

FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ

DISERTAČNÍ PRÁCE

PLZEŇ, 2014

Ing. František Žák



DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

Elektroenergetika

Ing. František Žák

**Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN
a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN**

**(Analysis of the Means of Neutral Point
Earthing in MV Networks
and Their Influence on MV Networks
Operation and Protection)**

Školitel: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Datum státní doktorské zkoušky: 24. 10. 2012

Datum odevzdání práce: 30. 5. 2014

V Plzni, 2014

Prohlášení

Předkládám tímto k obhajobě disertační práci zpracovanou v rámci doktorského studia Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval zcela samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Českých Budějovicích dne:

.....
František Žák

Poděkování

Děkuji mé školitelce paní Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za akademické vedení mého studia i této práce. Také bych rád poděkoval Doc. Ing. Jiřině Mertolové, CSc. za cenné připomínky a odborné konzultace.

Anotace

Disertační práce je věnována analýze způsobů uzemnění uzlu sítí vysokého napětí (VN) a jejich vlivu na provoz a chránění. Zvláštní pozornost je pak věnována metodám zjišťování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu ve VN sítích s izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem nebo v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů, tj. v sítích s uzlem neúčinně uzemněným přes zhášecí tlumivku. V některých VN sítích se můžeme setkat s vývody, které mají vysoké hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu. U takovýchto vývodů, kde nabíjecí zemní kapacitní proudy dosahují vysokých hodnot, je nutné přijmout opatření ke zmírnění jejich negativního vlivu. Znalost nabíjecího zemního kapacitního proudu v jednotlivých vývodech VN sítě je důležitá pro správné nastavení zemních ochran. Proto je nutné alespoň orientačně znát nabíjecí zemní kapacitní proudy jednotlivých vývodů. Negativní vliv vysokých hodnot nabíjecího zemního kapacitního proudu spočívá v ovlivnění systému chránění a ve zhoršení ekonomiky přenosu elektrické energie.

Klíčová slova

Sítě vysokého napětí, VN, jednofázové poruchy, zemní spojení, izolovaný uzel sítě, odporově uzemněný uzel sítě, neúčinně uzemněný uzel sítě, uzel sítě uzemněný přes zhášecí tlumivku, kompenzace zemních kapacitních proudů, chránění, nabíjecí proud vývodu, nabíjecí zemní kapacitní proud, ztráty na vývodu.

Abstract

This dissertation thesis deals with an analysis of means of neutral points earthing in middle-voltage networks (MV) and their influence on operation and protection. Special attention is paid to methods of establishment of earth capacitive charging current values in middle-voltage distribution networks with an insulated neutral point, with a neutral point earthed through a resistor, or in distribution networks with an earth capacitive current compensation - i.e. in networks with a neutral point ineffectively earthed through an arc-suppression coil. In some MV distribution networks, we can find feeders which have got high values of earth capacitive charging current. With such feeders, where earth capacitive charging current reaches high values, it is necessary to adopt measures to moderate its negative impact. The establishment of earth capacitive charging current in each feeder of MV distribution network is important for fault protection setting. Therefore it is important to know, at least approximately, the value of earth capacitive charging current in each feeder. The negative effect of high values of earth capacitive charging current involves the impact on protection system and aggravation of electrical power distribution economy.

Key Words

Middle-voltage network MV, single-phase fault, earth fault, insulated neutral point, neutral point earthed through a resistor, ineffectively earthed neutral point, neutral point earthed through an arc-suppression coil, compensation of earth capacitive currents, protection, feeder's charging current, earth capacitive charging current, feeder's power losses.

Seznam použitých zkratk a značek

Značka	Popis
j	Označení imaginární části komplexního čísla
NN	Elektrické sítě nízkého napětí (od 50 do 1000 V)
VN	Elektrické sítě vysokého napětí (do 52 kV)
VVN	Elektrické sítě velmi vysokého napětí (do 300 kV)
ZVN	Elektrické sítě zvlášť vysokého napětí (do 800 kV)
SVS	Označení systému pro třífázovou kompenzaci zemních kapacitních proudů a symetrizaci fázových napětí dle českého patentu č. 296038
SRA	Označení sekundárního odporníku s automatickou volbou hodnoty odporu připojovaného do pomocného vinutí zhášecí tlumivky, zapojeného dle evropského patentu EP2130277
SGR	Označení systém uzemňování fáze se zemní poruchou přes omezující reaktor zapojené dle českého patentu č. 299798

Značka	Popis	Jednotka
α	Činitel útlumu	(-)
ε	Činitel nesymetrie	(-, %)
$\varepsilon, \varepsilon_0, \varepsilon_r$	Permitivita, permitivita vakua, relativní permitivita	(Fm^{-1} , Fm^{-1} , -)
μ_0	Permeabilita vakua	(Hm^{-1})
ρ	Měrný odpor	(Ωm)
ω	Úhlová frekvence ($\omega = 2\pi f$)	($rad\ s^{-1}$)
γ	Úhel mezi proudem zátěže a nabíjecím zemním kapacitním proudem vývodu	(°, rad)
$d\gamma$	Chyba měření úhlu	(rad)
δ	Úhlová chyba měření proudu	(rad)
φ	Úhel mezi napětím a proudem zátěže	(°, rad)
ΔC	Jednofázová kapacita připojovaná mezi fází a zem	(F, %)
C	Kapacita	(F)
C_k	Kapacita krajní fáze	(F)
C_s	Kapacita prostřední fáze	(F)
C_0	Celková fázová zemní kapacita sítě	(F)

Značka	Popis	Jednotka
C_{0i}	Zemní fázová kapacita i - tého vývodu	(F)
E	Napětí zdroje, fázové napětí	(V)
G	Vodivost	(S)
G_0	Vodivost mezi uzlem sítě a zemí	(S)
D	vzdálenost místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení	(m)
D_K	Kritická délka vedení udávající, kdy pro daný typ vedení a daný typ dekompenzační tlumivky budou celkové ztráty při instalaci dekompenzace stejné jako bez dekompenzace	(m)
I_C, I_{CL1}	Zemní kapacitní proud, zemní fázový kapacitní proud	(A, A)
I_{Cf}	Fázový nabíjecí zemní kapacitní proud při zemním spojení ve fázi bez poruchy	(A)
I_{Cm}	hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztážená na jeden metr délky vedení	(A)
I_e	Svodový proud tekoucí z fázového vodiče do země	(A)
I_i	Fázový proud ve fázi bez zemní poruchy vyvolaný nabíjecím zemním kapacitním proudem a činným svodovým proudem fáze v „i“-tém vývodu	(A)
I_{LT}	Induktivní proud tlumivky	(A)
I_L	Fázový proud před vznikem zemního spojení	(A)
$I_L, I_{L1}, I_{L2}, I_{L3},$	Fázový proud, proudy ve fázích L_1, L_2, L_3	(A)
I_{Lmax}	Proud ve fázi vývodu bez zemní poruchy, ve které je při zemním spojení nejvyšší hodnota proudu	(A)
I_{Lmin}	Proud ve fázi vývodu bez zemní poruchy, ve které je při zemním spojení nejnižší hodnota proudu	(A)
I_0	Nulová složka proudu	(A)
i_0	Proud transformátoru naprázdno	(%)
I_{0i}	Nulová složka proudu „i-tého“ vývodu bez zemní poruchy	(A)
I_{0C}	Kapacitní část nulové složky proudu	(A)
I_{0Ci}	Kapacitní část nulové složky proudu i-tého vývodu	(A)
I_{0di}	Hodnota nulové složky proudu způsobená chybou měření měřícího transformátoru proudu	(A)
I_{0R}	Proud uzlovým odporníkem	(A)
I_{0V}	Nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti přepočtená na hodnotu nulové složky proudu při nulovém odporu zemního spojení	(A)
I_{0VRp}	Naměřená nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy	(A)
I_W	Činná složka proudu	(A)
I_{Wi}	Činná složka proudu i-tého vývodu	(A)

Značka	Popis	Jednotka
I_{WL}	Činný proud kompenzační tlumivky	(A)
I_{0W}	Činná část nulové složky proudu	(A)
I_{Z1}, I_{Z2}, I_{Z3}	proudy zátěže včetně mezifázových nabíjecích kapacitních proudů	(A)
L, l	Celková délka, délka	(m, m)
K	délka vývodu, pro kterou dekompenzační tlumivka eliminuje nabíjecí kapacitní proud	(m)
k_B	Koeficient bezpečnosti vývodu udává kolikrát je proud odporníkem při odporové poruše větší než vlastní kapacitní proud vývodu při kovovém zemním spojení	(-)
k_C	Koeficient pro výpočet fázové zemní kapacity po připojení přídavné kapacity ΔC	(-)
k_{CR}	Komplexní hodnota koeficient pro výpočet fázové zemní kapacity po připojení přídavné kapacity ΔC v odporově uzemněné síti	(-)
k_i	Poměrná část zemní fázové kapacity vývodu se zemní poruchou vztahovaná k celkové zemní kapacitě sítě	(-)
k_u	Koeficient udávající poměr mezi fázovou hodnotou napětí a nulovou složkou napětí	(-)
Q	Náboj	(C)
Q_T	Odebíraný induktivní jalový výkon transformátoru při hodu naprázdno	(VA _r)
P	Činný výkon	(W)
P_0	Činný výkon nulové složky	(W)
p_i	Proudový převod měřicího transformátoru proudu	(-)
p_u	Napěťový převod měřicího transformátoru napětí	(-)
dp_i	Chyba proudového převodu měřicího transformátoru proudu	(-)
R_0	Odpor nulové složky (odpor uzemnění uzlu sítě)	(Ω)
U	Napětí	(V)
dU	Amplitudová chyba měření napětí	(V)
U_f	Fázové napětí sítě, fázová napětí ve fázích L ₁ , L ₂ , L ₃	(V)
U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}		(V, V, V)
U_n	Jmenovité síťové napětí (sdružená hodnota napětí)	(V)
U_s	Sdružené napětí v síti, sdružená napětí sítě mezi fázemi L ₁ -L ₂ ,	(V)
U_{12}, U_{23}, U_{31}	L ₂ -L ₃ , L ₃ -L ₁	(V, V, V)
U_0	Nulová složka napětí	(V)
U_{0Rp}	Naměřená hodnota nulové složky napětí při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy	(V)
U_{REZ}	Rezonanční napětí, maximální zaznamenaná hodnota nulové složky napětí při ladění zhašecí tlumivky	(V, %)

Značka	Popis	Jednotka
w	Procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu z hodnoty zemního kapacitního proudu sítě	(%)
w_i	Procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu i-tého vývodu z hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu	(%)
Y_{01}, Y_{02}, Y_{03}	Příčné admitance mezi fází a zemí	(S)
Y	Střední hodnota příčné admitance mezi fází a zemí	(S)
$\Delta Y_{01}, \Delta Y_{02}, \Delta Y_{03}$	Odchyly fázových admitancí od střední hodnoty příčné admitance mezi fází a zemí	(S, %)
Z_k	Podélná impedance	(Ω)
Z_1	Impedance sousledné složky	(Ω)
Z_2	Impedance zpětné složky	(Ω)
Z_0	Impedance nulové složky, impedance uzemnění uzlu sítě	(Ω, Ω)
Z_{0i}	Fázová příčná impedance	(Ω)
Z	Impedance – obecná značka	(Ω)

Obsah

ÚVOD	1
1 ZÁMĚR DISERTAČNÍ PRÁCE A STANOVENÍ CÍLE VÝZKUMU	2
1.1 Současný stav techniky	2
1.2 Cíl disertační práce	2
1.3 Metodika výzkumu	3
2 ANALÝZA ZPŮSOBŮ UZEMNĚNÍ UZLŮ SÍTÍ VN	5
2.1 Sítě VN	6
2.2 Přímo uzemněný uzel sítě VN	7
2.3 Odporově uzemněný uzel sítě VN	9
2.4 Sítě VN s izolovaným uzlem	11
2.5 Uzemněný uzel sítě VN přes plynule laditelnou zhašecí tlumivku	14
2.6 Další způsoby uzemnění uzlu sítě VN	18
2.7 Provoz českých sítí VN	18
2.8 Způsoby napájení sítí VN	19
2.9 Kabelová vedení VN	21
2.10 Venkovní vedení VN	22
3 VLIV ZPŮSOBŮ UZEMNĚNÍ UZLU SÍTÍ VN NA JEJICH PROVOZ A CHRÁNĚNÍ	23
3.1 Zemní kapacitní proud	25
3.2 Jednofázový poruchový proud v síti s izolovaným uzlem	27
3.3 Jednofázový poruchový proud v síti s odporově uzemněným uzlem	32
3.4 Jednofázový poruchový proud v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů	37
3.4.1 Vývod s minimální hodnotou fázové zemní kapacity	39
3.4.2 Vývod s výrazně vysokou hodnotou fázové zemní kapacity	40
3.4.3 Zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu	44
3.5 Chránění v kompenzovaných sítích	45
3.6 Způsoby měření U_0	46
3.6.1 Amplitudová chyba měřících transformátorů napětí	49
3.6.2 Fázová chyba měřících transformátorů napětí	52
3.7 Způsoby měření I_0	54
3.7.1 Přesnost měření nulové složky proudu	58
3.7.2 Amplitudová chyba měření proudu	58
3.7.3 Fázová chyba měření proudu	61

4	ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU SÍŤE	67
4.1	Izolovaná síť	67
4.2	Odporově uzemněný uzel sítě	69
4.3	Síť s kompenzací zemních kapacitních proudů	71
4.4	Určování hodnoty zemního kapacitního proudu ze záznamů zemních ochran	74
5	MODEL SÍŤE VN PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY UZEMNĚNÍ UZLU SÍŤE	75
5.1	Stručný popis modelu VN sítě	75
5.2	Použitá metoda výpočtu	76
6	NOVÁ NEPŘÍMÁ METODA PŘIBLIŽNÉHO URČENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU SÍŤE	77
6.1	Popis návrhu nové nepřímé metody pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu umělým zvýšením nesymetrie v síti s izolovaným uzlem	77
6.2	Metodika výzkumu v síti s izolovaným uzlem	78
6.3	Výpočet metodou uzlových napětí v síti s izolovaným uzlem	79
6.4	Výpočet metodou souměrných složek v síti s izolovaným uzlem	81
6.5	Způsob přibližného určení zemní fázové kapacity sítě nepřímou metodou v síti s izolovaným uzlem	87
6.5.1	Použití nepřímé metody přibližného určení zemní fázové kapacity v síti s izolovaným uzlem	93
6.5.2	Zapojení měření pro nepřímou metodu přibližného určení zemní fázové kapacity v izolované síti	96
6.5.3	Příklady stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě nepřímou metodou v sítích s izolovaným uzlem	97
6.5.4	Porovnání naměřených hodnot poruchového proudu a hodnot určených nepřímou metodou v izolované síti	99
6.6	Aplikace nepřímé metody přibližného určení zemního kapacitního proudu v síti s odporově uzemněným uzlem	103
6.7	Použití nepřímé metody v odporově uzemněné síti	110
7	ZPŘESNĚNÍ METODY PŘIBLIŽNÉHO URČENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU VÝVODU PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ	111
7.1	Metoda zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu s využitím záznamu ochran	112
7.2	Vlivy snižující přesnost přibližného určení zemního kapacitního proudu vývodu	115

7.3	Nový návrh metody eliminace vlivu odporu zemní poruchy na stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu	122
8	NOVÉ METODY URČOVÁNÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU VÝVODU Z FÁZOVÝCH PROUDŮ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ	125
8.1	Aplikace metodiky výzkumu	127
8.2	Rozbor změny fázových proudů v síti při zemním spojení	127
8.3	Výpočet nabíjecího kapacitního proudu vývodu	132
8.4	Změnová metoda přibližného určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu	133
8.5	Rozdílová metoda přibližného určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu	135
8.6	Metoda rychlého odhadu pro přibližné určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu	137
8.7	Porovnání jednotlivých metod určování zemního kapacitního proudu vývodu	139
8.7.1	Testování metod	139
8.8	Výpočet příspěvku k zemnímu kapacitnímu proudu sítě	146
8.9	Použitelnost rozdílové metody	152
9	NABÍJECÍ KAPACITNÍ PROUDY A EKONOMIKA PROVOZU SÍTÍ VN	154
9.1	Dekompenzace nabíjecího proudu při zachování neutrálního účinku	157
9.2	Dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu pro snížení ztrát na vedení	160
9.3	Dekompenzační třífázové tlumivky	167
9.4	Dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu	169
9.5	Dekompenzace v městské kabelové síti	172
9.6	Snížení proudového zatížení vedení	173
10	ZÁVĚR	175
10.1	Vyhodnocení výsledků výzkumu	175
10.2	Resumé (CZ)	179
10.3	Resume (GB)	180
10.4	Přínosy disertační práce	181
11	DOPORUČENÍ K DALŠÍMU VÝZKUMU	183
12	POUŽITÁ LITERATURA	184
12.1	Odborná literatura	184

12.2	Normy	184
12.3	Patenty	184
13	PŘEHLED PUBLIKACÍ A JINÝCH AKTIVIT V RÁMCI DOKTORSKÉHO STUDIA	185
13.1	Seznam udělených patentů	185
13.2	Publikační činnost mezinárodní, recenzovaná	185
13.3	Publikační činnost v tuzemsku, recenzovaná	185
13.4	Příspěvky na tuzemských, recenzovaných, mezinárodních konferencích	185
13.5	Příspěvky na zahraničních konferencích	186
13.6	Příspěvky na tuzemských mezinárodních konferencích	186
13.7	Příspěvky na tuzemských konferencích	186
13.8	Pedagogická činnost	186
13.8.1	Přednášky a školení	186
13.8.2	Vedení diplomových prací	187
13.9	Tvorba aplikačních SW	187
14	SEZNAM GRAFŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	188
14.1	Seznam grafů	188
14.2	Seznam obrázků	192
14.3	Seznam tabulek	193
	Příloha 1: Software pro modelování poruchových stavů sítě	195
	Příloha 2: Software pro výpočet U_0 z fázových hodnot napětí SÍTĚ	203
	Příloha 3: Software pro NEPŘÍMOU metodu přibližného určení zemního kapacitního proudu v síti s izolovaným uzlem	204
	Příloha 4: Software pro výpočet zemní fázové kapacity vedení	208
	Příloha 5: Software pro výpočet zemního kapacitního proudu vývodu rozdílovou metodou	212

ÚVOD

Sítě vysokého napětí představují důležitou část rozvodu elektrické energie. Vlivem vývoje elektrických sítí jsou kladeny stále nové požadavky na jejich provoz. Vedle požadavků na zajištění vysoké bezpečnosti provozu sítí se zvyšují také požadavky na kvalitu, spolehlivost dodávky elektrické energie i její ekonomickou distribuci. Moderní technologie umožňují získávat nové poznatky o provozu sítí a přináší podklady i podněty pro další výzkum. Proto je důležité analyzovat získané údaje a dosahovat vyšší úrovně poznání. V této práci jsem se zaměřil na požadavky kladené na provozování sítí vysokého napětí z hlediska způsobů uzemnění uzlu i jejich vliv na chránění těchto sítí. S tímto tématem úzce souvisí zemní kapacitní proud. Ten významně ovlivňuje jak provoz, tak i chránění sítí vysokého napětí, které jsou provozované s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem. Výsledky výzkumu jsou určeny ke zpřesnění chránění sítí vysokého napětí a zároveň přispívají ke zlepšení ekonomiky provozu vysokonapěťových sítí, která je nabíjecím kapacitním proudem vedení ovlivněna.

1 ZÁMĚR DISERTAČNÍ PRÁCE A STANOVENÍ CÍLE VÝZKUMU

1.1 *Současný stav techniky*

Hodnoty zemního kapacitního proudu v sítích VN se určují několika způsoby. U sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů se pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě využívá údaj proudového nastavení zhášecí tlumivky při vyladění na paralelní rezonanci vůči fázové zemní kapacitě sítě. U moderních automatik ladění zhášecích tlumivek lze tento údaj získat pouhým vyčtením hodnoty zemního kapacitního proudu sítě z automatiky ladění. Tento údaj bývá standardně zobrazován na displeji automatiky nebo přenášen do řídicího systému.

V sítích s izolovaným uzlem se nejčastěji používá přímá metoda měření hodnoty zemního kapacitního poruchového proudu v místě zemního spojení. Ve světě je v sítích s izolovaným uzlem používána metoda vycházející z principů automatik ladění zhášecí tlumivky s proudovou injektáží. U této metody je na základě proudového impulsu změřena hodnota zemního kapacitního proudu v síti. Pořízení uvedené měřící jednotky je zpravidla spojeno s vyššími investičními náklady.

Ve všech typech sítí je používána metoda určení hodnoty zemního kapacitního proudu na základě výpočtu z tabulkových parametrů vedení a ze znalosti délek vedení. Tato metoda se využívá zejména při projektování sítí. Obecně však dosahuje nejnižší přesnosti. Pro stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu ve vývodu se kromě metody výpočtu z tabulkových parametrů a délek vedení používá i metoda měření nulové složky proudu ve vývodu při zemním spojení v síti.

Pro stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu u sítí s izolovaným nebo odporově uzemněným uzlem je počet jednoduchých a použitelných metod omezený. Pokud je vyžadováno zjišťování hodnoty zemních kapacitních proudů vývodů lze v současné době jednoduchým způsobem využívat pouze metodu měření nulové složky proudu ve vývodu při zemním spojení. U této metody je určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu výrazným způsobem ovlivněno hodnotou odporu zemní poruchy. Proto se této metody využívá pouze v případě realizace umělého kovového zemního spojení v síti.

Pro praktické využití by bylo vhodné stávající metody rozšířit. Nové metody zjišťování zemního kapacitního proudu v síti a v jednotlivých vývodech mohou přispět zejména ke zpřesnění nastavení zemních ochran, zlepšení systému chránění i zvýšení bezpečnosti provozu VN sítí.

1.2 *Cíl disertační práce*

Cílem disertační práce je analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN. Součástí výzkumu je nalezení nového způsobu zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu v síti VN. Vzhledem k rozsahu dané problematiky je práce zaměřena na VN sítě s izolovaným uzlem, sítě s odporově uzemněným uzlem a sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů.

Na základě analýzy různých způsobů uzemnění uzlu VN sítí lze porovnat jejich výhody a nevýhody z pohledu provozu a chránění. Stávající metody určování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě a vývodu mají svá omezení. V reálném provozu je nelze vždy bez obtíží realizovat. Přesnost používaných metod je ovlivněna řadou faktorů, které je rovněž nutné podrobit výzkumu. Důležité je prověření možného zdokonalení a zvýšení přesnosti určování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu u vybraných stávajících metod.

Hlavní část práce je zaměřena na výzkum jevů při nestandardních stavech a zemních spojeních v reálné VN síti. Rozbor těchto jevů poskytuje možnost stanovení nové metody pro určování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě a jednotlivých vývodů. Podstatnou součástí výzkumu je ověření navržených metod i jejich použitelnost v praxi.

V rámci výzkumu očekávám rovněž využití dlouholetých zkušeností a poznatků čerpaných z analýz VN sítí i jiných v státech Evropy, Asie a Jižní Ameriky, kde jsem se podílel na řešení problematiky kompenzace zemních kapacitních proudů ve VN sítích.

Stanovení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu ve vývodu je důležité zejména pro sítě s izolovaným uzlem a pro sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů. Údaj o velikosti nabíjecího zemního kapacitního proudu dává možnost přesnějšího nastavení systémů chránění ve VN sítích. Pro systémy chránění je důležité znát i poměr zemního kapacitního proudu chráněného vývodu k celkové hodnotě nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. Zvláštní pozornost je nutné věnovat vývodům s extrémně vysokou hodnotou fázového nabíjecího kapacitního proudu. Proto se této problematice věnuji podrobněji. Odhalení extrémně vysokých hodnot nabíjecích kapacitních proudů ve vývodech dává možnost včasného řešení problémů chránění vývodu i řešení negativního vlivu na ekonomiku provozu sítě. Vysoké hodnoty nabíjecích kapacitních proudů ve vývodech zhoršují rovněž podmínky pro funkci zemních směrových ochran. Zároveň dochází ke zvýšení ztrát na vedení a zvyšuje se i tepelné namáhání vodičů a izolace. Stanovení zemního kapacitního proudu vývodu je tedy pro provoz VN sítí důležité. Návrh způsobu určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu musí vycházet z reálných možností VN sítí. Jedná se zejména o možnosti měření napětí a proudů v sítích vysokého napětí. Jedna z částí disertační práce je tedy věnována i problematice ovlivňující přesnost stanovení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu a ovlivnění přesnosti funkce zemních ochran.

1.3 Metodika výzkumu

Navržená metodika výzkumu vychází nejprve z pozorování a empirického ověřování poznatků. Získané výsledky je dále nutné rozdělit na dílčí úkoly, které lze podrobit analýze. Na základě syntézy výsledků získaných z analýz, teoretických výpočtů a z matematického modelu dostaneme podklady pro návrh a ověření možností stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu v sítích s izolovaným a neúčinně uzemněným uzlem. Porovnání jednotlivých metod pro stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu bude provedeno konfrontací nejen s výsledky

Disertační práce:

Analýza způsobů uzemnění uzlů sítě VN a jejich vliv na provoz a chránění sítě VN František Žák

matematického modelu, ale i s hodnotami získanými při reálném měření. Produktem konfrontace bude stanovení vhodnosti jednotlivých metod pro praktické použití s ohledem na způsob uzemnění uzlu sítě VN. Zvolená metodika výzkumu umožní sledovat danou problematiku v širších souvislostech. Zároveň umožní nalezení a vyhodnocení více možných variant řešení.

2 ANALÝZA ZPŮSOBŮ UZEMNĚNÍ UZLŮ SÍTÍ VN

Přenos elektrické energie je realizován na různých napěťových hladinách. Volba napěťové hladiny pro přenos elektrické energie je ovlivněna hodnotou požadovaného přenášeného výkonu a vzdáleností, na kterou bude výkon přenášen. Pro přenosovou soustavu je v současné době v Čechách využívána nejvyšší napěťová hladina 400 kV (ZVN) a napěťová hladina 220 kV (VVN) u starších vedení. Pro rozvod elektrické energie v rámci jednotlivých regionů se využívá napěťová hladina 110 kV (VVN). Tato napěťová hladina již bývá označována jako distribuční síť. Z této napěťové úrovně bývají napájeny velké výrobní závody a průmyslové komplexy. Další distribuce elektrické energie je na úrovni vysokého napětí (VN). Z této napěťové úrovně bývají napájeny výrobní závody, obchodní centra, administrativní budovy. VN sítěmi je rozváděna elektrická energie v rámci průmyslových komplexů a i některé připojené technologie bývají napájeny přímo ze sítě VN. Pro napájení technologie se nejčastěji využívá napěťová hladina 6 kV. Maloodběratelé jsou připojeni do sítí nízkého napětí (NN). Tyto sítě jsou napájeny ze sítě VN přes distribuční transformátory. Sítě určené k rozvodu elektrické energie k odběratelům od úrovně VVN až po úroveň NN jsou nazývány distribučními sítěmi. Tyto sítě jsou zpravidla v majetku energetického podniku, který zajišťuje distribuci elektrické energie v daném regionu. Někdy tyto sítě bývají označovány jako veřejné sítě. Naproti tomu VN sítě ve výrobních závodech jsou určeny pro napájení výroby v daném objektu a bývají v majetku lokálního provozovatele nebo distributora energie.

České sítě NN, VVN a ZVN jsou provozovány s přímo uzemněným uzlem sítě. Způsoby uzemnění uzlu sítí VN jsou nejednotné i v českých sítích. Odpovídá to historickému vývoji. Je jistě zajímavé sledovat důvody, které v dané době ovlivňovaly rozhodování. Ne vždy se jednalo o technické důvody. Volba vhodného způsobu uzemnění uzlu sítě je i dnes aktuální otázkou, která vyvstává s požadavky na provozování sítí VN. Proto se i tato práce orientuje na problematiku provozu sítí VN ve vztahu k různým způsobům uzemnění uzlu těchto sítí. Jedná se o distribuční sítě VN a průmyslové sítě VN. Výzkum jsem dále zaměřil na nejčastěji provozované VN sítě v českých a evropských zemích. Sítě VN jsou zde nejčastěji provozované s neúčinně uzemněným uzlem nebo s izolovaným uzlem sítě.

Způsob uzemnění uzlu VN sítě má přímý vliv na její chování při jednofázových poruchách. Největší procento poruch (cca 70% všech poruch) v sítích VN představují jednofázové zemní poruchy. Snaha o omezení vlivu jednofázových poruch vede ke hledání vhodného způsobu uzemnění uzlu sítě. Vzhledem k tomu, že volba vhodného způsobu uzemnění uzlu sítě je závislá na mnoha faktorech, provozují se ve světě různé způsoby uzemnění uzlu sítě. Je to dáno i tím, že doposud neexistuje systém, který by byl po všech stránkách nejvýhodnější. Volba způsobu uzemnění uzlu sítě odráží vedle historického vývoje v daném regionu i technický stav VN sítí, stupeň automatizace a zvyklosti s provozováním VN sítí. Mezi základní způsoby uzemnění uzlu sítě patří přímo uzemněný uzel, izolovaný nebo nepřímo uzemněný uzel. Mezi nepřímo uzemněné uzly patří uzemnění uzlu přes nízkohomový odpor, vysokohomový odpor nebo induktivní reaktanci.

2.1 Sítě VN

Sítě vysokého napětí patří mezi nejrozsáhlejší část elektrizační soustavy. Tyto sítě jsou určeny k rozvodu elektrické energie v rámci menších územních celků a slouží pro napájení osad, vesnic, menších měst, městských částí a průmyslových komplexů.

Jak již bylo uvedeno, VN sítě jsou v Evropě nejčastěji provozovány s neúčinně uzemněným nebo s izolovaným uzlem sítě. V některých státech jižní Evropy, Ameriky a Asie se setkáváme se sítěmi vysokého napětí s přímo uzemněným uzlem. Výběr způsobu uzemnění uzlu sítě bývá volen na základě požadavků chování sítě při příčných jednofázových poruchách. Téma způsobu uzemnění uzlu sítě patří dlouhodobě mezi nejčastěji diskutovaná témata. Jedná se nejen o spolehlivost v zásobování elektrickou energií ovlivněnou poruchovostí sítě, ale i o bezpečnost provozu VN sítě. Jedním z nejdůležitějších parametrů, které ovlivňují volbu způsobu uzemnění uzlu sítě, je velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. Určení velikosti nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě může v některých sítích znamenat obtížně řešitelnou úlohu v závislosti na jejich způsobu uzemnění uzlu. Určení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu je technicky obtížné zejména u sítí s uzemněným uzlem přes nízkohmový odpor. Určení velikosti nabíjecího zemního kapacitního proudu celé sítě je však jen jedna část úlohy. Ve VN sítích je nutné znát i hodnoty nabíjecích zemních kapacitních proudů jednotlivých vývodů. Tato znalost je důležitá zvláště u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů a u sítí s izolovaným uzlem. Při extrémně vysokých hodnotách nabíjecích zemních kapacitních proudů ve vývodech může docházet vlivem průtoku nabíjecího zemního kapacitního proudu ke zvýšení ztrát přenosu elektrické energie. Tyto ztráty však nejsou ovlivněny způsobem uzemnění uzlu sítě. Ve všech aspektech je důležité znát alespoň orientační hodnotu těchto nabíjecích zemních kapacitních proudů, a to jak celé sítě, tak i nejrozsáhlejších vývodů. Není však vždy nutné zjišťovat přesné hodnoty nabíjecích zemních kapacitních proudů sítě. Při určování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu je nutné se zaměřit na metody, které bude možné jednoduchým způsobem aplikovat ve stávajících VN sítích. Dalším důležitým aspektem je, že při zjišťování hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu by nemělo docházet k výraznému ovlivnění připojených odběratelů. To může být hlavním omezujícím faktorem pro použití některých metod.

VN sítě bývají realizovány venkovním vedením, kabelovým vedením a dnes nejčastěji smíšenými sítěmi. Sítě bývají provozovány jako paprskové, v některých případech se můžeme setkat se smyčkami a jen v hustě osídlených oblastech se ojediněle vyskytují mřížové sítě. Způsob provozování sítě je ovlivněn ztrátami v závislosti na velikosti přenášené energie i na systému chránění, který odpovídá kvalitě a možnostem použitých ochran. Samostatnou kapitolu v chránění představují ochrany pro jednofázové poruchy. Volba ochran pro tyto poruchy je ovlivněna způsobem uzemnění uzlu sítě.

Snaha o zajištění efektivního, bezpečného a spolehlivého provozu VN sítí vede k volbě různých způsobů uzemnění uzlu sítě. Proto ve VN sítích můžeme najít největší rozmanitost způsobů uzemnění uzlu sítě v porovnání s ostatními typy sítí.

Vzhledem k tomu, že dosud nebyl nalezen systém uzemnění uzlu sítě, který by ve všech parametrech vykazoval ty nejlepší výsledky, setkáváme se i v rámci jedné energetické společnosti s různými způsoby uzemnění uzlu sítí. Nejčastěji využívaný způsob uzemnění uzlu sítě v Evropě je uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku. Tento způsob uzemnění uzlu sítě vynalezený panem Petersenem na počátku 20. století se řadí mezi nejpoužívanější způsoby uzemnění uzlu sítě i v českých energetikách. Po druhé světové válce se objevilo uzemňování uzlu sítě přes uzlový odporník. Tato metoda se začala používat především v Anglii a Francii. Při hledání optimálního způsobu uzemnění uzlu sítě se začaly používat i kombinace několika způsobů.

2.2 Přímo uzemněný uzel sítě VN

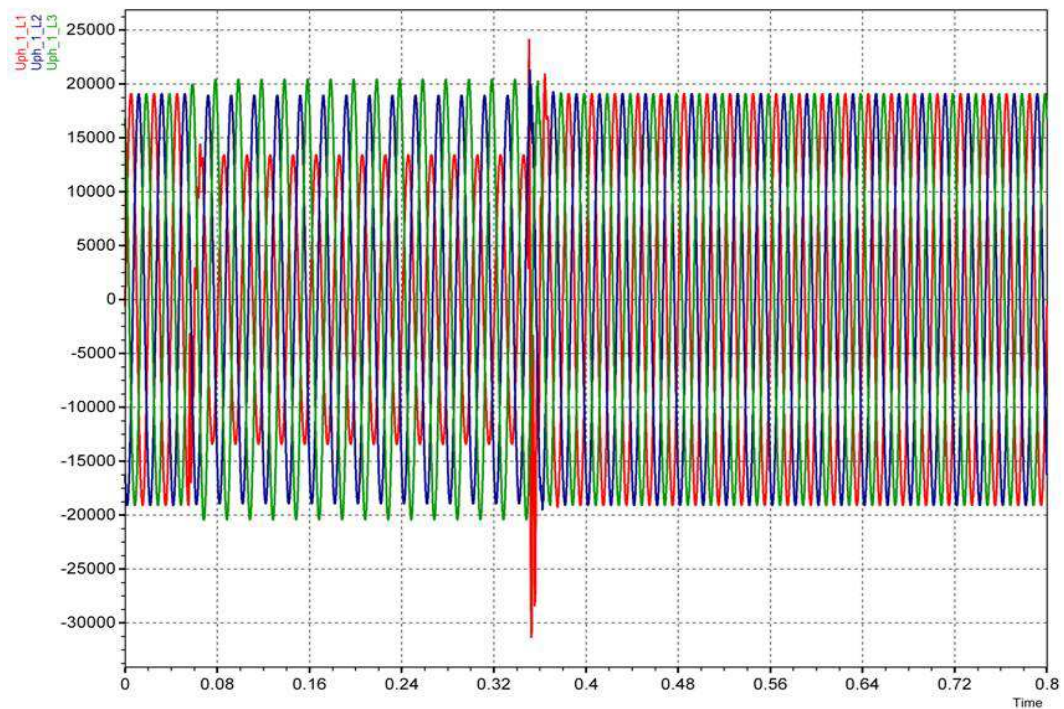
Přímo uzemněný uzel sítě se používá nejčastěji mimo Evropu. V Evropě je používán zejména v některých jižních státech. Jedná se především o Španělsko, Portugalsko, Řecko a Turecko. Přímo uzemněný uzel patří spolu s izolovaným uzlem k nejlevnějším způsobům uzemnění uzlu sítě. Při jednofázové poruše bude místem poruchy protékat zkratový proud. Zkratový proud je vždy nutné rychle vypínat. K vypínání se v napájecích rozvodnách používají běžné nadproudové a zkratové ochrany. V síti se používají pojistky nebo „reclosery“, tedy malé vypínače vybavené ochranami a dálkovým ovládním, které jsou instalovány přímo do venkovních sítí. Pro eliminaci přechodných poruch se v mnohých sítích využívá rychlého a pomalého opětovného zapínání „OZ“.



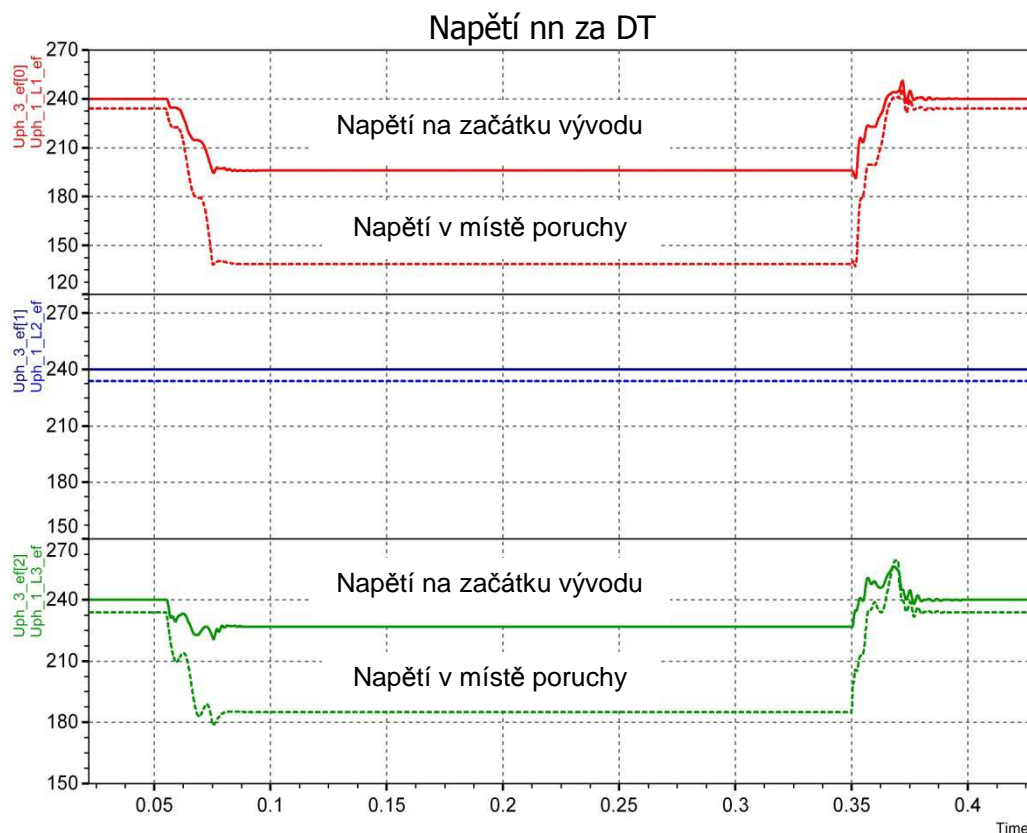
Obr. 1 Jednofázové distribuční transformátory v síti VN s přímo uzemněným uzlem

Provoz s přímo uzemněným uzlem sítě umožňuje napájet připojené odběratele přes jednofázové distribuční transformátory malého výkonu. Takto provozovaná distribuční síť VN nevyžaduje budování rozsáhlé distribuční sítě nízkého napětí (NN). Odběratelé na úrovni nízkého napětí jsou připojeni přes malý jednofázový distribuční transformátor přímo z vedení VN (Obr. 1). Tento způsob připojení odběratelů je výhodný zejména tam, kde jsou venkovní linky VN vedeny poblíž odběrného místa a v místech nízké hustoty malých odběrů. Vedení VN pak mohou být i jednofázová nebo dvoufázová. Pro zvýšení bezpečnosti těchto sítí v městských aglomeracích jsou

zde s výhodou používány izolované vodiče. Pro zajištění bezpečného provozu sítě je spolu s fázovými vodiči tažen i uzemňovací vodič.



Graf 1 Změny okamžitých hodnot fázových napětí při jednofázovém odporovém zkratu v síti s přímo uzemněným uzlem



Graf 2 Změny efektivních hodnot fázových napětí na sekundární straně NN distribučního transformátoru při jednofázovém odporovém zkratu v síti VN s přímo uzemněným uzlem

Pro připojení odlehlých odběratelů jsou využívána i jednofázová, případně dvoufázová vedení. V případě jednofázových poruch protéká místem poruchy zkratový proud. Opět je nutné řešit otázku zajištění bezpečné hodnoty dotykového napětí. Hodnota poruchového proudu je zde ovlivněna impedancí zkratové smyčky a fázová zemní kapacita vedení nemá přímý vliv na hodnotu poruchového proudu. Poruchový proud ovlivní napětí v postižené fázi. Zbývající dvě fáze nejsou touto poruchou přímo ovlivněny. Hodnoty sdruženého napětí mezi fázemi bez poruchy a fází s poruchou se v době poruchy výrazně změní. Pouze sdružená hodnota napětí mezi fázemi nepostiženými poruchou bude na stejné úrovni jako před poruchou. Při vypínání jednofázových zkratů vznikají i výrazná spínací přepětí v síti (viz Graf 1). U mnohých provozovatelů těchto sítí je proto patrná snaha o změnu způsobu uzemnění uzlu sítě. Nejčastěji se uvažuje o přechodu na uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku. Změna způsobu uzemnění uzlu sítě je však vysoce investičně náročná. Je nutné změnit systém napájení připojených odběratelů, přebudovat stávající distribuční síť a eliminovat vliv kapacitní nesymetrie dané provozem jednofázových a dvoufázových vedení. Rovněž je nutné změnit systém chránění. Neméně těžkou úlohou je i vyškolení obsluhy na nový způsob provozování sítě. I přes tyto problémy spojené se změnou způsobu uzemnění uzlu sítě vznikají pilotní projekty, které mají za cíl ukázat výhodnost změny.

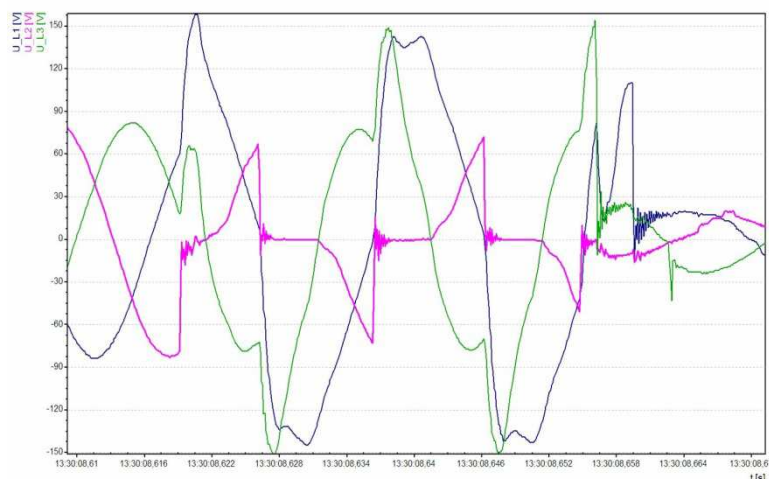
2.3 Odporově uzemněný uzel sítě VN

Odporově uzemněné sítě se v Evropě nejčastěji provozují s nízkou hodnotou uzlového odporu. Tento způsob uzemnění uzlu sítě vznikl po druhé světové válce. Síť s odporově uzemněným uzlem můžeme nalézt snad ve všech státech Evropy. Odporově uzemněný uzel převažuje ve Francii a Slovinsku. Zde se pro uzemnění uzlu sítě využívá uzlového odporníku s nízkou hodnotou odporu (Obr. 2). Tento způsob uzemnění uzlu sítě je často používán i ve Velké Británii. Zde se kromě uzlového odporníku s nízkou hodnotou odporu využívá i uzlových odporníků s vyšší hodnotou odporu. Ve Velké Británii a Irsku se používají i sítě s uzemněním uzlu přes odpor s hodnotou 300 Ω .



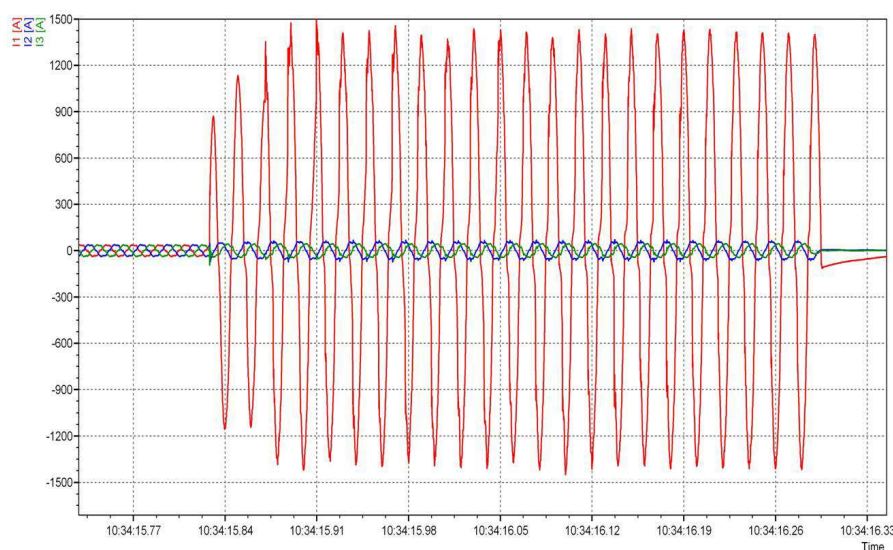
Obr. 2 Pohled do uzlového odporníku sítě 22 kV se jmenovitým proudem 1000 A

Odporově uzemněný uzel se prosadil i v některých energetických společnostech a používá se především v rozsáhlých kabelových sítích. U venkovních sítí je jeho použití méně časté. Hlavní výhodou systému je jeho jednoduchost. Proud jednofázové poruchy je oproti sítím s přímo uzemněným uzlem omezen uzlovým odporem. Vlivem omezení je poruchový proud na úrovni jmenovitého proudu vedení. Pro identifikaci poruchového proudu se využívají nadproudové nulové články ochrany. Tyto ochrany jsou nenáročné na nastavení a jsou vysoce spolehlivé.



Graf 3 Okamžité hodnoty fázových napětí v době propalování zemní poruchy v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem a následným rozšířením poruchy na třífázový zkrat, hodnoty fázových napětí jsou uvedeny v procentních hodnotách jmenovitého sdruženého napětí sítě

Odporově uzemnění uzlu sítě zároveň přispívá k tlumení přepětových jevů v síti. Je to způsobeno tím, že uzel sítě je spojen se zemí přes odpor s nízkou hodnotou odporu. Změny fázových napětí vyvolané spínáním v síti, tedy zapínáním nebo vypínáním poruch a prudkou změnou zatížení, jsou výrazně omezené. Při postupném propalování zemní poruchy v síti dochází k opakovaným rychlým změnám velikosti fázových napětí. Izolace proti zemi je vystavena působení rychlých časových změn napětí (Graf 3).



Graf 4 Okamžité hodnoty fázových proudů vývodu v době zemního spojení v síti s uzemněným uzlem přes uzlový odporník se jmenovitým proudem 1000 A

Nevýhodou tohoto způsobu uzemnění je tedy průtok relativně velké hodnoty poruchového proudu místem zemní poruchy (Graf 4). V místě poruchy se uvolňuje značné množství energie. Proto je nutné tyto poruchy rychle vypínat. Jedná se o vypínací časy od cca 0,4 s až po 1,6 s v závislosti na počtu stupňů selektivního chránění. Velikost poruchového proudu a delší doba působení poruchového proudu může způsobit zvýšení úrovně dotykového napětí v okolí zemní poruchy. Velikost poruchového proudu bývá částečně ovlivněna zemním kapacitním proudem sítě. Ten je závislý na poměru kapacitního proudu sítě ke jmenovitému proudu uzlového odporníku. S ohledem na velikost poruchového proudu nedochází k samovolnému zániku jednofázové poruchy. Vzniklé jednofázové poruchy jsou detekovány až při vyšším průtoku poruchového proudu. Místo poruchy bývá zřetelné a snáze identifikovatelné.

Pro bezpečnost provozu této sítě je nutné zajistit nízkou hodnotu odporu ochranného uzemnění. Splnění uvedeného požadavku dosahujeme především u rozsáhlých městských kabelových sítí. U venkovních linek je zajištění nízké hodnoty odporu ochranného uzemnění problematické. Další nevýhodou odporového uzemnění uzlu sítě je nízká citlivost na vysokoodporové poruchy. U venkovních sítí se často setkáváme s vysokými hodnotami odporů zemních poruch. Pro identifikaci zemních poruch s vyšší hodnotou odporu poruchy je nutné využívat citlivých směrových ochran. Přesto je identifikace těchto poruch omezená v závislosti na hodnotě odporu uzlového odporníku. Uzemnění uzlu sítě přes nízkoodporný odpor nevyžaduje přesnou znalost hodnoty kapacitního proudu sítě ani kapacitního proudu vývodu. Pouze ve zvláštních případech, kdy se jedná o vývod s vysokou hodnotou kapacitního proudu, je pro nastavení ochran hodnota zemního kapacitního proudu vývodu důležitá.

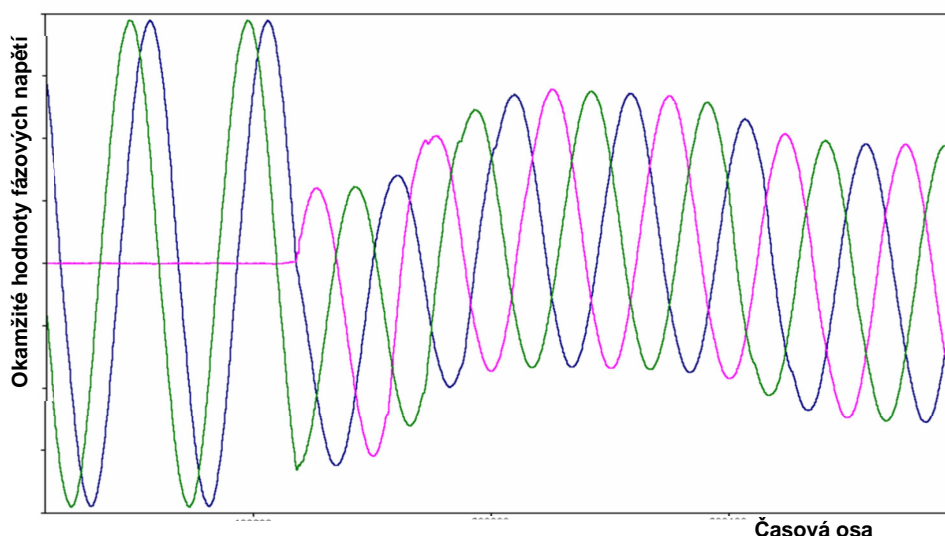
2.4 Sítě VN s izolovaným uzlem

Výskyt rozsáhlých sítí s izolovaným uzlem v Evropě patří již k výjimkám. Tyto sítě můžeme nalézt v Irsku, Anglii, Švýcarsku, Polsku a Rusku. Izolované sítě malého rozsahu však můžeme nalézt v mnoha státech Evropy. U sítí s izolovaným uzlem je při jednofázové zemní poruše poruchový proud tvořen převážně zemním kapacitním proudem sítě. Rozsah sítě tak přímo ovlivňuje velikost jednofázového poruchového proudu. U sítí s nízkou hodnotou zemního kapacitního proudu bývá možné provozování sítě po omezenou dobu s jednofázovou zemní poruchou.

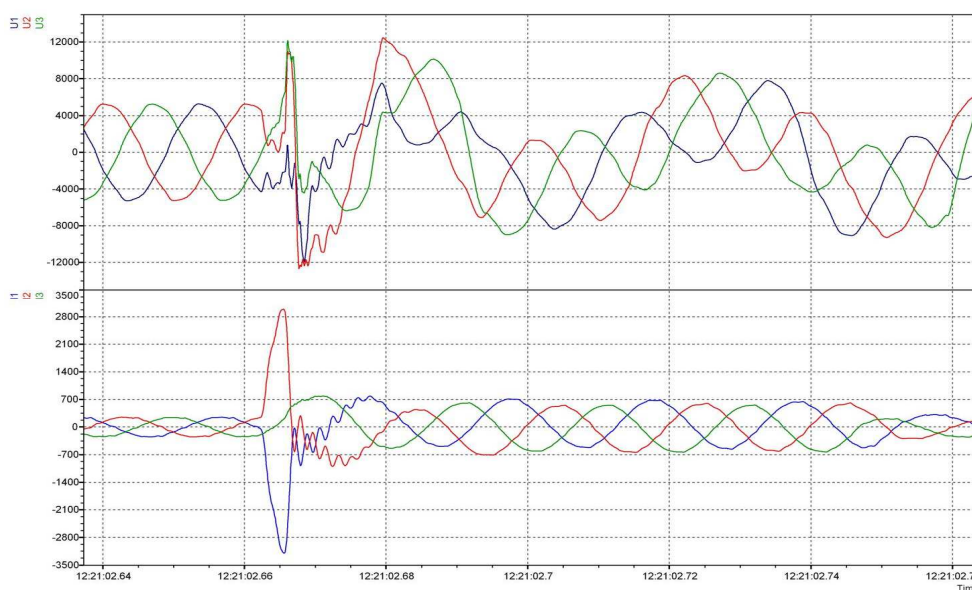
Z důvodů kapacitního charakteru poruchového proudu a z důvodu rychlého zvýšení napětí v postižené fázi nedochází k samovolnému zániku zemního spojení. V závislosti na okamžiku přerušení zemního spojení může být v postižené fázi proti zemi napětí odpovídající až dvojnásobku amplitudy fázového napětí (Graf 5).

U sítí s vysokou hodnotou zemního kapacitního proudu postačují pro chránění opět jednoduché nadproudové nulové články ochran. U sítí s nízkou hodnotou zemního kapacitního proudu sítě je nutné využívat směrových zemních ochran. Pro identifikaci vývodu se zemní poruchou se používaly zemní ochrany na principu sledování toku nulové složky jalové energie. Současné moderní digitální ochrany používají i další metody identifikace vývodu se zemní poruchou odvozené

z vektorových poměrů mezi nulovou složkou napětí vývodu a nulovou složkou proudu ve vývodu. Pro nastavení ochran v síti se vychází z celkové hodnoty zemního kapacitního proudu sítě. Tento údaj je pro nastavení ochran důležitý. Rovněž znalost hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu je vhodná pro nastavení vývodových ochran. Na základě znalosti hodnot zemního kapacitního proudu je možné rozhodnout nejen o použité metodě chránění, ale i o přesném nastavení ochran. V izolovaných sítích obecně nebývá problém se spolehlivostí zemních ochran. Pro zajištění vysoké bezpečnosti provozu sítě se využívají hlídače izolačního stavu. Jedná se o měření velikosti stejnosměrného proudu unikajícího přes svodové odpory do země. Tyto hlídače izolačního stavu umožňují v síti identifikovat i nepatrné odchylky způsobené narušením izolačního stavu sítě. Proto je tento způsob využíván hlavně v důlním průmyslu a v prostředí s nebezpečím výbuchu.

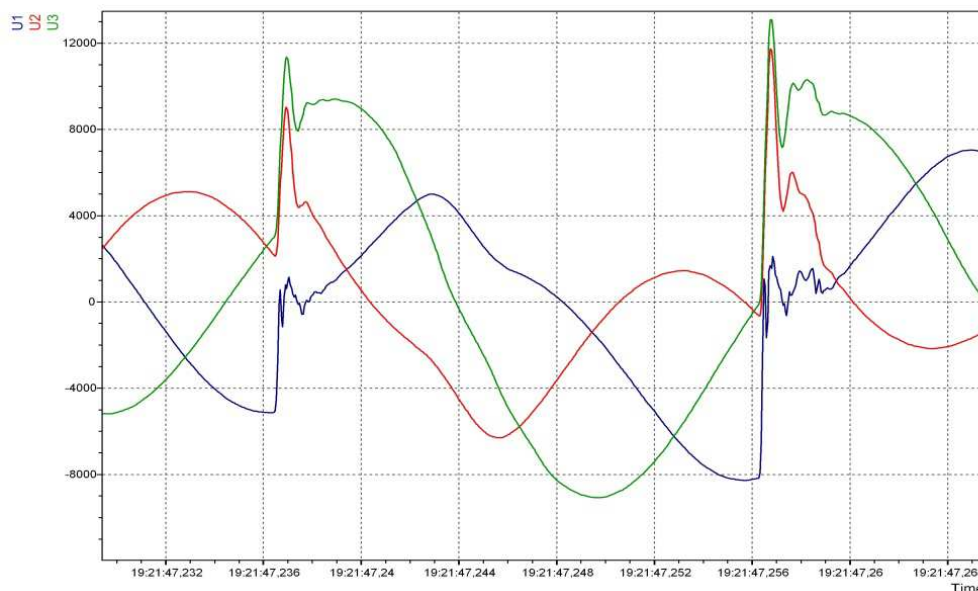


Graf 5 Okamžité hodnoty fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem v době vypnutí zemního spojení (bez popisu os)

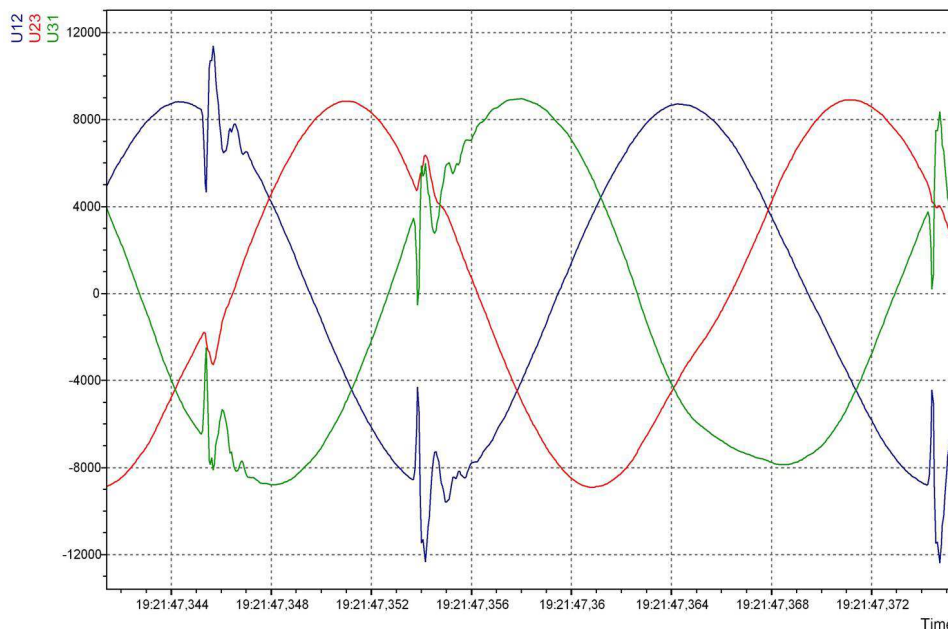


Graf 6 Změny fázových napětí vyvolané zapnutím zátěže v síti 6 kV s izolovaným uzlem

Vzhledem k tomu, že sítě s izolovaným uzlem nemají uzel sítě žádným způsobem spojen se zemí, jsou velikosti napětí proti zemi dány poměrem příčných parametrů sítě. To způsobuje nestabilitu fázových napětí. V těchto sítích můžeme sledovat výrazné změny fázových napětí při spínání v síti, při rázové změně nesymetrického zatížení nebo při zapínání, případně vypínání, poruch v síti (Graf 6). V těchto případech dochází především ke změnám fázových hodnot napětí. Naproti tomu hodnoty sdruženého napětí jsou ovlivněny menší měrou (Graf 7, Graf 8).



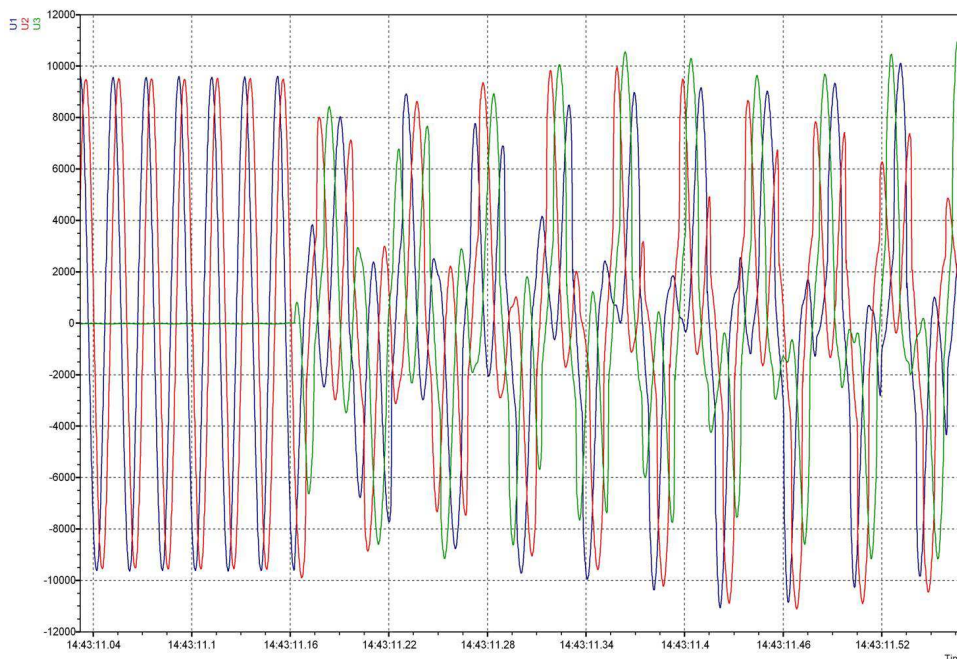
Graf 7 Změny fázových napětí vyvolané změnou zatížení připojené technologie v síti 6 kV s izolovaným uzlem



Graf 8 Změny sdružených napětí vyvolané změnou fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem odpovídající změnám na Graf 7

Připojení odběratelé nejsou změnami fázových napětí příliš ovlivněni, protože jsou připojeni na sdružené napětí. Sdružená napětí přesto vykazují změny, které

mohou negativně působit na připojené odběry. Změny fázových napětí ovlivňují použité izolační materiály a mohou být příčinou i rychlejšího stárnutí izolace, tedy i zvýšené četnosti poruch v síti.



Graf 9 Okamžité hodnoty fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem v době vypnutí zemní poruchy a následný vznik ferorezonance

Dalším nepříjemným jevem je náchylnost sítí s izolovaným uzlem ke vzniku ferorezonance (Graf 9). Tento jev se vyskytuje při významných změnách fázových napětí v síti. Zpravidla je tento jev vyvolán spínacími pochody v síti.

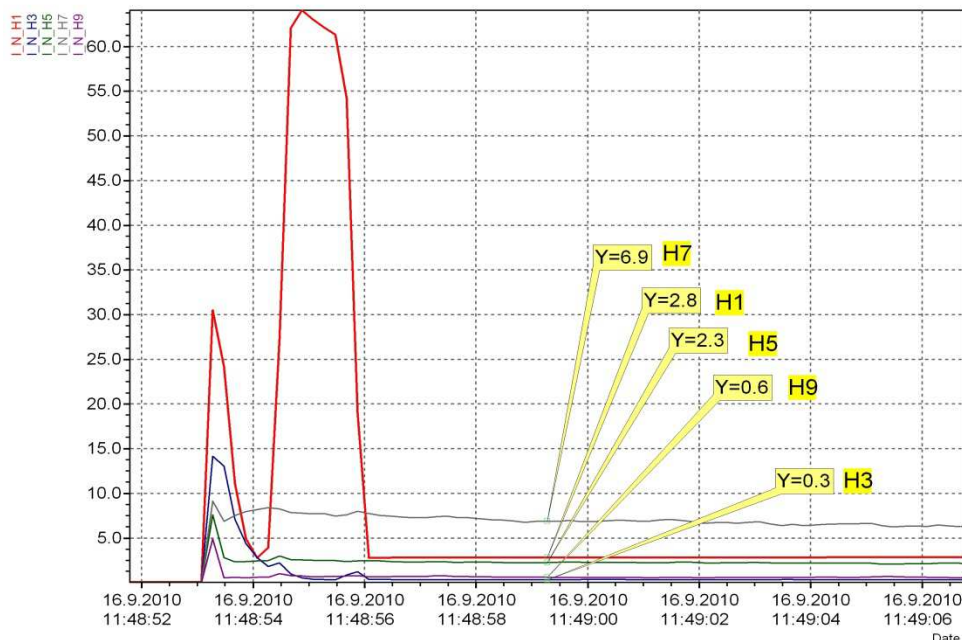
2.5 Uzemněný uzel sítě VN přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku



Obr. 3 Zhášecí tlumivka s 24-hodinovým provozem a maximálním kompenzačním proudem 550 A v síti 22 kV

K nečastějším způsobům uzemnění uzlu sítě v Evropě patří uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku (Petersenovu tlumivku) Obr. 3. Převažuje

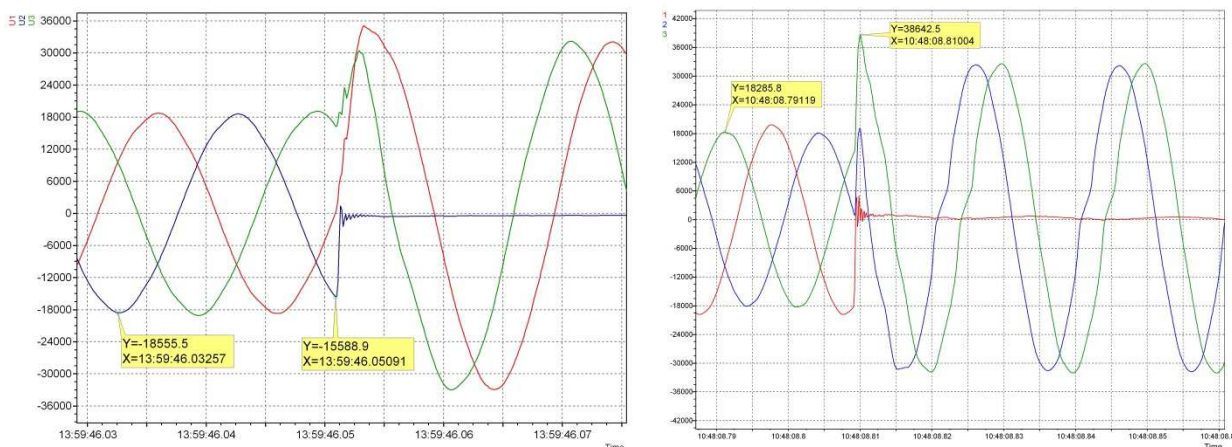
hlavně ve střední, severní a východní Evropě. Někdy je tento způsob označován jako rezonanční uzemnění uzlu sítě. Ve Spolkové republice Německo se provozují i sítě 110 kV (VVN) s uzlem uzemněným přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku. Variantou plynule laditelné zhášecí tlumivky je i odbočková tlumivka. Uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku patří k nejsložitějším způsobům a jeho efektivní provozování vyžaduje od provozních techniků znalost problematiky.



Graf 10 Zbytkový proud zemního spojení s uvedenými hodnotami proudů vyšších harmonických

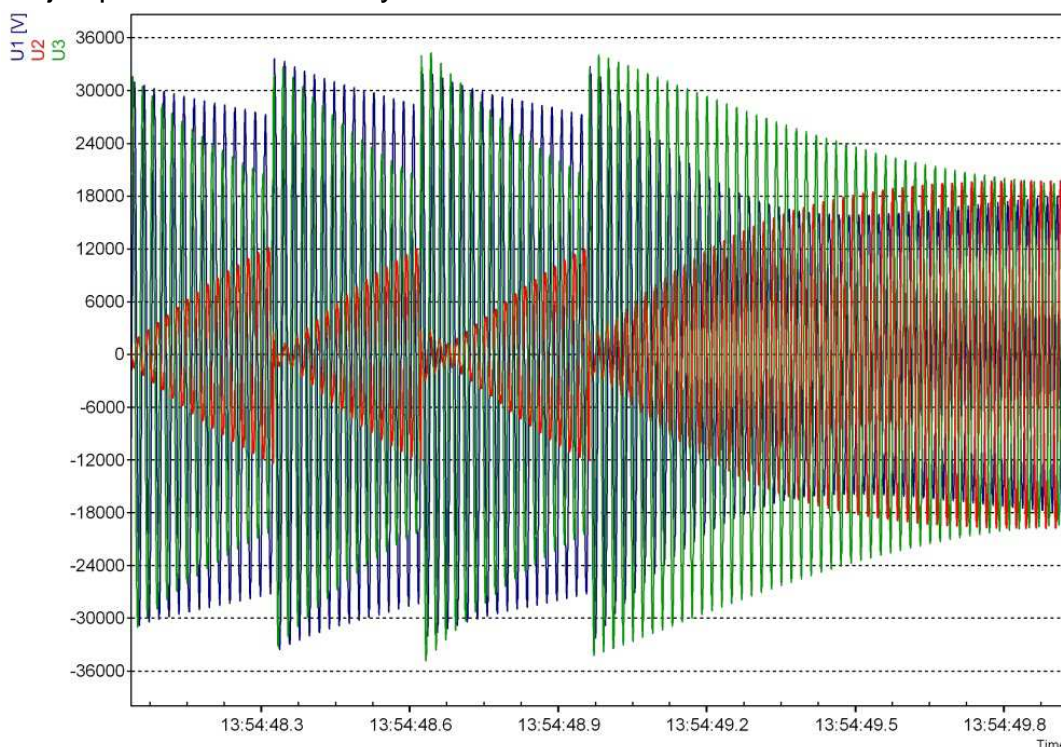
Uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku umožňuje vyznaným způsobem omezit poruchový proud místem zemní poruchy až na hodnotu jednotek procent zemního kapacitního proudu sítě. Zbytkový proud zemní poruchy obsahuje činnou i jalovou složku základní harmonické a proudy vyšších harmonických (Graf 10). Redukce velikosti poruchového proudu přispívá k samozhášení zemních poruch, zejména u venkovních vedení. Zde přibližně 70% zemních poruch samovolně zaniká. To se v síti projevuje celkovým poklesem poruch až o cca 50% oproti ostatním způsobům uzemnění uzlu sítě. Dalším výrazným přínosem omezení poruchového proudu je snížení uvolněné energie v místě zemní poruchy a nízká hodnota dotykového napětí. Tím jsou sníženy nároky na budování nákladného ochranného uzemnění s nízkou hodnotou zemního odporu. V některých případech umožňuje nízká hodnota poruchového proudu provoz sítě se zemní poruchou po omezenou dobu. Provoz sítě se zemním spojením napomáhá ke snížení doby přerušení dodávky elektrické energie. Ve výrobních závodech pak krátkodobý provoz se zemním spojením umožňuje řádným způsobem odstavit napájenou technologii, což omezuje následné škody.

Výhody provozování sítě s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku se projeví při vyladění zhášecí tlumivky vůči fázové zemní kapacitě sítě. Současné automaty ladění zhášecí tlumivky zajistí spolehlivé vyladění zhášecí tlumivky. Při používání zhášecí tlumivky v rozsáhlých kabelových sítích jsou s výhodou využívány automaty ladění s proudovou injektáží.



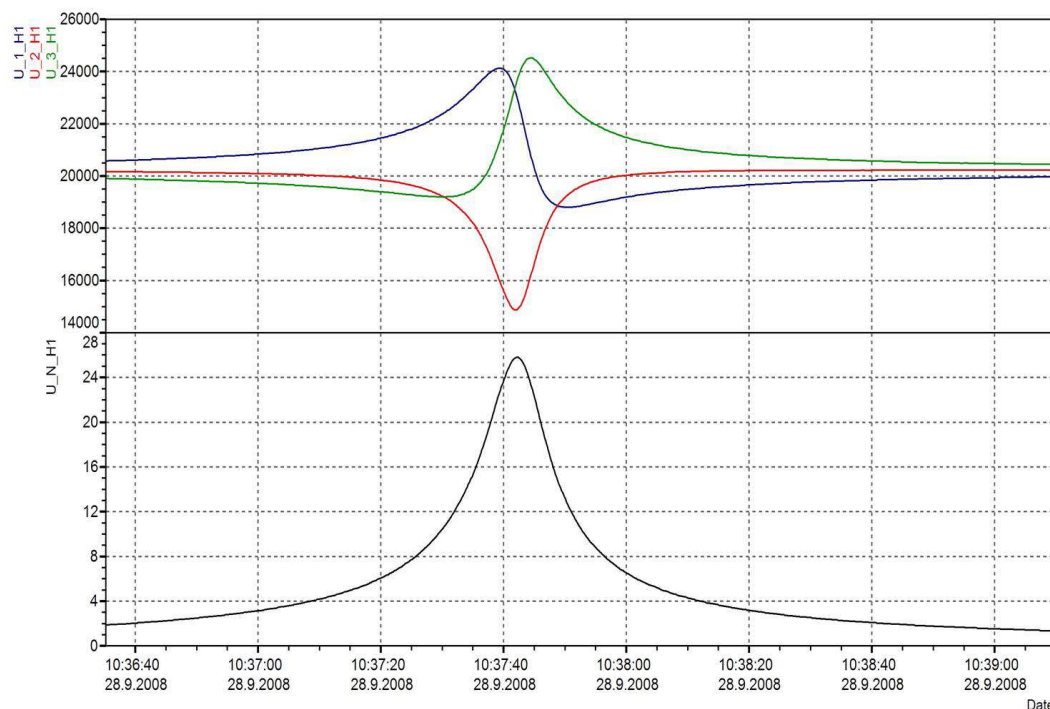
Graf 11 Časové průběhy fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v době vzniku zemního spojení

Ve vyladěném stavu dochází k omezení přepětových stavů v síti, které jsou způsobeny zapínáním vývodu do zemní poruchy (Graf 11). Vznikem zemní poruchy je vyvolán přechodový děj u fázových napětí. Tento děj doprovází zvýšení fázových napětí ve fázích bez poruchy až na hodnoty, které jsou na úrovni sdruženého napětí. Ve fázi se zemní poruchou poklesne napětí až na nulovou hodnotu. Dosažená úroveň přepětí je oproti izolované síti výrazně nižší.



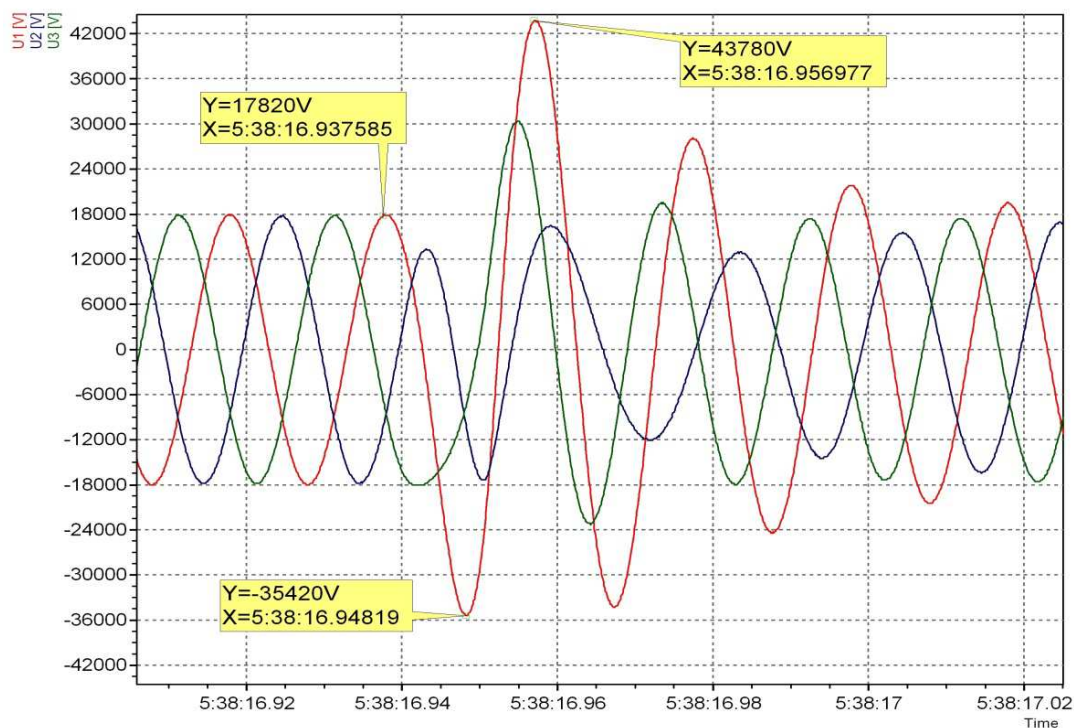
Graf 12 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v době ukončení přerušovaného zemního spojení

Při vypínání zemní poruchy v síti s vyladěnou zhášecí tlumivkou dochází k pozvolnému zotavování fázového napětí (Graf 12). Celkové zotavení fázového napětí trvá cca 300 ms až 400 ms.



Graf 13 Změny fázových napětí a nulové složky napětí při ladění zhášecí tlumivky v nesymetrické síti 35 kV

Ve vyladěném stavu zhášecí tlumivky se zvýší citlivost na fázovou zemní kapacitní nesymetrii v síti. Projevuje se to výraznou změnou velikosti fázových napětí a zvýšením hodnoty nulové složky napětí ve vyladěném stavu zhášecí tlumivky Graf 13. Proto je nutné v nesymetrických sítích zajistit vyrovnání fázových zemních kapacit. K tomu lze využít i speciální systémy určené k eliminaci vlivu fázové zemní kapacitní nesymetrie.



Graf 14 Změny fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v okamžiku poruchy v napájecí síti 110 kV

Výrazné přepětové stavy v síti VN mohou nastat i v případě, kdy zkratový proud v síti 110 kV bude procházet uzemněním, které je společné i pro uzemnění zhášecí tlumivky (Graf 14). V tomto případě může vzniknout sériová rezonance s vysokou hodnotou přepětí. Tomuto jevu se zabraňuje instalací omezovačů přepětí na zhášecí tlumivce.

Uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku umožňuje identifikovat i vysokoodporová zemní spojení. Tyto poruchy jsou časté ve venkovních sítích. Citlivost na vysokoodporové zemní poruchy je dána nízkou hodnotou poruchového proudu, který na odporu poruchy vyvolá menší úbytek napětí. Omezení poruchového proudu je výhodné i v kabelových sítích, kde dochází ke snížení rozsahu následných škod. Výhodou sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů je možnost provozu se zemním spojením po omezenou dobu nebo možnost rychlého vypínání vývodu se zemní poruchou. U těchto sítí je nutné používat směrové zemní ochrany. Nastavení zemních směrových ochrany vyžaduje bližší informace o chráněné síti, o zemním kapacitním proudu sítě i jednotlivých vývodů. Důležitou roli zde hraje i velikost činné složky zbytkového proudu zemního spojení.

Sítě s uzemněním uzlu přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku obecně vyžadují citlivé zemní směrové ochrany. Pro správnou funkci zemních směrových ochrany je rovněž důležitá přesnost měření nulové složky napětí a proudu.

2.6 Další způsoby uzemnění uzlu sítě VN

Při hledání vhodného způsobu uzemnění uzlu sítě dochází k různým modifikacím a kombinacím základních způsobů uzemnění uzlu sítě. I v této oblasti se stále zřetelněji uplatňují moderní elektronické prvky. Dnes je nejčastěji využívána kombinace uzemnění uzlu sítě přes zhášecí tlumivku a uzlový odporník. V běžném provozu je uzel sítě uzemněn přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku. Tento způsob uzemnění uzlu sítě umožňuje snížit počet poruch v síti samovolným zánikem zemních spojení. Při trvalém zemním spojení je pak ke zhášecí tlumivce paralelně připojen uzlový odporník. Zvýšení hodnoty poruchového proudu způsobí vypnutí vývodu se zemní poruchou.

V sítích, kde provozují síť s přímo uzemněným uzlem je testován i provoz se zhášecí tlumivkou. Uzel sítě je opět uzemněn přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku. Při trvalém zemním spojení je uzel sítě zapnutím vypínače přímo uzemněn. Na základě působení ochrany je vývod s jednofázovou poruchou následně vypnut.

Velká rozmanitost způsobů uzemnění uzlu sítě v Evropě dává dobré podmínky ke studiu vlastností jednotlivých systémů. Této možnosti využívají technici z energetických společností ke studiu a porovnávání různých způsobů uzemnění uzlu sítě, a to i mimo Evropu.

2.7 Provoz českých sítí VN

V českých podmínkách jsou VN sítě provozované na napětových hladinách 6 kV realizovány v průmyslových sítích, např. průmyslové a důlní rozvody, napájení vlastní spotřeby elektrárenských bloků. Rovněž se ojediněle můžeme setkat s napětovou

úrovni 10 kV. Jedná se především o doživající distribuce v městských kabelových sítích. Avšak nejběžnější napěťovou úrovní v českých podmínkách je hladina 22 kV, která je využívána pro distribuci elektrické energie, a to jak v městských lokalitách, tak i pro napájení menších měst a obcí. V severních a severovýchodních částech České republiky se pro distribuci elektrické energie využívá i napěťová úroveň 35 kV. V Čechách je patrná snaha o unifikaci napětí v sítích vysokého napětí. V sítích VN postupně dochází k nahrazování napěťové hladiny 10 kV za napěťovou úroveň 22 kV, respektive 35 kV. V Evropě se můžeme setkat i s jinými napěťovými hladinami pro VN sítě. Častou napěťovou hladinou je 20 kV. Pro kabelové městské sítě se stále používá napěťová hladina 6 kV, 10 kV, 11 kV a 15 kV.

U venkovních a smíšených sítí se nejčastěji používá uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku. Tento způsob se začal v našich energetických společnostech používat od počátku 60. let 20. století. Do této doby se používaly sítě s izolovaným uzlem nebo sítě neúčinně uzemněným uzlem přes odbočkovou tlumivku. Právě problémy s provozem těchto sítí vedly k hledání optimálního způsobu uzemnění uzlu sítě a bylo rozhodnuto o provozování VN sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů. V 80. letech 20. století, kdy docházelo v městských aglomeracích k výraznému zvýšení podílu kabelových sítí vysokého napětí, se začalo využívat uzemnění uzlu sítě přes nízkohmový odpor. Používání kabelů vedlo k výraznému zvýšení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu. Nižší spolehlivost zemních směrových elektromechanických ochran, relativně rychlé rozšíření jednofázové zemní poruchy na vícefázové zkraty a zvýšené tlumení přepětových jevů způsobené uzlovým odporem byly dostatečným důvodem pro tuto změnu způsobu uzemnění uzlu sítě. Přesto uvedená změna nebyla realizována ve všech městských aglomeracích. Při optimálním provozu sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů jsou poruchovost i výskyt přepětových jevů srovnatelné se sítěmi provozovanými s uzlem uzemněným přes uzlový odpor. Používání moderních způsobů ladění zhášecích tlumivek, používání jednožilových plastových kabelů XLPE a používání moderních spolehlivých zemních směrových ochran vede v současné době opět k ověřování výhodnosti provozu uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku i v čistě kabelových sítích. V Evropě je mnoho společností, které kabelové sítě provozují s kompenzací zemních kapacitních proudů. V současné době se používají zhášecí tlumivky se jmenovitým kompenzačním výkonem až cca 12 MVA_r.

2.8 Způsoby napájení sítí VN

VN sítě jsou v České republice nejčastěji napájeny ze sítí 110 kV. Pro napájení jsou využívány transformátory (Obr. 4) s primárním vinutím 110 kV zapojeným do hvězdy s přímo uzemněným středem (YN). Zapojení sekundárního, případně terciálního, vinutí je závislé na způsobu uzemnění uzlu VN sítě. V Čechách se provozují sítě vysokého napětí s izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem (uzemnění středu přes nízkohmový odpor) nebo neúčinně uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku.



Obr. 4 Zhášecí tlumivka a napájecí transformátor 110 kV / 22 kV

Sítě s izolovaným uzlem nevyžadují u napájecího transformátoru vyvedený uzel. Sekundární vinutí napájecího transformátoru bývá nejčastěji zapojeno do trojúhelníku (d). Zapojení do hvězdy s vyvedeným (yn) nebo nevyvedeným středem (y) je využíváno jen v ojedinělých případech. V případě vyvedení středu transformátoru není pak tento střed vinutí uzemněn. Sítě s izolovaným uzlem se používají v průmyslových rozvodech vysokého napětí a v napájení vlastní spotřeby elektrárenských bloků. S ohledem na nevýhodné provozní vlastnosti sítí s izolovaným uzlem nejsou tyto sítě v našich podmínkách příliš rozšířené. Pro VN sítě s izolovaným uzlem platí stále v Čechách norma ČSN 33 3070 (s účinností od 1. 5. 1981), která omezuje provoz sítí s izolovaným uzlem se zemním spojením, pokud nabíjecí zemní kapacitní proud sítě překročí hodnotu 10 A, případně hodnotu 20 A u sítí dožívajících. Izolované sítě mají za provozu nestabilní fázová napětí a při rychlých změnách zatížení nebo při poruchových stavech dochází ke vzniku přepětí v síti. Sítě s izolovaným uzlem jsou často náchylné ke vzniku ferorezonance. S ohledem na tyto provozní vlastnosti dochází v mnohých případech ke změně způsobu uzemnění uzlu sítě z izolovaného na odporově uzemněný uzel sítě nebo na uzel sítě uzemněný přes zhášecí tlumivku.

U sítí s neúčinně uzemněným uzlem bývá sekundární vinutí napájecího transformátoru zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem (yn). Tento střed sekundárního vinutí je pak připojen na uzlový odporník nebo zhášecí tlumivku. Aby se omezilo ovlivňování primárního nebo sekundárního napětí přenosem jednofázových poruch, je na napájecím transformátoru instalováno terciální vinutí zapojené do trojúhelníka (d). Výstupní svorky terciálního vinutí mohou, ale i nemusí, být vyvedeny na víko napájecího transformátoru. V průmyslových rozvodech se velmi často využívá vyvedení terciálního vinutí s napětím 6 kV pro kompenzaci jalového výkonu.

Můžeme se setkat s napájecími transformátory se zapojeným vinutím YNd, a to i v sítích s neúčinně uzemněným středem. V tomto případě se využívá uměle vytvořeného uzlu sítě pomocí zemní třífázové tlumivky v zapojení lomená hvězda (Z), v některých případech i hvězda (Y), vždy s vyvedeným středem. Rovněž lze využít

i zemního transformátoru s vyvedeným středem. Na zemní třífázovou tlumivku lze zjednodušeně pohlížet jako na transformátor bez sekundárního vinutí. Výkon zemní tlumivky je nutné odvodit od velikosti připojeného uzlového odporu nebo zhášecí tlumivky. Zemní transformátor má primární vinutí zapojené opět do lomené hvězdy a zároveň obsahuje i sekundární vinutí standardně zapojené do hvězdy pro napájení vlastní spotřeby na úrovni 230 V / 400 V (ZNyn). Pro omezení vlivu nesymetrické zátěže zemního transformátoru je vhodné, a to zejména u kompenzovaných sítí, doplnit jej i terciálním vinutím zapojeným do trojúhelníka (ZNynd). Terciální vinutí zde není vyvedeno na víko transformátoru. Zemní tlumivka nebo transformátor jsou zpravidla připojeny v napájecí rozvodně k hlavní přípojnici. Vytvoření umělého uzlu sítě s sebou přináší výhodu při změnách napájení z různých napájecích transformátorů a napájecích rozveden. Připojení systému uzemnění uzlu sítě přímo na napájecí přípojnici nevyžaduje řešit přepínání systému uzemnění mezi napájecími transformátory. To je výhodné i v případech, kdy v důsledku odstavení napájecích transformátorů dochází k náhradnímu napájení rozvodny z jiných rozveden VN. Nevýhodou je, že v případě nárůstu nabíjecího zemního kapacitního proudu nad kompenzační možnosti zhášecí tlumivky je nutná výměna, jak zemního transformátoru, tak i zhášecí tlumivky. Dále je nutné uvažovat s výkonovou rezervou tlumivek při odstavení zhášecí tlumivky v případě údržby, revize nebo poruchy. Použití umělého uzlu sítě zvyšuje ztráty v síti. Proto při volbě umělého uzlu sítě je nutné sledovat zejména ztráty naprázdno. Při zemním spojení jsou důležité ztráty nakrátko (podélné ztráty ve vinutí zemní tlumivky nebo zemního transformátoru). Tyto ztráty přispívají ke zvyšování hodnoty činné složky jednofázového poruchového proudu. U tlumivky zapojené do uzlu napájecího transformátoru se vzhledem ke změně konfigurace napájení v síti a odstavování jednoho z napájecích transformátorů využívá tzv. nulové sběrný. To umožňuje připínat zhášecí tlumivky pomocí jednopólových spínačů k uzlu jednotlivých napájecích transformátorů.

2.9 Kabelová vedení VN

Městské kabelové distribuční sítě vysoké napětí se vyznačují relativně krátkými kabelovými vývody. Vývody jsou opět nejčastěji provozovány jako paprskové. Kabelová síť a systém spínacích stanic umožňuje změnu konfigurace sítě a zpravidla je možné propojení jednotlivých paprsků z napájecí rozvodny. Tím dojde k vytvoření smyček. V některých sítích dochází k propojení napájecích rozveden přes kmenové kabelové vývody. Provoz s propojenými napájecími rozvodnami klade vysoké nároky na systém chránění. Zde se s výhodou využívá systému spínacích stanic osazených směrovými ochranami. Tyto ochrany jsou vzájemně komunikačně propojené. Komunikační propojení umožňuje spolehlivé a rychlé vypínání pouze nejmenšího úseku sítě s poruchou. V městských sítích se budují spínací stanice s distribučními transformátory (DT) VN/NN. Připojení distribučních transformátorů bývá provedeno zpravidla přes odpínač s výkonovými vysokonapěťovými pojistkami. V provozně důležitých spínacích stanicích se používají vysokonapěťové vypínače s ochranami. Vývody ze spínacích stanic jsou realizovány přes vypínače nebo odpínače. Starší

kabelové sítě jsou tvořeny třífázovými kabely s papírovou izolací napuštěnou olejem. Od 90. let 20. století se začaly používat především jednožilové plastové kabely s izolací XLPE (mají izolaci ze zesíťovaného polyetylénu). Tyto kabely již nejsou tolik náročné na údržbu jako olejové kabely. Používání jednofázových kabelů omezuje možnost rozšíření jednofázové poruchy na vícefázovou a kabelové sítě vykazují nízkou poruchovost. Poruchovost je nižší než u běžných venkovních linek. Velkou výhodou je, že poruchovost kabelových sítí není ovlivněna povětrnostními poměry.

2.10 Venkovní vedení VN

Venkovní sítě dosahují délky až několik desítek kilometrů. Jsou realizovány jako paprskové s odbočkami z kmene vedení. Nejběžnější provedení těchto sítí je na betonových stožárech s rovinným nebo trojúhelníkovým uspořádáním fázových vodičů. Odbočky z kmene vedení jsou zpravidla připojeny přes úsekové odpínače. Rovněž kmene vedení a dlouhé odbočky bývají děleny úsekovými odpínači. Úsekové odpínače jsou s ručním nebo s dálkovým ovládním. Pro přenos povelů se využívá rádiová síť nebo sítě pro mobilní telefony a jejich datové přenosy například GSM EDGE, GPRS atd. Některé dálkově ovládané odpínače jsou vybaveny indikátory průchodu poruchového proudu, což umožňuje operativní řízení VN sítě a urychlení lokalizace poruchy. V omezené míře jsou v těchto sítích využívány i venkovní výkonové vypínače (tzv. reclosery) instalované například přímo na stožáry vedení vysokého napětí. Tyto vypínače jsou vybaveny dálkovým ovládním, měřením napětí, proudů a ochrannými funkcemi. V případě, že jsou z venkovního vedení napájeny VN transformátory uprostřed obydlených aglomerací, dochází k přechodu tohoto venkovního vedení do kabelového vedení. Proto dnes již téměř nenajdeme síť tvořenou pouze venkovním vedením.

U venkovního vedení bývají distribuční transformátory připojeny přes úsekový odpínač. Úsekový odpínač umožňuje odpojení distribučního transformátoru při chodu naprázdno. Modernější odpínače se zhášecími komorami již dovolují vypínání distribučních transformátorů i pod zatížením. Chránění distribučního transformátoru bývá realizováno výkonovými vysokonapěťovými pojistkami. Z důvodu ochrany před přepětím bývají často u distribučního transformátoru osazeny i svodiče přepětí.

3 VLIV ZPŮSOBŮ UZEMNĚNÍ UZLU SÍTÍ VN NA JEJICH PROVOZ A CHRÁNĚNÍ

Způsob uzemnění uzlu sítě ovlivňuje chování sítě při jednofázových příčných poruchách. U přímo uzemněného uzlu se jedná o jednofázové zkraty. V těchto sítích protéká od napájecího bodu do místa poruchy jednofázový zkratový proud. S ohledem na velikost poruchového proudu je z důvodu bezpečnosti limitována doba trvání poruchy. Včasným vypnutím poruchy lze omezit rozsah následných škod. Při velkém poruchovém proudu lze v místě poruchy zaznamenat vysoké hodnoty dotykového napětí. Při vysoké rychlosti vypínání těchto poruch a při správném dimenzování ochranného uzemnění je nebezpečí úrazu elektrickým proudem minimalizováno. Rychlostí vypínání se snižuje i rozsah následných škod v místě poruchy. Proto je u těchto sítí snaha zajistit co nejkratší dobu provozu sítě s jednofázovou poruchou. Pro zajištění bezpečnosti osob je nutné budovat ochranné uzemnění s nízkou hodnotou zemního odporu. S ohledem na zajištění nízké hodnoty odporu ochranného uzemnění bývá u venkovního vedení kromě fázových vodičů tažen i uzemňovací vodič.

Obdobou přímo uzemněného uzlu je nízkoodporově uzemněný uzel sítě. V případě zemní poruchy je zde poruchový proud tvořen nabíjecím zemním kapacitním proudem a poruchovým proudem, který je omezen odporem uzlového odporníku. V těchto sítích je hodnota poruchového proudu výrazně omezena oproti hodnotě poruchového proudu v sítích s přímo uzemněným uzlem sítě. Přesto hodnoty poruchového proudu dosahují podle velikosti uzlového odporu až tisíc ampér a je tedy opět nutné tyto poruchy rychle vypínat. Dotyková a kroková napětí v místě poruchy jsou však v sítích s nízkoodporově uzemněným uzlem nižší než u obdobných poruch v síti s přímo uzemněným uzlem. Pro dosažení nízké hodnoty zemního odporu ochranného uzemnění se v kabelových sítích využívá propojení uzemnění přes stínění kabelů a propojování zemnicích soustav. Tím vzniká jednotná uzemňovací soustava s nízkou hodnotou zemního odporu. Problémy nastávají u venkovních vedení napájených ze systému s odporově uzemněným uzlem.

Při provozu sítě s izolovaným uzlem bude místem jednofázové příčné poruchy protékat pouze zemní kapacitní proud. Velikost poruchového proudu je tedy ovlivněna především velikostí nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. Nabíjecí zemní kapacitní proud sítě je způsoben tokem proudu přes zemní fázové kapacity. Je závislý na rozsahu sítě a jejím provedení (vzdušné vedení, kabelové vedení). Hodnota poruchového proudu může dosahovat hodnot od jednotek ampér až po stovky ampér. Jak již bylo řečeno, dle původní ČSN 33 3070 (účinnost od 1. 5. 1981) [8] není povolen provoz sítě s izolovaným uzlem s hodnotou zemního kapacitního proudu přesahující 10 A. Jen pro staré a dožívající sítě je hodnota povolena do 20 A. Jednofázová příčná porucha se v těchto sítích nazývá zemním spojením. U sítí, kde hodnota zemního kapacitního proudu nepřesahuje stanovené limity, je provoz sítě s izolovaným uzlem možný i při zemním spojením. U sítí s izolovaným uzlem jsem se

však setkal i s jejich provozování při kapacitních proudech přesahujících i několik desítek až stovek ampér, a to i v některých energetikách v rámci Evropy.

U sítí s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku dochází při jednofázové příčné poruše k eliminaci zemního kapacitního proudu sítě v místě zemní poruchy. Při přesném vyladění zhášecí tlumivky na hodnotu fázové zemní kapacity sítě lze uvažovat s hodnotou poruchového proudu do 10% z celkového zemního kapacitního proudu sítě. V praxi, kde jsou využívány automatiky ladění zhášecí tlumivky s nastavenou nízkou hodnotou rozladění zpravidla do 3% z hodnoty zemního kapacitního proudu, může hodnota poruchového proudu dosahovat jednotek procent z celkového zemního kapacitního proudu sítě. U poruchového proudu se zde výrazněji projevují jeho složky, jako je činná složka a vyšší harmonické. Jak již bylo uvedeno, ve vyladěném stavu zhášecí tlumivky má poruchový proud nejnižší hodnotu. Při podladění zhášecí tlumivky je nastavení proudové hodnoty zhášecí tlumivky nižší než odpovídá velikosti zemního kapacitního proudu sítě, neboli je nastaven nižší kompenzační výkon. Při přeladění zhášecí tlumivky je naopak nastavení proudové hodnoty zhášecí tlumivky vyšší, než je velikost zemního kapacitního proudu sítě. Zhášecí tlumivka je pak nastavena na vyšší kompenzační výkon. V obou výše popsaných případech, tj. podladění i přeladění zhášecí tlumivky, dojde ke zvýšení hodnoty poruchového proudu v místě zemní poruchy. Přesnost vyladění zhášecí tlumivky ovlivňuje i funkci zemních směrových ochran. U nesymetrických sítí dochází vlivem přesného vyladění zhášecí tlumivky k nárůstu napětí uzlu sítě proti zemi a zvýšení fázové napěťové nesymetrie v síti. Hodnoty sdružených napětí se nemění. Při rozladění zhášecí tlumivky se rozdíl fázových napětí snižuje. Rozladěním zhášecí tlumivky se však zvyšuje hodnota poruchového proudu v místě zemní poruchy a snižuje se i pravděpodobnost samovolného ukončení zemního spojení uhašením oblouku zemní poruchy. Samozhášení oblouku zemního spojení nastává u cca 70% případů zemních poruch na venkovním vedení. Rozladění zhášecí tlumivky způsobuje rovněž snížení tlumení přechodových dějů spojených se vznikem a zánikem zemního spojení.

Jednofázová příčná porucha je nejčastější u venkovního vedení. Velký počet zemních poruch zapříčiní například ptáci sedající na podpěry vedení v blízkosti fázových vodičů. Proto se podpěry uzpůsobují tak, aby zabraňovaly poruchám v důsledku usedání větších ptáků. Rovněž se na konstrukce přidávají různé zábrany. Další častou příčinou jednofázové poruchy je pád cizího předmětu do vedení. Jedná se například o větve stromů. Tyto poruchy mohou mít i vysoké hodnoty odporu. Jedná se zpravidla o hodnoty odporu poruchy od několika set ohmů až po několik tisíc ohmů. Druhým extrémem jsou poruchy s nízkým odporem. Tyto poruchy jsou obecně nazývané jako kovové poruchy. Nejčastěji se lze s poruchami s nízkým odporem setkat v kabelové síti nebo při jednofázových poruchách v rozvodnách a spínacích stanicích.

3.1 Zemní kapacitní proud

Povrch vodiče vůči povrchu země, respektive vůči stínění (u kabelových vedení), tvoří kondenzátor s definovanou kapacitou. Touto kapacitou pak ve střídavém obvodu protéká kapacitní proud. Velikost kapacity je přímo úměrná velikosti povrchu vodiče, materiálové konstantě použitého izolačního materiálu ϵ_r a nepřímo úměrná je výšce vodiče nad zemí nebo vzdálenosti od stínění kabelu.

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (\text{F; C, V; } \text{Fm}^{-1}, -, \text{m}^2, \text{m})$$

(3.1)

Kde : ϵ_0 permitivita vakua : $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 C^2} \approx 8,8541878 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$

Q náboj
U napětí
S plocha
d vzdálenost mezi plochami.

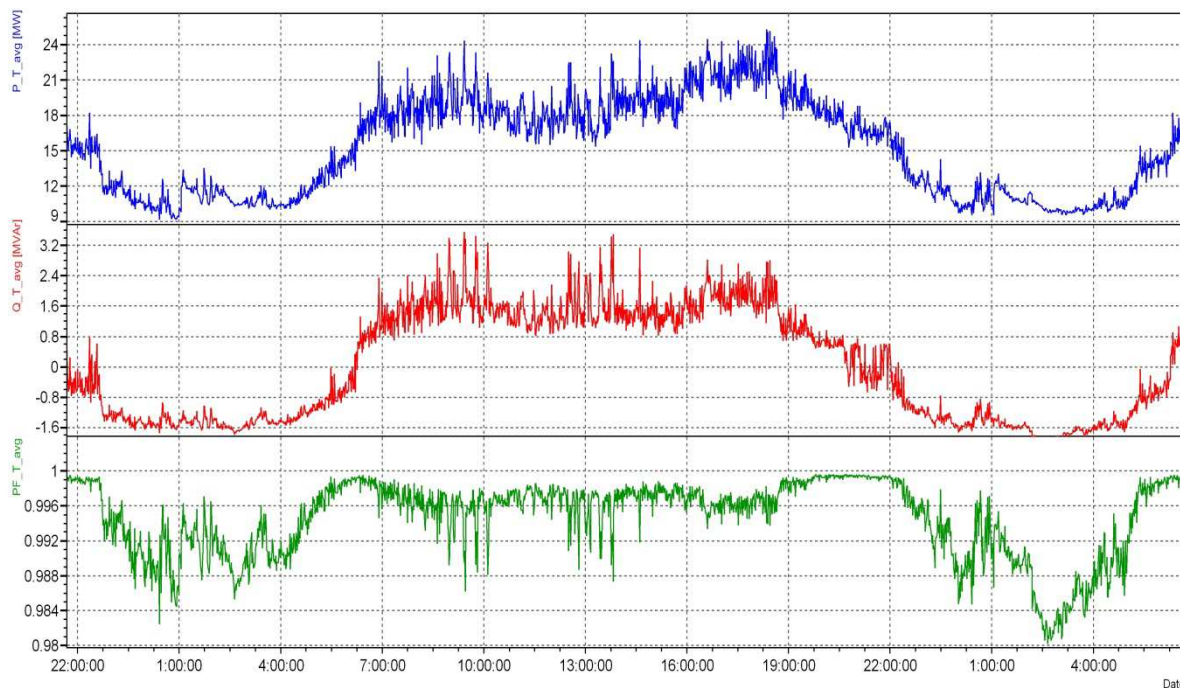
U vedení je nutné rozlišovat mezi provozní a zemní kapacitou. Provozní kapacita zahrnuje kapacitu mezi fázovými vodiči spolu se zemní fázovou kapacitou, tj. kapacitou mezi fází a zemí. Kapacita venkovního vedení, a to jak provozní, tak i zemní, je závislá na geometrickém uspořádání vodičů, vzdálenostech mezi vodiči a vzdálenosti mezi vodiči a zemí, případně pak mezi vodiči a zemním lanem. V našich podmínkách je nejběžnější venkovní vedení tvořené třemi fázovými vodiči bez zemního lana. Fázové vodiče jsou nejčastěji v rovinném nebo trojúhelníkovém uspořádání. Zemní kapacita vedení je vždy definována jako kapacita zjištěná mezi fázovým vodičem a zemí. Při porovnávání vlastností sítě z pohledu způsobu uzemnění uzlu sítě a z pohledu jednofázových poruch je důležitá hodnota fázové zemní kapacity vedení. Tato kapacita ovlivňuje velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. V bezporuchovém stavu sítě, kdy mají fázová napětí přibližně stejnou hodnotu, teče přes fázové zemní kapacity fázový nabíjecí zemní kapacitní proud. Při jednofázové poruše s nulovým poruchovým odporem bude mít postižená fáze v místě zemního spojení nulové napětí proti zemi a zbývající dvě fáze budou mít proti zemi hodnotu sdruženého napětí. Nabíjecí zemní kapacitní proud poteče ze zdravých fází do země a zemí do místa poruchy. Na základě empirického vztahu lze přibližně určit hodnotu nabíjecího zemního kapacitního proudu venkovního vedení tvořeného třemi fázovými vodiči. Jedná se o vztah pro určení přibližné hodnoty fázové zemní kapacity vedení u venkovního vedení [2].

$$I_c = \frac{U \cdot l}{300} \quad (\text{A; kV, km})$$

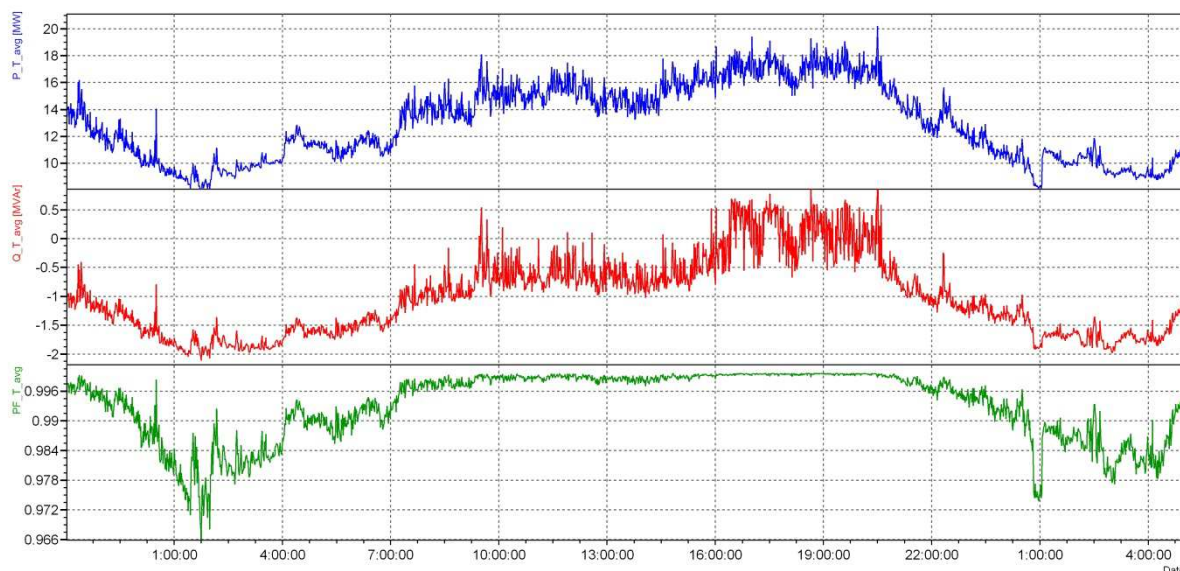
(3.2)

Kde I_c je zemní kapacitní proud sítě
U je provozní napětí sítě (sdružená hodnota napětí sítě)
l je celková délka venkovního vedení.

Provozní kapacita zahrnuje kromě fázové zemní kapacity i kapacity mezi ostatními fázemi. Pouze u jednožilových kabelů se stíněním je fázová zemní kapacita a provozní kapacita shodná. Pro velikost jednofázového zemního poruchového proudu je důležitá hodnota proudu tekoucího ze zdravých fází přes zemní kapacity do země. V místě zemní poruchy pak tento proud teče do porušené fáze. U venkovního vedení, kde jsou mezi fázovými vodiči a zemí velké vzdálenosti a konstanta ϵ_r má hodnotu 1, mají fázové zemní kapacity poměrně nízké hodnoty ($\epsilon_r = 1$ je definováno pro vakuum a vzduch). U kabelových vedení, kde jsou malé vzdálenosti mezi jádrem kabelu a jeho stíněním, konstanta ϵ_r má zároveň i vyšší hodnotu než 1, jsou hodnoty zemních kapacit řádově vyšší než u venkovního vedení. Jak provozní kapacita, tak i zemní fázová kapacita, způsobují tok kapacitního proudu do vedení, a to i v bezporuchovém stavu vedení. Tento proud se nazývá nabíjecím proudem vedení. Velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu kabelových sítí ovlivňuje celkové proudové zatížení vedení. Vlivem rostoucích délek kabelového vedení se pak celkový nabíjecí proud zvyšuje. V mnohých kabelových sítích, a to zejména při nižším zatížení (nižším odběru jalové energie induktivního charakteru), způsobuje nabíjecí kapacitní proud překompenzování celé VN sítě (viz Graf 15, Graf 16).



Graf 15 Vliv nabíjecího zemního kapacitního proudu kabelové sítě na překompenzování odebíraného jalového výkonu induktivního charakteru v distribuční síti 22 kV v pracovní den, kapacitní charakter jalového výkonu má zápornou hodnotou Q_{T_avg}



Graf 16 Vliv nabíjecího zemního kapacitního proudu kabelové sítě na překompenzování odebraného jalového výkonu inдукtivního charakteru v distribuční síti 22 kV v den pracovního klidu, kapacitní charakter jalového výkonu má zápornou hodnotou Q_{T_avg}

3.2 Jednofázový poruchový proud v síti s izolovaným uzlem

V sítích s izolovaným uzlem bude místem poruchy protékat zemní kapacitní proud. Tento poruchový proud je tvořen nabíjecím zemním kapacitním proudem zdravých fází a svodovým proudem. Fázový zemní kapacitní proud protéká přes fázové zemní kapacity do země a dál zemí do místa poruchy. Obvod se uzavírá v postižené fázi směrem od místa poruchy do napájecího transformátoru.

Při zemním spojení v síti rozlišujeme vývody bez poruchy a vývod se zemní poruchou. Ve vývodech bez poruchy mají obě zdravé fáze proti zemi sdružené napětí. Fáze s poruchou bude mít proti zemi malé, teoreticky až nulové, napětí. Velikost fázových napětí je ovlivněna odporem poruchy. Nabíjecí proud fázových zemních kapacit může při kovovém zemním spojení protékat pouze fázemi bez poruchy. Hodnota nabíjecího zemního kapacitního proudu bude závislá na velikosti vývodu, tedy na hodnotě fázové zemní kapacity. Vedle nabíjecího zemního kapacitního proudu bude ve zdravých fázích protékat i svodový proud. Za svodový proud je označován poruchový proud činného charakteru v místě zemního spojení. Hodnota svodového proudu se zpravidla uvádí jako procentní hodnota nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě.

Fázový zemní poruchový proud při zemním spojení ve fázi bez zemní poruchy bude obsahovat kapacitní i činnou složku. Proud v „i“-tém vývodu ve fázi bez zemní poruchy a se zemní kapacitou C_{0i} můžeme vyjádřit komplexní hodnotou.

$$I_i = \sqrt{3}\omega C_{0i} U_f \left(\frac{W}{100} - j \right) \quad (\text{A; rad s}^{-1}, \text{F, V, \%}, -)$$

(3.3)

Kde I_i je fázový proud ve fázi bez zemní poruchy vyvolaný nabíjecím zemním kapacitním proudem a činným svodovým proudem fáze v „i“-tém vývodu
 ω je úhlová frekvence sítě
 C_{0i} je zemní fázová kapacita „i“-tého vývodu

- U_f fázové napětí sítě
 w je procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu sítě
 j operátor pro označení imaginární části komplexního čísla.

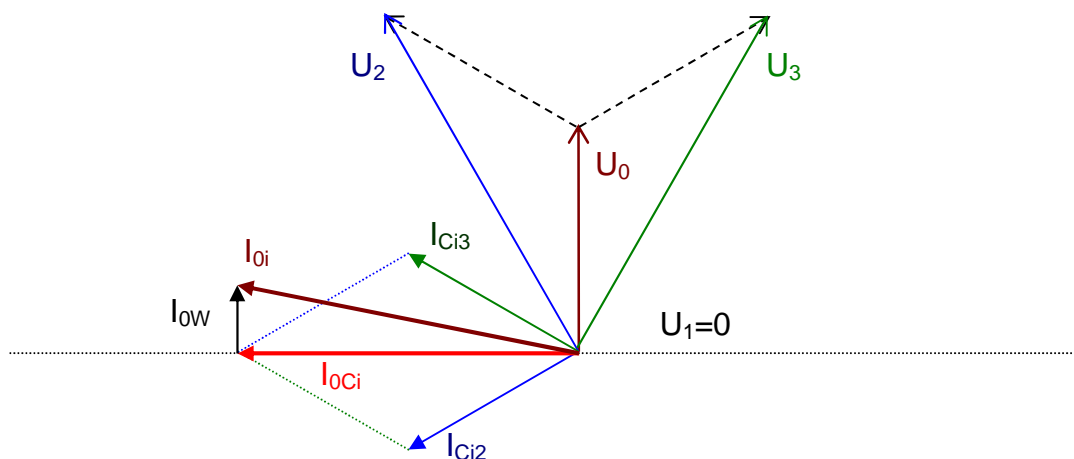
Při zemní poruše v síti máme vždy ve vývodu dvě fáze bez poruchy. Oběma fázemi teče proud I_{Ci} dle vztahu (3.3). Tyto fázové proudy jsou vzájemně natočeny o 60° . To je způsobeno vlivem změny natočení vektorů fázových napětí při zemním spojení v síti. Nulová složka proudu se určuje vektorovým součtem všech fázových proudů vývodu. Ve vývodu bez poruchy při kovovém zemním spojení můžeme vektorově sečíst proudy ve fázích a získáme tak komplexní hodnotu nulové složky proudu vývodu.

$$I_{0i} = 3\omega C_{0i} U_f \left(\frac{w_i}{100} - j \right) \quad (\text{A; rad s}^{-1}, \text{F, V, \%}, -)$$

(3.4)

- Kde I_{0i} je nulová složka proudu vývodu bez zemní poruchy
 ω je úhlová frekvence sítě
 C_{0i} je zemní fázová kapacita „i“-tého vývodu
 U_f fázové napětí sítě
 w_i je procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu „i“-tého vývodu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu sítě „i“-tého vývodu.

Vektorový součet fázových zemních kapacitních proudů při zemním spojení ve vývodu bez poruchy je zobrazen na obrázku Obr. 5.



Obr. 5 Fázorový diagram napětových a proudových poměrů v síti se zemním spojením ve vývodu bez zemního spojení

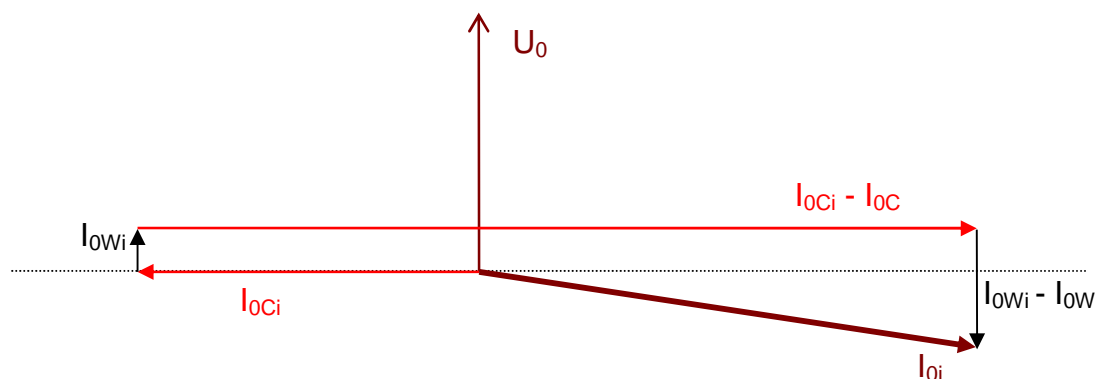
Ve vývodu s kovovou zemní poruchou bude fázemi bez poruchy protékat stejný proud vyjádřený vtahem (3.3). Po vektorovém součtu fázových proudů dostaneme příspěvek proudu nulové složky vývodu I_{0i} (dle vztahu (3.4)) k celkovému zemnímu poruchovému proudu sítě. U vývodu se zemní poruchou bude pak fází se zemní poruchou protékat plná hodnota zemního kapacitního proudu i činná hodnota svodového proudu celé sítě, a to od místa zemní poruchy až k napájecímu transformátoru sítě (Obr. 6). Tento proud má obrácený směr toku, než je tomu

u proudu zdravých fází. Celkovou nulovou složku proudu vývodu se zemní poruchou můžeme opět vyjádřit komplexní hodnotou.

$$\vec{I}_{0i} = 3\omega C_0 U_f (k-1) \left(-\frac{w}{100} + j\right) \quad (\text{A; rad s}^{-1}, \text{F, V, \%,-})$$

(3.5)

Kde I_{0i} je nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou
 ω je úhlová frekvence sítě
 C_0 je zemní fázová kapacita celé sítě
 U_f fázové napětí sítě
 k je poměrná část zemní fázové kapacity vývodu se zemní poruchou vztažená k celkové zemní kapacitě sítě $k = \frac{C_{0i}}{C_0}$; k může nabývat hodnot od 0 do 1
 w je procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu sítě.



Obr. 6 Fázorový diagram napěťových a proudových poměrů v síti se zemním spojením ve vývodu se zemní poruchou

Hodnota nulové složky proudu bude ovlivněna poměrem fázové zemní kapacity vývodu k celkové zemní kapacitě sítě. Tento poměr nám vyjadřuje koeficient „ k “. Bude-li síť tvořena pouze jedním vývodem, potom bude hodnota koeficientu $k = 1$. V takové síti teoreticky nelze na počátku vývodu naměřit žádnou nulovou složku poruchového proudu. Druhým extrémem je vývod s téměř nulovou hodnotou nabíjecího zemního kapacitního proudu (například vývod pro připojení transformátoru v rozvodně pomocí krátkých pasových vodičů). V případě, že porucha bude na tomto vývodu, pak ve fázích bez poruchy nebude protékat žádný nabíjecí zemní kapacitní proud a ve fázi s poruchou naměříme plnou hodnotu zemního poruchového proudu celé sítě. V případě, že porucha je na jiném vývodu, bude měřená hodnota nulové složky proudu mít nulovou hodnotu.

Sítě malého rozsahu s izolovaným uzlem je možné provozovat určitou dobu se zemní poruchou. U rozsáhlých sítí s izolovaným uzlem je nutné rychlé vypínání vývodu nebo části sítě se zemní poruchou. K tomuto účelu jsou v sítích instalovány zemní ochrany s vyhodnocováním velikosti nulové složky proudu nebo směrové zemní ochrany.

Úkolem ochran je rozlišit nabíjecí proud vývodu od poruchového proudu zemního spojení. V případě, že se jedná o rozsáhlou síť s velkým počtem vývodů, které budou mít přibližně stejnou hodnotu nabíjecího zemního kapacitního proudu, bude mít vývod se zemní poruchou výrazně vyšší hodnotu nulové složky proudu. U velmi rozsáhlých sítí s velkým počtem vývodů, lze v tomto případě pro detekci vývodu se zemní poruchou využít i jednoduchých ochran s detekcí vysoké hodnoty nulové složky proudu vývodu. Pro nastavení správné úrovně vybavovacího proudu v ochraně je nutné znát nabíjecí zemní kapacitní proud chráněného vývodu a celkový proud zemního spojení. Toto kritérium pro identifikaci vývodu se zemní poruchou postačuje pouze v případech, kdy nulová složka poruchového proudu je vždy jednoznačně vyšší, než je hodnota nulové složky nabíjecího proudu vývodu bez zemní poruchy, a to i při uvažování odporového zemního spojení. Při nastavování zemních ochran je nutné počítat s odporem zemního spojení. Při vyšším odporu zemního spojení nemusí již ochrany reagovat. Za vznik zemního spojení se považuje velikost nulové složky napětí větší než 30% z hodnoty fázového napětí sítě. V některých případech se volí i nižší hodnota. V českých podmínkách se nepoužívají rozsáhlé sítě s izolovaným uzlem. U sítí malého rozsahu bývá problém přesného měření malých hodnot nulové složky proudu. Touto problematikou se budu podrobněji zabývat v kapitole 3.6, kde popisují způsoby a přesnost měření nulové složky proudu. V sítích, kde nejsou splněny podmínky pro použití jednoduchých nadproudových ochran, je nutné používat zemní směrové ochrany. To platí u všech sítí malého rozsahu.

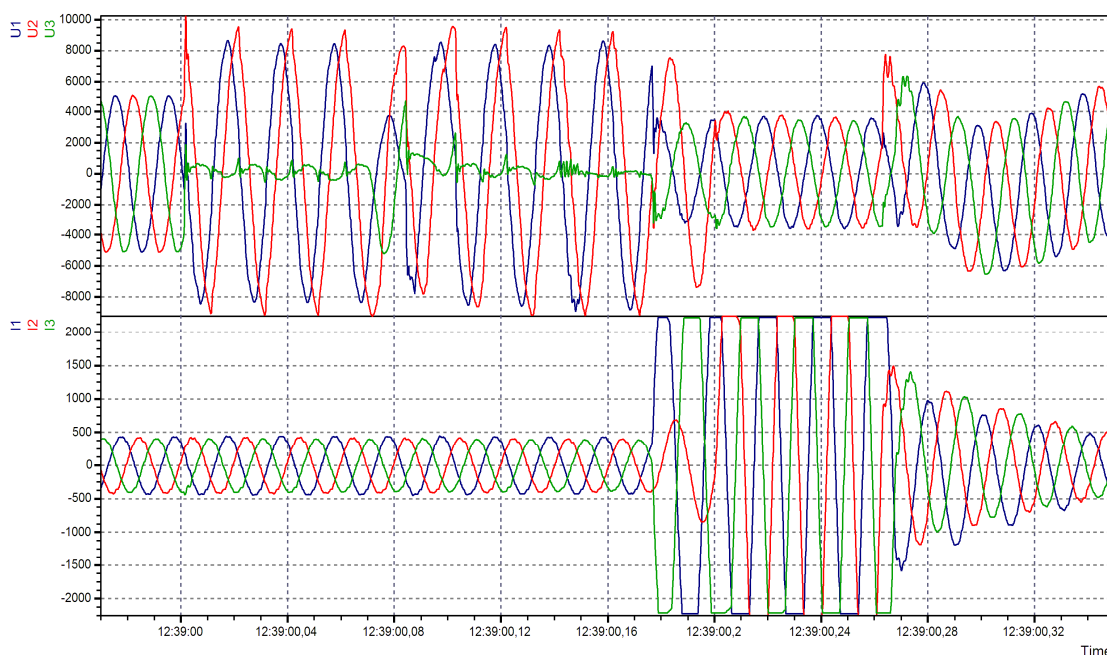
Při měření nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou změříme nulovou složku proudu sniženou o vlastní nabíjecí proud vývodu (viz vztah (3.5)). Ve vývodu bez poruchy bude naměřen pouze vlastní nabíjecí proud vývodu (viz vztah (3.4)). Je-li absolutní hodnota vlastního nabíjecího proudu vývodu alespoň řádově srovnatelná s celkovým nabíjecím zemním kapacitním proudem sítě, nelze vždy podle velikosti nulové složky proudu ve vývodu jednoznačně určit, zda v měřeném vývodu je zemní porucha nebo není. Tato nejednoznačnost identifikace vývodu se zemní poruchou může vést k falešnému působení ochran s jednoduchým nadproudovým nulovým článkem. V tomto případě je jednoznačným kritériem pro rozlišení nabíjecího proudu vývodu bez poruchy od zemního kapacitního proudu sítě ve vývodu s poruchou pouze porovnání natočení vektoru nulové složky proudu vůči nulové složce napětí. Pro chránění krátkých vývodů nebo odboček z vedení, případně pro chránění připojených strojů (transformátorů, motorů apod.), lze i v sítích s izolovaným uzlem malého rozsahu využít ochran s jednoduchými nadproudovými nulovými články. U vývodů, které mají relativně vysokou hodnotu nabíjecího zemního kapacitního proudu vzhledem k celkovému nabíjecímu zemnímu kapacitnímu proudu sítě, je nutné využívat směrové zemní ochrany. Vhodné nastavení směrových ochran je možné provést na základě znalosti nabíjecích zemních kapacitních proudů chráněného vývodu a celé sítě. Správné působení směrových ochran bude vždy záležet na citlivosti ochran, přesnosti jejich nastavení, přesnosti měření nulové složky napětí a na velikosti nabíjecího kapacitního proudu chráněného vývodu.

U sítí, kde dochází k častým změnám rozsahu sítě, je nutné kontrolovat velikost celkového nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. Pro kontrolu hodnoty ochranného uzemnění sítě je nutná znalost zemního kapacitního proudu sítě.

Zejména v důlních sítích dochází k častým změnám rozsahu sítí, které napájí pohyblivou technologii vlivem postupu těžby. Kontrolu nabíjecího zemního kapacitního proudu je možné provádět výpočtem nebo na základě měření hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě. Pro výpočet potřebujeme znát typy vedení v oblasti, jejich délky a měrnou hodnotu zemní fázové kapacity. Obecně lze říci, že problémem je získat relevantní data o síti. Zpravidla není problém zjistit typ vedení (typ kabelu), ale ostatní údaje jsou obvykle k dispozici již jen orientačně. U venkovního vedení většinou zjistíme typové parametry vedení pouze orientačně, protože exaktní údaje nebývají k dispozici. Pro třífázové kabely můžeme z katalogů nejčastěji zjistit pouze celkovou provozní kapacitu. Hodnota fázové zemní kapacity třífázového kabelu nebývá však v katalogu uvedena. Pro jednožilové kabely je v katalogu udávána měrná kapacita shodná s jeho fázovou zemní kapacitou. Dalším důležitým údajem jsou již zmíněné délky vedení. V mnohých případech zjistíme pouze orientační délky. Avšak nepřesná délka vedení, zejména u paralelních kabelů, může zapříčinit velké odchylky ve výpočtu hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě.

Přesnější metodou pro zjištění hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu I_c , je vytvoření umělého zemního spojení v síti a změření hodnoty zemního poruchového proudu. Vytváření umělého zemního spojení s sebou přináší i rizika. Zejména u průmyslových sítí s citlivou technologií na výpadky elektrické energie mohou vzniknout velké následné škody. Proto není v mnohých provozech měření povolováno. V případě, že budeme požadovat zjištění hodnoty nabíjecích proudů vývodů, musíme realizovat stejný počet zemních spojení jako je počet proměřovaných vývodů. To je v běžném provozu zcela nereálné.

Nevýhodou izolovaných sítí je velká nestabilita fázových napětí a průtok kapacitního poruchového proudu místem zemní poruchy. Vznik přepětí při zemním spojení a zejména tepelné účinky poruchového proudu v místě zemní poruchy vedou často k rozšíření poruchy na vícefázový zemní zkrat (Graf 17).



Graf 17 Časový průběh fázových napětí a fázových proudů při zemním spojení v síti 6 kV s izolovaným uzlem a s následným rozšířením poruchy na třífázový zkrat

3.3 Jednofázový poruchový proud v síti s odporově uzemněným uzlem

Sítě s nízkoohmovým uzlovým odporníkem řadíme rovněž do sítí s neúčinně uzemněným uzlem. Správná volba uzlového odporníku přispívá k omezení přepětových jevů při spínání v síti a snížení přepětí při jednofázových poruchách (Graf 18). Přepětové jevy lze snížit volbou nízké hodnoty uzlového odporu. Nízká hodnota uzlového odporu může vyvolávat vznik přepětí při vypínání jednofázových poruch na dlouhých vývodech. Naproti tomu vyšší hodnota uzlového odporu omezuje hodnotu poruchového proudu v místě poruchy. Velikost poruchového proudu je řádově na úrovni provozních proudů a při jednofázové poruše nedosahuje zkratové hodnoty, jak je tomu u sítí s přímo uzemněným uzlem (jednofázové zkraty). Hodnota uzlového odporu se volí jako kompromis vlivu na tlumení přepětí vůči vlivu na omezení poruchového proudu při zemní poruše. Při určování hodnoty uzlového odporu se zohledňuje velikost zemního kapacitního proudu sítě. U těchto sítí bude při jednofázové poruše místem poruchy protékat poruchový proud tvořený zemním kapacitním proudem sítě a proudem uzlového odporníku. S ohledem na velikost poruchového proudu je nutné tyto poruchy vypínat v relativně krátkém čase. V sítích s odporově uzemněným uzlem lze jen obtížně sledovat velikost zemního kapacitního proudu sítě. Sledování velikosti zemního kapacitního proudu sítě je zpravidla zaměřeno na sledování změn rozsahu (délek) vedení.

Z pohledu chránění je výhodou odporově uzemněného uzlu sítě jednoduchá identifikace vývodu se zemní poruchou. Zde postačují jednoduché nesměrové nadproudové články pro měření nulové složky proudu ve vývodu. Nastavení jednoduchých článků ochrany musí být i zde vyšší, než je vlastní kapacitní proud vývodu sítě. Zároveň musí proudové nastavení být menší, než je hodnota proudu

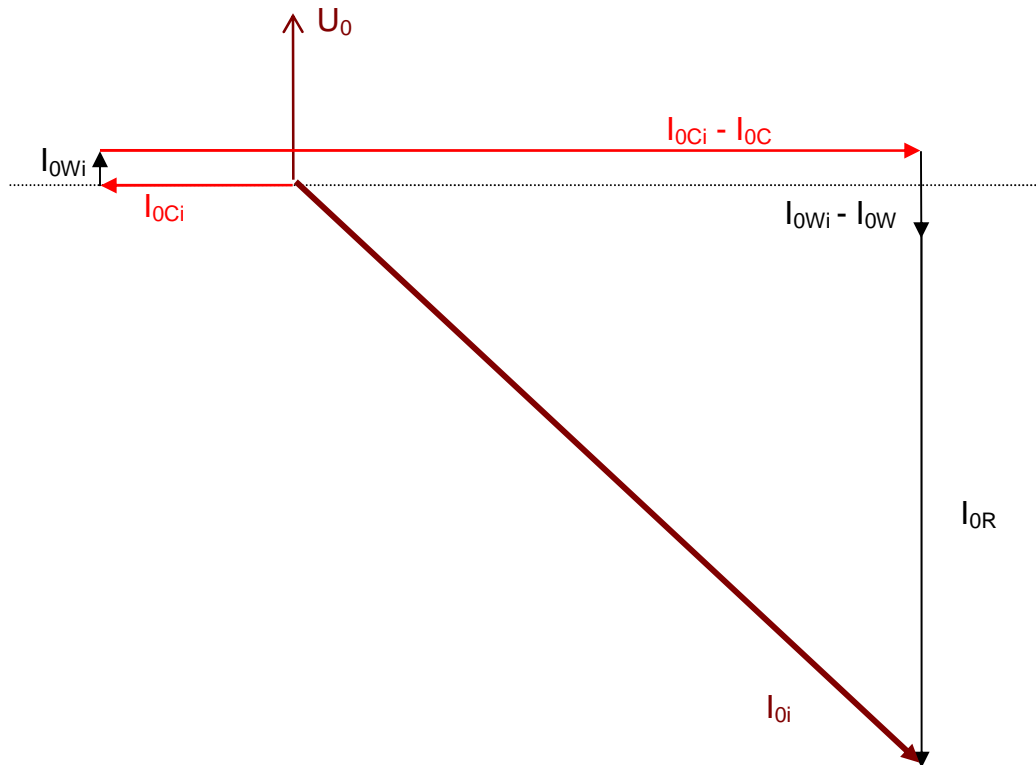
uzlovým odporníkem při odporovém zemním spojení. To je základní podmínka pro nastavení zemních proudových článků a omezení jejich falešného působení. Další podmínka stanovuje, že proudové nastavení zemních ochran musí odpovídat konstrukci uzlového odporníku a jeho dovolenému tepelnému zatížení. Starší typy uzlových odporníků byly zpravidla konstruovány na trvalé proudové zatížení až do 10% jmenovité hodnoty proudu uzlového odporu. V současné době jsou dodávány odporníky s nižším trvalým proudovým zatížením. Trvalé proudové zatížení výrazně ovlivňuje cenu odporníku. Proto při výběrových řízeních jsou nabízeny uzlové odporníky s čím dál nižší hodnotou trvalého zatížení. V praxi jsem se setkal i s uzlovými odporníky, které neměly definovanou hodnotu trvalého zatížení. Ochrany v těchto sítích musí být nastaveny tak, aby dokázaly identifikovat vývod se zemní poruchou a vypínaly postižený vývod nebo část vývodu se zemní poruchou dříve, než dojde k vyčerpání tepelné kapacity uzlového odporníku. V síti, kde bude mít jeden z vývodů vysokou hodnotu nabíjecího kapacitního proudu, mohou tyto požadavky způsobit problémy v nastavení ochran. Řešení problému může vést až k nutnosti použití směrových zemních ochran. Z hlediska nastavení ochran v síti s odporově uzemněným uzlem může alespoň orientační znalost velikosti zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů přispět k jejich přesnějšímu nastavení.

Při jednofázové zemní poruše v síti s odporově uzemněným uzlem je z hlediska proudových poměrů opět nutné rozlišovat mezi vývody bez poruchy a vývody s jednofázovou zemní poruchou. U vývodů bez poruchy v době zemního spojení v síti naměříme nulovou složku proudu stejně velkou jako v síti s izolovaným uzlem dle vztahu (3.4). Ve vývodu s poruchou bude kromě nulové složky proudu vyjádřené vztahem (3.5) protékat i proud odporníkem I_{0R} (Obr. 7).

$$\vec{I}_{0i} = 3\omega C_0 U_f (k_i - 1) \left(-\frac{w_i}{100} + j\right) - I_{0R} \quad (\text{A}; \text{rad s}^{-1}, \text{F}, \text{V}, \text{---}, \text{---}, \text{---}, \text{A})$$

(3.6)

Kde	I_{0i}	je nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou
	ω	je úhlová frekvence sítě
	C_0	je zemní fázová kapacita celé sítě
	U_f	fázové napětí sítě
	k_i	je poměrná část zemní fázové kapacity vývodu se zemní poruchou vztažená k celkové zemní kapacitě sítě $k_i = \frac{C_{0i}}{C_0}$; k může nabývat hodnot od 0 do 1
	w_i	je procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu vývodu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu vývodu
	I_{0R}	je proud uzlovým odporníkem.



Obr. 7 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s odporově uzemněným uzlem při zemním spojení ve vývodu, (I_{0R} – proud uzlovým odporníkem, I_{0Ci} – kapacitní proud vývodu, I_{0wi} svodový proud vývodu, I_{0C} kapacitní proud sítě, I_{0W} – svodový proud sítě, I_{0i} – nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou)

Aby se v sítích s odporově uzemněným uzlem mohly používat nesměrové ochrany, musí být proud odporníku i při odporové poruše bezpečně větší než je nulová složka proudu nejrozsáhlejšího vývodu bez zemní poruchy dle vztahu (3.4). Zavedený koeficient bezpečnosti k_B udává kolikrát je proud odporníkem při odporové poruše větší než vlastní kapacitní proud vývodu při kovovém zemním spojení.

$$/I_{0Rmin} / > k_B / I_{0i} / \quad (A; -, A)$$

$$/I_{0Rmin} / > k_B / 3\omega C_{0i} U_f (\frac{w_i}{100} - j) / \quad (A; -, rad.s^{-1}, F, V, \%, -)$$

(3.7)

Kde I_{0Rmin} je uvažovaný minimální proud uzlovým odporníkem při odporové zemní poruše
 I_{0i} je nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou
 k_B koeficient bezpečnosti udává kolikrát je proud odporníkem při odporové poruše větší než vlastní kapacitní proud vývodu při kovovém zemním spojení, je zadáván s hodnotou větší než 1 (například 1,2)
 ω je úhlová frekvence sítě
 C_{0i} je zemní fázová kapacita vývodu
 U_f fázové napětí sítě
 w_i je procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu vývodu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu vývodu.

Ze vztahu (3.7) můžeme určit vhodnou velikost uzlového odporníku. Pro stanovení hodnoty uzlového odporníku vycházíme z obecného pravidla, že proud odporníkem má být o 20% větší než je celkový zemní kapacitní proud sítě. S ohledem na použití nesměrových nulových nadproudových článků ochrany je nutné vyhovět

[34]

i další podmínce definované vztahem (3.7). Pro stanovení velikosti uzlového odporu při splnění podmínky (3.7) je nutné znát kapacitní proudy jednotlivých vývodů. Z podmínky (3.7) můžeme vyjádřit jmenovitý proud odporníkem.

$$I_R \geq k_u k_B 3\omega k_i C_0 U_f \quad (A; -, -, rad.s^{-1}, -, F, V)$$

(3.8)

Kde	I_R	je jmenovitý proud odporníkem
	k_B	koeficient bezpečnosti udává kolikrát je proud odporníkem při odporové poruše větší než vlastní kapacitní proud vývodu při kovovém zemním spojení, je zadáván s hodnotou větší než 1 (například 1,2)
	k_u	koeficient udávající poměr mezi fázovou hodnotou napětí a nulovou složkou napětí, při kterém ještě požadujeme působení zemní ochrany, $k_u = \frac{U_f}{U_{0min}}$
	k_i	je poměrná část zemní fázové kapacity vývodu se zemní poruchou vztažená k celkové zemní kapacitě sítě
	C_{0i}	je nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou
	U_f	fázové napětí sítě.

Budeme-li uvažovat přechodový odpor jednofázové poruchy, kdy napětí nulové složky bude dosahovat 10% fázové hodnoty (koeficient $k_u = 0,1$), potom musí být nulová složka proudu vývodu bez zemní poruchy I_{0i} bezpečně menší než 10% ze jmenovitého proudu uzlového odporníku. Při koeficientu bezpečnosti $k_B = 1,2$ lze stanovit podmínku, že v této síti je možné nastavit nadproudové články zemních ochran na hodnotu odpovídající 10% jmenovitého proudu odporníku za předpokladu, že nejrozsáhlejší vývod nebude představovat větší příspěvek z celkového zemního kapacitního proudu sítě než 8,33% jmenovitého proudu uzlového odporníku. Jmenovitý proud odporníkem se volí roven nebo větší než je zemní kapacitní proud sítě. Volba jmenovitého proudu odporníkem je dána následujícím vztahem (3.9) a (3.10):

$$I_R \geq k_u k_B 3\omega k_i C_0 U_f \quad (A; -, -, rad.s^{-1}, -, F, V)$$

(3.9)

$$I_R \geq 3\omega C_0 U_f \quad (A; rad.s^{-1}, F, V)$$

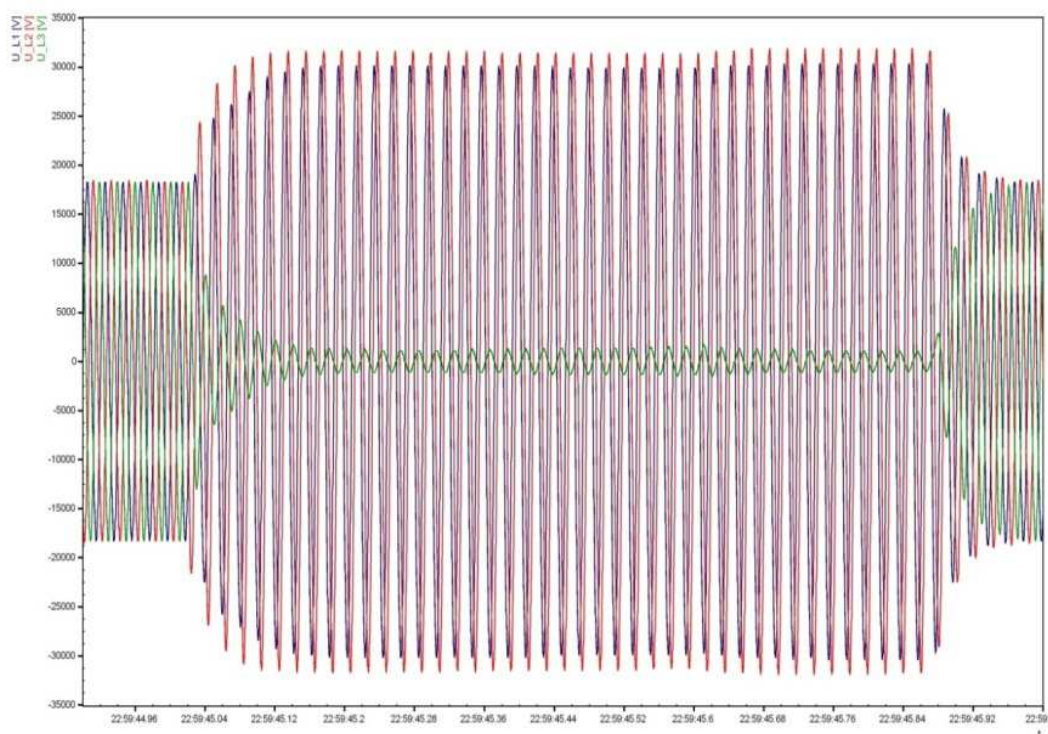
(3.10)

Kde	$k_u = 0,1$	(-)
	$k_i = 0,0833$	(-)
	$k_B = 1,2$	(-).

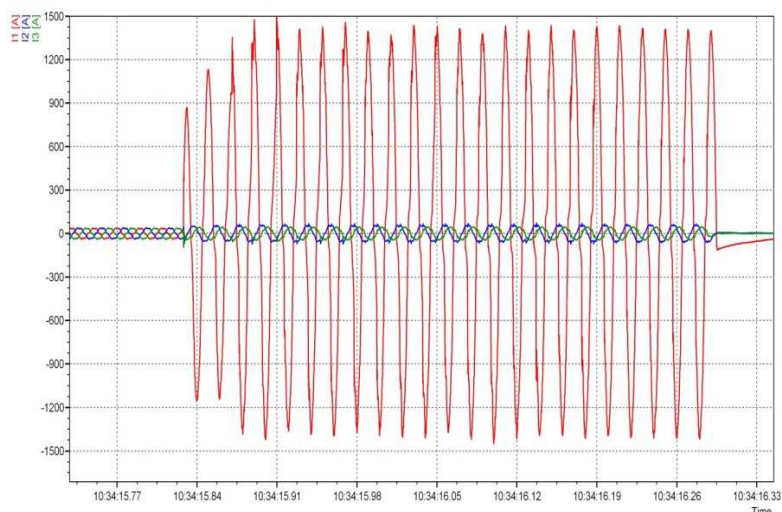
Pro výpočet nastavení jednoduchých nulových nadproudových článků ochran v odporově uzemněné síti, je nutné definovat minimální velikost nulové složky napětí, při které mají zemní ochrany ještě reagovat. Dále je nutné definovat odstup mezi hodnotou nabíjecího proudu vývodu bez poruchy a minimální hodnotou proudu ve vývodu se zemní poruchou, která obsahuje i navýšení o proud z uzlového odporníku. Na základě zjištění poměrné velikosti kapacitního proudu vývodu k celkovému zemnímu kapacitnímu proudu sítě můžeme dle rovnice (3.8) stanovit velikost jmenovitého proudu odporníku. Výpočet je vhodné provést alespoň pro jeden, a to

nejrozsáhlejší vývod z rozvodny. Uzlové odporníky s velkou hodnotou proudu umožňují propálení poruchy, což způsobuje pokles odporu poruchy (Graf 19). Pokud při vzniku jednofázové poruchy nedojde k jejímu propálení a odpor poruchy zůstává vysoký, mohou nastat problémy při detekci těchto poruch. Zemní ochrany nastavené na vysoké poruchové proudy nebudou reagovat na odporové poruchy a místem poruchy může delší dobu protékat poruchový proud. Uzlový odporník bude zároveň tímto proudem předehříván. V kabelové síti má většina zemních poruch nižší odpor než 100Ω . Zpravidla se jedná o odpory na úrovni jednotek až desítek ohmů. V případě poruchy na jiném zařízení než jsou kabely, kabelové spojky nebo koncovky mohou vzniknout i vysokoohmové poruchy. V tomto případě bude porucha postupně prohořívát až do doby než poklesne odpor poruchy pod zadanou mez nebo než dojde ke vzniku vícefázového zkratu. Nekontrolovaný proud místem poruchy může způsobit nebezpečí úrazu elektrickým proudem i zvýšení rozsahu poškození v místě poruchy a vznik následných škod.

Stanovení minimální nulové složky napětí, pro kterou budou ochrany reagovat, ovlivňuje trvalé zatížení odporníku. Je-li procentní hodnota minimálního napětí nulové složky vyšší než je procentní hodnota dovoleného proudu odporníku, může dojít k přetěžování uzlového odporníku a jeho tepelnému poškození. Aby nedošlo k uvedenému poškození, je nutné zajistit jeho chránění proti tepelnému přetížení. Toho lze docílit ochranou s tepelným modelem. Při tepelném přetížení uzlového odporníku dochází pak k vypínání napájecího transformátoru a tím i celé sítě vysokého napětí. V těchto případech může dojít k působení ochrany odporníku a k výpadku napájecího transformátoru aniž by působila nějaká ochrana na vývodu.



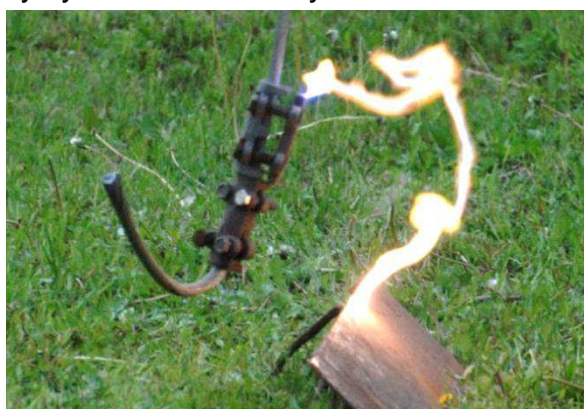
Graf 18 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem (uzlový odporník se jmenovitým proudem 300A) při jednofázové poruše



Graf 19 Fázové proudy ve vývodu při jednofázové poruše ve fázi L_1 v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem (jmenovitý proud uzlového odporníku je 1000 A)

3.4 Jednofázový poruchový proud v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů

Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů mají uzel sítě uzemněn přes induktivní reaktanci. Induktivní reaktancí bývá nejčastěji plynule laditelná zhášecí tlumivka, případně odbočková tlumivka. Jedná se tedy opět o kompenzovanou síť s neúčinně uzemněným uzlem. V kompenzovaných sítích budou při zemním spojení obdobné napěťové poměry jako v sítích s izolovaným uzlem. Hodnota přepětí dosahuje nižších hodnot a při vzniku zemního spojení s vyladěnou zhášecí tlumivkou se poměry v síti blíží síti s odporově uzemněným uzlem (Graf 20). Místem zemní poruchy bude protékat zbytkový proud zemního spojení (viz Obr. 8). Zbytkový proud je tvořen vektorovým součtem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhášecí tlumivky, dále pak činným svodovým proudem sítě navýšeným o činný proud tlumivky (ztráty v tlumivce) a proudy vyšších harmonických.



Obr. 8 Obloukové zemní spojení v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů

U vývodu bez poruchy jsou stejné napěťové a proudové poměry jako v síti s izolovaným nebo odporově uzemněným uzlem. Podstatný rozdíl je u vývodu se zemní poruchou. Ve fázích bez poruchy budou do vývodu se zemní poruchou opět protékat zemní nabíjecí proudy a svodové proudy. Fází se zemní poruchou bude pak protékat zbytkový proud zemní poruchy. Měřená složka nulového proudu na vývodu

bude ovlivněna vlastním kapacitním nabíjecím proudem vývodu, induktivním proudem zhášecí tlumivky, celkovým zemním kapacitním proudem sítě, činným svodovým proudem sítě a činným proudem zhášecí tlumivky.

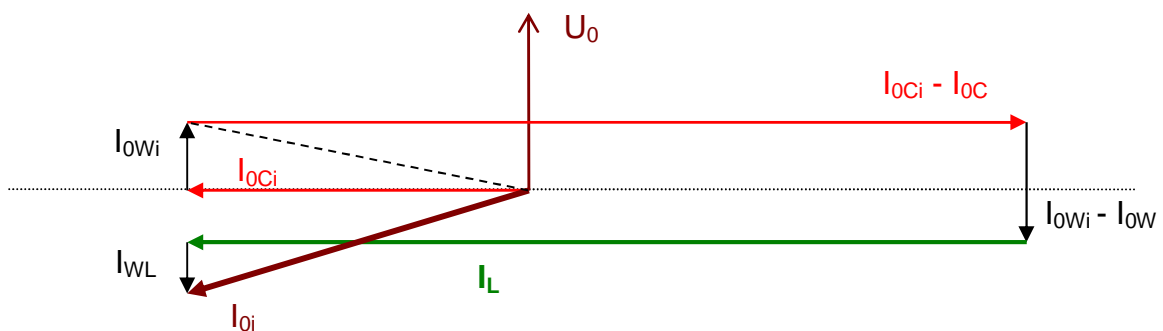
Rovnici (3.4) popisuje nulovou složku proudu ve vývodu bez zemní poruchy. Tento vztah je shodný i pro síť s kompenzací zemních kapacitních proudů. Pro nulovou složku proudu ve vývodu se zemní poruchou bude fázemi nepostiženými zemní poruchou protékat zemní kapacitní proud. Ve fázi se zemní poruchou bude vedle celkového zemního kapacitního proudu sítě a činného svodového proudu sítě protékat i proud zhášecí tlumivkou. Proud zhášecí tlumivkou má opět činnou a jalovou složku. Komplexní rovnice vyjadřující proudové poměry ve vývodu se zemní poruchou je popsána vztahem (3.11) a znázorněna na Obr. 9.

$$\bar{I}_{0i} = I_{wi} - jI_{0Ci} - I_w + jI_{0C} - I_{wL} - jI_L \quad (A; A, A, A, A, A, A, A) \quad (3.11)$$

Rovnici (3.11) jsem dále podrobněji rozepsal pro kovové zemní spojení

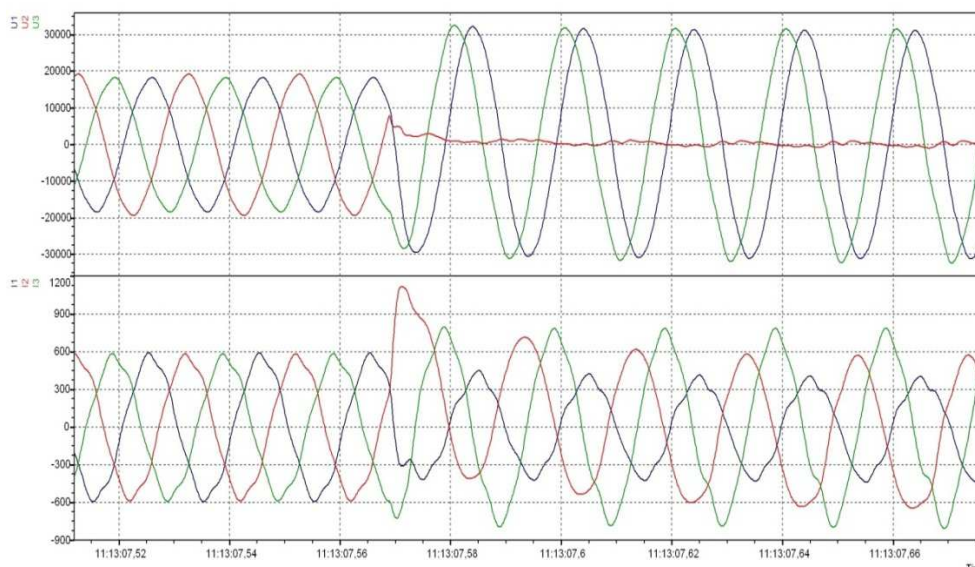
$$\bar{I}_{0i} = 3\omega U_f \left[\frac{C_{0i} w_i - C_0 w}{100} + j(C_0 - C_{0i}) \right] - I_{wL} - jI_L \quad (A; rad.s^{-1}, V, F, \%, F, \%, F, F, A, A) \quad (3.12)$$

Kde	I_{0i}	nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou
	I_{0wi}	svodový proud vývodu
	I_{0w}	svodový proud sítě
	I_{wL}	činný proud kompenzační tlumivky
	I_L	induktivní proud tlumivky
	C_{0i}	fázová zemní kapacita vývodu
	C_0	fázová zemní kapacita sítě
	w_i	procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu vývodu vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu vývodu
	w	procentní vyjádření hodnoty činného svodového proudu sítě vztaženého k zemnímu kapacitnímu proudu sítě
	I_{0Ci}	kapacitní složka nulového proudu vývodu
	I_{0C}	kapacitní složka nulového proudu sítě
	U_f	fázové napětí sítě.



Obr. 9 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

Na vývodu se zemním spojením lze naměřit hodnotu nulové složky proudu, kterou udává rovnice (3.12). Toto vyjádření mi umožnilo se podrobněji zabývat vlivy působícími na velikost i na vektorové natočení nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou.



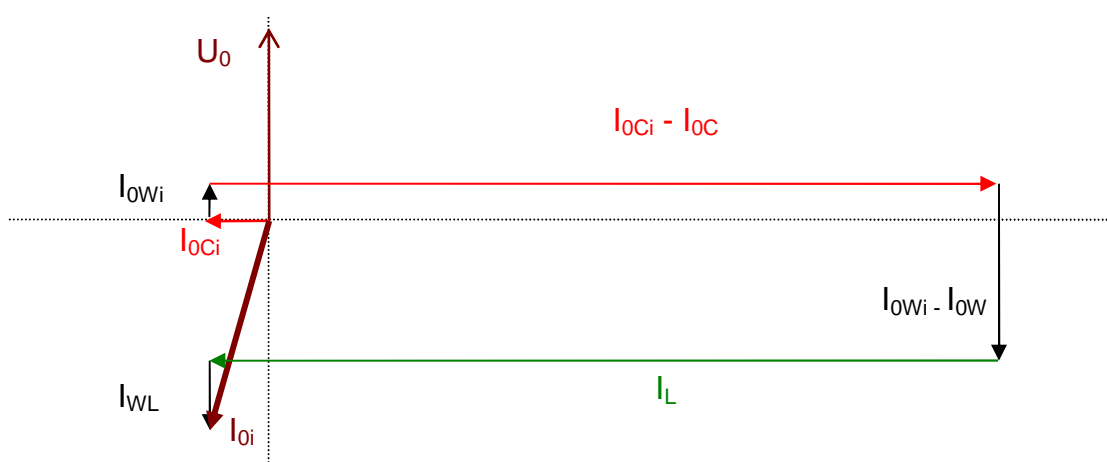
Graf 20 Časový průběh fázových napětí a fázových proudů při vzniku zemního spojení v kabelové síti 22 kV – měřeno na napájecím transformátoru 110kV/23 kV, zemní kapacitní proud sítě byl na úrovni 450 A

3.4.1 Vývod s minimální hodnotou fázové zemní kapacity

Zejména v napájecích rozvodnách se můžeme setkat s vývody, které mají velmi nízkou hodnotu fázového zemního kapacitního nabíjecího proudu. Jedná se o vývody napájecí odběry v objektu rozvodny nebo vývody s krátkým vedením a minimální fázovou zemní kapacitou vzhledem k celkové zemní fázové kapacitě sítě (typickým příkladem je vývod napájecí transformátor vlastní spotřeby). V těchto případech můžeme vliv hodnoty svodového proudu vývodu a fázové zemní kapacity vývodu zanedbat. Rovnici (3.12) jsem proto zjednodušil na rovnici (3.13). Vektory proudů jsou zobrazeny na Obr. 10.

$$\vec{I}_{oi} = 3\omega U_f \left[\frac{-C_0 w}{100} + jC_0 \right] - I_{wL} - jI_L \quad (A; rad.s^{-1}, V, F, \%, F, A, A)$$

(3.13)



Obr. 10 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zážecí tlumivku, kde vlastní kapacitní proud vývodu je vzhledem k celkové zemní kapacitě sítě nevýznamný

Při nepřesném vyladění zhášecí tlumivky bude proud v místě zemní poruchy obsahovat jalovou složku proudu způsobenou rozdílem mezi zemním kapacitním proudem sítě a induktivním proudem zhášecí tlumivky. Proud místem poruchy může mít jak induktivní, tak i kapacitní charakter. Při přesném vyladění zhášecí tlumivky vůči zemní fázové kapacitě sítě je jalová složka proudu zemní poruchy eliminována. Proud místem zemní poruchy bude v tomto případě obsahovat pouze činnou složku tvořenou svodovým proudem sítě a činným proudem zhášecí tlumivky I_{wL} . Při nulové hodnotě vlastního nabíjecího kapacitního proudu ve fázích bez poruchy bude nulová složka proudu ve vývodu se zemní poruchou shodná s proudem protékajícím místem poruchy.

$$I_{0i} = -3\omega \frac{C_0 w}{100} U_f - I_{wL} \quad (A; \text{rad}\cdot\text{s}^{-1}, F, \%, V, A)$$

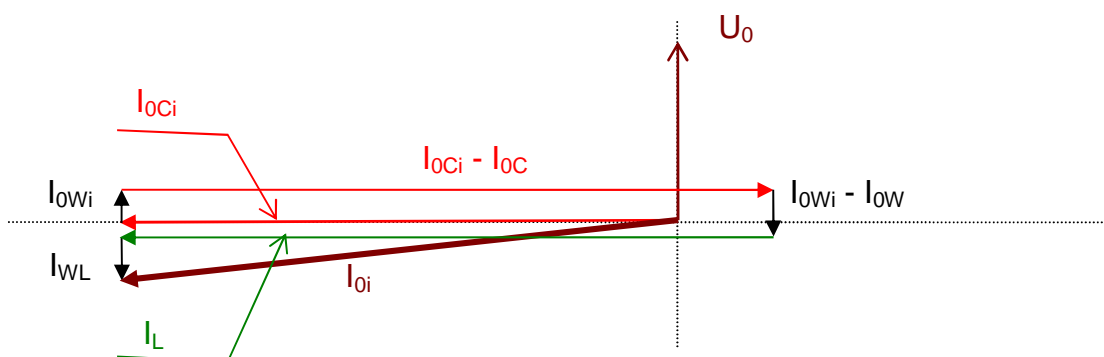
(3.14)

3.4.2 Vývod s výrazně vysokou hodnotou fázové zemní kapacity

Za vývody s významnou fázovou zemní kapacitou lze označovat vývody, jejichž fázová hodnota zemního kapacitního proudu přesahuje hodnotu 20% z celkové zemní fázové kapacity sítě. Naměřený nulový proud „i-tého“ vývodu I_{0i} bude mít jak činnou složku, tak i jalovou složku proudu. Velikost jalové složky proudu je závislá na poměru mezi fázovou zemní kapacitou vývodu a fázovou zemní kapacitou sítě (Obr. 11). Teoreticky může nastat případ, kdy celá síť bude tvořena pouze jedním vývodem. V tomto případě bude fázová zemní kapacita vývodu a fázová zemní kapacita sítě totožná. Ve vztahu (3.12) se pak tyto kapacity vzájemně odečtou a nulová složka vývodu bude tvořena pouze činným proudem zhášecí tlumivky a jejím induktivním proudem. Velikost nulové složky proudu v této síti bude ovlivněna pouze proudem zhášecí tlumivky dle vztahu (3.15). V místě zemní poruchy stále platí, že zemní kapacitní proud sítě je kompenzován právě induktivním proudem zhášecí tlumivky.

$$\vec{I}_{0i} = -I_{wL} - jI_L \quad (A; A, A)$$

(3.15)

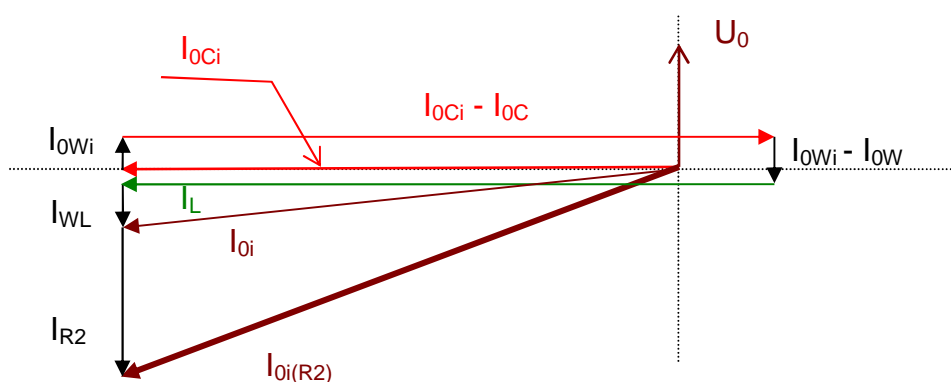


Obr. 11 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku, kde vlastní kapacitní proud vývodu má vzhledem k celkové zemní kapacitě sítě vysokou hodnotu

V síti, kde jeden vývod představuje významný podíl na celkovém zemním fázovém kapacitním proudu sítě, je obtížná spolehlivá identifikace vývodu se zemní poruchou. Jen obtížně lze rozeznat, zda v tomto vývodu došlo k zemní poruše či nikoli. Rozdíl mezi případem, kdy ve vývodu je zemní porucha a kdy je vývod bez zemní poruchy, spočívá pouze v nepatrné změně natočení vektoru nulové složky proudu I_{0i} vývodu vůči vektoru nulové složky napětí U_0 . U vývodu bez poruchy bude natočení nulové složky proudu nižší než 90° . Nulová složka proudu vývodu bude předbíhat nulovou složku napětí a bude mít tedy kapacitní charakter. V případě, že vývod bude postižen zemním spojením, bude úhel natočení nulové složky proudu o málo vyšší než 90° . Rozdíl mezi vývodem se zemní poruchou a vývodem bez zemní poruchy může v tomto případě znamenat vyhodnocení změny úhlu natočení nulové složky proudu vývodu o pouhé jednotky stupňů. Zde je nutné vzít v úvahu faktory ovlivňující přesnost měření nulové složky napětí, nulové složky proudu a samotné vlastní zpracování naměřených hodnot ochranou. Jedná se o tak závažný problém, že starší typy zemních směrových ochran u obdobných vývodů nebyly schopné spolehlivě identifikovat zemní spojení. I v současné době je nutné těmto vývodům věnovat zvláštní pozornost.

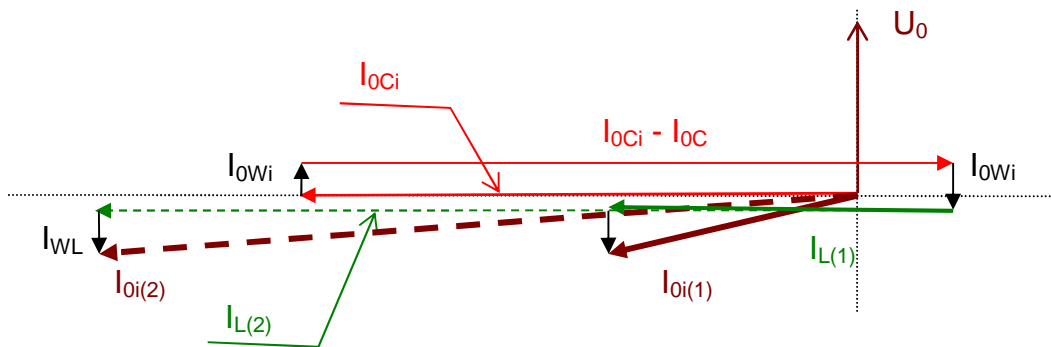
Zvýšení spolehlivosti zemních ochran vývodu docílíme zvětšením rozdílu vektorového natočení nulové složky proudu mezi stavy vývodu s poruchou a bez poruchy. Možnosti zvětšení rozdílu vektorového natočení proudu udává vztah (3.12). Jednou z možností je podladění zhášecí tlumivky, tzn. nastavení nižší proudové hodnoty tlumivky než je zemní kapacitní proud sítě. Na obrázku (Obr. 13) je znázorněno, jak volbou rozladění zhášecí tlumivky lze ovlivnit rozdíl úhlu nulové složky proudu vůči nulové složce napětí mezi stavem vývodu bez poruchy a stavem vývodu se zemní poruchou. Největšího rozdílu úhlu lze dosáhnout při podladění zhášecí tlumivky o hodnotu větší než je vlastní nabíjecí proud vývodu. Toto opatření však zároveň zvyšuje hodnotu poruchového proudu v místě zemního spojení. Podladění zhášecí tlumivky o jednotky procent z celkového zemního kapacitního proudu je s ohledem na velikost poruchového proudu v místě zemního spojení akceptováno. Mírné podladění zhášecí tlumivky může nepatrně zvýšit rozdíl úhlu a zvýšit tak i pravděpodobnost spolehlivé identifikace vývodu se zemní poruchou. Další možností je zvýšení činné složky proudu zhášecí tlumivky. Toto opatření opět zvyšuje hodnotu poruchového proudu. Proto se využívá pouze pro krátkodobé zvyšování činné složky poruchového proudu, které je realizováno připínáním primárního odporníku ke zhášecí tlumivce nebo sekundárního odporníku do pomocného vinutí zhášecí tlumivky (Obr. 12) Připínání sekundárního odporníku do pomocného vinutí zhášecí tlumivky je považováno v českých VN sítích za standard. Zhášecí tlumivka je dodávána s pomocným sekundárním (výkonovým) vinutím se jmenovitým napětím 500 V. Tuto hodnotu napětí však na vinutí naměříme pouze při kovovém zemním spojení. Do sekundárního vinutí lze připínat sekundární odporníky od hodnot několik desetin ohmů až po jednotky ohmů, a to s ohledem na výkon zhášecí tlumivky. Volba hodnoty odporu sekundárního odporníku je závislá na mnoha parametrech. Jedná se například o kvalitu použitých zemních ochran, přesnost měření nulové složky napětí a proudu,

velikost přirozené nesymetrie v síti i svodový odpor sítě. Rovněž je třeba vzít v úvahu reálný požadavek, do jaké mezní hodnoty odporu zemní poruchy ve vývodech chceme identifikaci provádět. Vhodná volba sekundárního odporníku ovlivní spolehlivost použitých zemních směrových ochran. Pro usnadnění vhodné volby sekundárního odporníku a pro zvýšení rozsahu identifikace vývodu s vysokohmovým odporem zemní poruchy lze využít víceúrovňový sekundární odporník s automatickou volbou hodnoty sekundárního odporu, který je připínán v závislosti na odporu poruchy. U tohoto typu sekundárního odporníku s označením SRA [13] odpadá nutnost stanovení vhodné volby sekundárního odporu. Automatika odporníku vybírá vhodnou velikost odporu sekundárního odporníku v závislosti na vypočtené hodnotě odporu zemní poruchy. Volba odporu je rovněž podřízena nastavení zemních směrových ochran. Použití automatického typu sekundárního odporníku umožňuje identifikaci zemních spojení i s vyššími odpory poruchy, a to i na úrovni jednotek až desítek kiloohmů.

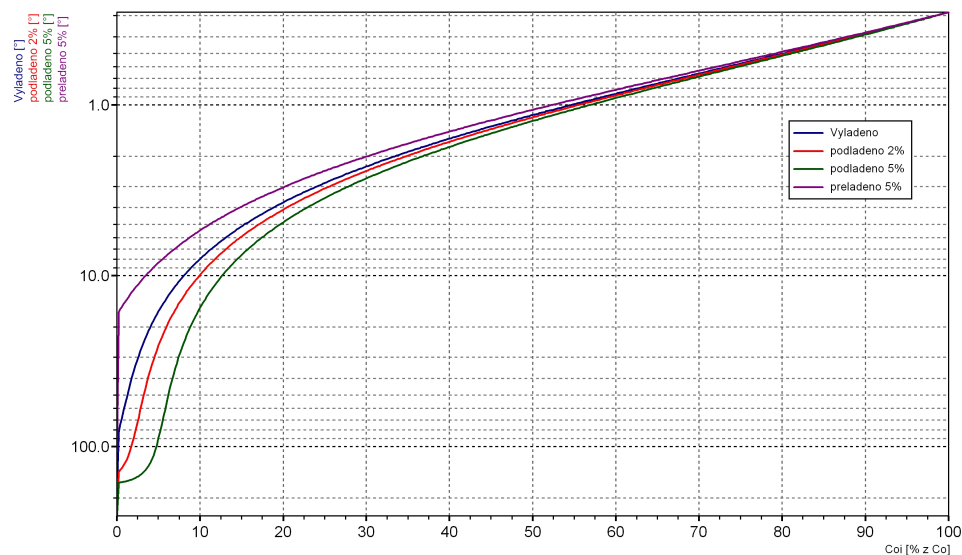


Obr. 12 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s uzlem uzemněným přes induktivní reaktanci v době zemního spojení ve vývodu, kde vlastní kapacitní proud vývodu představuje významný podíl celkového zemního kapacitního proudu sítě, vliv připínání sekundárního odporu R_2 se projeví na vektorové natočení nulové složky proudu vývodu I_{0i} vůči nulové složce napětí U_0

Z grafů Graf 21 a Graf 22 je patrné, že nejlepších výsledků pro zpřesnění funkce zemních směrových ochran je možné dosáhnout zvyšováním činné složky proudu zhášecí tlumivkou. Při reálném zemním spojení je nutné uvažovat i vlastní odpor zemní poruchy. Zemní spojení v kabelových sítích mají zpravidla odpor poruchy na úrovni 20Ω až 50Ω . Odpory jednofázových poruch bývají proudově závislé. Ve většině případů s rostoucí hodnotou poruchového proudu klesá odpor poruchy. V praxi jsem se setkal i s opačným jevem, kdy po zvýšení hodnoty poruchového proudu došlo k nárůstu odporu poruchy. U venkovních vedení musíme počítat s odpory poruchy i několik kiloohmů.



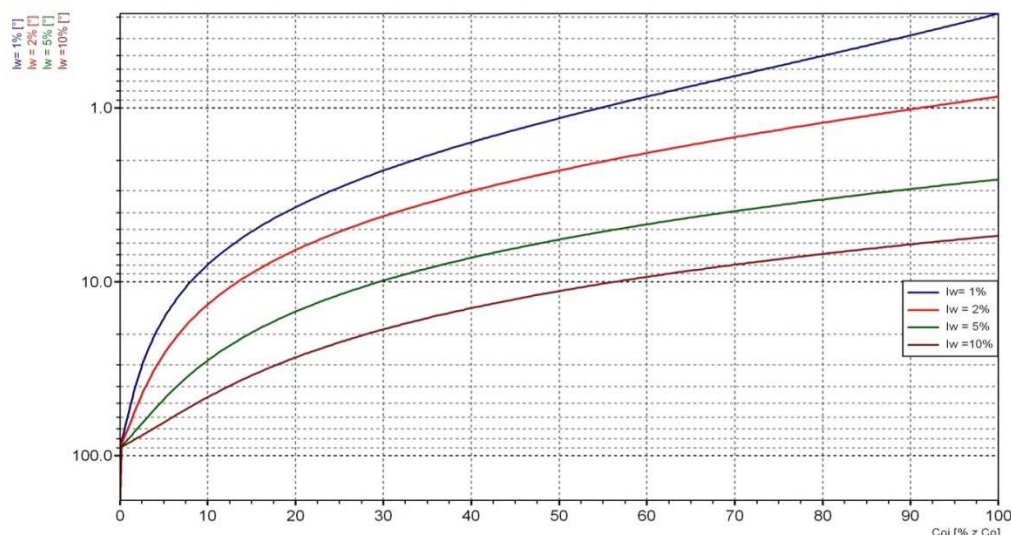
Obr. 13 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s uzlem uzemněným přes induktivní reaktanci v době zemního spojení ve vývodu, kde vlastní kapacitní proud vývodu představuje významný podíl celkového zemního kapacitního proudu sítě, vliv rozladění tlumivky ($I_{L(1)}$ podladění, $I_{L(2)}$ přeladění) ovlivní vektorové natočení nulové složky proudu vývodu I_{0i} ($I_{0(1)}$ podladění, $I_{0(2)}$ přeladění)



Graf 21 Závislost rozdílu úhlu mezi proudem nulové složky napětí u vývodu se zemní poruchou a bez zemní poruchy na procentní velikosti kapacity vývodu vztážené k celkové zemní fázové kapacitě pro různé přesnosti vyladění zhášecí tlumivky (vyladěno, přeladěno – induktivní proud zhášecí tlumivky je větší než zemní kapacitní proud sítě, podladěno – induktivní proud zhášecí tlumivky je menší než zemní kapacitní proud sítě)

Průběhy zobrazené na grafu Graf 21 ukazují, že největší rozdíl vektorového natočení nulové složky proudu mezi vývodem s poruchou a bez poruchy je u sítí s podladěnou zhášecí tlumivkou a při malé hodnotě kapacitního proudu vývodu. Dobré výsledky dostáváme i pro vyladěnou zhášecí tlumivku. U sítí, kde je provozována přeladěná zhášecí tlumivka se bude rozdíl vektorového natočení nulové složky proudu mezi vývodem se zemní poruchou a bez zemní poruchy zmenšovat. Pro rozsáhlé vývody, které představují podstatnou část zemního kapacitního proudu sítě, se rozdíly mezi vyladěnou, podladěnou nebo přeladěnou zhášecí tlumivkou zmenšují. Přesto i u těchto vývodů jsou patrné vlivy zvýšení činné složky poruchového proudu pro identifikaci vývodu se zemní poruchou. Zvýšení činné složky ovlivňuje schopnost rozpoznat vývod se zemní poruchou i u vývodů, které představují významný příspěvek

k celkovému zemnímu kapacitnímu proudu sítě. Tím je umožněno identifikovat vývod se zemní poruchou i v případech, kdy mírné podladění zhášecí tlumivky selhává. Zároveň krátkodobé zvýšení činné složky poruchového proudu zlepšuje podmínky pro činnost zemních ochran i u sítí s vyšší hodnotou fázové napěťové nesymetrie¹.



Graf 22 Závislost rozdílu úhlu mezi proudem nulové složky napětí u vývodu se zemní poruchou a bez zemní poruchy na procentní velikosti kapacity vývodu vztážené k celkové zemní fázové kapacitě pro různé hodnoty velikosti činného proudu zhášecí tlumivky (vliv přidavného odporu)

3.4.3 Zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu

Sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů poskytují nejjednodušší možnost sledování hodnoty celkového zemního kapacitního proudu v síti. Pro zjištění hodnoty zemního kapacitního proudu sítě postačuje vyladit zhášecí tlumivku a odečíst její proudové nastavení. Při vyladěné zhášecí tlumivce její proudové nastavení odpovídá hodnotě zemního kapacitního proudu sítě. Po odpojení vývodu nebo jeho převedení do jiného napájecího systému s následným vyladěním zhášecí tlumivky můžeme z rozdílu proudového nastavení zhášecí tlumivky přesně určit hodnotu zemního nabíjecího proudu vývodu.

Opět není důležitá vysoká přesnost určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Pro zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu postačuje přesnost na úrovni jednotek procent. Je však důležité zjistit, v jakém poměru je hodnota zemní kapacity vývodu k hodnotám ostatních vývodů a k celkové zemní kapacitě sítě. Z pohledu jednoduchého nastavení zemních ochran ve VN síti by měly mít všechny vývody srovnatelnou hodnotu zemního kapacitního proudu. U dlouhých vývodů napájecích větší obce a malá města dochází k nárůstu hodnoty zemního kapacitního proudu. Je to způsobeno nahrazováním venkovního vedení v bytové zástavbě za kabelová vedení. Zvláštním případem jsou příměstské distribuční sítě. V napájecí

¹ Tato problematika se týká zejména venkovních sítí s vysokou hodnotou fázové kapacitní nesymetrie. Vlivem fázové kapacitní nesymetrie dochází k ovlivnění úhlu mezi nulovou složkou napětí a nulovou složkou proudu vývodu a je ovlivněna i amplituda nulové složky proudu. Vše závisí na tom, ve které fázi vznikne zemní spojení. U nesymetrických sítí lze zařízením popsaným v literatuře [12] tyto vlivy plně eliminovat.

rozvodně představuje část napájených vývodů čistě kabelovou sítí a část vývodů zahrnuje smíšené sítě. Zde můžeme sledovat velké rozdíly v nabíjecích kapacitních proudech jednotlivých vývodů. Je nutné mít na zřeteli, že 1 km kabelového vedení svým zemním kapacitním proudem odpovídá přibližně 50 km venkovního vedení. Sledování velikosti zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů je kromě hlediska nastavení ochrany důležité i z pohledu ztrát na vedení. Vždy je důležité sledovat vývody s extrémně vysokou hodnotou zemního kapacitního proudu. U těchto vývodů se mohou projevit zvýšené ztráty na vedení způsobené průtokem nabíjecího kapacitního proudu vývodu.

3.5 Chránění v kompenzovaných sítích

Při zemním spojení bude zemní kapacitní proud v místě poruchy kompenzován induktivním proudem tlumivky. To znamená, že v postižené fázi mezi místem zemní poruchy a napájecím místem nebude protékat zemní kapacitní poruchový proud sítě, ale jeho zbytková hodnota vektorově sečtená s proudem zátěže. Tento zbytkový zemní kapacitní proud v postižené fázi může být při ideálně vyladěné zhášecí tlumivce téměř nulový. Místem poruchy bude protékat pouze činná složka poruchového proudu a proudy vyšších harmonických. V reálném případě bude tento poruchový proud obsahovat ještě zbytkový kapacitní nebo zbytkový induktivní proud. Charakter proudu v postižené fázi bude záviset na stavu vyladění zhášecí tlumivky. V případě, že tlumivka bude podladěná, bude v místě zemního spojení převládat zemní kapacitní proud sítě a zbytkový proud bude mít kapacitní charakter. Při přeladěné zhášecí tlumivce bude převládat induktivní proud zhášecí tlumivky a zbytkový proud bude mít induktivní charakter.

Zemní ochrany musí spolehlivě rozpoznat vývod se zemní poruchou od vývodu bez zemní poruchy. Proto je důležité podrobněji analyzovat a porovnávat poměry mezi vývodem se zemní poruchou a vývody bez zemní poruchy.

Zemní spojení ve vývodu postihuje pouze jednu fázi. V postižené fázi protéká kromě poruchového proudu rovněž proud odebíraný připojenými odběry. Ve fázích bez poruchy protéká nabíjecí kapacitní proud a proud odebíraný připojenými odběry. Vektorovým součtem všech tří fázových proudů vývodu získáme hodnotu nulové složky proudu, jak jsem již popsal v rovnici (3.12). Hodnota nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou může v určitých případech nabývat velmi nízké úrovně. Zároveň může docházet jen k malému rozdílu v natočení vektoru nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou oproti stavu, kdy ve vývodu není zemní porucha. Velmi často se v takových případech jedná o rozdíly na úrovni několika stupňů. To klade vysoké nároky na zemní ochrany.

U tohoto způsobu uzemnění uzlu sítě nelze pro jednoznačné určení vývodu s poruchou použít jednoduché nadproudové kritérium. Tohoto kritéria lze u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů použít pouze ve výjimečných případech. Pro chránění v kompenzované síti nelze rovněž použít stejných principů jako u sítí s izolovaným uzlem. Vynálezce způsobu uzemnění uzlu sítě přes laditelnou zhášecí tlumivku pan Petersen již rok po udělení patentu na plynule laditelnou tlumivku

patentoval první směrovou zemní ochranu pro identifikaci vývodu se zemní poruchou. Metoda byla založena na sledování směru toku činného výkonu nulové složky ve vývodu. Na tomto principu byly až do cca 90. let 20. století konstruovány elektromechanické směrové zemní ochrany. Tyto ochrany využívaly citlivá elektrodynamická relé a podle směru toku činného výkonu nulové složky byl určován vývod se zemní poruchou. České elektromechanické wattmetrické zemní ochrany měly označení GSC. Nevýhodou této metody je kvadratická závislost citlivosti na měřené veličině. Pro vyšší odpory poruchy se účinnost ochran kvadraticky snižuje. Současné elektronické ochrany kromě sledování směru toku činné části nulové složky proudu vyhodnocují také vektorové natočení mezi nulovou složkou napětí a nulovou složkou proudu. Pro kompenzované sítě se využívají i jiné principy vyhodnocení vývodu se zemní poruchou.

Správná funkce zemních ochran souvisí s jejich citlivostí, možností vhodného nastavení i přesností měření nebo výpočtu vektoru nulové složky napětí a proudu. Pro činnost zemních směrových ochran je důležitá přesnost vyhodnocení vektorového natočení nulové složky proudu vůči nulové složce napětí. Určení, zda ve vývodu je zemní porucha může opět v některých případech znamenat vyhodnocení rozdílu úhlu na úrovni jednotek stupňů. Změnu natočení vektoru nulové složky proudu (jak již bylo v předchozích kapitolách popsáno) ovlivňuje poměr vlastního nabíjecího kapacitního proudu vývodu k celkovému zemnímu kapacitnímu proudu sítě. Proto pro správné nastavení zemních směrových ochran je nutné znát alespoň orientačně nabíjecí proudy vývodů. Je to důležité zejména u vývodů, jejichž hodnota zemního kapacitního proudu přesahuje hodnotu cca 15% z celkového zemního kapacitního proudu sítě. Dnes se můžeme setkat i s ochranami, které využívají admitanční a konduktanční metody. Jiné ochrany jsou založené na analýze transientního děje při vzniku zemního spojení. Další používané metody využívají například injektování proudu, periodické (impulsní) změny poruchového proudu atd.

Všechny moderní směrové zemní ochrany jsou založeny na principu přesného měření nulové složky napětí a nulové složky proudu. Důraz je přitom kladen na přesnost měření veličin jak v amplitudě, tak i ve fázi. Naměřena data jsou zpracována v závislosti na použité metodě. Zpracování je záležitostí softwarového vybavení ochrany. Dnešní digitální zemní směrové ochrany umožňují výběr z většího počtu metod identifikace vývodu se zemní poruchou. Při návrhu chránění v konkrétní síti je nutné zvolit vhodnou metodu a optimální nastavení parametrů ochrany.

3.6 Způsoby měření U_0

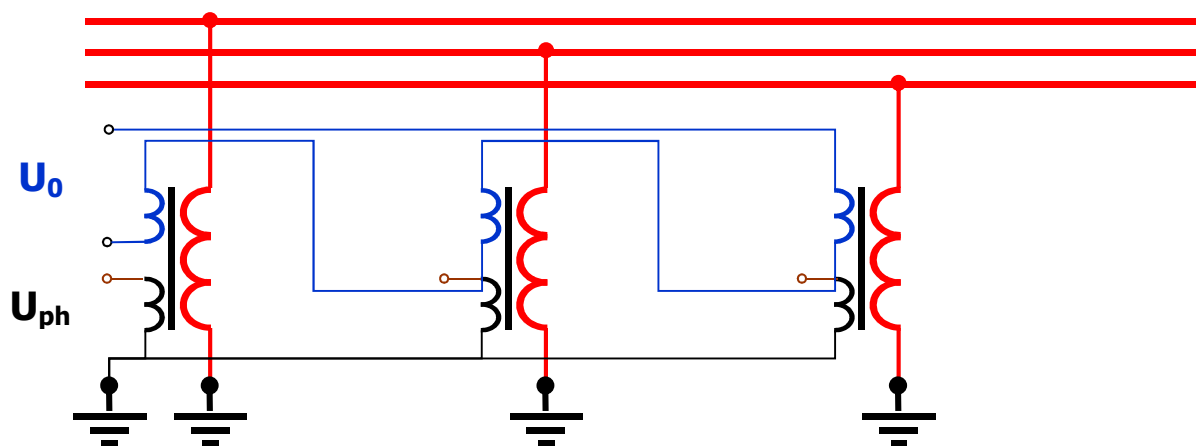
V sítích vysokého napětí se napětí měří pomocí napěťových měřících transformátorů. Tyto transformátory mají standardně sekundární výstupní napětí na úrovni 100 V při jmenovité hodnotě primárního síťového napětí (sdružená hodnota napětí sítě). Fázová napětí jsou měřena napěťovými měřícími transformátory s převodem jmenovitého síťového napětí na zmiňovaných 100 V. Při běžném bezporuchovém stavu VN sítě je na napěťovém měniči fázová hodnota napětí. Proto na sekundární straně napěťových měničů je výstupní napětí na úrovni $100 \text{ V} / \sqrt{3}$. Při

kovovém zemním spojení bude ve fázi postižené zemní poruchou téměř nulové napětí. Napětí uzlu sítě bude mít hodnotu fázového napětí sítě. Ve fázích bez poruchy bude proti zemi sdružená hodnota napětí. Proto napětí na sekundární straně napěťových měřících transformátorů ve fázích bez zemního spojení bude na úrovni 100 V.

Nulovou složku napětí získáme vektorovým součtem všech tří fázových napětí. Vektorový součet fázových napětí je často měřen na terciálním vinutí měřících transformátorů zapojených do otevřeného trojúhelníka Obr. 14.

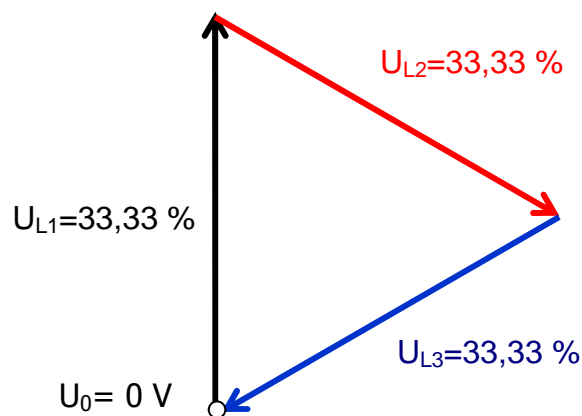
$$\vec{U}_0 = \frac{\vec{U}_{L1} + \vec{U}_{L2} + \vec{U}_{L3}}{3} \quad (V; V, V, V)$$

(3.16)



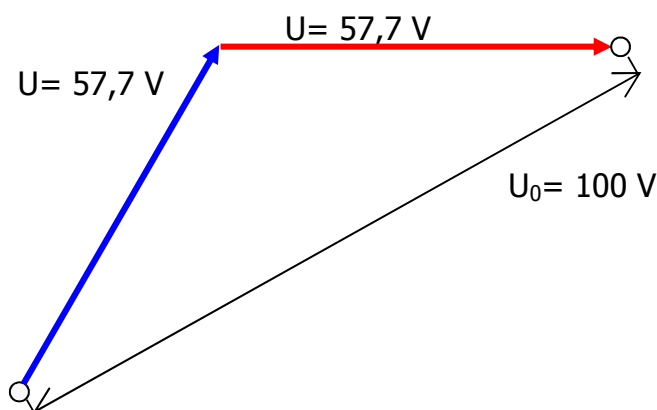
Obr. 14 Zapojení měřících transformátorů napětí (modře je znázorněno zapojení terciálního vinutí do otevřeného trojúhelníka pro měření nulové složky napětí, černá zobrazuje zapojení sekundárních obvodů měření fázového napětí, červeně je znázorněno zapojení primárních obvodů)

Třetí (terciální) vinutí zapojené do otevřeného trojúhelníka je navrženo tak, aby při jmenovité hodnotě sítě bylo na sekundární straně napětí 100/3 V. Při stavu, kdy na primární straně napěťového měřícího transformátoru bude jmenovité fázové napětí sítě, pak na terciálním vinutí napěťového měřícího transformátoru naměříme právě 33,33 V. To je běžný bezporuchový stav sítě. Při běžném bezporuchovém stavu je při zapojení terciálních vinutí napěťových měřících transformátorů do otevřeného trojúhelníka úhel mezi jednotlivými fázovými napětími 60°. Budou-li mít jednotlivá napětí stejnou velikost, bude napětí měřené na svorkách otevřeného trojúhelníku nulové (viz vektorový diagram na obrázku Obr. 15).



Obr. 15 Vektorový součet fázových napětí zapojených do otevřeného trojúhelníka v ideálně symetrické síti

Bude-li na primárním vinutí napěťového měřicího transformátoru právě sdružená hodnota napětí proti zemi, naměříme na svorkách terciálního vinutí napětí $100/\sqrt{3} \text{ V}$. Hodnota terciálního napětí je $\sqrt{3}$ krát vyšší než v bezporuchovém stavu. Při zemním spojení bude ve fázích bez poruchy na terciálním vinutí napětí cca $57,7 \text{ V}$. Zároveň se změní nejen amplituda měřených napětí, ale i jejich vzájemné vektorové natočení. Při kovovém zemním spojení bude měřeno napětí pouze u fází bez zemní poruchy (fáze se zemní poruchou bude mít nulovou hodnotu napětí). Při vektorovém součtu fázových napětí se uplatní pouze dvě fázová napětí, která budou mít hodnotu na úrovni sdruženého napětí. Tato napětí při vektorovém součtu svírají mezi sebou úhel 120° (viz vektorový diagram na obrázku Obr. 16).



Obr. 16 Vektorový součet fázových napětí zapojených do otevřeného trojúhelníka při kovovém zemním spojení v síti

Standardně jsou v rozvodnách instalovány měřicí transformátory napětí se třemi vinutími a s převodem umožňující měřit fázová napětí a nulovou složku napětí. Převod terciálního vinutí umožňuje, aby při elektricky blízkém kovovém zemním spojení měla nulová složka napětí právě hodnotu 100 V . Proto můžeme uvažovat hodnotu nulové složky napětí, měřenou na terciálním vinutí zapojeného do otevřeného trojúhelníka s napěťovým převodem dle (3.17), jako procentní hodnotu z fázového napětí sítě. V mnoha případech se udává nulová složka napětí pouze jako procentní hodnota fázového napětí sítě.

Převod napěťových měřících transformátorů je:

$$\frac{U_s}{\sqrt{3}} / \frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3}$$

(3.17)

Pro systémy chránění je důležité přesné měření nulové složky napětí. Při zemním spojení bude nulová složka napětí zvýšená. I ve velmi symetrických kabelových sítích se zpravidla nastavují zemní ochrany na vyšší hodnotu nulové složky napětí než 10% jmenovité hodnoty fázového napětí sítě. Při zemním spojení bude úroveň měřené hodnoty nulové složky napětí vyšší než 10% z fázové hodnoty napětí a při kovovém zemním spojení bude na úrovni 100% z fázové hodnoty napětí. Stále platí, že pro systémy chránění je důležitá přesnost měření nulové složky napětí. Chyba měření je ovlivněna chybou měření vlastní ochrany a chybou způsobenou měřícími transformátory napětí. Standardní měřící vstupy ochrany jsou na úrovni 0 V až 100 V. Pro identifikaci vývodu se zemní poruchou není tak důležitá amplitudová chyba měření nulové složky napětí, ale její fázová chyba. Amplitudová chyba nulové složky napětí ovlivňuje aktivaci zemní ochrany po překročení komparační meze nulové složky napětí nastavené pro identifikaci vzniku zemního spojení v síti. Chyba měření fáze nulové složky napětí může způsobit chybné působení zemních směrových ochrany. V důsledku chybného působení zemní ochrany může být zemní porucha signalizována i u vývodu bez poruchy nebo může dokonce dojít k vypnutí vývodu. Oproti tomu u vývodu se zemní poruchou nemusí ochrana tuto zemní poruchu vůbec signalizovat. Problém měření nulové složky napětí na otevřeném trojúhelníku spočívá v tom, že výslednou přesnost ovlivňují až tři měřící napěťové transformátory.

3.6.1 Amplitudová chyba měřících transformátorů napětí

Měření pomocí měřících transformátorů napětí je zatíženo jak amplitudovou, tak i fázovou chybou. Nulová složka napětí je dána vektorovým součtem tří fázových napětí. Nejprve jsem se zaměřil na problematiku, jakým způsobem je ovlivněna fázová chyba měření nulové složky napětí na otevřeném trojúhelníku amplitudovou chybou jednotlivých měřících transformátorů napětí. Pro jednoduchost jsem předpokládal, že ve fázích bez poruchy je na obou měřících transformátorech stejná amplitudová chyba. Dále jsem uvažoval, že zemní spojení vznikne ve fázi L_1 . Pokud mají odchylnky napětí stejná znaménka, můžeme naměřená sekundární napětí vyjádřit rovnicí (3.18).

$$U_2 = U (1 + dU)$$

$$U_3 = U (1 + dU)$$

(3.18)

Kde	U	ideální hodnota sekundárního napětí měřícího napěťového transformátoru
	U_2, U_3	změřená hodnota sekundárního napětí měřícího napěťového transformátoru
	dU	chyba měření.

Nulovou složku napětí jsem vyjádřil pomocí kosinové věty jako vektorový součet fázových napětí U_2 a U_3 .

$$U_0 = \sqrt{(U(1+dU))^2 + (U(1+dU))^2 - 2U^2(1+dU)^2 \cos(120^\circ)}$$

$$U_0 = \sqrt{3U^2(1+dU)^2}$$

(3.19)

Pro určení úhlu nulové složky napětí jsem vycházel z vektorového součtu zobrazeného na obrázku Obr. 16. Ve vektorovém součtu je známá velikosti obou fázových napětí. Velikost nulové složky napětí jsem vyjádřil vztahem (3.19). Fázová napětí svírají úhel 120° . Úhel nulové složky napětí jsem označil jako úhel α . Dále jsem ověřil, zda při stejné amplitudové chybě u obou fázových napětí získám správnou hodnotu úhlu α , která je 30° .

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma)} = \frac{U(1+dU)}{\sqrt{U^2[(1+dU)^2 + (1+dU)^2 - 2(1+dU)(1+dU)\cos(\gamma)]}}$$

$$\sin(\alpha) = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{U^2(1+dU)^2}{3U^2(1+dU)^2}}$$

(3.20)

Kde U ideální hodnota sekundárního napětí měřících napěťových transformátorů
 dU chyba měření
 α úhel nulové složky napětí (teoretická hodnota je 30°)
 γ úhel fázových napětí při zemním spojení (teoretická hodnota je 120°).

Úpravou rovnice (3.20) a jejím vyčíslením jsem získal hodnotu úhlu nulové složky napětí (viz. vztah (3.21)).

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{2}\right) = 30^\circ$$

(3.21)

Z odvození (3.20) a vztahu (3.21) je patrné, že pokud měřící napěťové transformátory budou mít stejné odchylky měření se stejným znaménkem, nebudou mít tyto chyby měření vliv na přesnost měření vektorového natočení nulové složky napětí U_0 .

Dále jsem předpokládal, že odchylky napětí budou opět stejně velké, ale budou mít opačnou orientaci. Naměřená sekundární napětí měřících transformátorů napětí jsem vyjádřil vztahem (3.22).

$$U_2 = U_{2n}(1+dU)$$

$$U_3 = U_{2n}(1-dU)$$

(3.22)

Napětí dle vztahu (3.22) jsem použil pro vyjádření sinu úhlu α obdobně jako u vztahu (3.20).

$$\sin(\alpha) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3U(1+2dU+dU^2)}{U[(1+dU)^2 + (1-dU)^2 + (1+dU)(1-dU)]}}$$

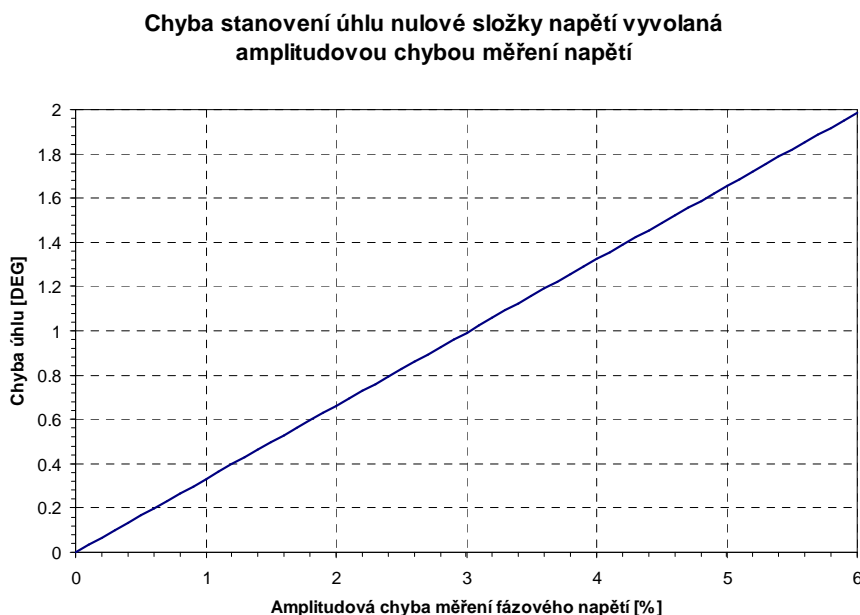
(3.23)

Za předpokladu, že úhel mezi fázovým napětím při vektorovém součtu v otevřeném trojúhelníku je 120° (Obr. 30), můžeme pomocí sinové věty vyjádřit úhel α u měřené nulové složky napětí U_0 . Jak jsem již uvedl, v ideálním případě bude úhel α dosahovat hodnoty 30° . Tomuto úhlu odpovídá hodnota $\sin = 0,5$. Z rovnice (3.24) je patrné, že pokud bude chyba měření dU různá od nuly, ovlivní chybu měření i hodnotu úhlu α u měřené nulové složky napětí. Je třeba znovu připomenout, že pokud budeme počítat chránění vývodu s velkou fázovou zemní kapacitou, může změna úhlu i o několik desetin stupně znamenat výrazné zhoršení podmínek pro zemní ochrany.

$$\sin(\alpha) = \frac{1}{2} \frac{1 + dU}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} dU^2}}$$

(3.24)

Z rovnice (3.24) vyplývá, že rozdílná amplitudová chyba měřících transformátorů napětí ovlivní fázovou chybu měřené nulové složky napětí. Na grafu Graf 23 jsem zobrazil fázovou chybu měření nulové složky napětí pro zjednodušující podmínky dané vztahem (3.22).



Graf 23 Chyba stanovení úhlu nulové složky napětí vyvolaná amplitudovou chybou měření napětí na otevřeném trojúhelníku za podmínky, že oba napěťové měřící transformátory mají ve fázích bez zemní poruchy stejně velkou amplitudovou chybu měření, ale s opačným znaménkem

Z grafu Graf 23 je patrné, že amplitudová chyba měření napětí na úrovni 0,5% nebude vyvolávat významnější fázovou odchylku. Avšak amplitudová chyba měření napětí na úrovni 3% již může způsobit odchylku úhlu nulové složky napětí větší než 1° . Odchylka úhlu měřené hodnoty nulové složky napětí může způsobovat chybné působení zemní ochrany, zejména u vývodů, jejichž hodnota zemní fázové kapacity přesahuje cca 15% hodnoty zemní fázové kapacity sítě. Avšak u vývodů, jejichž zemní kapacitní proud představuje méně než 10% z celkového zemního kapacitního proudu,

nemusí natočení vektoru nulové složky napětí i o několik stupňů znamenat významnější problém pro funkci zemních směrových ochran.

3.6.2 Fázová chyba měřících transformátorů napětí

Přesnost měření nulové složky napětí ovlivňuje i fázová chyba napěťových měničů. Při kovovém zemním spojení mají vektory napětí vzájemně svírat úhel 120° . Fázová chyba měřících transformátorů napětí zapříčiní, že vektory napětí budou mít jiný úhel než je 120° . Vliv fázové chyby napěťových měničů ovlivňuje jak amplitudovou, tak i fázovou přesnost měření nulové složky napětí. Při zemním spojení opět není příliš důležitá amplitudová chyba v porovnání s fázovou chybou měření nulové složky napětí.

Amplitudu nulové složky napětí jsem určil pomocí kosinové věty. Pro výpočet jsem použil hodnotu fázového napětí sniženou o převod měřícího napěťového transformátoru pro otevřený trojúhelník.

$$U_0 = \sqrt{\frac{U_{L1}^2}{3} + \frac{U_{L2}^2}{3} - \frac{2U_{L1}U_{L2}}{3} \cos(\gamma)}$$

(3.25)

Kde U_0 velikost nulové složky napětí
 U_{L1}, U_{L2} fázová napětí
 $\cos(\gamma)$ úhel mezi U_{L1} a U_{L2} .

Dále jsem vycházel z předpokladu, že fázová napětí ve fázích bez poruchy budou mít stejnou hodnotu. V tomto případě jsem mohl vztah (3.25) dále zjednodušit. Zároveň jsem do zmíněného vztahu zavedl fázovou chybu měřících transformátorů napětí $d\gamma$.

$$\cos(\gamma + d\gamma) = \cos(\gamma) \cos(d\gamma) - \sin(\gamma) \sin(d\gamma)$$

(3.26)

Pro úhel $\gamma = 120^\circ$ jsem upravil vztah (3.26) a po dosazení do rovnice (3.25) jsem získal vztah pro velikost nulové složky napětí (3.27).

$$U_0 = \frac{U_f}{\sqrt{3}} \sqrt{2 + \cos(d\gamma) + \sqrt{3} \sin(d\gamma)}$$

(3.27)

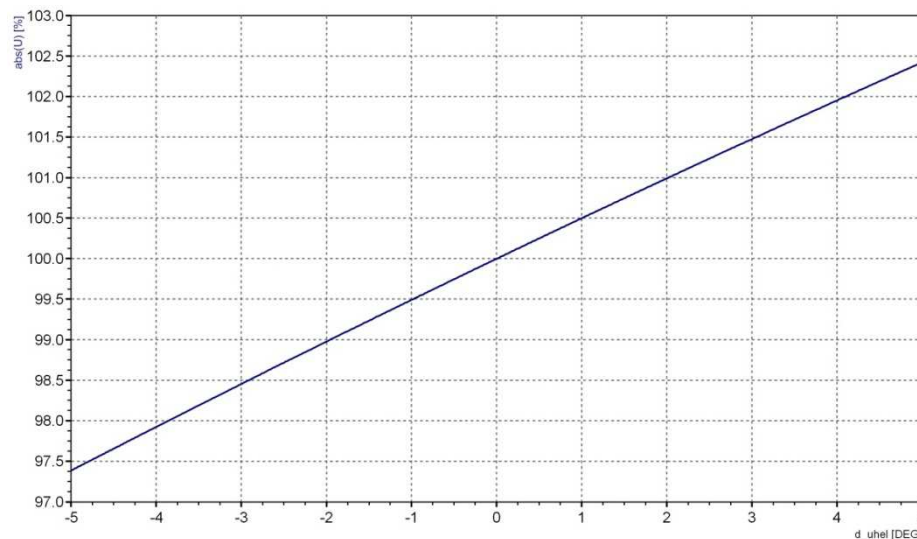
Za předpokladu, že je ve vztahu (3.27) nulová fázová chyba, potom $d\gamma = 0$. V tomto případě bude nulová složka napětí mít stejnou hodnotu jako je fázová hodnota napětí v síti. V našem případě na svorkách otevřeného trojúhelníka při jmenovitém napětí v síti naměříme právě 100 V.

$$U_0 = \frac{U_f}{\sqrt{3}} \sqrt{3} = U_f$$

(3.28)

Na následujícím grafu Graf 24 jsem zobrazil vliv fázové chyby napěťových transformátorů zapojených do otevřeného trojúhelníka na amplitudovou přesnost

měření nulové složky napětí. Z grafu je patrné, že chyba úhlu mezi vektory fázových napětí o velikosti 1° způsobí chybu amplitudy nulové složky napětí cca 0,5%. Takováto amplitudová chyba měření není pro zemní ochrany podstatná.



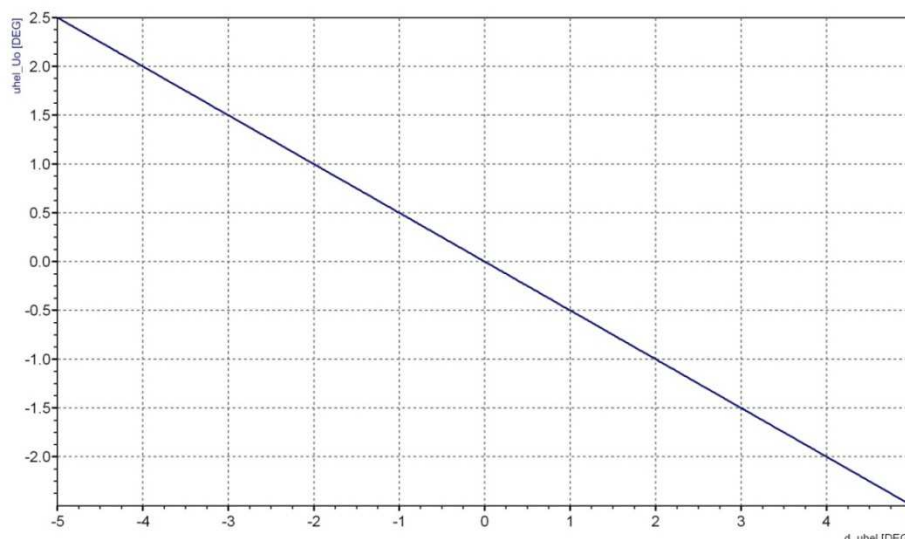
Graf 24 Vliv fázové chyby měřících napěťových transformátorů se zapojeným vinutím do otevřeného trojúhelníka na procentní amplitudovou chybu měření nulové složky napětí

Fázová chyba napěťových transformátorů rovněž ovlivňuje přesnost určení fáze nulové složky napětí (Graf 25). Zde jsem ověřil, že fázová chyba napěťových měničů způsobená změnou úhlu mezi vektory napětí o velikosti 1° zapříčiní fázovou chybu určení nulové složky napětí na otevřeném trojúhelníku o velikosti až cca $0,5^\circ$. Největší vliv chyby měření se projevuje v případě, že pouze jeden z napěťových měničů vykazuje chybu měření úhlu napětí. Obdobný případ nastane v případě, že napěťové měniče mají stejně orientovanou chybu měření úhlu. V případě, že napěťové měniče mají rozdílnou orientaci chyby měření úhlu, tyto chyby se vzájemně eliminují.

Fázová chyba měřících transformátorů napětí je tedy pro přesnost měření úhlu nulové složky napětí závažnější než amplitudová chyba měřících napěťových transformátorů, protože amplitudová chyba způsobuje menší změnu úhlu U_0 v porovnání s fázovou chybou.

Z hlediska napěťových měřících transformátorů je nutné používat pro zapojení do otevřeného trojúhelníka vždy stejné typy napěťových transformátorů (stejně převody, stejné výkony a třídy přesnosti). Nejlépe je používat napěťové transformátory od stejného výrobce.

Moderní směrové zemní ochrany si nulovou složku napětí vypočítávají z měřených hodnot fázových napětí. Pak není pro měření nulové složky napětí vyžadováno zapojení vinutí napěťových měničů do otevřeného trojúhelníka. Na měřící vstupy ochrany jsou přivedena tři fázová napětí. Při zpracování měřeného fázového napětí si ochrana na základě vektorového součtu fázových napětí vypočte nulovou složku napětí. I v tomto případě bude chyba napěťových měničů ovlivňovat výsledné určení vektoru nulové složky napětí. Proto je nutné při použití zemních směrových ochran klást velký důraz na přesnost a kvalitu použitých fázových měřících transformátorů napětí.



Graf 25 Vliv fázové chyby měřicího transformátoru napětí na chybu určení fáze nulové složky napětí měřené na svorkách otevřeného trojúhelníka

Další možností měření nulové složky napětí je měření napětí uzlu sítě proti zemi. Tato metoda vyžaduje pouze jeden měřicí transformátor napětí. Uzel sítě může mít proti zemi maximálně hodnotu fázového napětí. Proto se zde používá měřicí transformátor napětí s převodem z fázové hodnoty napětí sítě na 100 V. Přesnost měření je ovlivněna pouze přesností jednoho měřicího transformátoru napětí. Při výměně napěťového měřicího transformátoru již odpadá problém volby vhodného typu měniče s ohledem na ostatní napěťové měniče. Směrové zemní ochrany jsou standardně vybaveny pro přímé měření nulové složky napětí. Použití této metody měření nulové složky napětí umožňuje omezit vliv fázové chyby napěťových měřicích transformátorů na přesnost vyhodnocení vývodu se zemní poruchou.

3.7 Způsoby měření I_0

Měření nulové složky proudu ve vývodu je nejdůležitější pro identifikaci vývodu s jednofázovou poruchou v síti. Pro měření nulové složky proudu vývodu máme více možností. Hlavním problémem je opět zajištění požadované přesnosti měření. Při jednofázových poruchách v sítích s přímo uzemněným uzlem bude postiženou fází od místa napájení (napájecí transformátor) až do místa zkratu protékat zkratový proud. Hodnota zkratového proudu je ovlivněna impedancí sítě a odporem poruchy. Velikost poruchového proudu je zpravidla mnohonásobně vyšší než jmenovité zatížení vývodu. Pro měření lze využívat běžných fázových měřicích transformátorů proudu. Přesnost měření velkých poruchových proudů je ovlivněna zatížením proudových transformátorů. Pro měření těchto proudů je důležitý údaj o hodnotě nadproudového čísla použitých měřicích transformátorů proudu a jejich skutečném zatížení.

V síti s neúčinně uzemněným uzlem nebo v síti s izolovaným uzlem dochází při jednofázové zemní poruše k výraznému omezení hodnoty poruchového proudu. Pokud je uzel sítě uzemněný přes uzlový odpor s nízkou hodnotou odporu, je velikost poruchového proudu na úrovni jmenovitého proudu měřicích transformátorů proudu. U sítě s izolovaným uzlem a zejména u sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů bývá poruchový proud výrazně nižší než je jmenovitý proud měřicího

transformátoru proudu. To klade zvýšené nároky na přesnost měření nulové složky proudu. Zejména při použití zemní směrových ochran v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů je nutné přesně měřit úhel a velikost nulové složky proudu.

Při měření nulové složky proudu v síti s neúčinně uzemněným uzlem nebo s izolovaným uzlem je nutné při dimenzování měřících obvodů a připojení přístrojů (ochrany, měřící přístroje proudu) počítat s hodnotou dvoufázového zemního zkratového proudu. V případě rozšíření jednofázové zemní poruchy na dvoufázový zemní zkrat, kdy obě místa poruchy jsou v různých vývodech, bude vývodem s poruchou protékat zkratový proud pouze v jedné fázi. Proto celá proudová cesta pro měření nulové složky proudu musí být dimenzována i na tuto hodnotu zkratového proudu.

Podle teorie složkových soustav platí, že nulová složka proudu je dána třetinou vektorového součtu fázových proudů. U analogových ochran, kde se analogově sčítaly vektory proudů, docházelo k zavlečení chyb. Pro zpracování vektorů fázových proudů byly používány analogové filtry. Nulová složka proudu byla vyhodnocována pouze pro proudy 1. harmonické, tj. proudy v okolí frekvence 50 Hz. Analogové obvody byly teplotně závislé. Závislost byla způsobena změnou parametrů filtračních obvodů. Rovněž diskrétní součástky měnily své parametry se stářím ochrany. Výrazné změny parametrů nastávaly zejména u kondenzátorů. Z těchto důvodů byly analogové ochrany vybaveny dalšími složitými obvody, které obsahovaly různé kompenzační obvody pro eliminaci chyb a teplotní závislosti.

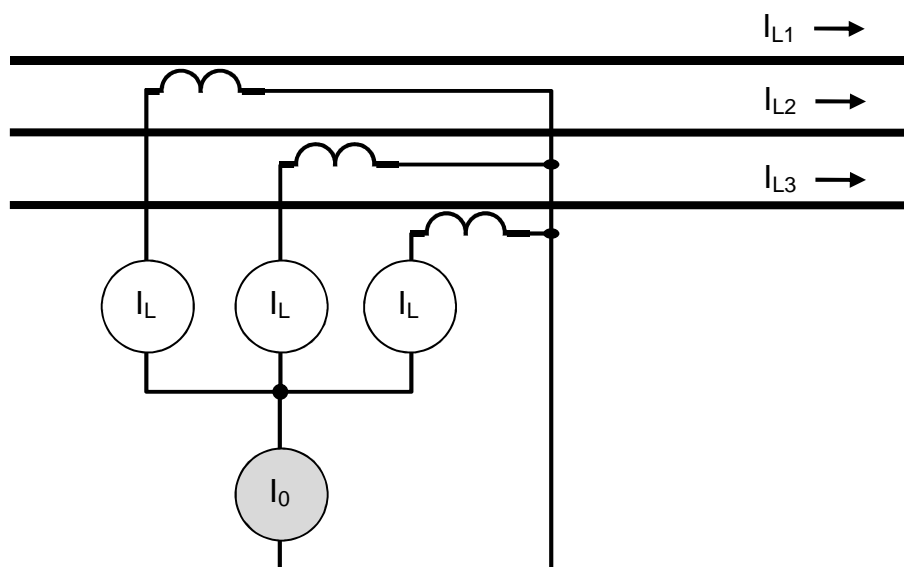
Nulovou složku proudu si moderní ochrany dovedou vyhodnotit na základě měření vektorů fázových proudů dle vztahu (3.29). Zpracování fázových proudů a vyčíslení nulové složky proudu je v číslicových ochranách relativně jednoduchá úloha. Při výpočtu nulové složky proudu nevzniká žádná významná chyba.

$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{I}_{L1} + \vec{I}_{L2} + \vec{I}_{L3}}{3}$$

(3.29)

Další možností je přímé měření nulové složky proudu vývodu. Pro přímé měření nulové složky proudu můžeme použít různá zapojení proudových měničů. Zapojení vycházející ze schématu na Obr. 17 je velmi časté u běžných vývodů VN sítí. Výhodou je jednoduchost zapojení a využití stávajících fázových transformátorů proudu. Nulová složka proudu je měřena na úrovni odpovídající standardnímu proudovému výstupu měřícího transformátoru proudu 1 A nebo 5 A. Chyba měření nulové složky proudu je ovlivněna přesností jednotlivých měřících transformátorů proudu. Přesnost měření je u běžných měřících transformátorů proudu uváděna pro úroveň 80% až 120% jejich proudového zatížení. Při nižším proudu protékajícím měřícím transformátorem proudu se zvětšuje jak amplitudová, tak i fázová chyba měřeného proudu. Dalším faktorem ovlivňujícím přesnost měření nulové složky proudu je převod měřících transformátorů proudu. Pro velké převody, například 600 A/1 A (5A) a větší, je nutné si uvědomit, že při třídě přesnosti měřícího transformátoru proudu 0,2 může být primární chyba měření až na úrovni 1,2 A. Při

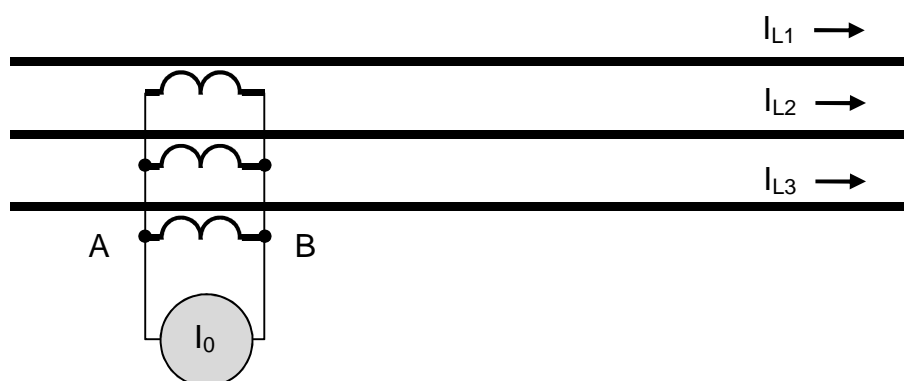
větším proudovým převodu 1000A / 1A (5A) a nižší přesnosti měřících transformátorů proudu bude chyba měření nulové složky proudu ještě vyšší. Tato chyba měření nulové složky proudu může dosahovat úrovně jednofázových poruchových proudů v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů. Zapojení pro měření nulové složky proudu dle obrázku Obr. 17 může způsobit chybu měření a snížení spolehlivosti funkce zemních směrových ochran. Chyby měření nulové složky proudu, které ovlivňují funkci zemních směrových ochran, lze očekávat zejména u velkých proudových převodů a u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde dosahuje poruchový proud velmi nízkých hodnot. Dalším negativem ovlivňujícím přesnost měření je nesymetrické proudové zatížení fází. Ve vývodu s vyšší hodnotou zemního kapacitního proudu bude v případě zemního spojení docházet k nesymetrickému průtoku fázových proudů. Je to způsobeno vlivem průtoku nabíjecího proudu vývodu a změnou vektorového natočení fázových napětí. Touto vlastností se budu podrobněji zabývat v kapitole 8. Při zapojení měřících transformátorů proudu dle schématu na Obr. 17 je nutné věnovat zvýšenou pozornost vývodům s vysokou hodnotou zemního nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Problémy s nastavením ochran lze rovněž očekávat v sítích s nízkou hodnotou zemního kapacitního proudu a u vývodů s vyšší hodnotou převodu měřícího transformátoru proudu. Metoda měření nulové složky proudu dle schématu na Obr. 17 je vhodná pro menší proudové převody měřících transformátorů proudu a symetrické proudové zatížení vývodu. Důležité je, aby byly použity měřící transformátory proudu se stejnými parametry.



Obr. 17 Schéma zapojení měřících transformátorů proudu pro měření nulové složky proudu I_0

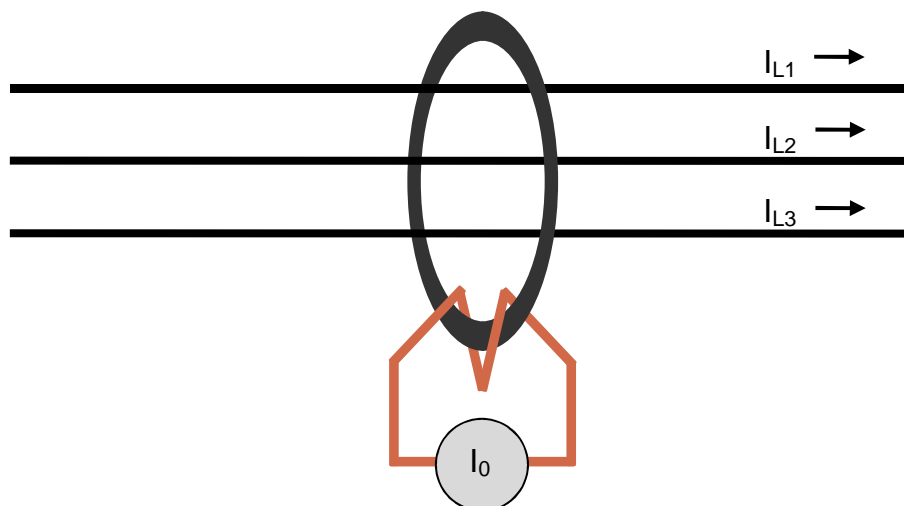
Pro zvýšení přesnosti měření nulové složky proudu, a to i ve vývodech s velkým proudovým zatížením, je definováno Hollmgreenovo zapojení měřících transformátorů proudu. V tomto zapojení je standardní proudový převod definován pro primární proud 100 A a sekundární proudu 1 A. Použití jmenovitého primárního proudu 100 A i pro vývody s větším proudovým zatížením nezpůsobuje jejich přetěžování. To je dáno způsobem zapojení a nízkou hodnotou zatížení proudových měničů. Je zde však nutné dodržet základní pravidla pro propojení fázových měřících transformátorů

proudu. Důležité je použití dostatečného průřezu propojovacího vodiče a krátká vzdálenost mezi jednotlivými fázovými měřicími transformátory proudu. Fázové proudy se vektorově sčítají v bodech A a B viz Obr. 18. Obvodem pro měření nulové složky proudu protéká pouze ekvivalentní hodnota nulové složky proudu. Tento obvod není zatěžován hodnotami fázového proudu. Pouze při dvoufázovém zemním zkratu, kdy zemní poruchy budou na rozdílných vývodech, se v nulové složce proudu objeví hodnota sekundárního proudu odpovídající hodnotě dvoufázového zkratového proudu sítě. Převod měřících transformátorů proudu 100 A / 1 A umožňuje přesné měření nulové složky proudu. Opět zde platí podmínka pro použití stejných parametrů fázových měřících transformátorů proudu. Jedná se o doporučené zapojení pro sítě, kde jsou problémové vývody a je nutné využívat přesných a citlivých zemních směrových ochran. Nevýhodou metody je nutnost instalace samostatných měřících transformátorů proudu pro měření nulové složky proudu. V tomto zapojení lze použít i jiné proudové převody.



Obr. 18 Schéma zapojení měřících transformátorů proudu pro měření nulové složky proudu I_0 podle Hollmgreenova zapojení

Součtové transformátory proudu jsou s výhodou využívány také v kabelových sítích. Magnetické jádro obepíná všechny silové vodiče, a to i u paralelních kabelů viz Obr. 19. Je nutné dodržet podmínku, že stínění kabelů nesmí procházet magnetickým oknem obepínajícím pracovní vodiče. V magnetickém jádře součtového transformátoru proudu se uzavírá součtový magnetický tok vybudovaný proudem protékajícím fázovými vodiči. Pro mezifázové zatížení platí, že vektorový součet všech proudů dává nulovou hodnotu. V případě, že se proud z některé fáze bude uzavírat přes zem, vznikne při vektorovém součtu fázových proudů rozdíl, který vybudí v magnetickém jádru součtového transformátoru proudu magnetický tok. Ve vinutí součtového transformátoru proudu se pak bude indukovat proud úměrný převodu součtového transformátoru proudu. Tento proud odpovídá nulové složce proudu. Jedná se o nejpřesnější metodu měření nulové složky proudu. Tuto metodu lze uplatnit pouze na kabelová vedení, kde je možné všechny fázové vodiče provléci oknem magnetického obvodu součtového transformátoru proudu. U vývodů s velkým zatížením, kde je nutné použít více paralelních kabelů, mohou nastat problémy s velikostí magnetického okna pro provlečení více kabelů.



Obr. 19 Schéma zapojení součtového měřicího transformátoru proudu pro měření nulové složky proudu I_0

3.7.1 Přesnost měření nulové složky proudu

Zapojení pro měření nulové složky proudu podle obrázků Obr. 17 a Obr. 18 jsou ovlivněna přesností fázových proudových měničů. Zapojení dle obrázku Obr. 19 je ovlivněno pouze kvalitou součtového transformátoru proudu. Volba způsobu měření nulové složky proudu může výrazným způsobem ovlivnit funkci zemních ochran. Proto je nutné vždy správně posoudit vhodný způsob měření nulové složky proudu s ohledem na předpokládaný způsob chránění a rozložení zemních kapacitních proudů mezi jednotlivé vývody. U měřicích transformátorů proudu je nutné vždy uvažovat s chybou měření. Problémem může být i to, že absolutní chyba měřicího transformátoru proudu je proudově závislá. Tím chybu měření ovlivňuje mnoho faktorů jako je minimální zatížení, přetížení proudových měřicích transformátorů, nesymetrické proudy atd.

3.7.2 Amplitudová chyba měření proudu

Nejprve jsem se zaměřil na přesnost měření nulové složky proudu pomocí fázových transformátorů proudu zapojených dle obrázků Obr. 17 a Obr. 18. Vyšel jsem z předpokladu symetrického zatížení, kdy vedením protéká ve všech fázích stejně veliký proud a fázové proudy jsou mezi sebou posunuty o 120° . Pro měření proudu jsem použil měřicí transformátory proudu s proudovým převodem „ p_i “. Chybu převodu měřicího transformátoru proudu „ dp_i “ jsem uvažoval pouze u jednoho z měřicích transformátorů proudu. Dále jsem předpokládal, že chyba je ve fázi L_3 . Při měření nulové složky proudu nezatížené chybou měřicích proudových transformátorů bude mít nulová složka proudu nulovou hodnotu. Při předpokládané chybě měření naměříme nulovou složku proudu I_{0E} , kterou jsem vyjádřil následujícím vztahem (3.30).

$$\vec{I}_{0E} = \frac{p_i \vec{I}_{L1} + p_i \vec{I}_{L2} + p_i (1 + dp_i) \vec{I}_{L3}}{3}$$

(3.30)

Za zmíněného předpokladu souměrných fázových proudů se vzájemným posunem o 120° mohu rovnici (3.30) dále upravit a zjednodušit.

Po úpravě dostáváme:

$$\vec{I}_{0E} = p_i I_L \frac{\vec{a}^2 dp_i}{3} = p_i I_L dp_i \frac{\vec{a}^2}{3} \quad (3.31)$$

Chyba převodu jednoho ze tří proudových transformátorů zapojených dle obrázků Obr. 17 a Obr. 18 ovlivňuje nejen velikost, ale i úhlovou chybu naměřené hodnoty nulové složky proudu I_{0E} .

Dále jsem uvažoval případ, kdy chyba převodu je u dvou ze tří proudových transformátorů. Pro jednoduchost jsem pro tyto měřící proudové transformátory použil stejně velkou chybu převodu „ dp_i “, a to ve fázi L_2 se znaménkem „+“ a ve fázi L_3 se znaménkem „-“. Výslednou hodnotu nulové složky proudu jsem určil vektorovým součtem všech fázových proudů.

$$\vec{I}_{0E} = \frac{I_L + (1 + dp_i)\vec{a}I_L + (1 - dp_i)\vec{a}^2 I_L}{3} \quad (3.32)$$

Po úpravě a zjednodušení vztahu (3.32) jsem získal rovnici pro výpočet chybové hodnoty nulové složky proudu (3.33).

$$\begin{aligned} \vec{I}_{0di} &= jI \frac{dp_i}{\sqrt{3}} \\ |I_{0di}| &= I \frac{dp_i}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Vztah (3.33) udává velikost nulové složky proudu, která vznikne, budeme-li měřit fázový proud v jedné fázi s chybou $+dp_i$ a v další fázi s chybou $-dp_i$. Vztah (3.33) má lineární průběh a je závislý na velikosti proudu a chybě převodu. Z rovnice je patrné, že chyba měření I_0 se projevuje jak ve velikosti, tak i v úhlu. Abychom mohli spolehlivě detekovat skutečnou nulovou složku proudu vývodu, musí být absolutní velikost nulové složky proudu větší než je dvojnásobek absolutní hodnoty nulové složky proudu. Proto při požadavku měření nulové složky proudu v zapojení dle Obr. 17 a Obr. 18 na měřících transformátorech s velkým proudovým převodem, musíme volit vyšší třídu přesnosti.

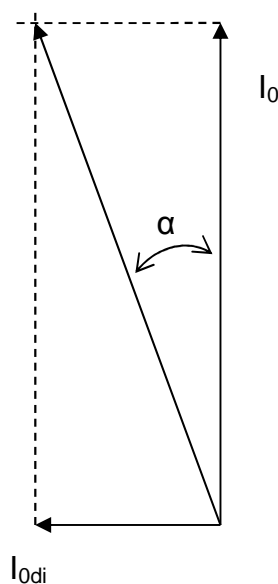
$$I_0 > 2I_{0di} \quad (3.34)$$

Kde I_0 nulová složka proudu vývodu při zemním spojení
 I_{0di} hodnota nulové složky proudu způsobená chybou měření měřících transformátorů proudu.

Při měření nulové složky proudu vývodu vzniká vedle amplitudové chyby i fázová chyba. U směrových zemních ochran je důležitější fázová chyba měření I_0 než amplitudová. U běžných sítí můžeme tolerovat fázovou chybu nulové složky jak

proudu, tak napětí na úrovni i jednotek stupňů. Existují však vývoody, kde chyba několika desetín stupně může znamenat falešné a nespolehlivé působení směrových zemních ochran. Tento problém jsem již popsal v minulých kapitolách 3.4.2, 3.4.3 a 3.5. Uvedené kapitoly popisují problém, kdy nabíjecí kapacitní proud vývodu tvoří významný podíl vůči celkovému nabíjecímu proudu sítě. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem je nutné se problematikou fázové chyby měření nulové složky proudu věnovat podrobněji.

Ze vztahu (3.33) je zřejmé, že chybový nulový proud I_{0di} způsobený amplitudovou chybou měření fázových proudů ve dvou fázích má jalový charakter. Výsledný vektor nulové složky proudu bude mít vektorové natočení dané vektorovým součtem složky nulového proudu a chybové složky nulového proudu I_{0di} viz Obr. 20.



Obr. 20 Znárodnění natočení vektoru naměřené složky nulového proudu od skutečného nulového proudu způsobené chybovým proudem I_{0di}

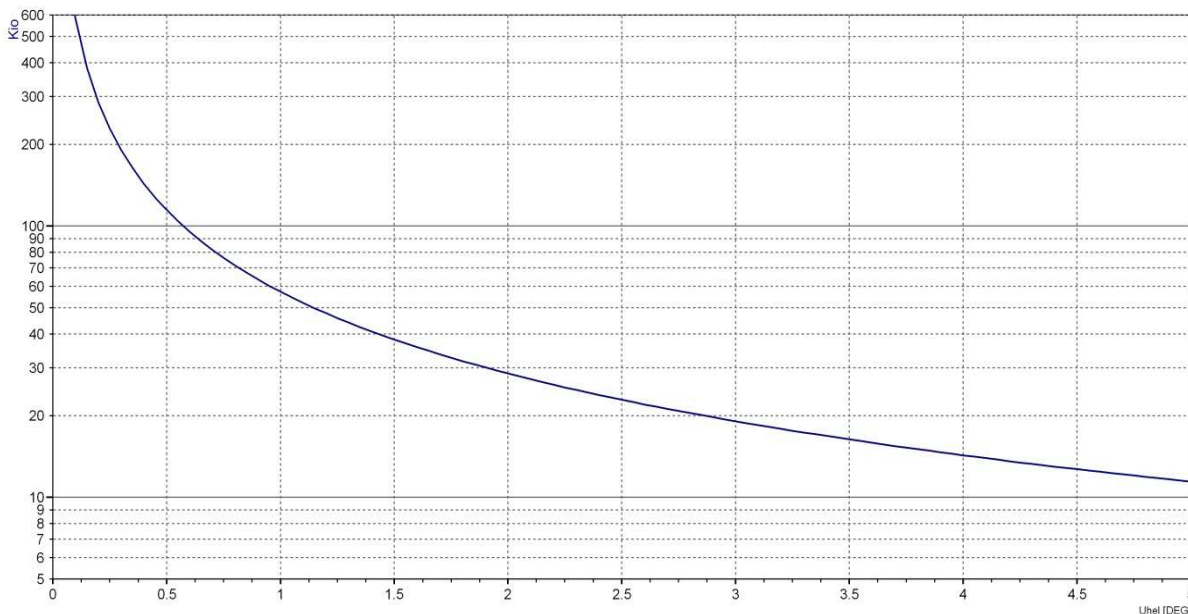
Úhel α udává velikost natočení vektoru naměřené složky nulového proudu od skutečné složky nulového proudu. Budeme-li požadovat menší chybu měření úhlu nulové složky proudu než je mezní úhel α_{dov} , musí skutečná složka nulového proudu I_0 odpovídat následujícímu vztahu.

$$I_0 > \frac{I_{0di}}{\operatorname{tg}(\alpha_{dov})}$$

(3.35)

Z rovnic (3.34) a (3.35) dostáváme podmínky pro přesnost měření nulové složky proudu. Tyto rovnice definují i nutnost zajištění dostatečného odstupu skutečné hodnoty nulové složky proudu od nulové složky proudu I_{0di} zatížené chybou měření. V praxi splnění podmínky definované ve vztahu (3.34) nepředstavuje významnější problém. Pro použití směrových zemních ochran je důležité splnění podmínky definované vztahem (3.35). Zejména u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů je tato podmínka důležitá. Obtížnost splnění podmínky (3.35) bude záležet na velikosti zemního proudu vývodu vůči celkovému zemnímu kapacitnímu proudu sítě.

U sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde vývody jsou vybaveny směrovými zemními ochranami a zemní kapacitní proud vývodu nepřesahuje cca 15% hodnoty celkového zemního kapacitního proudu sítě, lze tolerovat chyby měření úhlu nulové složky proudu až cca 3°. Pro povolenou toleranci $\pm 3^\circ$ měření úhlu nulové složky proudu lze z grafu Graf 26 zjistit, že nulová složka proudu v uvedeném případě musí být větší než 19 násobek I_{0di} . S rostoucími požadavky na přesnost měření musí být tedy nulová složka proudu vývodu výrazně větší než je chybový proud I_{0di} způsobený chybou převodu měřících transformátorů proudu.



Graf 26 Poměr nulové složky proudu k proudu I_{0di} v závislosti na chybě úhlu měření nulové složky proudu

Pro velké proudové převody je téměř nereálné zajistit dostatečný odstup nulové složky proudu od chybového proudu I_{0di} pouhým dodržением přesnosti měřících transformátorů proudu. Požadovaný odstup lze rovněž docílit i krátkodobým zvýšením hodnoty činné složky poruchového proudu jednofázové poruchy. Stane se tak po připnutí odporníku do pomocného vinutí zhášecí tlumivky nebo po krátkodobém připnutí uzlového odporníku. V těchto případech se uvedená metoda jeví jako neúčinnější. Z podmínek pro přesnost měření nulové složky proudu můžeme určit požadovanou hodnotu zvýšení nulové složky proudu krátkodobým připnutím odporníku v době zemní poruchy. Hodnota odporu musí být volena tak, aby umožnila spolehlivou identifikaci vývodu se zemní poruchou i pro odporové zemní poruchy. V některých energetických společnostech proto využívají sekundární odporníky typu SRA popsané v literatuře [13], které automaticky volí vhodnou hodnotu odporu připínaného odporníku s ohledem na zjištěnou velikost odporu zemní poruchy v síti.

3.7.3 Fázová chyba měření proudu

Obdobně jako je přesnost měření nulové složky proudu ovlivněna amplitudovou chybou při měření fázových proudů, tak je ovlivněna i fázovou chybou při tomto měření. Pro odvození chyby měření nulové složky proudu jsem opět uvažoval

zapojení dle obrázků Obr. 17 a Obr. 18. Chybu měření úhlu δ jsem předpokládal ve fázi L_2 (Graf 27).

$$\begin{aligned}\vec{I}_{L1} &= I \\ \vec{I}_{L2} &= I^{120^\circ+\delta} = I(\cos(120+\delta) + j \sin((120+\delta))) \\ \vec{I}_{L3} &= I^{240^\circ} = I(\cos(240) + j \sin((240)))\end{aligned}$$

(3.36)

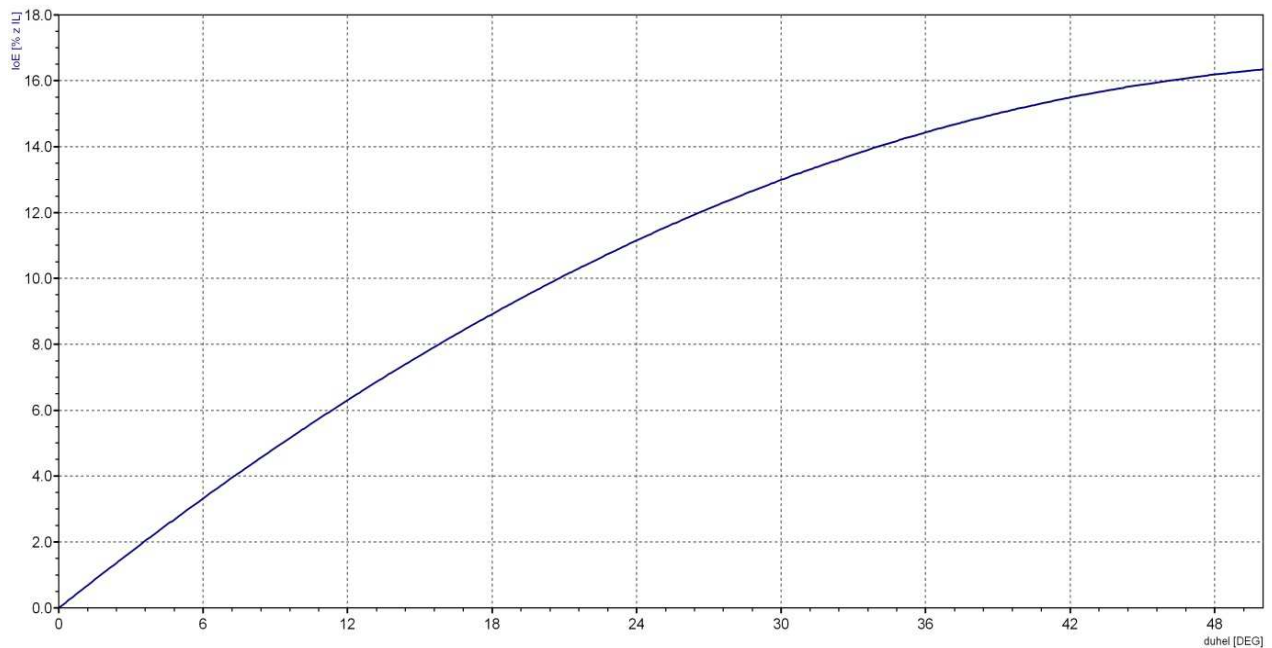
$$\vec{I}_{0E} = \frac{1}{3}I\left(1 - \frac{1}{2}\cos(\delta) - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin(\delta) + j\frac{\sqrt{3}}{2}\cos(\delta) - j\frac{1}{2}\sin(\delta) - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

(3.37)

$$\vec{I}_{0E} = \frac{1}{3}I\left(1 - \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\cos(\delta) + \left(-j\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\sin(\delta)\right)$$

$$\vec{I}_{0E} = \frac{1}{3}I(1 + \vec{a}^2 + a \cdot \cos(\delta) + j \cdot \vec{a} \cdot \sin(\delta))$$

(3.38)



Graf 27 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázi L_2

Dále jsem bral v úvahu následující podmínky: chyba měření úhlu δ je ve dvou fázích L_2 a L_3 a je stejně velká, ale s opačným znaménkem.

$$\begin{aligned}\vec{I}_{L1} &= I \\ \vec{I}_{L2} &= I^{120^\circ+\delta} = I(\cos(120+\delta) + j \sin((120+\delta))) \\ \vec{I}_{L3} &= I^{240^\circ-\delta} = I(\cos(240-\delta) + j \sin((240-\delta)))\end{aligned}$$

(3.39)

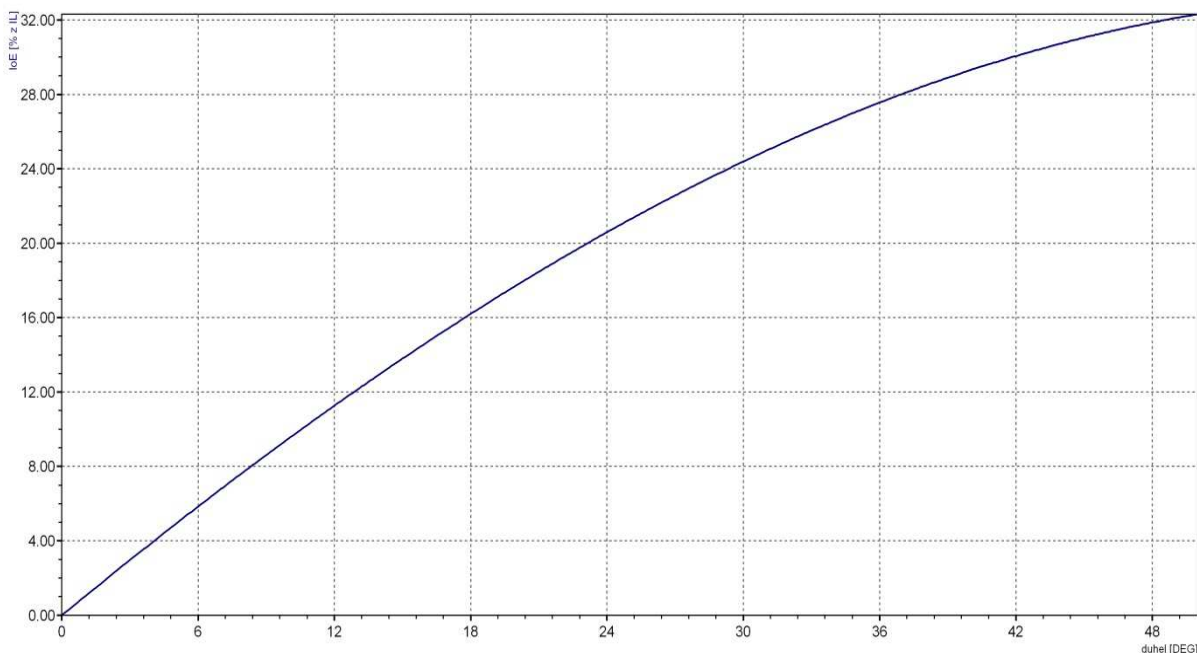
Pro výpočet chybové hodnoty nulové složky proudu způsobené chybou měření úhlu proudu u měřících transformátorů proudu jsem opět vycházel z rovnice (3.29). Dosazením rovnice fázových proudů z (3.39) do rovnice (3.29) jsem dostal následující vztah (3.40).

$$\vec{I}_{0E} = \frac{1}{3} I (1 + \cos(120 + \delta) + j \sin((120 + \delta) + \cos(240 - \delta) + j \sin((240 - \delta))) \quad (3.40)$$

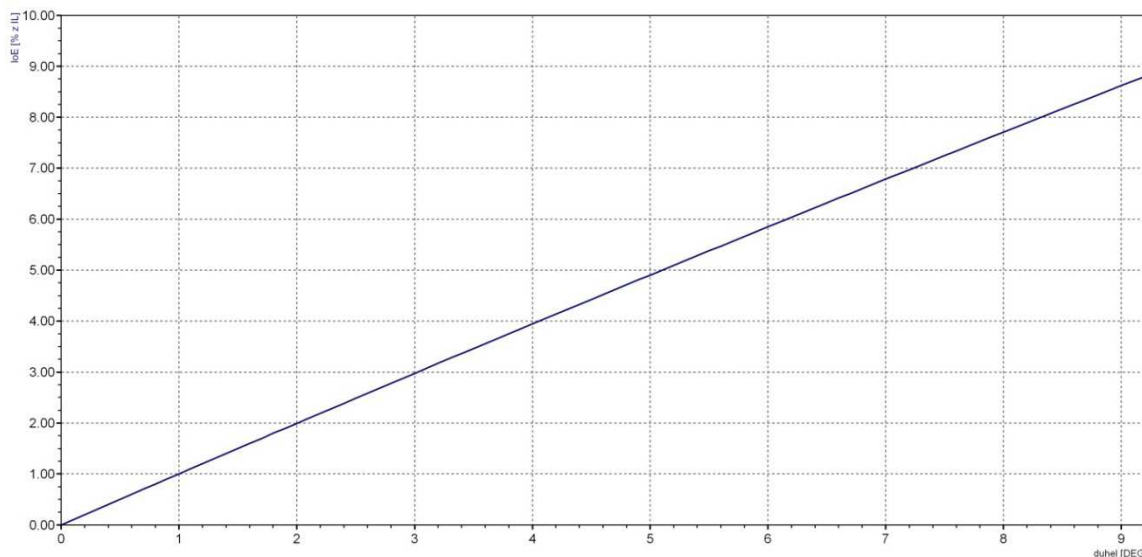
Vztah (3.40) jsem pak dále upravil za využití vzorců pro goniometrické funkce. Rovnice (3.41) je výsledným vztahem pro výpočet chybové hodnoty nulové složky proudu.

$$\vec{I}_{0E} = I_L \frac{1 - \cos(\delta) + j\sqrt{3} \cos(\delta)}{3} \quad (3.41)$$

Výsledný vztah pro výpočet chyby velikosti nulové složky proudu způsobené fázovou chybou dvou měřících transformátorů proudu s opačně orientovanou chybou je reálnou, nikoli komplexní funkcí. Pro názornost jsem v grafu Graf 28 zobrazil hodnoty amplitudové chyby nulové složky proudu určené vztahem (3.41) jako funkci chyby měření proudu ve fázích L_2 a L_3 .



Graf 28 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 , chyby úhlů ve fázích mají opačná znaménka (viz vztah (3.40),(3.41))



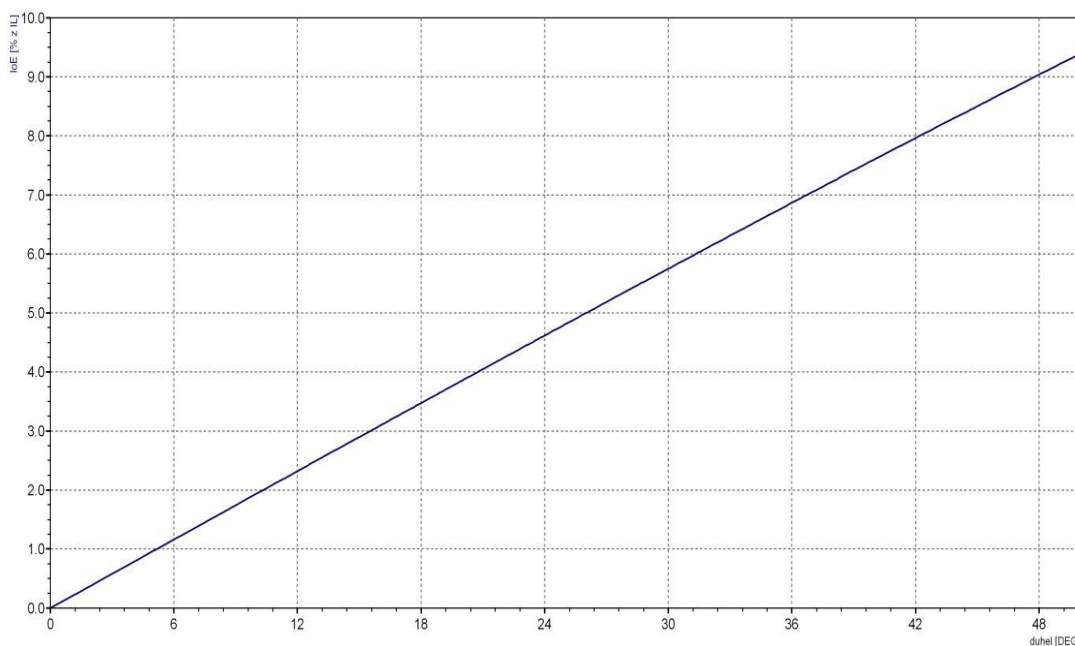
Graf 29 Detail grafu Graf 28 závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 v rozsahu 0 až 9°, chyby úhlů ve fázích mají opačná znaménka (viz vztah (3.40),(3.41))

Pokud mají chyby úhlů stejná znaménka, lze rovnici (3.40) upravit na následující tvar:

$$\vec{I}_{0E} = \frac{1}{3} I (1 + \cos(120 + \delta) + j \sin((120 + \delta)) + \cos(240 + \delta) + j \sin((240 + \delta))) \quad (3.42)$$

$$\vec{I}_{0E} = I_L \frac{1 - \cos(\delta) - j \sin(\delta)}{3} \quad (3.43)$$

Výsledky vztahů (3.42), (3.43) jsou graficky znázorněny v grafu Graf 30.



Graf 30 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 , chyby úhlů ve fázích mají stejná znaménka (viz vztah (3.42), (3.43))

Z předchozích grafů je patrné, že největší ovlivnění výsledku měření velikosti nulové složky proudu vznikne při chybě měření úhlu v jedné fázi. Obdobou je chyba ve dvou fázích, kdy chyba úhlu má stejné znaménko. Při chybě úhlu u měřicího transformátoru proudu na úrovni jednotek stupňů nebude mít tato chyba zásadní vliv na měření amplitudy nulové složky proudu.

Jak již bylo uvedeno, fázová chyba měření proudu nebude ovlivňovat pouze velikost nulové složky proudu, ale bude způsobovat i fázovou chybu měření nulové složky proudu. Fázová chyba nulové složky proudu má na správnou funkci zemní směrové ochrany větší vliv, než chyba měření velikosti nulové složky proudu. Proto jsem se zaměřil na zjišťování velikosti chyby měření nulové složky proudu při zemním spojení. Pro analýzu fázové chyby měření nulové složky proudu jsem uvažovat měření nulové složky proudu na vývodu bez zemní poruchy.

Nulová složka proudu vývodu je tvořena vektorovým součtem nabíjecích fázových proudů ve fázích bez poruchy. Pro jednoduchost jsem opět předpokládal vznik kovového zemního spojení ve fázi L₁. Nabíjecí fázové proudy pak předbíhají fázová napětí o 90°. Při zemním spojení mají jednotlivá fázová napětí úhel +30° a -30° vůči nulové složce napětí. Fázové nabíjecí proudy s posunem o +90° vůči fázovému napětí jsem vyjádřil vztahem (3.44).

$$\begin{aligned}\vec{I}_{C1} &= 0 \\ \vec{I}_{C2} &= I_C^{120^\circ+\delta} = -I_C(\cos(120+\delta) + j\sin((120+\delta))) \\ \vec{I}_{C3} &= I_C^{60^\circ} = -jI_C(\cos(60) + j\sin((60)))\end{aligned}\tag{3.44}$$

$$\begin{aligned}\vec{I}_{0E} &= -j\frac{1}{\sqrt{3}}I_C\left(\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\cos(\delta) + \left(-j\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\sin(\delta)\right) \\ \vec{I}_{0E} &= -j\frac{1}{\sqrt{3}}I_C\left(-a^2 + a \cdot \cos(\delta) + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) \cdot \sin(\delta)\right)\end{aligned}\tag{3.45}$$

Při fázové chybě měření úhlu δ ve dvou fázích se stejnou orientací chyby (stejně znaménko) jsem popsal výsledek následující rovnicí.

$$\begin{aligned}\vec{I}_{C1} &= 0 \\ \vec{I}_{C2} &= I_C^{120^\circ+\delta} = -I_C(\cos(120+\delta) + j\sin((120+\delta))) \\ \vec{I}_{C3} &= I_C^{60^\circ+\delta} = -jI_C(\cos(60+\delta) + j\sin((60+\delta)))\end{aligned}\tag{3.46}$$

Po úpravě:

$$\vec{I}_{0E} = \sqrt{3}I_C(-\sin(\delta) + j\cos(\delta))\tag{3.47}$$

Při rozdílné orientaci chyb měření na proudových transformátorech ve fázích L₂ a L₃ jsem rovnicí pro výpočet nulové složky proudu popsal vztahem (3.48) a (3.49).

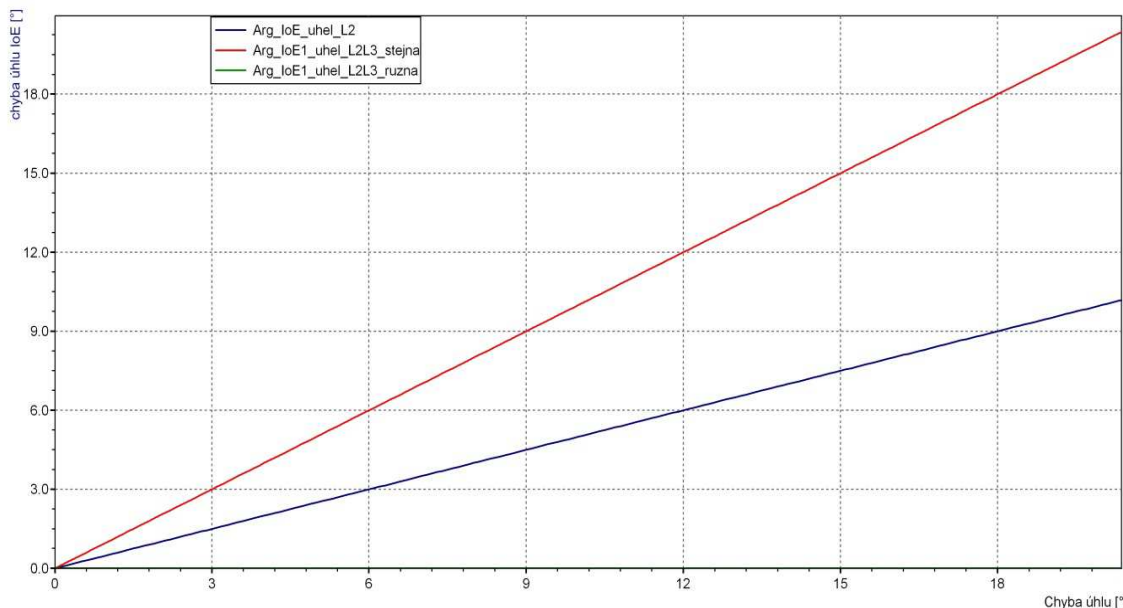
$$\begin{aligned}\vec{I}_{C1} &= 0 \\ \vec{I}_{C2} &= I_C^{120^\circ+\delta} = -I_C(\cos(120+\delta) + j\sin((120+\delta))) \\ \vec{I}_{C3} &= I_C^{60^\circ-\delta} = -jI_C(\cos(60-\delta) + j\sin((60-\delta)))\end{aligned}$$

(3.48)

Po úpravě:

$$\vec{I}_{0E} = jI_C(\sqrt{3}\cos(\delta) - \sin(\delta))$$

(3.49)



Graf 31 Závislost natočení nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy na chybě měření úhlů fázových proudů ve fázích L_2 a L_3 (červená křivka: stejná velikost chyby úhlů ve fázích L_2 a L_3 se stejným znaménkem dle (3.47); zelená křivka: nulová hodnota chyby úhlů, křivka leží na ose x , stejná velikost chyby úhlů ve fázích L_2 a L_3 s rozdílným znaménkem dle (3.49); modrá křivka: chyba úhlu ve fázích L_2 – dle (3.45))

Při zemním spojení ve fázi L_1 je nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy teoreticky natočená vůči nulové složce napětí o 90° . Graf 31 ukazuje velikost chyby úhlu v natočení nulové složky proudu v závislosti na chybě měření proudu ve fázi L_2 . Bude-li chyba ve fázi L_2 mít opačné znaménko, než ve fázi L_3 , pak při zemním spojení ve fázi L_1 se tato chyba nebude projevovat na změně vektorového natočení nulové složky proudu. Stále platí, že největší ovlivnění nastane v případě, že dva měřicí transformátory proudu budou mít stejně orientovanou úhlovou chybu. Potom lze předpokládat, že stejná chyba se projeví i ve změně vektorového natočení nulové složky proudu při zemním spojení. Tomuto stavu odpovídá případ, kdy byl jeden ze tří měřících transformátorů proudu vyměněn, například v důsledku poruchy.

4 ANALÝZA STÁVAJÍCÍCH ZPŮSOBŮ MĚŘENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU SÍTĚ

Při zemním spojení v sítích VN s izolovaným uzlem prochází místem poruchy poruchový proud tvořený především zemním kapacitním proudem sítě. U těchto sítí můžeme zjistit hodnotu zemního kapacitního proudu sítě nejnázve měřením proudu v místě zemního spojení.

U sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů protéká místem poruchy pouze zbytkový proud zemního spojení. Měřením hodnoty poruchového proudu v místě zemního spojení proto nelze stanovit hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. U těchto sítí máme jednodušší možnost zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu sítě. Ta spočívá na odečtení hodnoty proudového nastavení zhášecí tlumivky při jejím přesném vyladění na paralelní rezonanci vůči zemnímu kapacitnímu proudu sítě.

U sítí s odporově uzemněným uzlem bude místem poruchy protékat činný proud uzlového odporníku vektorově sečtený se zemním kapacitním proudem sítě. Zemní kapacitní proud sítě lze odvodit z kapacitní jalové složky poruchového proudu v místě zemní poruchy.

Analýzou poruchového proudu zemního spojení v izolovaných nebo odporově uzemněných sítích můžeme vyhodnotit velikost zemního kapacitního proudu sítě, činnou složku poruchového proudu a proudy vyšších harmonických. U kompenzovaných sítí vyhodnotíme z poruchového proudu zemního spojení pouze činnou a nevykompenzovanou jalovou složku zbytkového proudu a proudy vyšších harmonických. Jak již bylo uvedeno, u těchto sítí nelze z poruchového proudu určit hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. Zemní kapacitní proud sítě lze vypočítat na základě znalosti typů vedení, jejich délek, průřezů a měrných parametrů. Zejména u starších sítí zaznamenáváme problém při zjišťování měrných parametrů vedení. Především přesné délky vedení nemusí být vždy k dispozici.

4.1 Izolovaná síť

Stále platí, že v izolované síti bude místem zemního spojení protékat celkový zemní kapacitní proud, činná složka poruchového proudu a proudy vyšších harmonických. Pro přesnější analýzu poruchového proudu je nutné porovnat vektorové natočení poruchového proudu a nulové složky napětí. Na základě rozboru vektorového natočení proudu vůči nulové složce napětí můžeme stanovit velikost zemního kapacitního proudu a činné složky poruchového proudu. Celkový zemní kapacitní proud sítě je dán celkovou hodnotou fázové zemní kapacity sítě.

$$I_C = 3\omega C_0 U_f \quad (A; \text{rad/s, F, V})$$

(4.1)

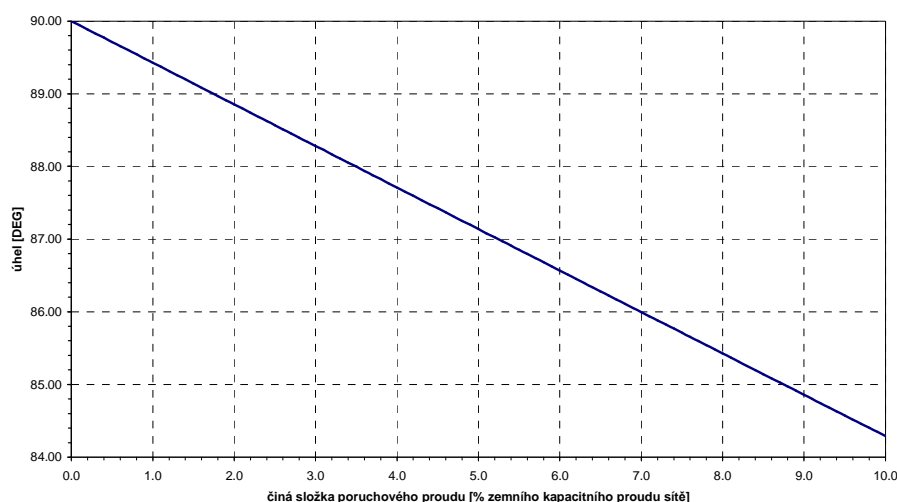
Činná složka poruchového proudu je ovlivněna parametry sítě i její konfigurací. Tato složka bývá označována jako svodový proud sítě a je ve fázi nebo v protifázi s nulovou složkou napětí. Činná složka poruchového proudu může obvykle nabývat hodnoty od cca 0,5% až po cca 8% z hodnoty zemního kapacitního proudu. Proud

vyšších harmonických jsou ovlivněny harmonickým zkreslením napětí. Harmonické zkreslení napětí bývá způsobeno napájením nelineárních odběrů, a to i na jiných, nejčastěji nižších, napěťových hladinách.

Pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě je nutné vytvořit zemní spojení v síti a měřit přímo hodnotu poruchového proudu a nulové složky napětí. Na základě rozložení naměřeného poruchového proudu do reálné (osa ve fázi s nulovou složkou napětí) a imaginární složky zjistíme hodnotu činného svodového proudu sítě a hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. Realizaci umělého zemního spojení je nutné provádět v blízkosti napájecí rozvodny (u napájecího transformátoru), kde se jedna fáze uzemní přes měřicí transformátor proudu na uzemňovací soustavu rozvodny. Pro měření poruchového proudu je možné využít i některého z fázových měřících transformátorů proudu instalovaného na jednotlivých vývodech z napájecí rozvodny. S výhodou se využívají rezervní vývody rozvodny.

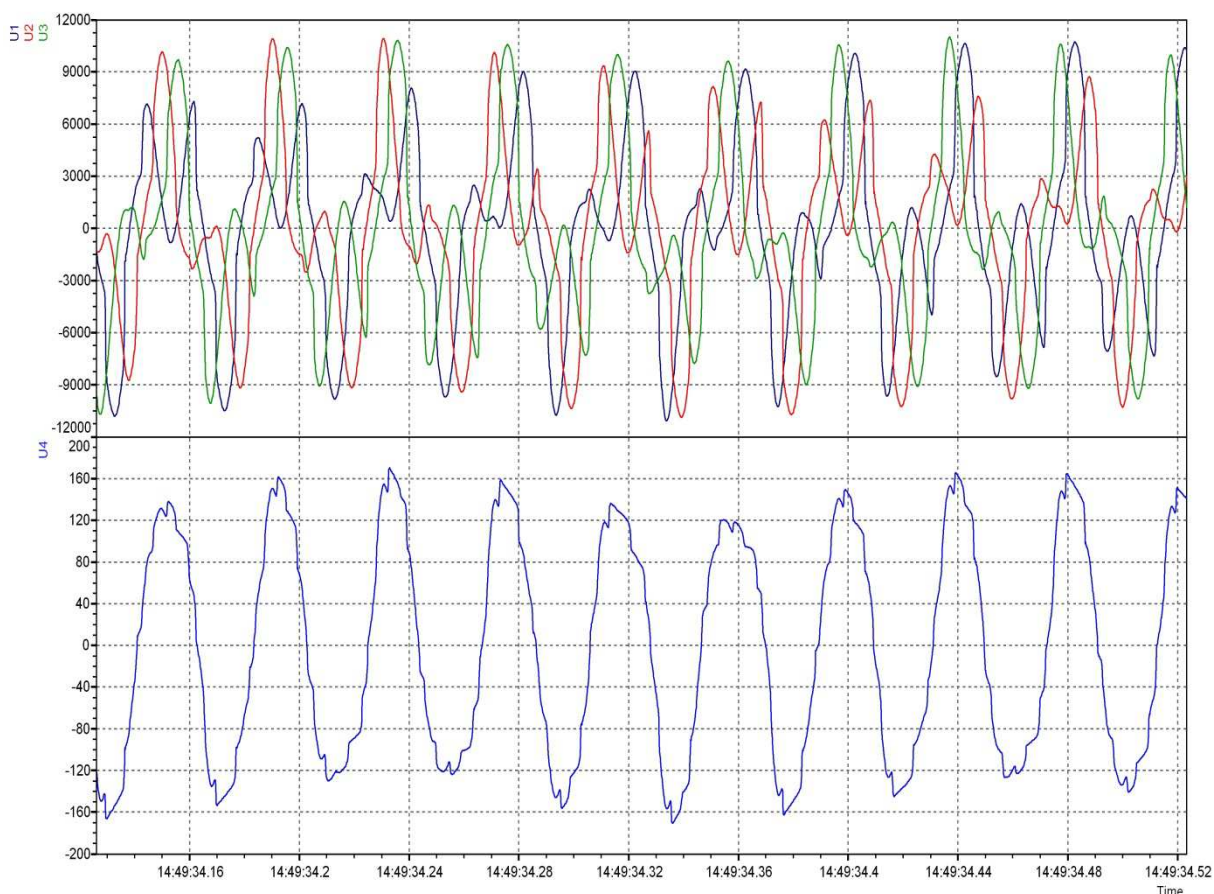
Pro měření proudů základní harmonické je nutné, aby měřicí přístroj disponoval možností měření veličin základní harmonické. Pro měření vyšších harmonických je vhodné, aby měřicí přístroj disponoval funkcemi harmonické analýzy měřeného signálu. Tyto funkce bývají součástí síťového analyzátoru. Tímto přístrojem můžeme změřit nejen celkové harmonické zkreslení poruchového proudu, ale i zastoupení jednotlivých harmonických proudů. Procentní zastoupení vyšších harmonických bývá u sítí s izolovaným uzlem méně významné. Zemní kapacitní proud základní harmonické tvoří podstatnou část poruchového proudu. Činná složka poruchového proudu dosahuje hodnot několika procent zemního kapacitního proudu sítě. Velikost činné složky poruchového proudu ovlivňuje úhel mezi nulovou složkou napětí a nulovou složkou proudu ve vývodu se zemní poruchou (Graf 32). Vyšší harmonické bývají zpravidla na srovnatelné rovní jako činná složka svodového proudu. Existují však i výjimky, kde můžeme změřit vysoké hodnoty zastoupení vyšších harmonických v poruchovém proudu.

Úhel mezi U_0 a I_0 v závislosti na činné složce poruchového proudu



Graf 32 Úhel mezi U_0 a I_0 jako funkce procentní hodnoty činné složky poruchového proudu vtažené k zemnímu kapacitnímu proudu

Vytváření umělého zemního spojení s sebou přináší i určitá rizika spojená s rozšířením poruchy na vícefázový zkrat. Proto bývá v některých sítích problémové realizovat umělá zemní spojení. Častým jevem v sítích s izolovaným uzlem bývá i vznik tzv. ferorezonance. Často vzniká při zapínání sítě, po velkém proudovém rázu nebo po vypnutí zemní poruchy. Ferorezonance může být i příčinou výpadku celé sítě. Při vzniku ferorezonance má nulová složka napětí frekvenci zpravidla na úrovni 25 Hz. Mohou zde být i další doprovodné frekvence na úrovni jednotek Hz. Okolo této nulové složky napětí kmitají fázová napětí s frekvencí 50 Hz, viz Graf 33.



Graf 33 Ferorezonance v síti 6 kV vzniklá po vypnutí zemního spojení v síti, v grafu je znázorněn časový průběh fázových napětí a časový průběh nulové složky napětí

4.2 Odporově uzemněný uzel sítě

U odporově uzemněného uzlu sítě protéká místem zemní poruchy poruchový proud. Tento poruchový proud obsahuje zemní kapacitní proud sítě vektorově sečtený s proudem uzlového odporníku. Volba hodnoty odporu uzlového odporníku je ovlivněna rozsahem sítě. Proud odporníkem bývá volen vyšší, než je zemní kapacitní proud sítě. Navýšení poruchového proudu o proud odporníkem dává možnost snadnější identifikace vývodu se zemní poruchou. Proto v síti s odporově uzemněným uzlem se používají prosté nadproudové ochrany, které měří nulovou složku poruchového proudu. S ohledem na velikost jednofázového poruchového proudu v těchto sítích není důležitá přesnost měření nulové složky proudu. Fázová chyba měření nulové složky proudu je pro systém chránění nesměrovými ochranami nepodstatná. V místě jednofázové poruchy však protéká vyšší hodnota poruchového

proudu. To způsobuje zejména u obloukových zemních spojení uvolnění značného množství tepelné energie. Množství uvolněné tepelné energie můžeme eliminovat vyšší rychlostí vypínání vývodů s jednofázovou zemní poruchou a vhodnou volbou uzlového odporníku. Hodnota proudu odporníku se volí alespoň o 20% vyšší než je vlastní kapacitní proud sítě. Dalším kritériem pro volbu hodnoty uzlového odporníku je zajištění působení zemních ochran s ohledem na jejich citlivost. U sítí malého rozsahu, tj. s malou hodnotou zemního kapacitního proudu, a s velkými zatěžovacími proudy je nutné respektovat i parametry použitých měřících transformátorů proudu. S ohledem na selektivní chránění mohou vypínací časy ochran v napájecí rozvodně dosahovat časového zpoždění mezi 1 s až 2 s. Uzlový odporník je dimenzován pouze na omezenou dobu provozu se zemním spojením. Zpravidla je možné uzlový odporník zatěžovat jmenovitým výkonem po dobu 10 s. Doba provozu uzlového odporníku se jmenovitým zatížením výrazně ovlivňuje jeho konstrukci, materiálovou náročnost, rozměry a tím i cenu. U uzlového odporníku je dalším důležitým údajem jeho trvalé proudové zatížení. Uzlové odporníky mívají trvalé zatížení řádově v jednotkách procent jmenovitého proudu. Trvalé zatížení umožňuje provozovat uzlový odporník i v mírně nesymetrické síti aniž by docházelo k jeho tepelnému přetížení v době zemní poruchy. Při lokalizaci místa se zemní poruchou může docházet k opakovanému zapínání do poruchy. Proto zatížení uzlového odporníku musí umožňovat několik po sobě následujících zapnutí do zemního spojení.

V síti s odporově uzemněným uzlem musíme počítat s vyšší hodnotou poruchového proudu. Tomuto proudu musí vyhovovat hodnota ochranného uzemnění v síti. U kabelových sítí se nízké hodnoty odporu ochranného uzemnění dosahuje pospojováním jednotlivých zemních soustav pomocí stínění vysokonapěťových kabelů. Proto v kabelové síti bývá hodnota odporu ochranného uzemnění velmi nízká. Problém s hodnotou odporu ochranného uzemnění může být na koncích delších vývodů, které jsou napájeny pouze jedním kabelem. Výrazné problémy s hodnotou odporu ochranného uzemnění jsou u venkovních linek napájených z rozsáhlých kabelových sítí s odporově uzemněným uzlem. V našich podmínkách je jen malý počet venkovních linek napájených ze sítě s odporově uzemněným středem. Jedná se zejména o linky na okraji velkých městských sítí. V napájecích rozvodnách pro tyto smíšené sítě bývá instalována zhášecí tlumivka a sítě jsou provozovány jako kompenzované. V některých provozních režimech však tyto sítě mohou být napájeny z napájecích transformátorů, jejichž uzel je uzemněn právě přes uzlový odporník.

Měření jednofázového poruchového proudu sítě v místě zemního spojení vyžaduje měření proudů na úrovni několika stovek ampér. Hodnota proudu zemního spojení je závislá i na velikosti uzlového odporníku. Pro analýzu hodnoty zemního kapacitního proudu sítě je nutné vektorově odečíst hodnotu proudu odporníkem. Pro nízké hodnoty uzlového odporu je nutné pro vzdálené poruchy uvažovat i s úbytkem napětí na vedení. Při realizaci umělého zemního spojení v odporově uzemněné síti budou výsledky obtížněji analyzovatelné než u poruch v izolované síti. S ohledem na velikost poruchového proudu se v odporových sítích zpravidla neprovádí umělé zemní

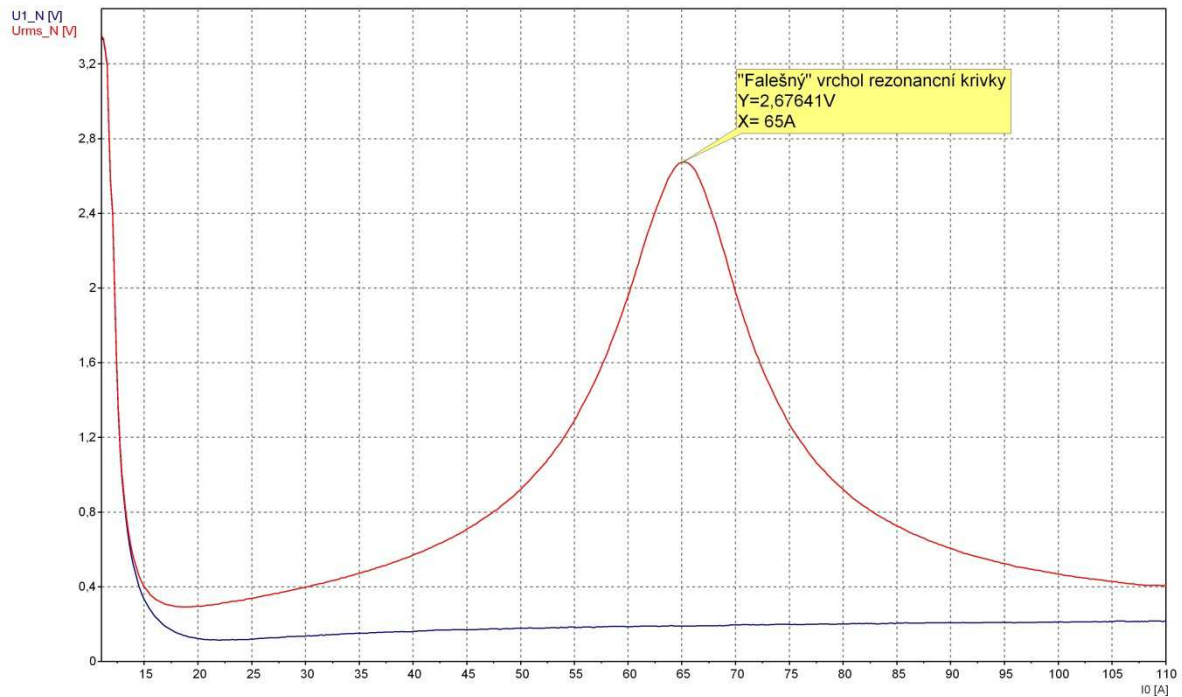
spojení a velikost kapacitního proudu se stanovuje výpočtem na základě znalosti délek, typu a průřezu kabelového vedení.

4.3 Sít' s kompenzací zemních kapacitních proudů

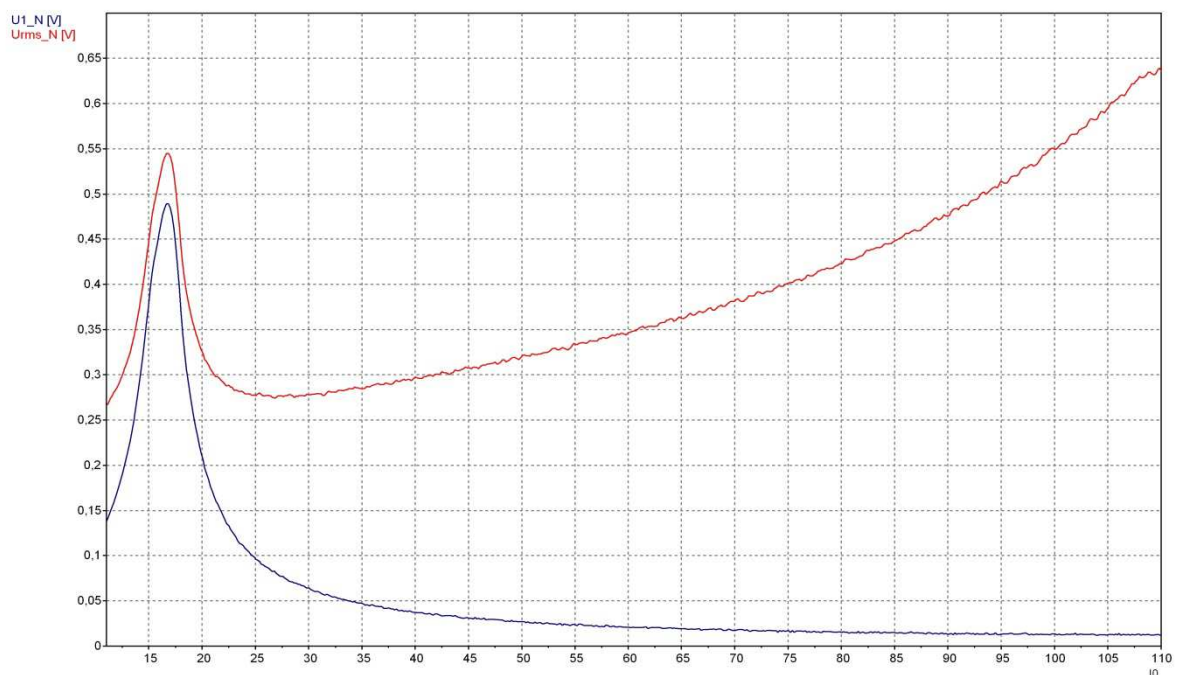
Provoz sítě s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivky má optimální vlastnosti právě při vyladění zhášecí tlumivky. Vyladěním zhášecí tlumivky se rozumí nastavení její indukčnosti tak, aby byla v paralelní rezonanci vůči zemní fázové kapacitě celé napájené sítě. Použití plynule laditelné zhášecí tlumivky v mnohých případech umožňuje jednoduchým způsobem dosáhnout paralelní rezonance. V síti s běžnou zemní fázovou kapacitní nesymetrií můžeme při plynulé změně indukčnosti zhášecí tlumivky sledovat velikost nulové složky napětí. Při dosažení maximální hodnoty nulové složky napětí je zhášecí tlumivka právě vyladěna na paralelní rezonanci vůči fázové zemní kapacitě sítě. Aby bylo zaručeno, že je tlumivka správně vyladěna, je nutné pro měření nulové složky napětí používat voltmetr s frekvenčním filtrem umožňující měření napětí v okolí hodnoty 50 Hz (viz grafy Graf 34, Graf 35, Graf 36 a Graf 37). Při velkém výkonu zhášecí tlumivky je vzhledem k velikosti zemního kapacitního proudu sítě možné zhášecí tlumivky vyladit i na vyšší harmonickou. Zpravidla se jedná o 3. harmonickou². Ověření vyladění zhášecí tlumivky na základní harmonickou je možné obyčejným ručním měřicím přístrojem, který umožňuje měření frekvence. Při vyladění na základní harmonickou bude frekvence nulové složky napětí odpovídat 50 Hz. Při vyladění na 3. harmonickou bude změřená frekvence nulové složky napětí ukazovat 150 Hz.

Zhášecí tlumivka je vybavena ukazatelem proudového nastavení. Ukazatel proudového nastavení udává velikost rezonančního proudu při vyladění zhášecí tlumivky. Tato hodnota proudu odpovídá i zemnímu kapacitnímu proudu sítě. Jedná se tedy o jednoduchou metodu určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě bez nutnosti vytvářet zemní spojení. Pro analýzu sítě je vhodné změřit rezonanční křivku sítě. Jedná se o grafické vyjádření velikosti nulové složky napětí v závislosti na proudovém nastavení zhášecí tlumivky.

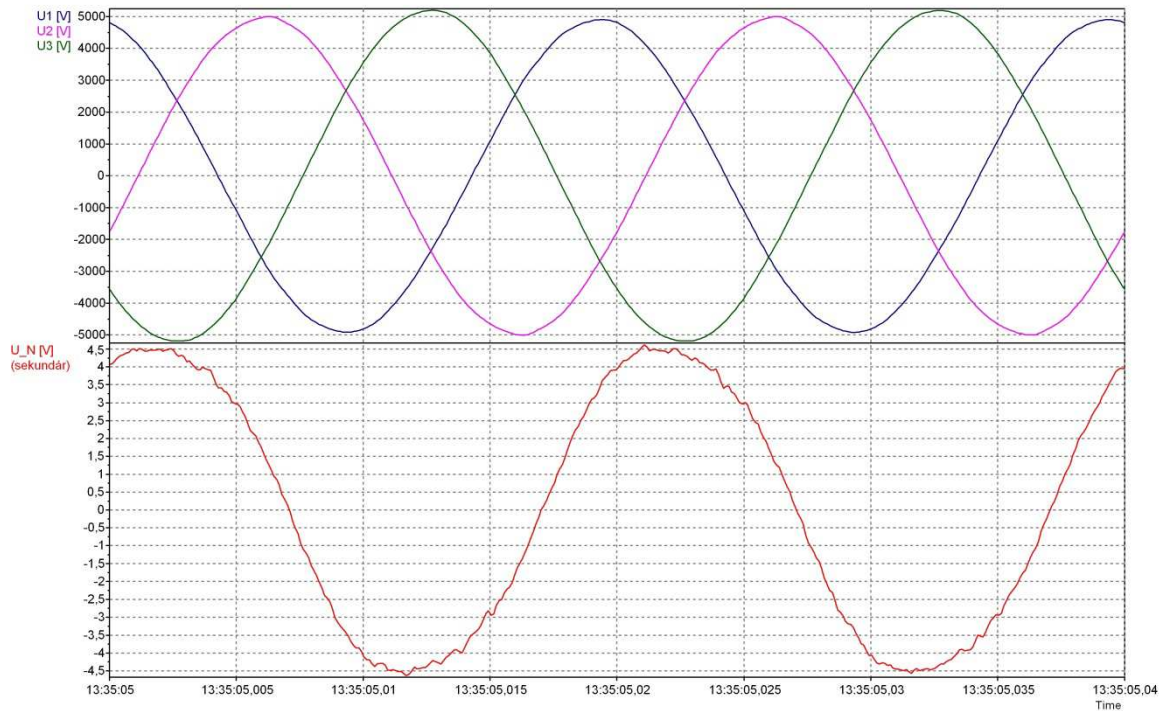
² Tohoto stavu lze dosáhnout zejména u předimenzované zhášecí tlumivky. V praxi jsem se setkal s několika případy, kdy zemní kapacitní proud sítě byl na úrovni minimálního proudového nastavení zhášecí tlumivky, v některých případech i nižší, a tlumivka byla vyladěna na 3. harmonickou. Při měření jednoduchým měřicím panelovým přístrojem bez vstupního filtru na 1. harmonickou nelze rozeznat, zda je zhášecí tlumivka správně naladěna. Efektivní hodnota nulové složky napětí může být pro 3. harmonickou vyšší než pro základní harmonickou.



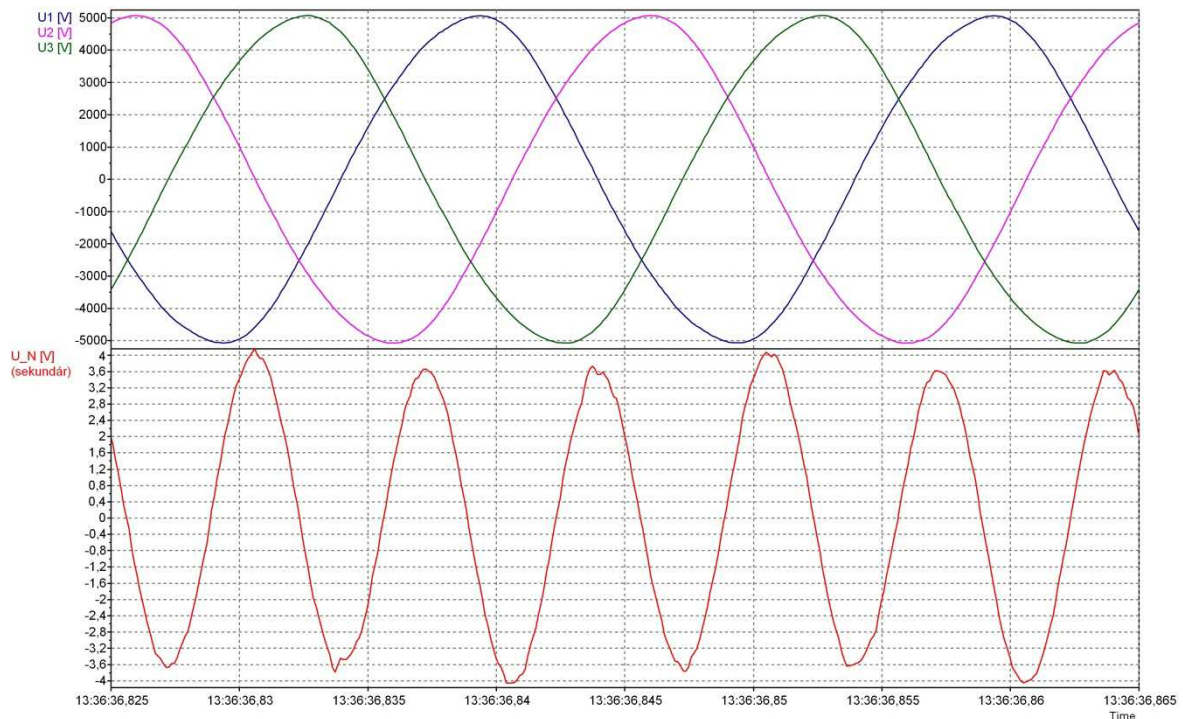
Graf 34 Rezonanční křivka – závislost nulové složky napětí U_0 (%) na proudovém nastavení zhášecí tlumivky I_0 (A), modrá křivka znázorňuje průběh nulové složky napětí 50 Hz a červená křivka znázorňuje průběh měřené hodnoty nulové složky napětí včetně všech harmonických (RMS), hodnota rezonančního proudu zhášecí tlumivky je na úrovni cca 7 až 8 A



Graf 35 Rezonanční křivka – závislost nulové složky napětí U_0 (%) na proudovém nastavení zhášecí tlumivky I_0 (A), modrá křivka znázorňuje průběh nulové složky napětí 50 Hz a červená křivka znázorňuje průběh měřené hodnoty nulové složky napětí včetně všech harmonických (RMS), hodnota rezonančního proudu zhášecí tlumivky je na úrovni cca 17 A, vrchol rezonanční křivky pro 3. harmonickou je za hodnotou maximálního proudového nastavení zhášecí tlumivky



Graf 36 Detail okamžitých hodnot fázových napětí (horní polovina grafu) a nulové složky napětí (dolní polovina grafu) při proudovém nastavení zhášecí tlumivky blízko stavu paralelní rezonance, červená křivka znázorňuje nulovou složku napětí s frekvencí 50 Hz



Graf 37 Detail okamžitých hodnot fázových napětí (horní polovina grafu) a nulové složky napětí (dolní polovina grafu) při proudovém nastavení zhášecí tlumivky blízko stavu paralelní rezonance pro 3. harmonickou, červená křivka znázorňuje nulovou složku napětí s frekvencí 150 Hz

U symetrických sítí, zpravidla se jedná o kabelové sítě, je i při přesném vyladění zhášecí tlumivky nulová složka napětí velmi nízká. V mnohých případech je nižší než 0,2% z fázové hodnoty napětí sítě. Vzhledem k tlumení v kabelové síti je taková křivka

velmi plochá, proto v mnohých případech nelze jednoduchým způsobem přesně vyladit zhášecí tlumivku podle velikosti nulové složky napětí. Pro takové sítě se používají automatiky ladění založené na principu proudové injekce. Automatika na základě proudového impulsu změří parametry sítě a vypočítá hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. Zhášecí tlumivka je pak automatikou nastavena na vypočtenou proudovou hodnotu. Po nastavení zhášecí tlumivky na vypočtenou proudovou hodnotu dochází k ověření správnosti vyladění. Tato metoda je také vhodná pro použití v sítích, kde dochází k výrazným změnám nulové složky napětí bez změny rozsahu sítě. V těchto sítích není změna nulové složky napětí vyvolána změnou hodnoty zemního kapacitního proudu sítě. Výhodou je, že v těchto sítích nedochází k nadměrnému ladění zhášecí tlumivky. Běžná automatika v obdobných sítích může provádět až několik set ladění zhášecí tlumivky za den. Ve vyladěném stavu proudový ukazatel zhášecí tlumivky udává hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. Přesnost měření je ovlivněna přesností odečtu hodnoty ukazatele proudového nastavení. Proudové nastavení zhášecí tlumivky je možné odečíst na mechanickém ukazateli nebo na instalovaném odporovém ukazateli proudového nastavení zhášecí tlumivky (potenciometru). Přesnost odečtu proudové hodnoty je omezená, avšak pro stanovení přibližné hodnoty zemního kapacitního proudu sítě vyhovuje.

Po vypnutí vývodu v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů můžeme z rozdílu proudového nastavení zhášecí tlumivky určit hodnotu zemního kapacitního proudu vývodu. Jedná se opět o relativně přesnou metodu měření hodnoty zemního kapacitního proudu sítě bez nutnosti vytváření umělého zemního spojení. V případě, že je napájecí rozvodna realizována jako více systémová, lze jednotlivé vývody postupně převádět na jiný systém a tak můžeme proměřit zemní fázovou kapacitu všech vývodů, a to bez omezení připojených odběratelů.

4.4 Určování hodnoty zemního kapacitního proudu ze záznamů zemních ochran

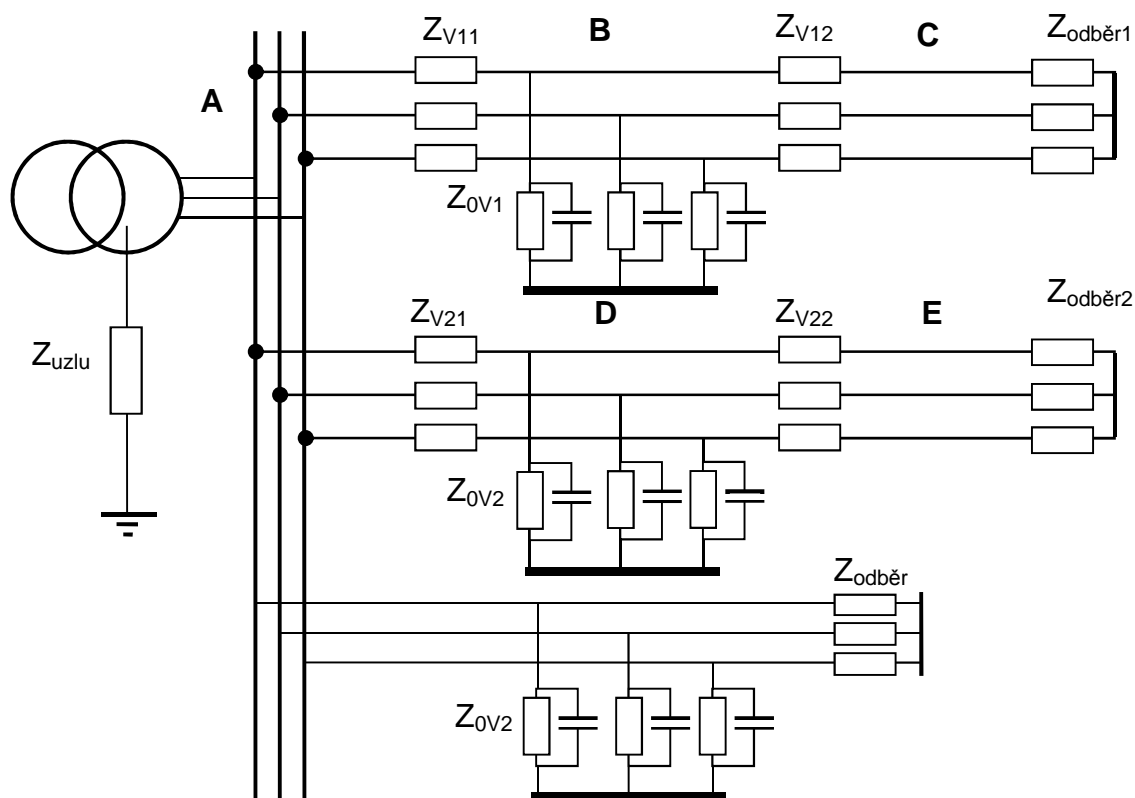
Ve vývodech, kde jsou instalovány zemní ochrany se záznamem poruchových hodnot, je možné využít těchto ochran ke stanovení hodnoty zemního fázového kapacitního proudu vývodu. Při kovovém zemním spojení ve vývodu bez poruchy má nulová složka proudu vývodu hodnotu odpovídající zemnímu kapacitnímu proudu vývodu. Při zemním spojení lze zjistit hodnoty zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů, kromě vývodu se zemní poruchou. Touto metodou se budu podrobněji zabývat v kapitole 7.1, kde popisují způsob přibližného určení zemního kapacitního proudu při zemním spojení.

5 MODEL SÍTĚ VN PRO RŮZNÉ ZPŮSOBY UZEMNĚNÍ UZLU SÍTĚ

Pro analýzu a řešení problémů v síti VN je nutné studovat velké množství různých provozních a poruchových stavů. Jedná se o zjišťování příčin problémů a následné testování návrhu opatření směřujících k eliminaci řešeného problému. V provozní praxi není reálné uskutečňovat velké množství pokusů na skutečné síti. Proto je nutné k řešení daného problému vytvořit matematický model. Pro řešení problému stanovení hodnot zemního kapacitního proudu vývodu jsem vytvořil matematický model VN sítě s možností změny způsobu uzemnění uzlu a parametrů sítě. Tento matematický model umožňuje porovnávání dvou vývodů při možnosti změn jejich podélných i příčných parametrů. Zároveň při modelování sítě bylo nutné zajistit co nejreálnější výsledky při různých provozních i poruchových stavech. Pro potřeby modelování provozních a poruchových stavů jsem zvolil zjednodušené schéma VN sítě zobrazené na Obr. 21. Toto schéma umožňuje modelování vývodu s podélnou i příčnou poruchou. Modelováním dvou vývodů mi umožnilo současně sledovat poměry ve vývodu bez poruchy a s poruchou. Modelování poruchových stavů je zaměřeno zejména na jednofázové poruchy, změnu příčných parametrů a různé způsoby uzemnění uzlu sítě u napájecího transformátoru. Podrobný popis modelu jsem uvedl v příloze 1.

5.1 *Stručný popis modelu VN sítě*

Modelovaná síť dle obrázku je Obr. 21 napájena transformátorem, pro který jsou zadány jeho štítkové parametry. V modelu jsem uvažoval pouze podélné parametry transformátoru. Sekundární vinutí transformátoru je zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem. Vyvedený střed napájecího transformátoru lze ponechat jako izolovaný, nebo jej lze přímo, případně nepřímo uzemnit. Uzemnění středu transformátoru je možné zadat přes impedanci tvořenou paralelní kombinací odporu a reaktance. V uzlu „A“ můžeme sledovat elektrické poměry na přípojnici za napájecím transformátorem. Zde jsou rovněž připojeny příčné parametry celé sítě (kapacita a svod) kromě dvou vývodů (vývod s uzly ABC a ADE). Zároveň je možné modelovat zatížení transformátoru a obou vývodů. Na vývodech lze modelovat symetrické i nesymetrické mezifázové zatížení. Mezi prvním bodem vývodu „B“, respektive „D“, a napájecí rozvodnou jsem vedení modeloval obráceným gama článkem. Podélnou impedanci tvoří odpor a reaktance vedení. Pro každou fázi je možné zadat jinou hodnotu podélné impedance. Model umožňuje simulovat i přetržení fázového vodiče. V prvním bodě vývodu „B“, respektive „D“, se zadávají příčné parametry vývodu. Zadává se zde hodnota svodového odporu a hodnota fázového kapacitního nabíjecího proudu vývodu. V tomto bodě lze modelovat kovové i odporové zemní spojení.



Obr. 21 Schéma pro modelování provozních i poruchových stavů v VN síti

5.2 Použitá metoda výpočtu

Pro modelování sítě, dle schématu zobrazeném na obrázku Obr. 21, jsem použil metodu uzlových napětí. Základem je popis elektrického obvodu pomocí uzlových napětí U_i . Tato metoda umožňuje popsat schéma relativně malým počtem rovnic v komplexním oboru čísel.

Ze schématu sítě je patrné, že metoda uzlových napětí vychází z pěti uzlových napětí vždy pro tři fáze a napětí uzlu sítě proti zemi. Tímto způsobem dostáváme 16 rovnic v komplexním oboru. Jednu rovnici jsem nahradil nezávislou rovnicí vycházející z I. Kirchhoffova zákona. Tato rovnice je sestavena pro součet proudů tekoucích do země.

Detaily použití metody uzlových napětí lze nalézt například v literatuře [3] a [4]. Celý výpočet byl naprogramován v jazyce Borland C++. Pro řešení rovnic v komplexním oboru jsem uplatnil modifikovanou Gauss-Saidelovu metodu popsanou v literatuře [7]. Pro potřeby modelování je možné měnit některé parametry sítě v definovaném rozsahu a se zadaným krokem. Například můžeme měnit velikost odporu zemní poruchy, impedanci uzemnění uzlu sítě (simulace ladění zhášecí tlumivky), podélnou impedanci vedení, fázovou zemní kapacitní nesymetrii atd. Výsledky výpočtů jsou ukládány do textového souboru. Tento textový soubor obsahuje veličiny a jejich proměnné hodnoty, které je možné pro daný výpočet navolit. V textovém souboru jsou obsaženy rovněž hodnoty vstupních parametrů, které se během výpočtu měnily. Data jsem využil i pro následné grafické zobrazení výsledků.

6 NOVÁ NEPŘÍMÁ METODA PŘIBLIŽNÉHO URČENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU SÍTĚ

V sítích VN provozovaných s izolovaným uzlem bude při jednofázové zemní poruše protékat místem poruchy zemní kapacitní proud sítě. Velikost poruchového proudu je ovlivněna použitým typem vedení a rozsahem sítě. Důvodů, proč zjišťovat hodnoty zemního kapacitního proudu sítě, může být mnoho. Jedním z nejdůležitějších důvodů je bezpečnost provozu VN sítí. Při jednofázové zemní poruše je nutné dodržet dovolené hodnoty dotykových napětí.

Právě bezpečnost byla jedním z hlavních důvodů, které vedly i mě k nalezení jednoduché a snadno použitelné metody pro zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu v sítích s izolovaným uzlem. Dalším důvodem byl také častý požadavek provozovatele sítě na změnu způsobu uzemnění uzlu sítě, kdy u vybraných sítí požadoval provozovatel přechod na sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů. Pro splnění uvedeného požadavku bylo nutné stanovit požadovaný výkon zhášecí tlumivky. Doposud se měření zemního kapacitního proudu provádělo vytvořením umělého zemního spojení. To však s sebou přinášelo riziko vzniku vícefázové zemní poruchy s možností výpadku části vedení (napájených odběrů). Navrhl jsem tedy metodu založenou na vytvoření umělé nesymetrie v síti. Zároveň jsem se snažil snížit riziko vzniku vícefázové zemní poruchy oproti přímé metodě měření hodnoty poruchového proudu zemního spojení.

6.1 Popis návrhu nové nepřímé metody pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu umělým zvýšením nesymetrie v síti s izolovaným uzlem

Na myšlenku využít umělého zvýšení nesymetrie hodnot fázových zemních kapacit pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu v síti mě přivedly problémy s laděním zhášecí tlumivky v sítích s vysokou fázovou nesymetrií zemních kapacit. Zde vlivem fázové kapacitní nesymetrie dochází ke zvýšení hodnoty nulové složky napětí a vzniká vysoká fázová napěťová nesymetrie. Při řešení problému s fázovou napěťovou nesymetrií jsem musel určovat velikost fázové zemní kapacitní nesymetrie v síti. Vznikla tak myšlenka na využití opačného postupu. Dospěl jsem k úmyslu vyvolat v síti definovanou fázovou zemní kapacitní nesymetrii a z nesymetrie fázových napětí odvodit hodnotu fázové zemní kapacity sítě.

Sítě s izolovaným uzlem jsou k těmto nesymetriím méně citlivé než sítě s kompenzací zemních kapacitních proudů. U sítí s izolovaným uzlem má nulová složka napětí v běžném provozním stavu téměř nulovou hodnotu. Aby došlo ke změně nulové složky napětí, je nutné vytvořit v síti výrazně vyšší nesymetrii než je běžná zemní fázová kapacitní nesymetrie sítě. Ze sledování napěťových poměrů v síti s izolovaným uzlem, tzn. změn fázových napětí a nulové složky napětí, a po vytvoření výrazné fázové zemní kapacitní nesymetrie jsem dospěl k závěru, že se této metody dá využít pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě. Pro vytváření kapacitní nesymetrie lze využít kondenzátorů nebo připojování části kabelového vedení pouze

do jedné fáze. Základ metody spočívá v připínání známé kapacity mezi jednu fázi a zem. Tato metoda byla ověřována v síti 6 kV. Pro tyto sítě jsem použil třífázové vysokonapěťové kompenzační kondenzátory, které jsem zapojil jako jednofázové, a to mezi jednu fázi a zem. Před vlastním testováním metody jsem opět využil možnosti simulování výsledků na matematickém modelu. Na základě rozboru výsledků z matematického modelu jsem určil požadavky na vstupní veličiny. Po návrhu metodiky měření a zpracování vstupních dat jsem vytvořil software. Tento software mi umožnil jednoduché a rychlé zpracování naměřených dat při dalších testech této metody. Později jsem uvedený software přepracoval do uživatelské verze. Tuto metodu lze upravit i pro připínání indukčnosti mezi jednu fázi a zem. Ve fázi s připojenou indukčností dojde k „poklesu“ fázové zemní kapacity proti zemi. Jedná se o analogii připínání kapacity (zvětšování zemní kapacity v jedné fázi proti zemi).

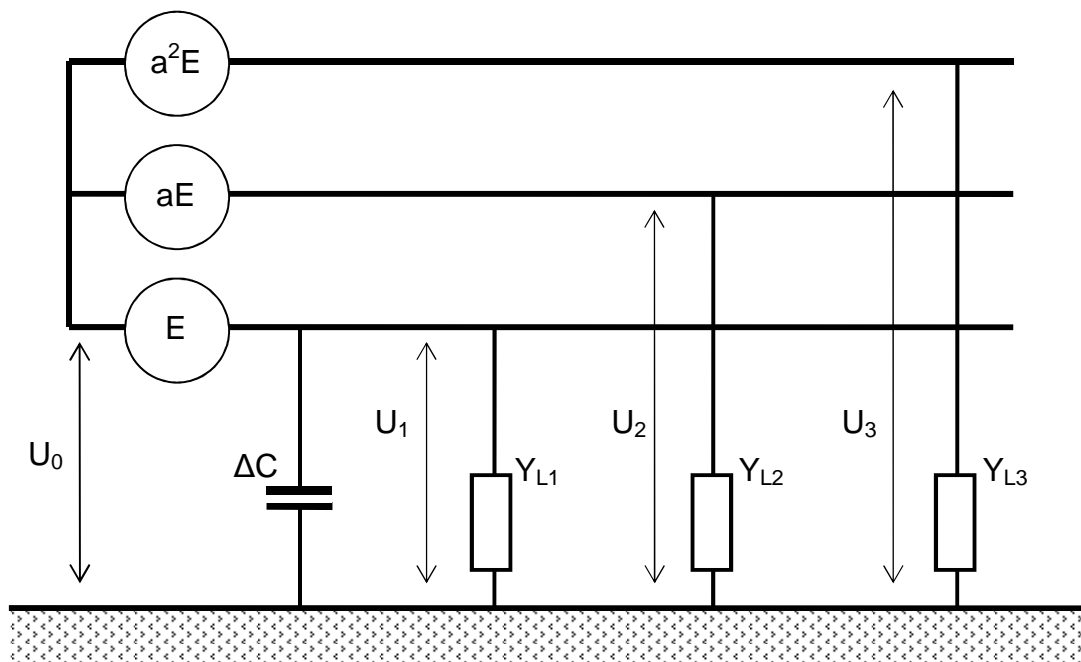
6.2 Metodika výzkumu v síti s izolovaným uzlem

Při výzkumu jsem nejprve analyzoval změny elektrických veličin v izolované síti vyvolané změnou fázové zemní kapacitní nesymetrie. Zaměřil jsem se na elektrické veličiny, které jsou jednoduchým způsobem měřitelné a u kterých je vliv změny fázové kapacitní nesymetrie nejvýznamnější. Na základě výsledků analýzy jsem se soustředil na sledování změn vyvolaných změnou fázové zemní kapacitní nesymetrie u fázových napětí v síti a u nulové složky napětí v síti. Po optimalizaci matematických vztahů jsem provedl návrh metody určování hodnoty zemního kapacitního proudu izolované sítě. Získal jsem tak dvě možné varianty řešení. První spočívá ve vyhodnocení změn fázových napětí a druhá ve vyhodnocení změny nulové složky napětí. První varianta umožňuje kromě určení hodnoty zemního kapacitního proudu získat informace i o izolačním stavu sítě. Z tohoto důvodu jsem hlavní pozornost soustředil na první variantu. Na základě analýzy vlivů fázové zemní kapacitní nesymetrie na napěťové poměry v síti a na základě matematického popisu těchto zákonitostí jsem odvodil vztahy pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu v síti s izolovaným uzlem. Syntézou těchto vztahů s výsledky modelovaných příkladů jsem dospěl k závěrům, které jsem konfrontoval se záznamy z reálných měření v sítích s izolovaným uzlem. Získané poznatky jsem využil jako podklad pro optimalizaci výpočtu. Určil jsem rovněž výčet měřených veličin, které je nutné změřit, abych mohl jednoznačně stanovit hodnotu zemní fázové kapacity sítě. Dále jsem vytvořil SW pro výpočet fázové zemní kapacity z rozdílu fázových napětí mezi stavy bez připojené fázové kapacity a s připojenou fázovou kapacitou. Definoval jsem postup měření spočívající v umělé vyvolané fázové zemní kapacitní nesymetrii, která vznikne připojením známé kapacity mezi jednu fázi a zem. Ověřil jsem si, že tento postup plně postačuje k jednoznačnému určení hodnoty zemního kapacitního proudu v síti s izolovaným uzlem. Pro použití této metody je nutné měřit jednu hodnotu sdruženého napětí a dvě hodnoty fázových napětí. Fázová napětí je nutné měřit s připojenou přídavnou kapacitou i bez připojené přídavné kapacity. Jedno z fázových napětí musí být při tom měřeno ve fázi s připojovanou hodnotou přídavné kapacity. Posledním krokem bylo ověření metody v běžném provozu. Metoda byla odzkoušena v síti 6 kV s izolovaným

uzlem. Pro kontrolu byl proveden výpočet zemních kapacitních proudů na základě zadaných délek vedení a také bylo realizováno zemní spojení s měřením hodnoty proudu v místě zemní poruchy.

6.3 Výpočet metodou uzlových napětí v síti s izolovaným uzlem

Pro ověření reálnosti využití umělého zvýšení fázové zemní kapacitní nesymetrie k určení hodnoty zemního kapacitního proudu izolované sítě jsem nejprve vycházel z metody uzlových napětí. Pro výpočet jsem použil jednoduchý obvod, který je zobrazen na obrázku Obr. 22.



Obr. 22 Jednoduché schéma pro ověření možnosti zjišťování zemního kapacitního proudu sítě umělým vytvořením fázové zemní kapacitní nesymetrie v síti v izolované síti.

Příčné admittance vedení jsem popsal rovnicí za použití střední hodnoty admittance a odchylkou od střední hodnoty.

$$\vec{Y}_i = G_i + j\omega C_i \quad (6.1)$$

$$\vec{Y}_i = \vec{Y} + \Delta\vec{Y}_i = G + j\omega C + \Delta G_i + \Delta j\omega C_i \quad (6.2)$$

V uvedeném zapojení jsou pouze napětí zdroje E a napětí uzlu sítě proti zemi U_0 . Fázová napětí jsou pak dána vektorovým součtem napětí uzlu sítě a napětí zdroje v jednotlivých fázích. V síti s izolovaným uzlem jsem součet proudů tekoucích přes příčné admittance vyjádřil pomocí napětí zdroje a napětí uzlu sítě.

$$E(\vec{Y}_1 + \vec{a}\vec{Y}_2 + \vec{a}^2\vec{Y}_3) = \vec{U}_0(\vec{Y}_1 + \vec{Y}_2 + \vec{Y}_3) \quad (6.3)$$

Kde E hodnota fázového napětí
 U_0 napětí uzlu sítě proti zemi
 Y příčná fázová admitance sítě
 a, a^2 komplexní operátor.

$$\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Dále jsem dosadil vztah pro příčnou admitanci dle rovnice (6.2) a do vztahu (6.3), abych vyjádřil napětí uzlu sítě.

$$\bar{U}_0 = E \frac{(\Delta\bar{Y}_1 + \bar{a}\Delta\bar{Y}_2 + \bar{a}^2\Delta\bar{Y}_3)}{3\bar{Y} + \Delta\bar{Y}_1 + \Delta\bar{Y}_2 + \Delta\bar{Y}_3} = E \frac{\bar{Y}(1 + \bar{a} + \bar{a}^2) + (\Delta\bar{Y}_1 + \bar{a}\Delta\bar{Y}_2 + \bar{a}^2\Delta\bar{Y}_3)}{3\bar{Y} + \Delta\bar{Y}_1 + \Delta\bar{Y}_2 + \Delta\bar{Y}_3} \quad (6.4)$$

Matematicky jsem vztah (6.4) upravil na základě rovnic vyjadřující součet komplexních operátorů (6.5) a podmínky (6.6), že součet všech odchylek od střední hodnoty je nulový.

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0 \quad (6.5)$$

$$\Delta Y_1 + \Delta Y_2 + \Delta Y_3 = 0 \quad (6.6)$$

Po úpravě je výsledkem vztah (6.7).

$$\bar{U}_0 = E \frac{(\Delta\bar{Y}_1 + \bar{a}\Delta\bar{Y}_2 + \bar{a}^2\Delta\bar{Y}_3)}{3\bar{Y}} \quad (6.7)$$

V našich podmínkách se provozují relativně symetrické sítě. Odchylka fázových zemních kapacit bývá zejména u třífázových kabelových vedení menší než 0,2% z celkové fázové zemní kapacity. Pro výpočet můžeme odchylku zanedbat a rovnice (6.7) bude mít přibližně nulovou hodnotu napětí uzlu sítě proti zemi. Vytvoříme-li významnou fázovou zemní kapacitní nesymetrii v izolované síti připojením kapacity mezi jednu fázi a zem, dojde ke zvýšení napětí uzlu sítě proti zemi.

Rovnici (6.7) jsem upravil zanedbáním svodu a přidáním fázové zemní kapacity ΔC do fáze L_1 . Hodnota svodu je vůči fázové zemní susceptanci zanedbatelná, zpravidla na úrovni jednotek procent. Proto je možné zanedbat svodovou vodivost bez výraznějšího ovlivnění výsledku. Střední hodnota příčné admitance je:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= j\omega C + \frac{j\omega\Delta C}{3} \\ \Delta\bar{Y}_1 &= \bar{Y} + j\omega\Delta C - \bar{Y} = \bar{Y} + j\omega\Delta C - \bar{Y} - \frac{j\omega\Delta C}{3} = +\frac{2j\omega\Delta C}{3} \\ \Delta\bar{Y}_2 &= \bar{Y} - \bar{Y} = \bar{Y} - \bar{Y} - \frac{j\omega\Delta C}{3} = -\frac{j\omega\Delta C}{3} \\ \Delta\bar{Y}_3 &= \bar{Y} - \bar{Y} = \bar{Y} - \bar{Y} - \frac{j\omega\Delta C}{3} = -\frac{j\omega\Delta C}{3} \end{aligned} \quad (6.8)$$

Vtáh (6.8) jsem dosadil do rovnice (6.4) a dále upravil.

$$\vec{U}_0 = E \frac{\frac{2j\omega\Delta C}{3} - a \frac{j\omega\Delta C}{3} - a^2 \frac{j\omega\Delta C}{3}}{3\bar{Y} + j\omega\Delta C} = E \frac{j\omega\Delta C}{3\bar{Y} + j\omega\Delta C}$$

(6.9)

Poté jsem vyjádřil příčnou admittance \bar{Y} :

$$\bar{Y} = \frac{j\omega\Delta C}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)$$

(6.10)

Rovnici (6.10) jsem dále rozepsal do tvaru:

$$j\omega C_0 = \frac{j\omega\Delta C}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)$$

$$C_0 = \frac{\Delta C}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)$$

(6.11)

Na základě předchozího odvození je zřejmé, že této metody lze využít pro zjišťování hodnoty zemních kapacitních proudů v síti s izolovaným uzlem. Pro další podrobnější prostudování možností této metody jsem volil metodu souměrných složek. Tato metoda je při výpočtech v třífázových sítích nejjednodušší.

6.4 Výpočet metodou souměrných složek v síti s izolovaným uzlem

Pro řešení ustálených poměrů třífázového systému v provozním nebo poruchovém stavu je výhodné využívat metodu souměrných složek (metoda C. L. Fortescue - 1918). Tato metoda spočívá v rozložení jakékoliv nesouměrné trojfázové soustavy do tří souměrných složek. Jedná se o souslednou, zpětnou a nulovou (netočivou) soustavu složek. Pouze sousledná složka je aktivní tzn., že pouze tato složka obsahuje zdroj. Zpětná a nulová složka je pasivní. Impedance jednotlivých složek je tvořena impedancí zdroje (pro zjednodušení impedancí napájecího transformátoru), impedancí vedení atd.

Mezi soustavou souměrných složek a třífázovou nesouměrnou soustavou platí následující vztahy. Pro netočivou složku:

$$\vec{U}_{(0)} = \frac{\vec{U}_a + \vec{U}_b + \vec{U}_c}{3} \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V})$$

(6.12)

Pro souslednou složku:

$$\vec{U}_{(1)} = \frac{\vec{U}_a + a\vec{U}_b + a^2\vec{U}_c}{3} \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V})$$

(6.13)

Pro zpětnou složku:

$$\vec{U}_{(2)} = \frac{\vec{U}_a + \vec{a}^2 \vec{U}_b + \vec{a} \vec{U}_c}{3} \quad (\text{V}; \text{V}, \text{V}, \text{V}) \quad (6.14)$$

Kde operátor „a“ je definován jako jednotkový vektor v komplexní rovině s natočením o 120° a operátor \vec{a}^2 s natočením o 240°.

$$\vec{a} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6.15)$$

$$\vec{a}^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (6.16)$$

Zpětná transformace pro přepočítání napětí souměrných složek na napětí třífázové soustavy je definována vztahem:

$$\begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \vec{a}^2 & \vec{a} \\ 1 & \vec{a} & \vec{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{U}_{(0)} \\ \vec{U}_{(1)} \\ \vec{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

V maticovém počtu lze pro soustavy rovnic vyjádřit dvě vzájemně inverzní lineární transformace.

Sloupcová matice nesouměrných složek:

$$[\vec{U}] = \begin{bmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

Sloupcová matice souměrných složek:

$$[\vec{U}_F] = \begin{bmatrix} \vec{U}_{(0)} \\ \vec{U}_{(1)} \\ \vec{U}_{(2)} \end{bmatrix} \quad (6.19)$$

Transformační matice:

$$[\vec{F}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \vec{a}^2 & \vec{a} \\ 1 & \vec{a} & \vec{a}^2 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Maticově můžeme vztah (6.17) vyjádřit: $[\vec{U}] = [\vec{F}] \cdot [\vec{U}_F]$

Inverzní transformační matice je :

$$[\vec{F}]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \vec{a} & \vec{a}^2 \\ 1 & \vec{a}^2 & \vec{a} \end{bmatrix}$$

(6.21)

Pro zemní spojení ve fázi L_1 s nulovým odporem poruchy platí následující podmínky:

a) fázové napětí ve fázi L_1 proti zemi je nulové

$$\vec{U}_{L_1} = \vec{U}_{(1)} + \vec{U}_{(2)} + \vec{U}_{(0)} = 0$$

(6.22)

b) Poruchový proud je pouze ve fázi L_1

$$\vec{I}_{L_1} = \vec{I}_P; \quad I_{L_2} = 0; \quad I_{L_3} = 0;$$

(6.23)

Kde: I_{L_1} je proud fáze L_1
 I_{L_2} je proud fáze L_2
 I_{L_3} je proud fáze L_3
 I_P je poruchový proud.

S využitím metody souměrných složek můžeme vyjádřit fázové proudy při zemním spojení v síti:

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_{L_1} \\ \vec{I}_{L_2} \\ \vec{I}_{L_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \vec{a}^2 & \vec{a} & 1 \\ \vec{a} & \vec{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{I}_{(0)} \\ \vec{I}_{(1)} \\ \vec{I}_{(2)} \end{bmatrix}$$

(6.24)

$$\vec{I}_{(1)} = \frac{1}{3} (\vec{I}_{L_1} + \vec{a} \vec{I}_{L_2} + \vec{a}^2 \vec{I}_{L_3})$$

(6.25)

$$\vec{I}_{(2)} = \frac{1}{3} (\vec{I}_{L_1} + \vec{a}^2 \vec{I}_{L_2} + \vec{a} \vec{I}_{L_3})$$

(6.26)

$$\vec{I}_{(0)} = \frac{1}{3} (\vec{I}_{L_1} + \vec{I}_{L_2} + \vec{I}_{L_3})$$

(6.27)

Po dosazení (6.24) do rovnic pro složkové proudy a úpravě dostaneme:

$$\vec{I}_{(1)} = \vec{I}_{(2)} = \vec{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \vec{I}_P$$

(6.28)

Rovnici (6.28) odpovídá stav, kdy jednotlivé složky v místě poruchy jsou zapojeny do série.

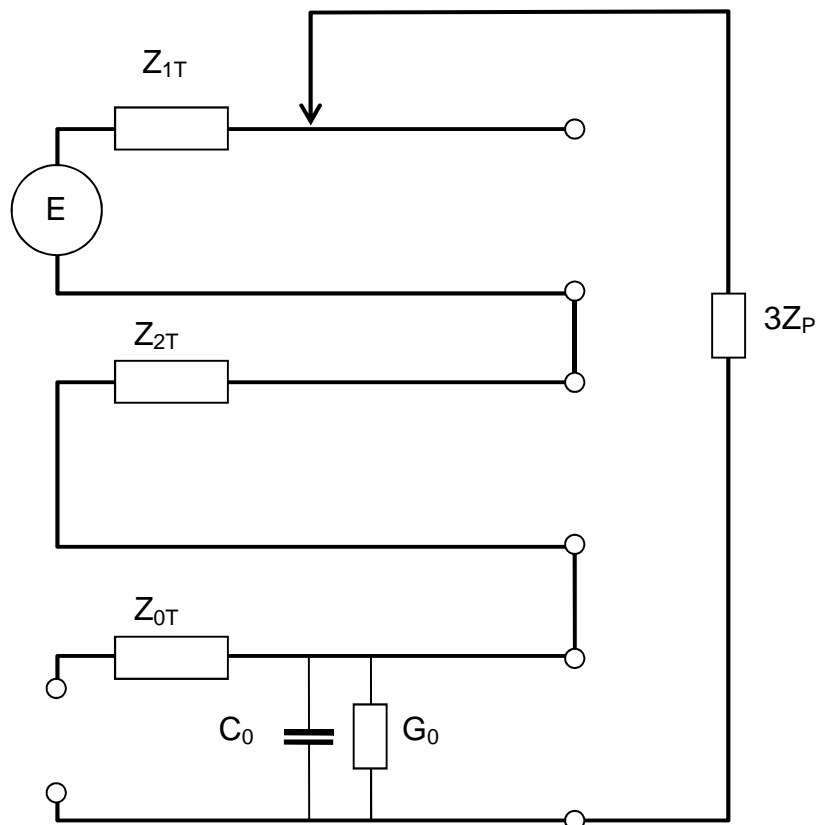
Připojíme-li přidavnou impedanci Z_P do jedné fáze v napájecí rozvodně, můžeme ve schématu zanedbat všechny podélné impedance vedení. V uvažovaném případě impedanci Z_P představuje kapacitní reaktance tvořená kapacitou ΔC . Vlivem relativně velké hodnoty připojované impedance je výrazně omezena hodnota protékajícího proudu. Při nízké hodnotě proudu lze zanedbat hodnoty podélné impedance. Úbytek napětí na těchto impedancích je zanedbatelný.

Sousledná a zpětná impedance je zpravidla totožná. Nulová impedance je ovlivněna zejména příčnými parametry vedení. Impedance jednotlivých složek lze tedy vyjádřit rovnicí (6.29).

$$\vec{Z}_{1T} = \vec{Z}_{2T}$$

$$\vec{Z}_0 = \frac{1}{G_0} - j \frac{1}{\omega C_0}$$

(6.29)



Obr. 23 Schéma pro odvození vztahů výpočtu zemní fázové kapacity při uměle vyvolané nesymetrii v síti s izolovaným uzlem

Proud protékající obvodem zobrazeným na Obr. 23 můžeme popsat rovnicí (6.30).

$$\vec{I} = \frac{E}{\vec{Z}_{(1)} + \vec{Z}_{(2)} + \vec{Z}_{(0)} + \vec{Z}_P} = \frac{E}{2\vec{Z}_{(1)} + \vec{Z}_{(0)} + \vec{Z}_P}$$

(6.30)

Na základě znalosti proudu obvodu si můžeme vyjádřit jednotlivá složková napětí.

$$\begin{aligned}\vec{U}_{(0)} &= \vec{I} \cdot \vec{Z}_{(0)} = \frac{E}{2\vec{Z}_{(1)} + \vec{Z}_{(0)} + \vec{Z}_p} \vec{Z}_{(0)} \\ \vec{U}_{(2)} &= \vec{I} \cdot \vec{Z}_{(2)} = \frac{E}{2\vec{Z}_{(1)} + \vec{Z}_{(0)} + \vec{Z}_p} \vec{Z}_{(1)} \\ \vec{U}_{(1)} &= E - \vec{I} \cdot \vec{Z}_{(1)} = E \left(1 - \frac{\vec{Z}_{(1)}}{2\vec{Z}_{(1)} + \vec{Z}_{(0)} + \vec{Z}_p} \right)\end{aligned}$$

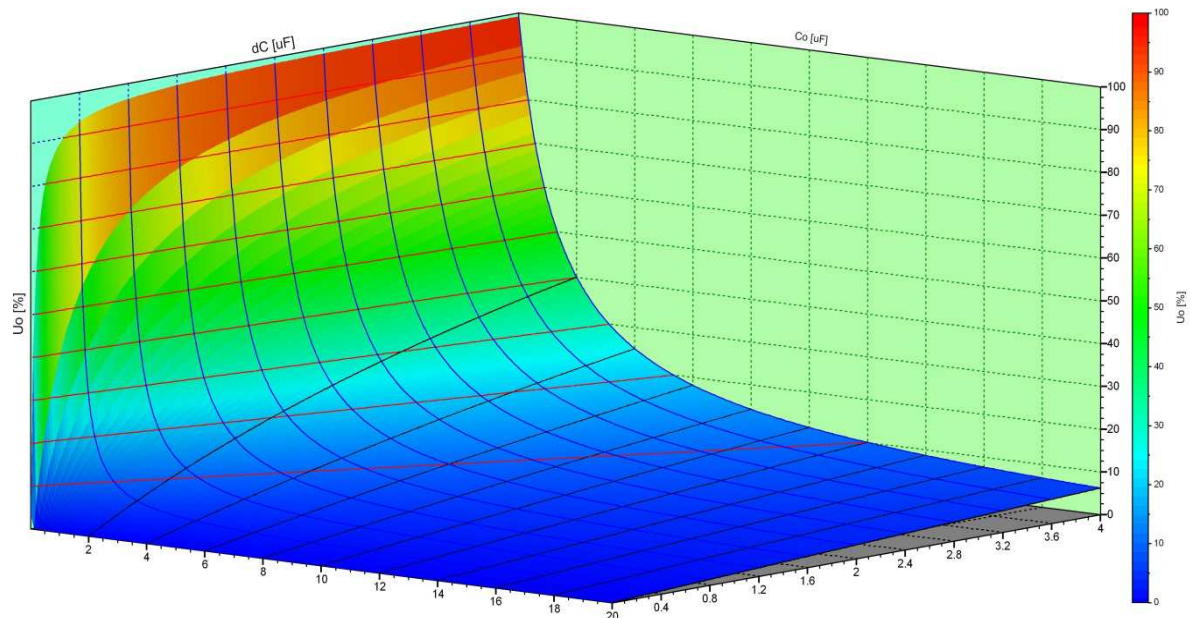
(6.31)

Fázová napětí můžeme vyjádřit zpětnou transformací složkových napětí.

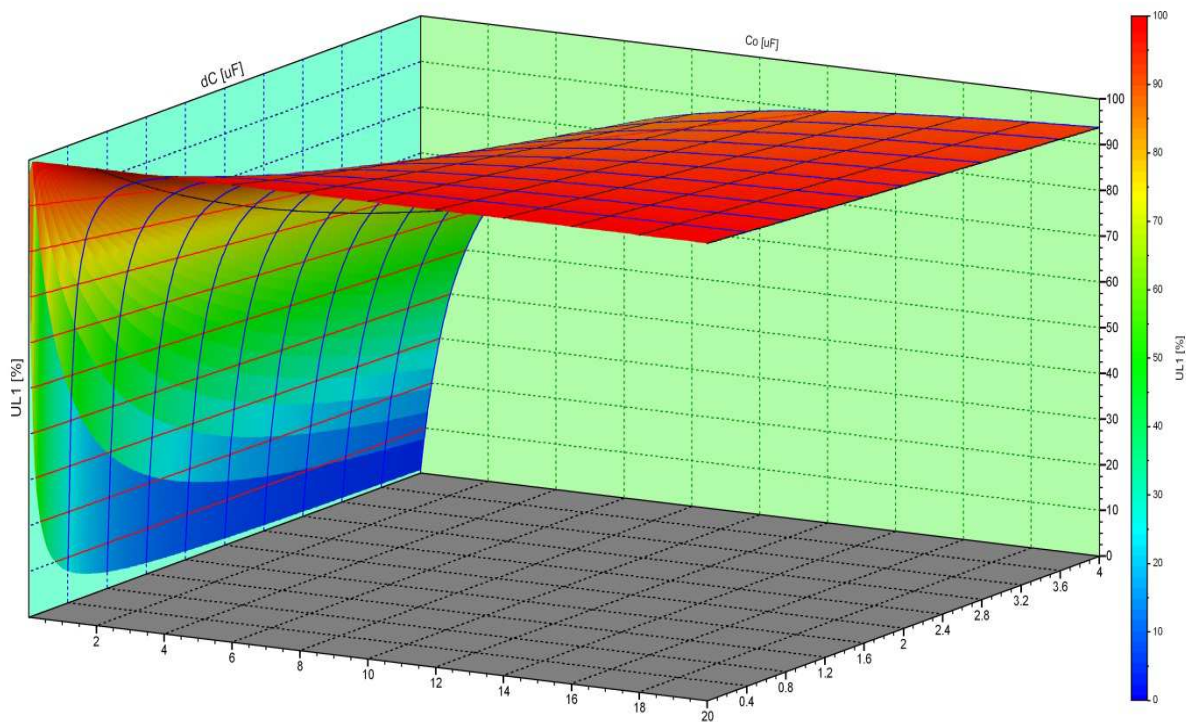
$$\begin{aligned}\vec{U}_{L1} &= \vec{U}_{(1)} + \vec{U}_{(2)} + \vec{U}_{(0)} \\ \vec{U}_{L2} &= \vec{a}\vec{U}_{(1)} + \vec{a}^2\vec{U}_{(2)} + \vec{U}_{(0)} \\ \vec{U}_{L3} &= \vec{a}^2\vec{U}_{(1)} + \vec{a}\vec{U}_{(2)} + \vec{U}_{(0)}\end{aligned}$$

(6.32)

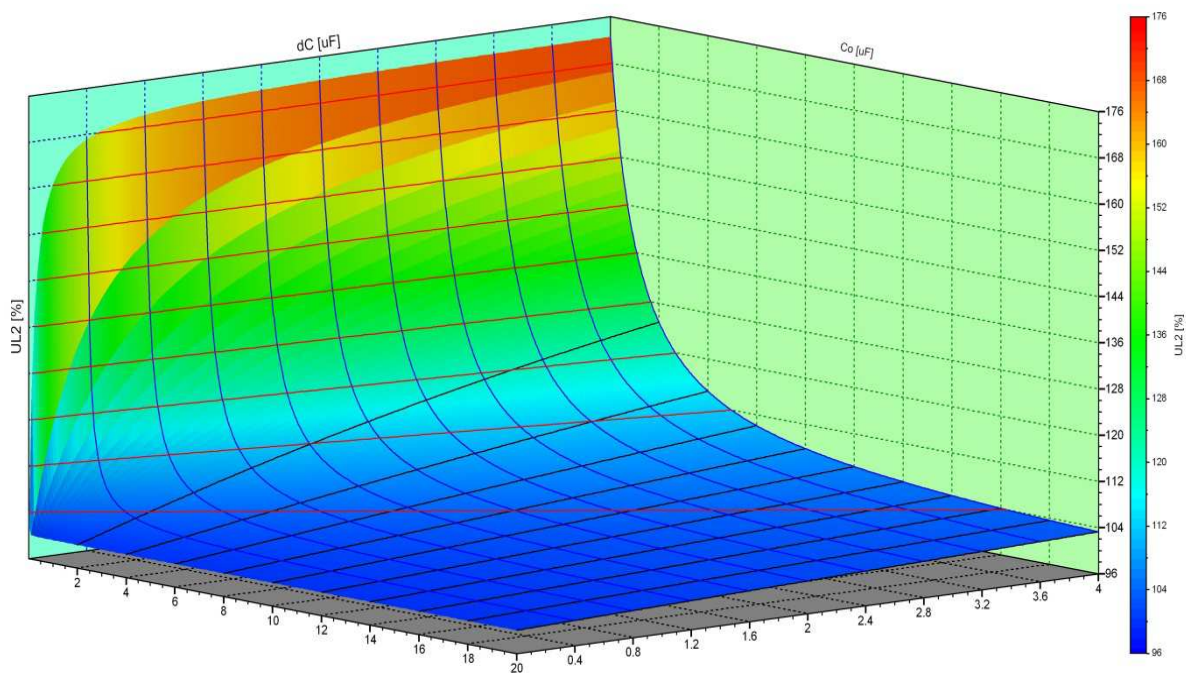
Impedance Z_p je tvořena připojovanou kapacitou ΔC do fáze L_1 . Na základě výše uvedených vztahů jsem graficky zobrazil závislost nulové složky napětí U_0 na celkové zemní kapacitě sítě C_0 a hodnotě připojované nesymetrické kapacity ΔC (Graf 38). Obdobnou závislost jsem zobrazil i pro fázová napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} (Graf 39, Graf 40 a Graf 41).



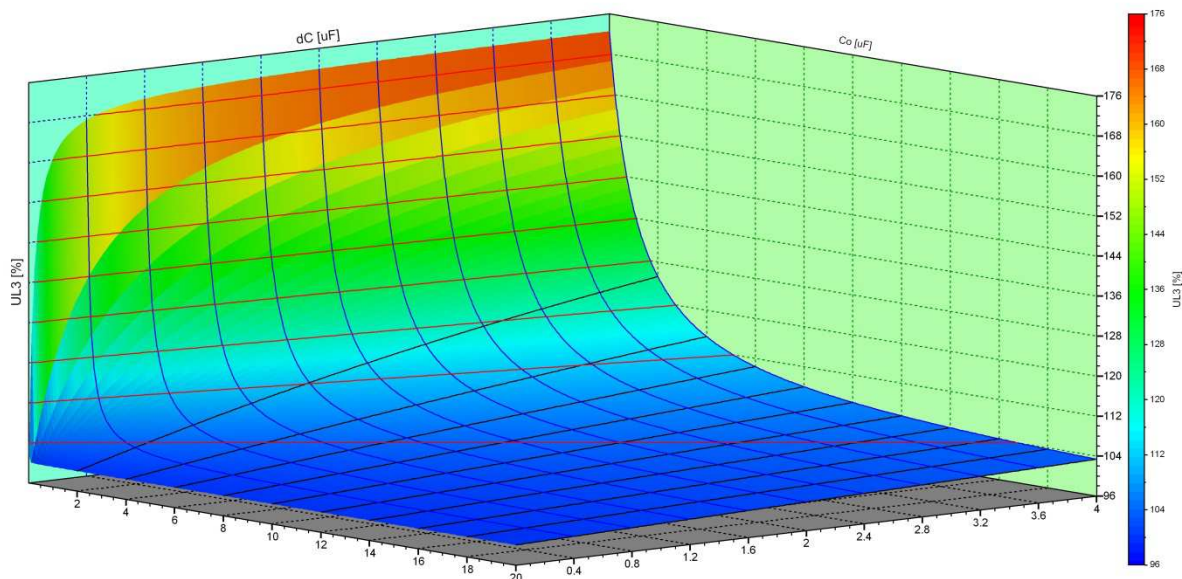
Graf 38 Závislost procentní velikosti nulové složky napětí U_0 na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1



Graf 39 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L1} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1



Graf 40 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L2} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1



Graf 41 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L3} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1

6.5 Způsob přibližného určení zemní fázové kapacity sítě nepřímou metodou v síti s izolovaným uzlem

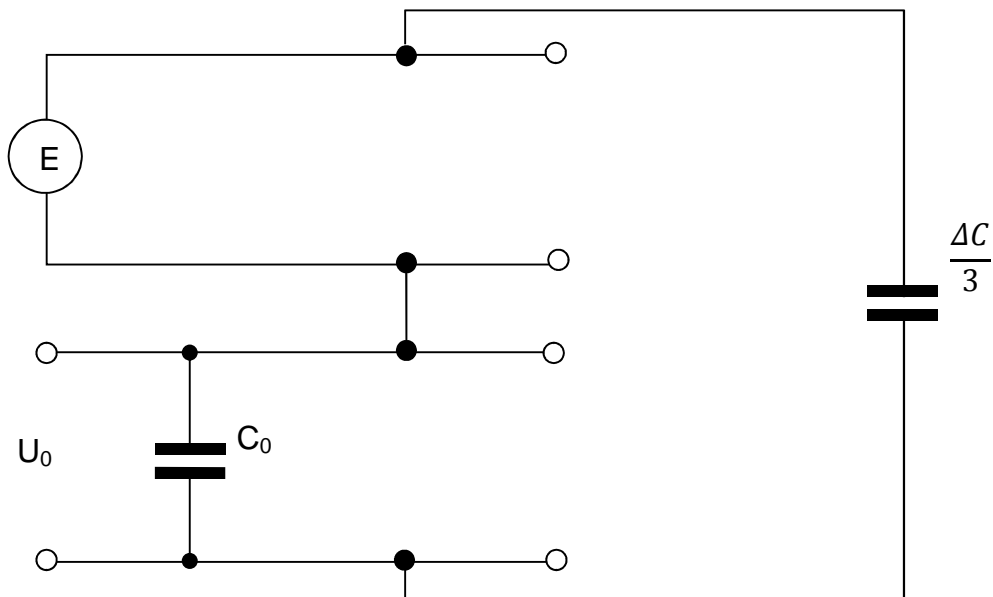
Pro určení zemní fázové kapacity sítě s izolovaným uzlem jsem nejprve stanovil následující zjednodušující předpoklady. Síť s izolovaným uzlem je téměř ideálně symetrická a obsahuje zanedbatelné svodové proudy (do cca 2% z hodnoty zemního kapacitního proudu sítě). V běžném provozním stavu je nulová složka napětí nižší než 0,1 % z fázové hodnoty napětí sítě. Uvažovaná síť s izolovaným uzlem neobsahuje extrémně dlouhé vývody s vyšší hodnotou podélné impedance. Vzhledem k tomu, že se zpravidla jedná o průmyslové kabelové sítě malého rozsahu nebo sítě pro napájení vlastních spotřeb elektrárenských bloků, jsou tyto zjednodušující požadavky reálné. Izolovaný uzel sítě se provozuje také v důlním prostředí. Zde mají některé sítě větší rozsah a provoz těchto sítí podléhá zvláštním důlním předpisům. U těchto sítí je požadována periodická kontrola velikosti zemního kapacitního proudu sítě. Pro zajištění vyšší bezpečnosti provozu sítě jsou instalovány hlídače izolačního stavu.

Dalším předpokladem je, že fázové zemní kapacity této sítě mají ve všech fázích stejnou hodnotu. Fázová napětí sítě jsou symetrická a rovněž jsou symetrická i sdružená napětí. Pro výpočet jsem zvolil metodu souměrných složek. Připínanou kapacitu zde můžeme modelovat jako poruchovou impedanci Z_P kapacitního charakteru. Zanedbáním všech podélných impedancí se celý obvod výrazně redukuje (viz obrázek Obr. 24).

$$Z_0 \gg Z_1; \quad Z_1 - > 0$$

$$U_1 = E; \quad U_2 = 0$$

(6.33)



Obr. 24 Schéma pro zjednodušený výpočet zemní fázové kapacity C_0 pomocí připojené přídavné kapacity ΔC

Proud obvodem jsem popsal rovnicí:

$$I = E \frac{j\omega C_0 \frac{\omega \Delta C}{3}}{\omega C_0 + \frac{\omega \Delta C}{3}}$$

(6.34)

Napětí U_0 jsem vyjádřil pomocí proudu tekoucího přes kapacitní impedanci tvořenou zemní fázovou kapacitou C_0 .

$$U_0 = \frac{1}{j\omega C_0} \cdot E \cdot j \frac{\omega C_0 \frac{\omega \Delta C}{3}}{\omega C_0 + \frac{\omega \Delta C}{3}}$$

(6.35)

Po úpravě rovnice jsem získal vztah pro U_0 :

$$U_0 = E \cdot \frac{\frac{\omega \Delta C}{3}}{\omega C_0 + \frac{\omega \Delta C}{3}} = E \frac{\frac{\Delta C}{3}}{\frac{\Delta C}{3} + C_0} = E \frac{\Delta C}{\Delta C + 3C_0}$$

(6.36)

Fázová napětí můžeme vyjádřit vztahy:

$$\begin{aligned} \vec{U}_{L1} &= E + \vec{U}_0 \\ \vec{U}_{L2} &= \vec{a}E + \vec{U}_0 \\ \vec{U}_{L3} &= \vec{a}^2E + \vec{U}_0 \end{aligned}$$

(6.37)

Budeme-li předpokládat, že síť s izolovaným uzlem je ideálně symetrická a má všechna fázová napětí stejně velká s posunem 120° . Připojením přídavné kapacity ΔC do jedné fáze vznikne v síti nesymetrie. Tato nesymetrie se projeví vzrůstem nulové složky napětí. Známe-li hodnotu připojované kapacity ΔC a změříme-li hodnotu nulové složky napětí, můžeme vypočítat hodnotu zemní fázové kapacity C_0 úpravou rovnice (6.36).

$$C_0 = \frac{E}{U_0} \cdot \frac{\Delta C}{3} - \frac{\Delta C}{3}$$

$$C_0 = \frac{\Delta C}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)$$

(6.38)

Kde

E	fázové napětí zdroje
C_0	fázová zemní kapacita
ΔC	přídavná kapacita
U_0	nulová složka napětí
ω	úhlová frekvence sítě.

Vztah (6.38) je shodný se vztahem (6.11). Obě metody dávají tedy shodné výsledky. Vztah (6.38) udává poměr mezi připojenou kapacitou v jedné fázi a celkovou zemní kapacitou sítě. Ze vztahu (6.38) vyplývá, že v symetrické síti s izolovaným uzlem je pro určení hodnoty zemní fázové kapacity rozhodující hodnota podílu velikosti fázového napětí E a velikosti nulové složky napětí U_0 .

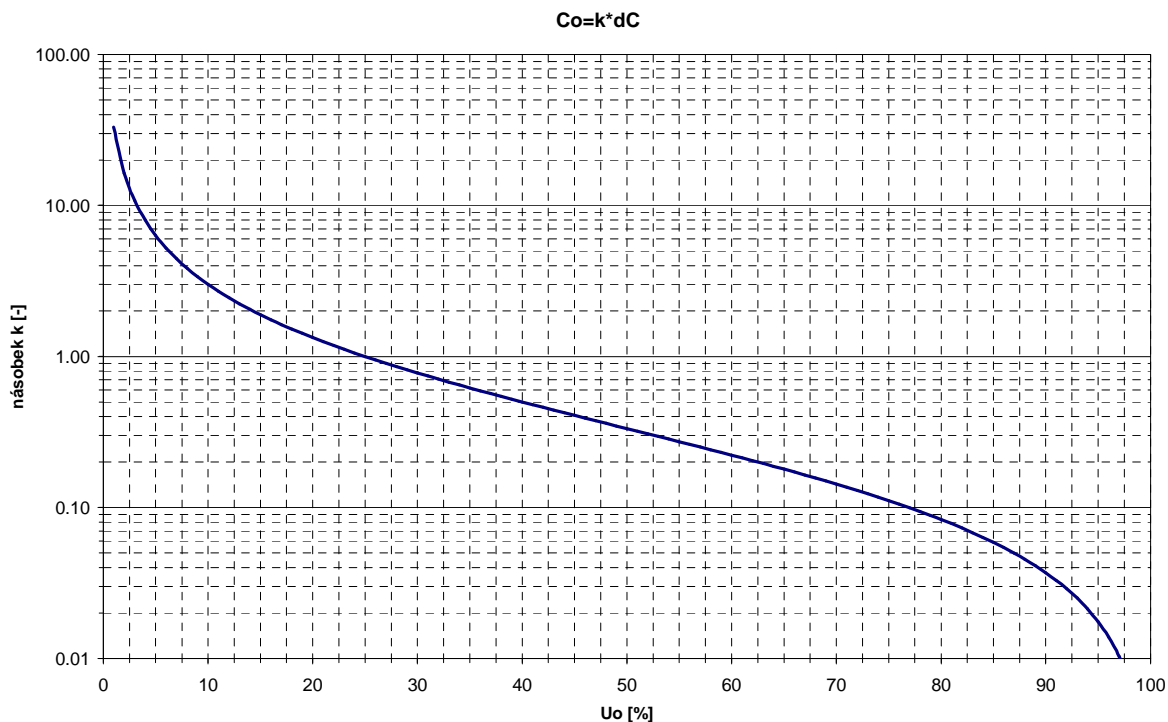
Pro určení hodnoty zemní fázové kapacity je nutné volit přídavnou kapacitu ΔC tak, aby po jejím připojení došlo k dostatečnému zvýšení nulové složky napětí. Krajní meze výpočtu ve vztahu (6.38) určují dva stavy. Prvním krajním stavem je, že po připojení přídavné kapacity ΔC nedojde ke zvýšení nulové složky napětí U_0 . Tomuto stavu odpovídá případ, kdy hodnota fázové zemní kapacity sítě bude mnohonásobně vyšší než hodnota připojované fázové přídavné kapacity ΔC . Druhým extrémem je stav, kdy fázová zemní kapacita sítě bude mít nulovou hodnotu. Po připojení přídavné fázové kapacity ΔC bude pak hodnota nulové složky napětí stejně velká jako je hodnota fázového napětí zdroje E. Pro praktické použití této metody je nutné, aby připojená přídavná kapacita ΔC způsobila zvýšení nulové složky napětí U_0 v síti na hodnotu mezi 10% až 80% fázového napětí sítě. Z výpočtu vyplývá, že touto metodou lze relativně přesně určit zemní fázovou kapacitu, která je v rozsahu 0,08 až 5 násobku hodnoty přídavné zemní kapacity ΔC . Tento násobek jsem označil jako k_C . Koeficient k_C získáme úpravou rovnice (6.38). V grafu (Graf 42) je znázorněna závislost koeficientu k_C na nulové složce napětí.

$$C_0 = k_C \cdot \Delta C$$

$$k_C = \frac{1}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right)$$

(6.39)

Před vlastním měřením je vhodné alespoň orientačně vědět očekávanou hodnotu zemního kapacitního proudu sítě. Pro první určení lze využít přibližnou metodu výpočtu zemního kapacitního proudu sítě například z délek vedení.



Graf 42 Vliv procentní velikosti nulové složky napětí na hodnotu koeficientu „k_c“ pro určení celkové zemní kapacity v izolované síti při použití kondenzátoru s kapacitou 1 μF

I dnes lze nalézt průmyslové sítě s izolovaným uzlem, kde nejsou instalované zemní směrové ochrany. V těchto sítích mnohdy není instalováno měření nulové složky napětí. K určení nulové složky napětí je nutné znát vektory fázových napětí. Pro měření jsem měl k dispozici pouze hodnoty fázových napětí U_{L1} , U_{L2} a U_{L3} . Hodnotu nulové složky napětí však nelze určit pouze z velikostí fázových napětí. Pro výpočet nulové složky napětí z velikostí fázových napětí je nutné znát i velikost sdruženého napětí. Vycházel jsem z předpokladu, že všechna sdružená napětí mají stejnou velikost. Ve skutečnosti bývá odchylka sdružených hodnot napětí nižší než jedno procento. Opět jsem předpokládal symetrickou síť. Pro připojení přídavné kapacity ΔC_0 do fáze L_1 jsem sestavil rovnici pro vektorový součet napětí.

$$\begin{aligned} \omega(3C_0 + \Delta C_0)\vec{U}_{L1} + \omega 3C_0\vec{U}_{L2} + \omega 3C_0\vec{U}_{L3} &= 0 \\ 3C_0(\vec{U}_{L1} + \vec{U}_{L2} + \vec{U}_{L3}) &= -\Delta C_0\vec{U}_{L1} \end{aligned}$$

(6.40)

Další úpravou jsem získal vztah:

$$3C_0 = -\Delta C_0 \frac{\vec{U}_{L1}}{(\vec{U}_{L1} + \vec{U}_{L2} + \vec{U}_{L3})}$$

(6.41)

Po dosazení za

$$U_{L1} = E + U_0$$

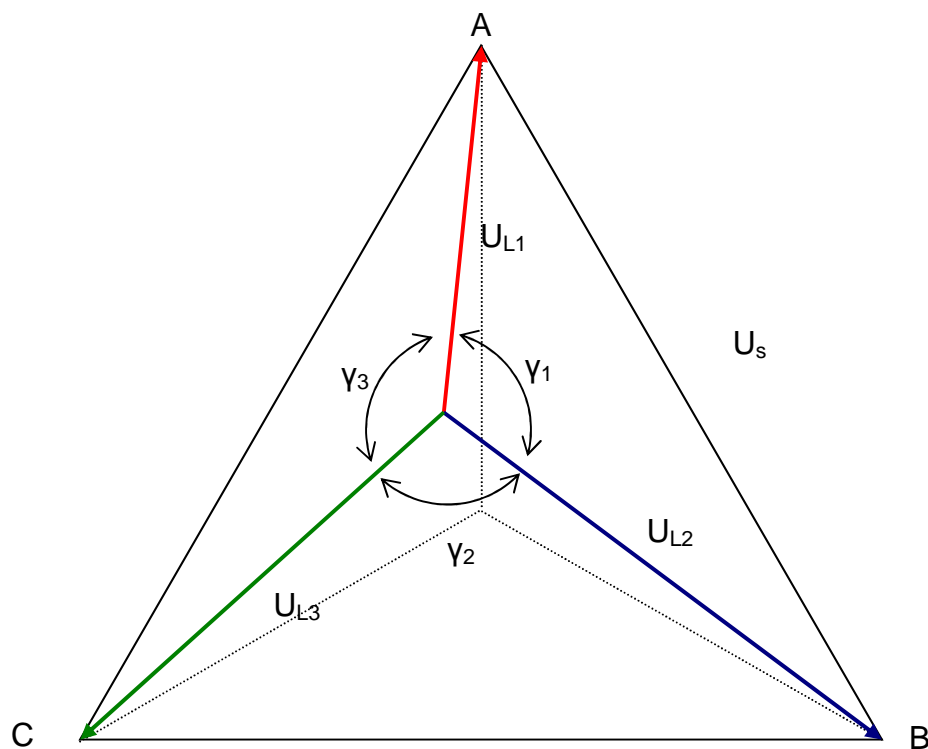
a za

$$U_{L1} + U_{L2} + U_{L3} = 3U_0$$

jsem opět dospěl k rovnici (6.38). Znaménko „-“, v rovnici (6.41) se změní na „+“ z důvodů opačné orientace napětí nulové složky oproti napětí zdroje.

Součet vektorů fázových napětí představuje trojnásobek hodnoty nulové složky napětí. Pro tento součet musíme určit vzájemné natočení vektorů fázových napětí.

Sdružená napětí tvoří rovnostranný trojúhelník. Na vrcholy trojúhelníku navazují konce fázových napětí. Pokud jsou známy velikosti fázových napětí, zbývá určit úhly γ_1 , γ_2 , a γ_3 , které mezi sebou fázová napětí svírají. Zobrazení obecných vektorů fázových a sdružených napětí pro výpočet je znázorněno na obrázku Obr. 25.



Obr. 25 Vektorový diagram fázových napětí v nesymetrické síti

Pro výpočet úhlu γ_1 a γ_3 jsem využil kosinové věty. Třetí úhel γ_2 jsem získal odečtením součtu úhlů γ_1 a γ_3 od 360° .

$$\gamma_1 = \arccos\left(\frac{-U_s^2 + U_{L1}^2 + U_{L2}^2}{2U_{L1}U_{L2}}\right)$$

$$\gamma_3 = \arccos\left(\frac{-U_s^2 + U_{L1}^2 + U_{L3}^2}{2U_{L1}U_{L3}}\right)$$

$$\gamma_2 = 2\pi - \gamma_1 - \gamma_3$$

(6.42)

Pro jednoduchost jsem fázor fázového napětí U_{L1} umístil do reálné osy. Úhly γ_1 a γ_3 udávají vektorové natočení fázového napětí U_{L2} a U_{L3} vůči reálné ose. Nyní jsem mohl sečíst reálné a imaginární části jednotlivých fázových napětí. Tím jsem získal komplexní hodnotu nulové složky napětí vztáženou k hodnotě fázového napětí U_{L1} .

Stanovení velikostí úhlů mezi fázovými napětími však pro výpočet fázové zemní kapacity nestačí. Je nutné určit rovněž vektorové natočení nulové složky napětí vůči vektoru napětí zdroje ve fázi s připojovanou přídavnou kapacitou ΔC . Pro jednoduchost jsem fázi s připojovanou fázovou kapacitou ΔC označil jako L_1 . Vektorové natočení nulové složky napětí vůči této fázi jsem určil pomocí vtažů (6.43) respektive (6.44).

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{U_0\} &= \frac{U_{L1} + U_{L2} \cos(\gamma_1) + U_{L3} \cos(\gamma_3)}{3} \\ \operatorname{Im}\{U_0\} &= \frac{U_{L2} \sin(\gamma_1) + U_{L3} \sin(\gamma_3)}{3}\end{aligned}\tag{6.43}$$

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{U_0\} &= \frac{-2U_s^2 + 4U_{L1}^2 + U_{L2}^2 + U_{L3}^2}{6U_{L1}} \\ \operatorname{Im}\{U_0\} &= \frac{U_{L2} \sin(\gamma_1) - U_{L3} \sin(\gamma_3)}{3}\end{aligned}\tag{6.44}$$

U nesymetrické sítě bude docházet k vektorovému natočení fázového napětí s připojenou přídavnou kapacitou vůči vektoru fázového napětí zdroje (E). Tento výpočet u většiny případů lze zanedbat. Lze předpokládat, že pro většinu reálných měření bude síť dostatečně symetrická a chyba přibližného určení velikosti zemního kapacitního proudu nebude vektorovým natočením napětí významněji ovlivněna. U většiny případů postačuje, pokud přibližně určená fázová zemní kapacita bude stanovena s nepřesností v úrovni jednotek procent.

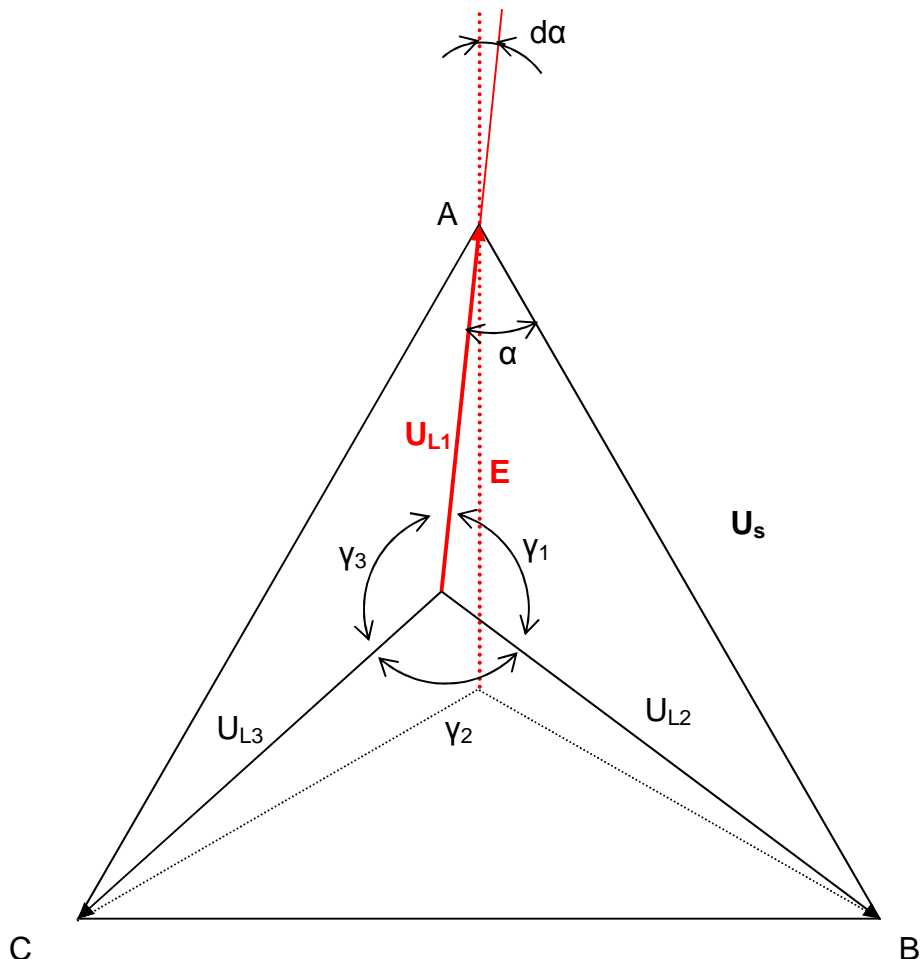
Pro určení úhlu natočení vektoru fázového napětí s připojenou přídavnou kapacitou ΔC využijeme opět trigonometrických funkcí, a to sinovou větu.

$$\frac{U_{L1}}{U_s} = \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\gamma_1)}\tag{6.45}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{U_{L1}}{U_s} \sin(\gamma_1)\right)\tag{6.46}$$

Úhel α je úhel mezi vektorem napětí U_{L1} a sdruženým napětím (viz Obr. 26). V případě, kdy napětí U_{L1} má stejnou velikost jako napětí zdroje, bude mít úhel α hodnotu právě 30° . Úhel α bude mít tuto hodnotu pouze v případě symetrické sítě. Po připojení přídavné fázové kapacity vznikne nesymetrická síť a dojde ke změně jak velikosti fázového napětí U_{L1} , tak i jeho vektorového natočení. Úhel „ $d\alpha$ “ udává úhel mezi vnitřním fázovým napětím zdroje E a napětím ve fázi L_1 . Úhel mezi fázovým

napětím zdroje E a sdruženým napětím U_s je možné určit z teorie o rovnostranném trojúhelníku. Tento úhel bude mít hodnotu 30° . Odečtením úhlu 30° od úhlu α (úhel mezi fázovým napětím U_{L1} a hodnotou sdruženého napětí U_s) získáme hodnotu úhlu „ $d\alpha$ “. Tato hodnota úhlu udává hledaný úhel mezi vnitřním fázovým napětím zdroje E a fázovým napětím U_{L1} .



Obr. 26 Vektorový diagram fázových napětí a vnitřního napětí zdroje pro určení vektorového natočení fázového napětí U_{L1} vůči vnitřnímu fázovému napětí zdroje E

6.5.1 Použití nepřímé metody přibližného určení zemní fázové kapacity v síti s izolovaným uzlem

Tato metoda vychází ze zjednodušujících podmínek a je určena pouze pro síť s izolovaným uzlem. Tyto síť musí být dostatečně symetrické. Jak jsem již uvedl, zmíněný předpoklad lze uvažovat pouze u sítí, kde v běžném provozním stavu má nulová složka napětí téměř nulovou hodnotu. V běžném provozu lze za symetrické síť považovat převážnou většinu kabelových sítí s izolovaným uzlem, kde nulová složka napětí je nižší než 0.1% z fázové hodnoty napětí.

Základem této metody je opět připojení známé přídavné fázové kapacity ΔC mezi libovolnou fází a zem. Tato přídavná kapacita ΔC vyvolá nesymetrii v síti a vzrůst nulové složky napětí stejně jako u předchozí metody. Jako přídavnou kapacitu ΔC jsem používal kompenzační kondenzátor. Tyto kompenzační kondenzátory se běžně vyrábějí pro napěťové hladiny 6 kV. Kondenzátor je možné připojit do 1. fáze

rezervního vývodu rozvodny. Po zapnutí rezervního vývodu se vytvoří umělá nesymetrie v síti. Měřicí přístroje zaznamenají změnu nulové složky napětí, případně fázových napětí, a po té můžeme vývod s přídatnou fázovou kapacitou opět vypnout. Doba měření může být jen krátká, odpovídající ustálení napětí po připojení kapacity. V reálném případě postačuje doba měření v řádu jednotek sekund.

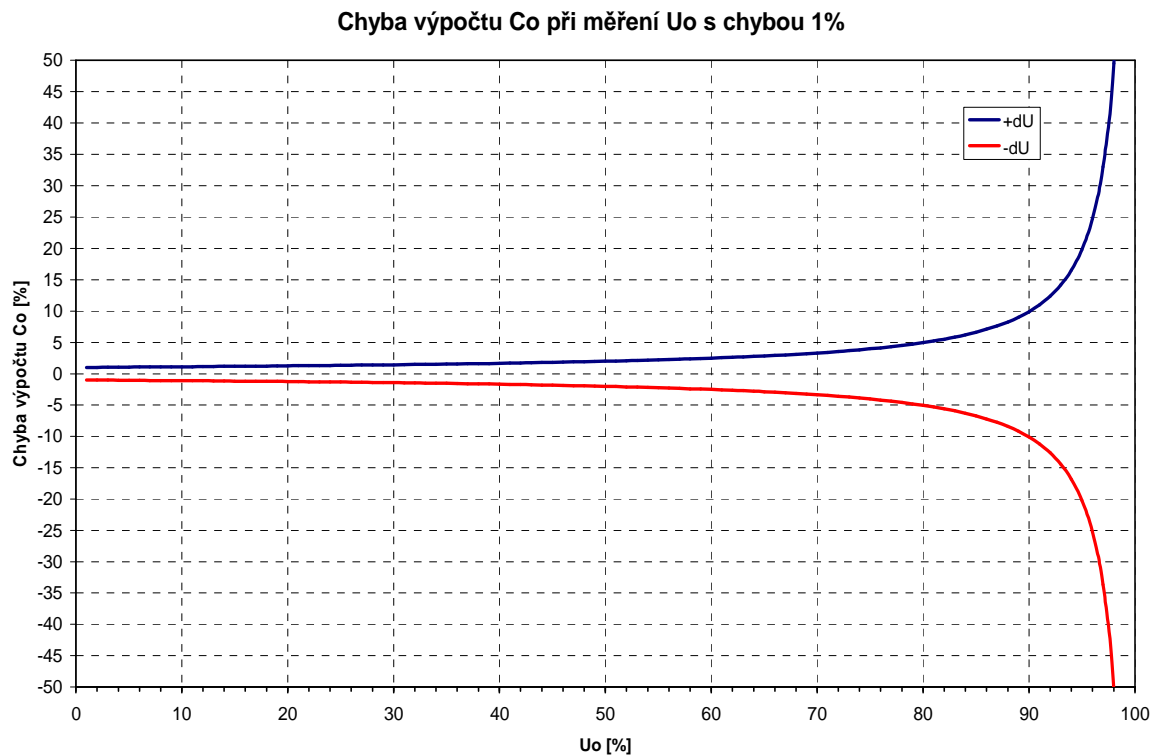
Pro sítě s vyšším napětím než 6 kV vychází cena kondenzátorů vyšší a tyto kondenzátory se běžně nepoužívají. U těchto sítí lze místo kondenzátoru využít připojení jedné fáze kabelového vedení. Kapacita kabelového vedení tak nahrazuje připojený kondenzátor. Pro měření je však nutné znát hodnotu kapacity připojovaného kabelového vedení. Tuto hodnotu můžeme změřit nebo při známé délce kabelového vedení i vypočítat. Při měření je nutné volit velikost kapacity ΔC úměrnou celkové zemní fázové kapacitě izolované sítě.

Opět platí, že při velmi nízké hodnotě připojené fázové kapacity ΔC nebude změna U_0 dostatečná pro přesné měření. Je tedy vhodné, aby napětí U_0 po připojení fázové zemní kapacity dosahovalo úrovně alespoň 10% z fázové hodnoty napětí. Problémy s přesností měření budou i v případě, že připojíme přídatnou kapacitu ΔC s výrazně vyšší hodnotou, než je kapacita měřené sítě.

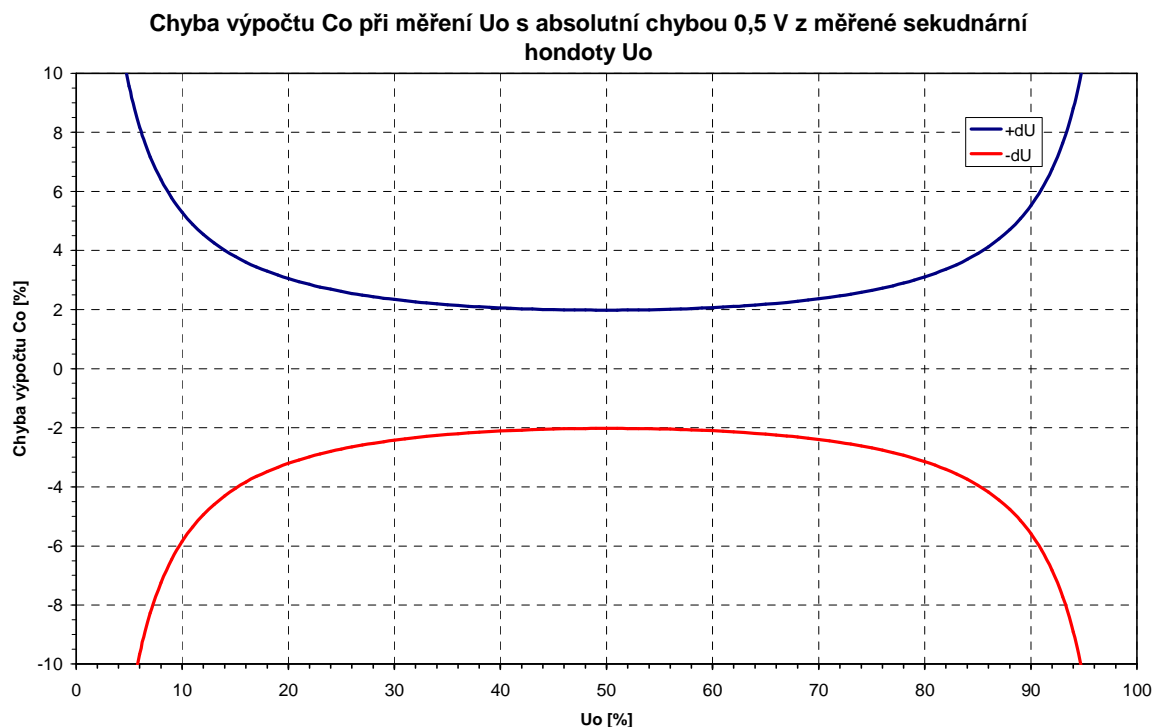
Jak je výpočet zemní fázové kapacity vedení ovlivněn přesností měření nulové složky napětí, je znázorněno na následujícím grafu Graf 43. Na grafu je znázorněna chyba výpočtu zemní kapacity vedení při chybě měření $U_0 \pm 1\%$ z měřené hodnoty nulové složky napětí.

Přesnost měření nulové složky napětí U_0 je pro nízké hodnoty zatížena velkou chybou. Zde bude záležet, zda se nulová složka napětí bude měřit na otevřeném trojúhelníku nebo přímo na měřicím transformátoru napětí zapojeném mezi uzel sítě a zem. Při měření na otevřeném trojúhelníku bude záležet i na přesnosti jednotlivých měničů (viz kapitola 3.6 věnovaná měření nulové složky napětí). Napěťové měřicí transformátory mají na primární straně velikost napětí na úrovni fázové hodnoty. Tyto měřicí transformátory napětí pracují v oblasti 60% jmenovité hodnoty napětí. Zde je důležitá jak amplitudová přesnost měření, tak i fázová. Při měření napětí mezi uzlem sítě a zemí může být na měřicím transformátoru nízká hodnota napětí. Stanovení hodnoty nulové složky napětí bude pak ovlivněno přesností měření pomocí měřicího transformátoru napětí. Je důležité, aby amplitudová a fázová chyba měření byla co nejmenší právě pro měření v oblasti nízkých hodnot na úrovni jednotek procent fázového napětí. Připojení takové hodnoty přídatné kapacity ΔC , která způsobí výrazné zvýšení napětí nulové složky, přispěje k přesnějšímu měření. Vysoká nesymetrie v síti vzniklá po připojení přídatné kapacity ΔC způsobí, že i malá chyba měření bude mít za následek poměrně velkou chybu v určení hodnoty zemní fázové kapacity sítě C_0 . Za vysokou nesymetrií lze považovat vzrůst hodnoty nulové složky napětí nad 85% z hodnoty fázového napětí sítě.

Důležité je rovněž nezapomínat na frekvenční závislost kapacitní reaktance. Proto doporučuji provádět měření napětí přístrojem umožňující měření pouze základní harmonické. Je tedy nutné používat měřicího přístroje s vestavěným analogovým nebo digitálním filtrem.



Graf 43 Závislost chyby stanovení zemní fázové kapacity na velikosti nulové složky napětí při měření nulové složky napětí s chybou $\pm dU$, kde $dU = 1\% U_0$



Graf 44 Závislost chyby stanovení zemní fázové kapacity na velikosti nulové složky napětí při měření nulové složky napětí s absolutní chybou $\pm dU$, kde $dU = 0.5V$ z měřené sekundární hodnoty nulové složky napětí (měření na otevřeném trojúhelníku napět'ových měřících transformátorů)

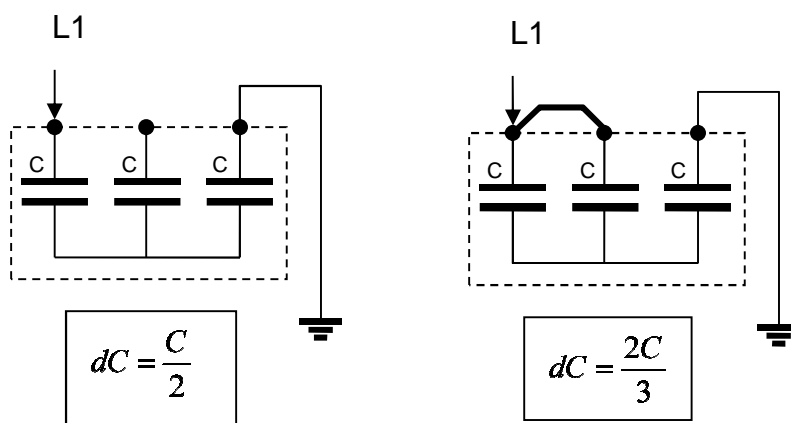
Z grafu Graf 43 je zřejmé, že při relativní chybě měření 1% bude výsledek měření nejméně ovlivněn nulovou složkou napětí vyšší než 90% z fázové hodnoty napětí sítě. Při měření nízkých hodnot nulové složky napětí bude výslednou hodnotu ovlivňovat zejména absolutní chyba měření. Na grafu Graf 44 je znázorněna závislost chyby určení zemní fázové kapacity při absolutní chybě měření 0,5 V. Při této chybě můžeme získat relativně dobré určení zemní fázové kapacity v rozsahu hodnot U_0 od 10% do 90% z fázové hodnoty napětí. Při uvažování relativní a absolutní chyby měření je pro tuto metodu vhodné připojit takovou kapacitu, která způsobí zvýšení nulové složky napětí v rozmezí 10% až 80% hodnoty fázového napětí sítě.

6.5.2 Zapojení měření pro nepřímou metodu přibližného určení zemní fázové kapacity v izolované síti

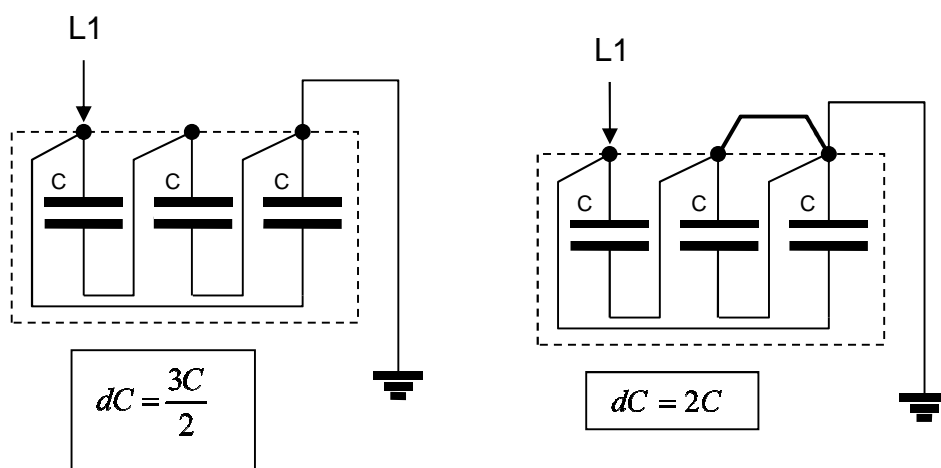
Pro měření budeme potřebovat měřicí přístroj, který umožní měření napětí základní frekvence sítě (1. harmonické) a potlačení ostatních harmonických. Pro měření nulové složky napětí je možné využívat měření na otevřeném trojúhelníku nebo měření napětí mezi uzlem sítě a zemí. U sítí s izolovaným uzlem bývá často vinutí napájecího transformátoru nebo zdroje zapojeno do trojúhelníka. Pro použití nepřímé metody, kdy potřebujeme měření nulové složky napětí, proto zbývá pouze možnost měření na otevřeném trojúhelníku. Další variantou nepřímé metody je měření fázových hodnot napětí a sdružené hodnoty napětí. Měření hodnot fázových a sdružených napětí v síti je přesnější než měření nízké hodnoty nulové složky napětí. Navíc v některých průmyslových sítích s izolovaným uzlem nebylo instalováno ani měření nulové složky napětí na otevřeném trojúhelníku. Z uvedených důvodů jsem nepřímou metodu s měřením fázových napětí používal častěji.

Pro zpracování výsledků měření jsem vytvořil krátký program v jazyce Borland C++, který je rozšířen o možnost přibližného určení i činné složky svodového proudu sítě. Pro přibližné určení zemního kapacitního proudu se zadávají fázová napětí před připojením přídavné kapacity, hodnota připojované přídavné kapacity, velikost sdruženého napětí a hodnoty fázových napětí po připojení přídavné kapacity. Přídavná kapacita může být tvořena jednofázovým kondenzátorem nebo třífázovým kondenzátorem zapojeným dle Obr. 27 nebo Obr. 28. Výsledkem je přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě a orientační určení hodnoty svodového proudu sítě (Příloha 3.).

Tato metoda byla odzkoušena v síti 6 kV. Jako přídavnou kapacitu jsem používal třífázový kompenzační kondenzátor 6,3 kV s výkonem 25 kVAr (kapacita $3 \times 2 \mu\text{F}$). Třífázové kondenzátory mohou být zapojeny do hvězdy bez vyvedeného středu nebo do trojúhelníka. Vhodným zapojením lze pro měření získat více kombinací. Dále jsem používal i jednofázový kondenzátor s výkonem 20 kVAr.



Obr. 27 Možná zapojení 3-fázového kondenzátoru zapojeného do hvězdy a výsledná kapacita pro jednofázové zapojení



Obr. 28 Možná zapojení 3-fázového kondenzátoru zapojeného do trojúhelníka a výsledná kapacita pro jednofázové zapojení

Jak již bylo uvedeno, zejména u sítí s vyšším napětím lze místo kondenzátorů využít kapacitu kabelových vedení. Můžeme využívat jak jednožilové, tak i třížilové kabely. Paralelním zapojením žil kabelového vedení lze zvýšit hodnotu připojované zemní fázové kapacity. Další možností u paralelních kabelových vedení je odpojení paralelních kabelů ve dvou fázích. Tím je vyvolána stejná nesymetrie napětí jako v případě připojení kapacity mezi fází a zem. Požadovanou nesymetrii lze vyvolat i odpojením paralelního kabelu v jedné fázi. Je však nutné upravit výpočet pro určení fázové zemní kapacity. Namísto zvýšení kapacity ve fázi je nutné uvažovat o snížení fázové zemní kapacity. Jedná se o obdobu připojení indukčnosti do jedné fáze, kdy indukčnost částečně dekompenzuje fázové zemní kapacity.

6.5.3 Příklady stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě nepřímou metodou v sítích s izolovaným uzlem

V síti 6 kV, bez možnosti měření nulové složky napětí, byl připojen jednofázový kondenzátor se jmenovitým výkonem 20 kVAr při 6700 V.

Nejprve jsem si určil hodnotu připojované kapacity:

$$C = \frac{Q}{\omega U^2} = \frac{20000 [\text{VAr}]}{100\pi \cdot 6700^2 [\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{V}]} = 1,4182 \mu\text{F}$$

Naměřené hodnoty napětí byly zaznamenány síťovým analyzátozem a odpovídají procentní hodnotě jmenovitého síťového napětí. Přídavná kapacita byla připojována do fáze L_1 . Naměřené hodnoty napětí jsem uvedl v následující tabulce Tab. 1.

Tab. 1 Naměřené hodnoty fázových napětí (procentní hodnoty síťového napětí) v síti 6 kV pro výpočet zemního kapacitního proudu

U_S	102,78 % (6166,8 V)			
	Bez „C“		Po připojení „C“ do L_1	
	U_f		U_f	
	(%)	(V)	(%)	(V)
U_{L1}	59,21	3552,6	47,21	2832,6
U_{L2}	59,40	3564,0	65,92	3955,2
U_{L3}	59,55	3573,0	66,65	3999,0

Protože jsem neměl možnost měřit hodnotu nulové složky napětí, nejprve jsem musel určit její velikost výpočtem. K výpočtu jsem použil vztah (6.44), tj. z naměřených procentních hodnot fázových napětí jsem vypočítal hodnotu nulové složky napětí. Nulová složka napětí je běžně udávána jako procentní hodnota fázového napětí. Vzhledem k tomu, že procentní hodnoty fázových napětí jsou vztaženy ke sdružené hodnotě napětí sítě, je i výsledná hodnota nulové složky napětí vztažena ke sdružené hodnotě napětí sítě. Tuto nulovou složku napětí jsem označil jako U_{0S} .

$$\text{Re}\{U_{0S}\} = \frac{-2U_S^2 + 4U_{L1}^2 + U_{L2}^2 + U_{L3}^2}{6U_{L1}} = \frac{4 \cdot 47,21^2 - 2 \cdot 102,78^2 + 65,92^2 + 66,65^2}{6 \cdot 47,21} = -12,09 \text{ V}$$

$$\text{Im}\{U_{0S}\} = \frac{U_{L2} \sin(\gamma_1) - U_{L3} \sin(\gamma_3)}{3} = \frac{65,92 \cdot 0,767567 - 66,65 \cdot 0,785729}{3} = -0,59 \text{ V}$$

$$|U_0| = \sqrt{12,09^2 + 0,59^2} = 12,1 \quad (\% \text{ z } U_S)$$

Výsledkem je komplexní hodnota nulové složky napětí, která je vztažena k fázovému napětí s připojenou fázovou zemní kapacitou U_{L1} . Při výpočtu jsem fázové napětí U_{L1} umístil na reálnou osu. Absolutní velikost nulové složky napětí je 12,1 % z hodnoty jmenovitého sdruženého napětí sítě. Nulová složka napětí se udává jako procentní hodnota fázového napětí. Protože se jedná o změřenou hodnotu napětí sinusového průběhu 1. harmonické, mohl jsem použít pro přepočítání základní vztah mezi sdruženou a fázovou hodnotou napětí.

$$U_0 = \sqrt{3}U_{0S} = \sqrt{3} \cdot 12,1 = 20,96 \quad (\%) \text{ z } U_f$$

Pro kontrolu jsem vypočítal změnu natočení vektoru fázového napětí dle Obr. 26. Úhel α je dán vztahem:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{U_{L1}}{E} \sin(\gamma_1)\right) = \arcsin\left(\frac{65,92}{102,78} \cdot 0,7675\right) = 29,49^\circ$$

$$d\alpha = 0,5085^\circ$$

Je zřejmé, že vektorové natočení fázového napětí můžeme zanedbat. Při rozložení do komplexních složek je chyba výpočtu na úrovni setin procent. Při praktickém měření jsou chyby měření fázových napětí, nulové složky napětí a hodnoty připojované kapacity zatíženy významnější chybou, která je řádově vyšší, než chyba způsobená natočením vektoru napětí.

Pro hodnotu $U_0 = 21\%$ jsem ze zdrojových dat pro Graf 42 získal hodnotu koeficientu $k_C = 1,254$. Za použití koeficientu „ k_C “ vychází výsledná zemní kapacita sítě o cca 24,6% větší než je hodnota připojené kapacity. Výslednou hodnotu fázové zemní kapacity sítě jsem určil ze vztahu (6.39).

$$C_0 = k_C \cdot C_a = 1,254 \cdot 1,4182 = 1,778 \mu F$$

Pro výpočet zemní fázové kapacity C_0 dle vztahu (6.38) je nutné znát hodnotu nulové složky napětí naměřené po připojení přídavné kapacity. Znovu jsem tedy použil procentní hodnotu nulové složky napětí vypočtenou v předchozím příkladu z hodnot fázových napětí. Nulová složka napětí je vyjádřena jako procentní hodnota ze jmenovitého fázového napětí sítě. Jmenovité procentní fázové napětí sítě E má hodnotu 100%. Po provedení výpočtu je výsledná hodnota zemní fázové kapacity sítě 1,778 μF .

$$C_0 = \frac{\Delta C}{3} \left(\frac{E}{U_0} - 1 \right) = \frac{1,4182}{3} \left(\frac{100}{21} - 1 \right) = 1,778 \mu F$$

Ze znalosti zemní fázové kapacity jsem vypočítal i celkový zemní kapacitní proud. Zemní kapacitní proud sítě I_{0C} je 5,80 A.

$$I_{0C} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 100\pi \cdot 1,778 \cdot 10^{-6} \cdot 3464 = 5,80 A$$

Metoda umělého zvýšení nesymetrie pro přibližné určení zemního kapacitního proudu byla ověřena v síti s izolovaným uzlem. Zde jsem realizoval kontrolní zemní spojení s přímým měřením hodnoty zemního kapacitního proudu. Výsledky obou způsobů určování hodnoty zemního kapacitního proudu byly srovnatelné. Vzhledem k chybám měření nelze jednoznačně určit, zda přesnější výsledky získáme z přímé nebo nepřímé metody.

6.5.4 Porovnání naměřených hodnot poruchového proudu a hodnot určených nepřímou metodou v izolované síti

Jak jsem již uvedl, metoda umělého zvýšení nesymetrie pro přibližné určení zemního kapacitního proudu byla ověřena v síti s izolovaným uzlem. Zde jsem realizoval kontrolní zemní spojení s přímým měřením hodnoty zemního poruchového proudu. Výsledky obou způsobů byly srovnatelné.

Měření 1

Měření bylo prováděno v době odstávky technologie, proto měřená síť byla jen minimálně zatížena. Pro vytvoření umělé nesymetrie v síti byl použit jednofázový kondenzátor s kapacitou 1,42 μF . Měřena byla pouze fázová napětí – viz Tab. 2. Nulové složka napětí nebyla k dispozici. Kontrolní měření poruchového proudu bylo založeno na konci kabelového vývodu v síti 6 kV. Porovnání výsledků je uvedeno v tabulce Tab. 3.

Tab. 2 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 1. měření

Připojovaná přídavná kapacita $\Delta C = 1,42 \mu\text{F}$			
			Napětí (V)
Sdružené napětí sítě		U_{12}	6259
Bez připojené přídavné kapacity ΔC	Fázová napětí	L_1	3641
		L_2	3585
		L_3	3618
	Napětí uzlu	U_0	-
S připojenou přídavnou kapacitou ΔC	Fázová napětí	L_1	2973
		L_2	3948
		L_3	4001
	Napětí uzlu	U_0	-

Tab. 3 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 1. měření

Výsledné hodnoty určení zemní fázové kapacity a zemního kapacitního proudu		
	Výpočet z U_0	Výpočet z U_f
Vypočtená hodnota C_0 nepřímá metoda	-	2,091 μF
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při jmenovité hodnotě napětí sítě – nepřímá metoda	-	6,8 A
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při aktuálním napětí – nepřímá metoda	-	7,1 A
Změřená hodnota proudu jednofázové zemní poruchy při aktuálním napětí I_{por}	7,8 A	

Měření 2

Měření bylo opět prováděno v kabelové síti 6 kV v době omezeného odběru (Tab. 4). Kontrolní měření zemního poruchového proudu bylo realizováno v areálu rozvodny. Pro měření nepřímou metodou byl použit třífázový kondenzátor o celkovém výkonu 50 kVAr. Fázové kapacity kondenzátoru jsou zapojeny do hvězdy a mají hodnotu 4 μF . Při propojení dvou fází byla výsledná kapacita připojovaného kondenzátoru 2,667 μF . Výsledky jsou uvedeny v tabulce Tab. 5.

Tab. 4 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 2. měření

Připojovaná přídavná kapacita $\Delta C = 2,667 \mu\text{F}$			
			Napětí (V)
Sdružené napětí sítě		U_{12}	6409
Bez připojené přídavné kapacity ΔC	Fázová napětí	L_1	3690
		L_2	3719
		L_3	3693
	Napětí uzlu	U_0	18
S připojenou přídavnou kapacitou ΔC	Fázová napětí	L_1	1750
		L_2	4917
		L_3	5030
	Napětí uzlu	U_0	1954

Tab. 5 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 2. měření

Výsledné hodnoty určení zemní fázové kapacity a zemního kapacitního proudu		
	Výpočet z U_0	Výpočet z U_f
Vypočtená hodnota C_0 – nepřímá metoda	0,792 μF	0,794 μF
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při jmenovité hodnotě napětí sítě – nepřímá metoda	2,58 A	2,6 A
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při aktuálním napětí – nepřímá metoda	2,76 A	2,8 A
Změřená hodnota proudu jednofázové zemní poruchy při aktuálním napětí I_{por}	2,9 A	

Měření 3

Toto měření bylo realizováno v relativně rozsáhlé kabelové síti 6 kV v době sníženého zatížení. Pro měření byl použit třífázový kompenzační kondenzátor s výkonem 50 kVA zapojený do hvězdy. Při měření byla využita obě možná zapojení kondenzátoru uvedená na obrázku Obr. 27. První část měření byla prováděna s třífázovým kompenzačním kondenzátorem zapojeným jednofázově s výslednou kapacitou 2 μF . Při druhém měření byly na kondenzátoru propojeny dvě fáze a měření bylo realizováno s přídavnou kapacitou 2,66 μF (Tab. 6).

Tab. 6 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 3. měření

Připojovaná přídavná kapacita		$\Delta C = 2 \mu\text{F}$	$\Delta C = 2,66 \mu\text{F}$	
		Napětí (V)	Napětí (V)	
Sdružené napětí sítě		U_{12}	6162	6208
Bez připojené přídavné kapacity ΔC	Fázová napětí	L_1	3572	3592
		L_2	3560	3581
		L_3	3565	3575
	Napětí uzlu	U_0	13	11
S připojenou přídavnou kapacitou ΔC	Fázová napětí	L_1	3285	3228
		L_2	3694	3770
		L_3	3703	3781
	Napětí uzlu	U_0	271	357

Tab. 7 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou s přídavnou kapacitou $\Delta C = 2 \mu\text{F}$ a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 3. měření

Výsledné hodnoty určení zemní fázové kapacity a zemního kapacitního proudu		
$\Delta C = 2 \mu\text{F}$	Výpočet z U_0	Výpočet z U_f
Vypočtená hodnota C_0 – nepřímá metoda	8,102 μF	7,556 μF
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při jmenovité hodnotě napětí sítě – nepřímá metoda	26,45 A	24,7 A
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při aktuálním napětí – nepřímá metoda	27,22 A	25,4 A
Změřená hodnota proudu jednofázové zemní poruchy při aktuálním napětí I_{por}	26,8 A	

Tab. 8 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou s přídavnou kapacitou $\Delta C = 2,66 \mu\text{F}$ a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 3. měření

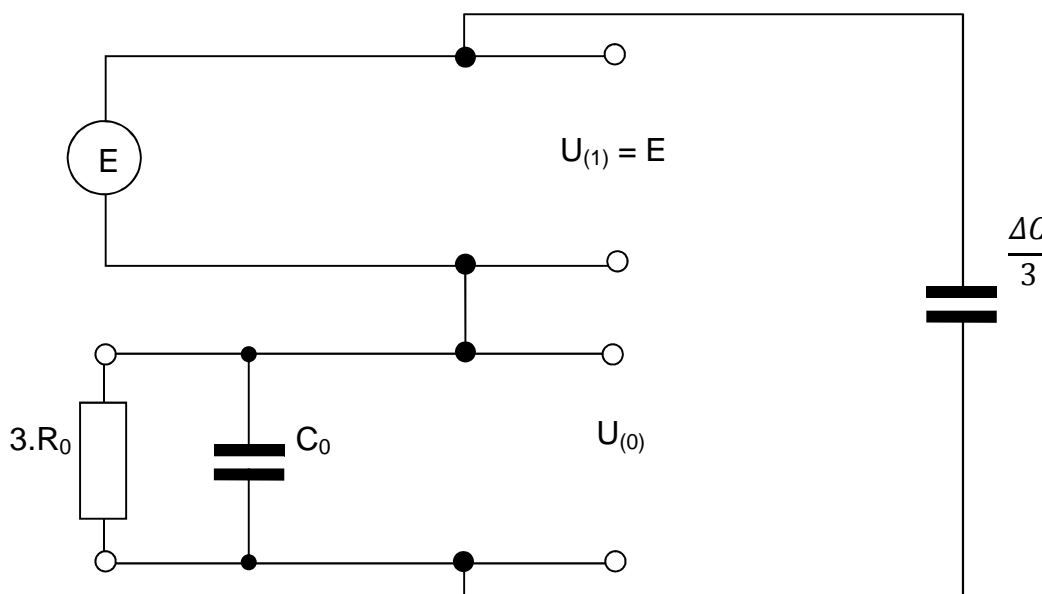
Výsledné hodnoty určení zemní fázové kapacity a zemního kapacitního proudu		
$\Delta C = 2,66 \mu\text{F}$	Výpočet z U_0	Výpočet z U_f
Vypočtená hodnota C_0	8,016 μF	7,86 μF
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při jmenovité hodnotě napětí sítě	26,17 A	25,7 A
Vypočtená hodnota zemního kapacitního proudu I_{0C} při aktuálním napětí	27,086 A	26,6 A
Změřená hodnota proudu jednofázové zemní poruchy při aktuálním napětí I_{por}	28,4 A	

Z údajů uvedených v předchozích tabulkách Tab. 7 a Tab. 8 je zřejmé, že hodnoty z měření a výsledky získané nepřímou metodou jsou srovnatelné. Lze pouze znovu upozornit na fakt, že vzhledem k chybám měření nelze jednoznačně určit, zda přesnější výsledky získáme z přímé nebo nepřímé metody. Přesnou hodnotu zemní fázové kapacity sítě nelze přesně zjistit. Hodnota poruchového proudu určená přímou metodou by měla dávat vyšší hodnoty proudu než nepřímá metoda. Je to způsobeno tím, že u přímé metody, tj. měření hodnoty poruchového proudu v místě zemní poruchy, byla měřena absolutní hodnota poruchového proudu. Měřená hodnota proudu obsahuje činnou i jalovou složku. Měření poruchového proudu proběhlo s filtrací na 1. harmonickou. Uvedená naměřená proudová hodnota tedy neobsahuje proudy vyšších harmonických.

6.6 Aplikace nepřímé metody přibližného určení zemního kapacitního proudu v síti s odporově uzemněným uzlem

V síti s odporově uzemněným uzlem je poměrně složité zjistit hodnotu zemního kapacitního proudu. Nejčastěji se využívá výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu na základě přibližného určení délek vedení.

Při návrhu jednoduchého způsobu určování hodnoty zemního kapacitního proudu jsem vycházel z metody odvozené pro síť s izolovaným uzlem. Pro odvození jsem použil jednoduché schéma zapojení jednotlivých složek. Zpětnou složku jsem opět zanedbal. Ve zjednodušeném náhradním schématu pro nulovou složku je vedle zemní fázové kapacity zapojen paralelně uzlový odporník s odporem R_0 .



Obr. 29 Impedance nulové složky je dána paralelním zapojením fázové zemní kapacity a uzlového odporu

Nejprve jsem si vyjádřil impedanci nulové složky tvořenou paralelní kombinací uzlového odporu a zemní fázové kapacity.

$$\bar{Z}_0 = \frac{\frac{3R_0}{j\omega C_0}}{3R_0 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{3R_0}{1 + j3R_0\omega C_0}$$

(6.47)

Impedance celého obvodu je doplněna o sériově připojenou přídavnou kapacitu $\Delta C/3$.

$$\bar{Z} = \bar{Z}_0 + \frac{3}{j\omega\Delta C} = \frac{3R_0}{1 + j3R_0\omega C_0} + \frac{3}{j\omega\Delta C}$$

(6.48)

$$\bar{Z} = \frac{3 + j\omega 3R_0(3C_0 + \Delta C)}{j\omega\Delta C(1 + j3R_0\omega C_0)}$$

(6.49)

Proud protékající obvodem můžeme vyjádřit podílem napětí zdroje E a celkové impedance Z :

$$\bar{I} = \frac{E}{\bar{Z}} = E \cdot \frac{j\omega\Delta C(1 + j3R_0\omega C_0)}{3 + j\omega 3R_0(3C_0 + \Delta C)}$$

(6.50)

Nulová složka napětí je ovlivněna nesymetrií vyvolanou připojením přídavné kapacity ΔC . Po připojení kapacity do jedné fáze proti zemi je uměle vyvolána kapacitní nesymetrie v síti a dojde ke zvýšení nulové složky napětí. Nulovou složku napětí vyjádříme jako úbytek napětí vyvolaný proudem procházejícím nulovou impedancí:

$$\bar{U}_0 = \bar{Z}_0 \bar{I} = \frac{3R_0}{1 + j3R_0\omega C_0} E \cdot \frac{j\omega\Delta C(1 + j3R_0\omega C_0)}{3 + j\omega 3R_0(3C_0 + \Delta C)} = E \cdot \frac{j\omega\Delta C R_0}{1 + j\omega R_0(3C_0 + \Delta C)}$$

(6.51)

Rovnice (6.51) pro nulovou složku napětí obsahuje zemní fázovou kapacitu, připojovanou přídavnou kapacitu pro vytvoření nesymetrii v síti a uzlový odpor. Z této rovnice můžeme vyjádřit hodnotu zemní fázové kapacity, která je jedinou neznámou v rovnici.

$$C_0 = \frac{\Delta C}{3} \left(\frac{E}{\bar{U}_0} - 1 \right) + j \frac{1}{3\omega R_0}$$

(6.52)

Další možností výpočtu hodnoty zemní fázové kapacity je její určení z hodnoty proudu protékajícího přes odpor a zemní fázovou kapacitu. Pro sestavení rovnice jsem opět vycházel ze schématu zobrazeného na Obr. 29. Proud tekoucí přes přídavnou kapacitu se rozdělí na proud tekoucí přes odpor a přes zemní fázovou kapacitu. Rozdělení proudu lze popsat následující rovnicí.

$$j(E - \bar{U}_0) \frac{\omega \Delta C}{3} = \frac{\bar{U}_0}{3R_0} + j\omega C_0 U_0$$

(6.53)

Po úpravě rovnice (6.53) dostáváme vztah pro výpočet zemní fázové kapacity (6.54). Jedná se o stejný vztah jako v (6.52).

$$C_0 = \frac{\Delta C}{3} \left(\frac{E}{\bar{U}_0} - 1 \right) + j \frac{1}{3\omega R_0}$$

(6.54)

Z rovnice (6.54), respektive rovnice (6.52), je patrné, že teoreticky lze tento způsob určování zemního kapacitního proudu aplikovat i na odporově uzemněný uzel sítě. Uzlový odpor výrazným způsobem zvyšuje tlumení v síti a snižuje úroveň nulové složky napětí vyvolané fázovou zemní kapacitní nesymetrií. Z rovnice (6.54) je patrná změna vektorového natočení nulové složky napětí.

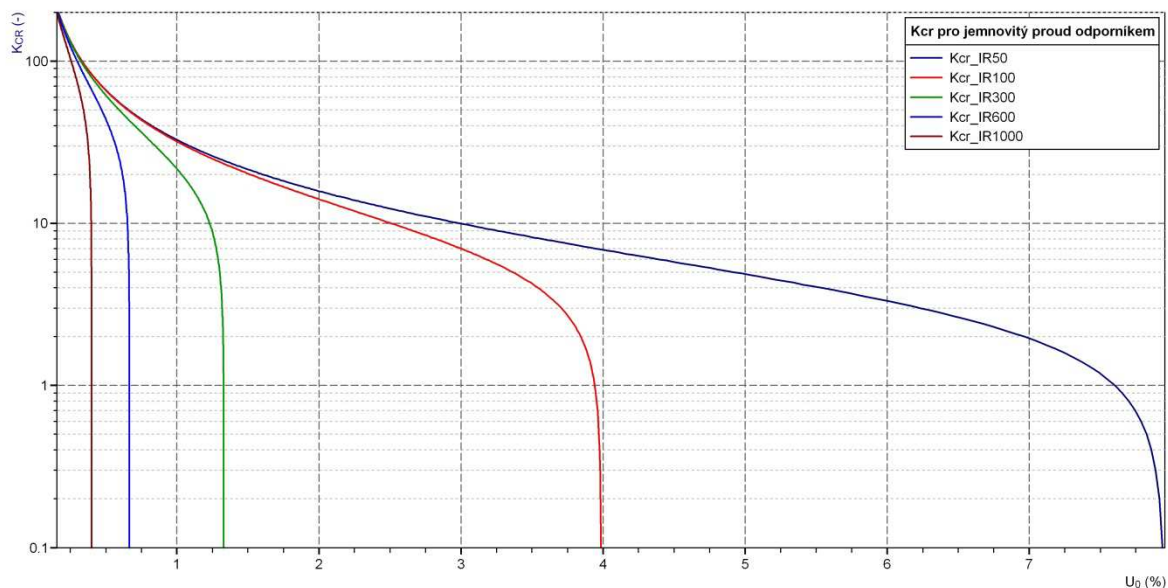
Obdobně jako pro izolovaný uzel si i zde můžeme odvodit hodnotu koeficientu k_{CR} pro odporově uzemněný uzel sítě. Na rozdíl od koeficientu pro izolovaný uzel (6.39) je koeficient k_{CR} komplexním číslem.

$$\bar{k}_{CR} = \frac{1}{3} \left(\frac{E}{\bar{U}_0} - 1 \right) + j \frac{1}{3\omega R_0 \Delta C}$$

(6.55)

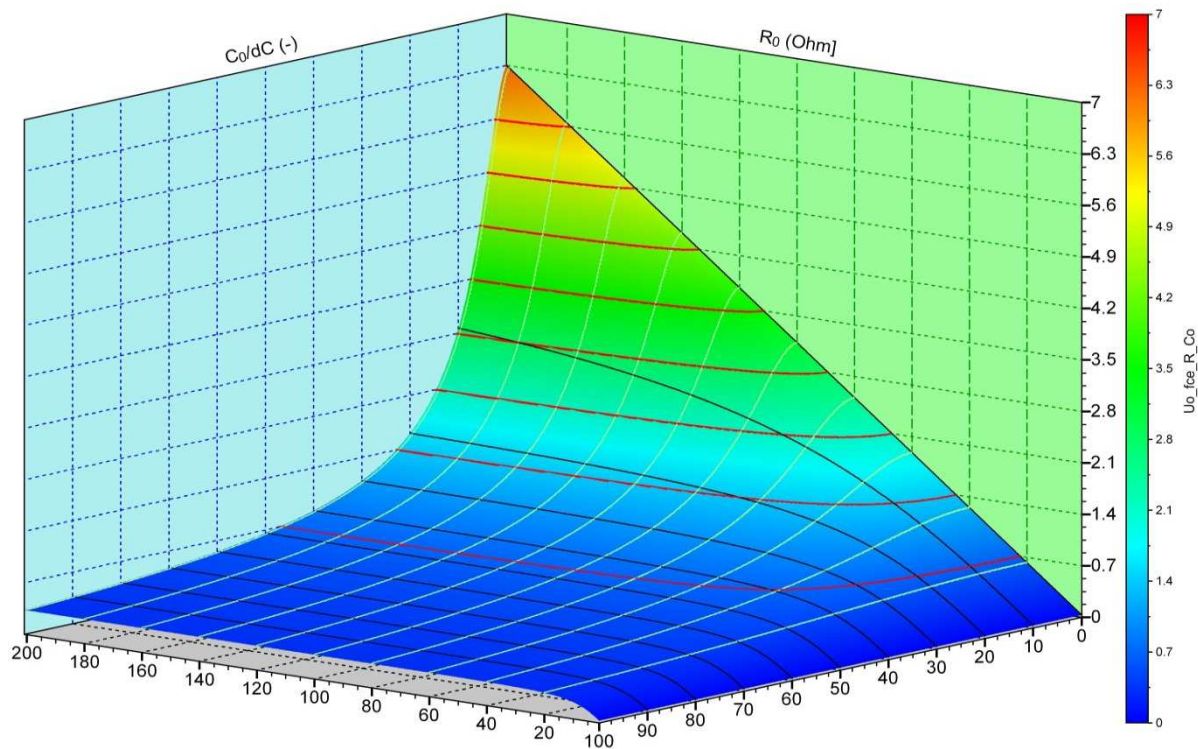
Hodnota koeficientu k_{CR} je, oproti koeficientu k_C pro síť s izolovaným uzlem, závislá na velikosti připínané kapacity ΔC a velikosti uzlového odporu. Na následujícím grafu Graf 45 je zobrazena absolutní hodnota koeficient k_{CR} v závislosti na velikosti nulové složky napětí, a to pro různé hodnoty uzlového odporu. Z grafu je patrné, že pro poměr celkové zemní kapacity C_0 k připojované kapacitě ΔC , který je menší než 1, je velikost nulové složky napětí výrazně tlumena uzlovým odporem. Proto zde nedochází k výraznější změně nulové složky napětí, jak je tomu u sítě s izolovaným uzlem. Změna nulové složky napětí je tím menší, čím menší hodnotu má uzlový odpor.

V rovnici (6.54) lze teoreticky uvažovat dva extrémní případy pro hodnotu uzlového odporu. Pro nulovou hodnotu uzlového odporu (přímo uzemněná soustava $R_0 = 0$) bude mít podíl vždy nekonečnou hodnotu. Proto pro přímo uzemněnou soustavu tuto metodu nelze využívat. Druhým extrémem je nekonečná hodnota uzlového odporu ($R_0 = \infty$). Síť s odporově uzemněným uzlem pak přejde na síť s izolovaným uzlem a podíl s výrazem R_0 ve jmenovateli bude mít nulovou hodnotu. Tím se změní rovnice (6.54) na rovnici (6.38), která popisuje výpočet zemní fázové kapacity pro síť s izolovaným uzlem.



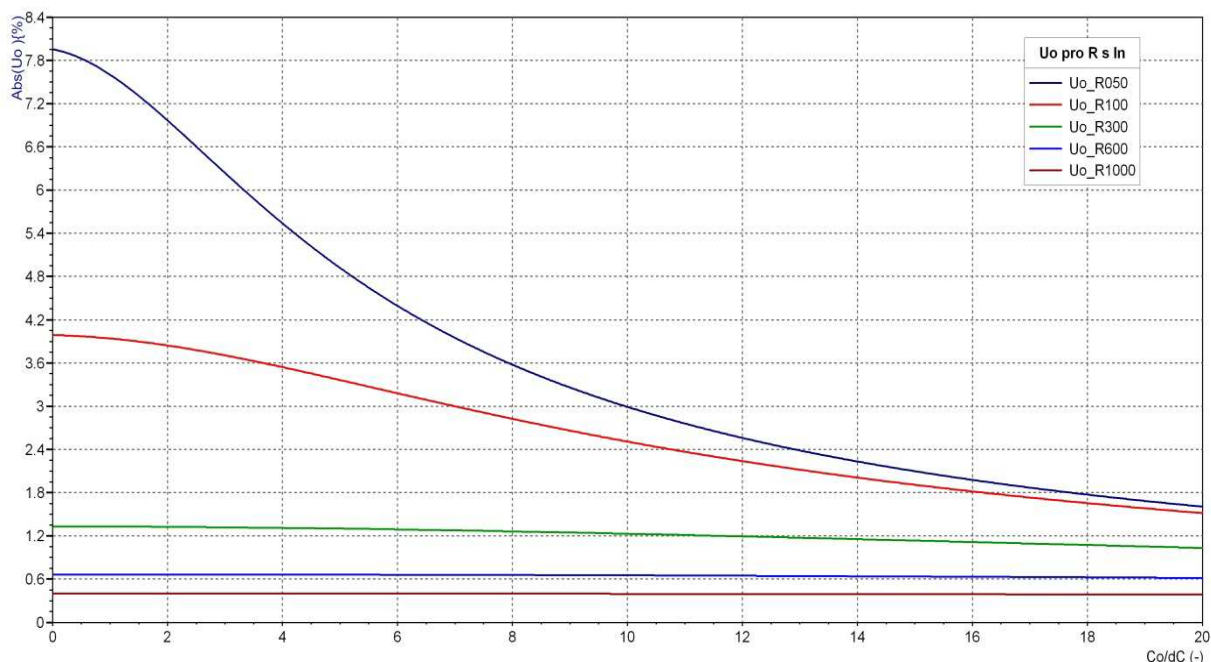
Graf 45 Absolutní hodnota koeficientu k_{CR} (-) pro připínanou kapacitou $1 \mu F$ v odporově uzemněné síti 22 kV a pro uzlový odporník s různými jmenovitými proudy 50 A (254 Ω), 100 A (127 Ω), 300 A (42,3 Ω), 600 A (21,16 Ω), 1000 A (12,7 Ω) v závislosti na absolutní hodnotě nulové složky napětí U_0 (%)

Nejprve jsem se zaměřil na absolutní hodnotu nulové složky napětí. Na základě výpočtu nulové složky napětí jsem sestavil Graf 46, který zobrazuje velikost nulové složky napětí v závislosti na velikosti uzlového odporníku a na velikosti poměru celkové zemní fázové kapacity k připojované kapacitě ΔC .



Graf 46 Závislost nulové složky napětí U_0 na velikosti uzlového odporníku R_0 (udávaného jmenovitou proudovou hodnotou) a na velikosti poměru celkové zemní fázové kapacity k připojované kapacitě $\Delta C = 1 \mu F$

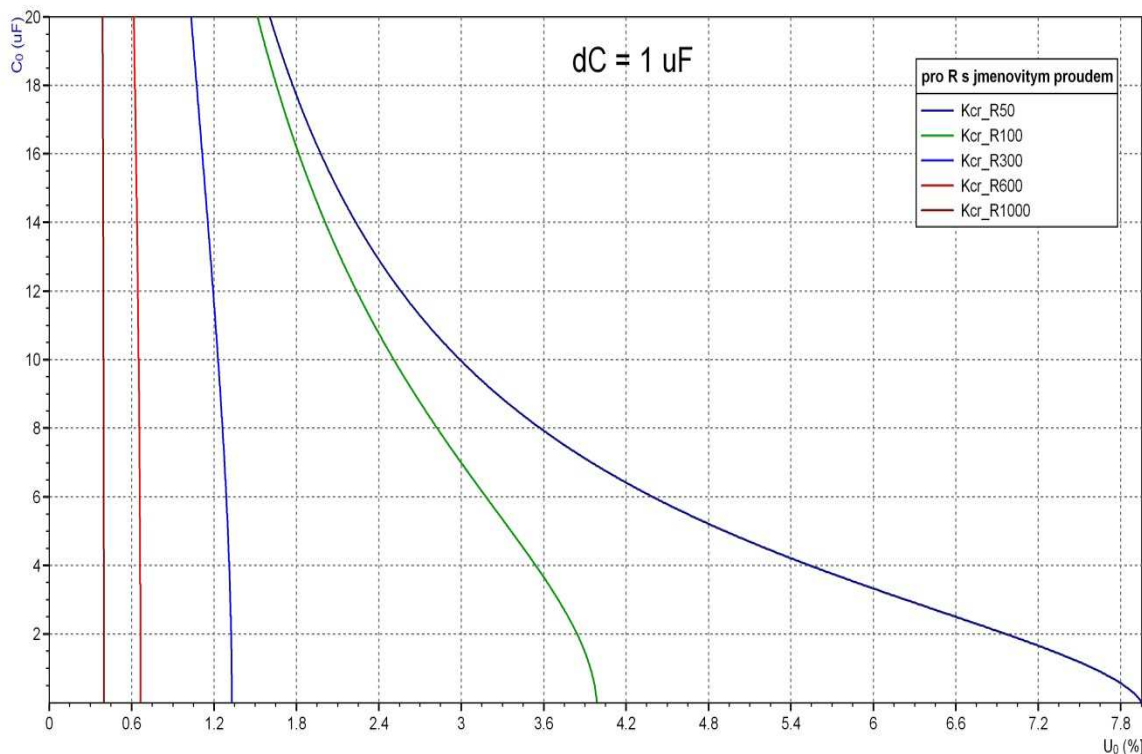
Z grafu Graf 46 je patrné, že absolutní hodnota napětí uzlu sítě proti zemi bude dosahovat nízkých hodnot, zejména pro uzlové odpory s nízkou hodnotou odporu. V rozvodných sítích vysokého napětí (zpravidla u sítí 22 kV) se v našich podmínkách setkáváme s uzlovými odporníky se jmenovitým proudem 1000 A (12,7 Ohm), 600 A (21.16 Ohm) a 300 A (42,33 Ohm). Pro názornost jsem kromě standardně používaných uzlových odporníků uvažoval i odporníky s vyšší hodnou uzlového odporu. Jedná se o uzlové odporníky se jmenovitými proudy 100 A (odpor 127 Ohm) a 50 A (odpor 254 Ohm). Graf 47 zobrazuje pro uvedené hodnoty odporů uzlových odporníků průběh absolutní hodnoty nulové složky napětí po připojení kapacity $\Delta C = 1 \mu\text{F}$ do jedné fáze v závislosti na poměru hodnoty zemní fázové kapacity sítě C_0 k připojované hodnotě přídavné kapacity ΔC . Hodnota nulové složky napětí je zde zobrazena jako funkce poměru fázové zemní kapacity C_0 k připojované kapacitě ΔC . Zemní fázová kapacita C_0 o velikosti $1 \mu\text{F}$ způsobuje zemní kapacitní proud o velikosti cca 11,9 A (poměr $\Delta C/C_0 = 1$). Pro poměr $\Delta C/C_0 = 10$ bude zemní kapacitní proud sítě dosahovat hodnoty cca 119,7 A. Tato hodnota kapacitního proudu v praxi představuje kabelovou síť malého rozsahu. Pro běžné kabelové sítě s kapacitním proudem mezi 300 A až 600 A by bylo nutné připojovat přídavnou kapacitu na úrovni cca $10 \mu\text{F}$ a větší. Avšak i pro velké hodnoty připojované přídavné kapacity bude nulová složka napětí stále nízká. Měření nízké hodnoty nulové složky napětí bude zatíženo jak absolutní chybou, tak i relativní chybou měření (viz kapitola 3.6). Reálně lze očekávat, že chyba měření nízké hodnoty nulové složky napětí bude příčinou vzniku velké chyby při určování hodnoty zemního kapacitního proudu touto metodou.



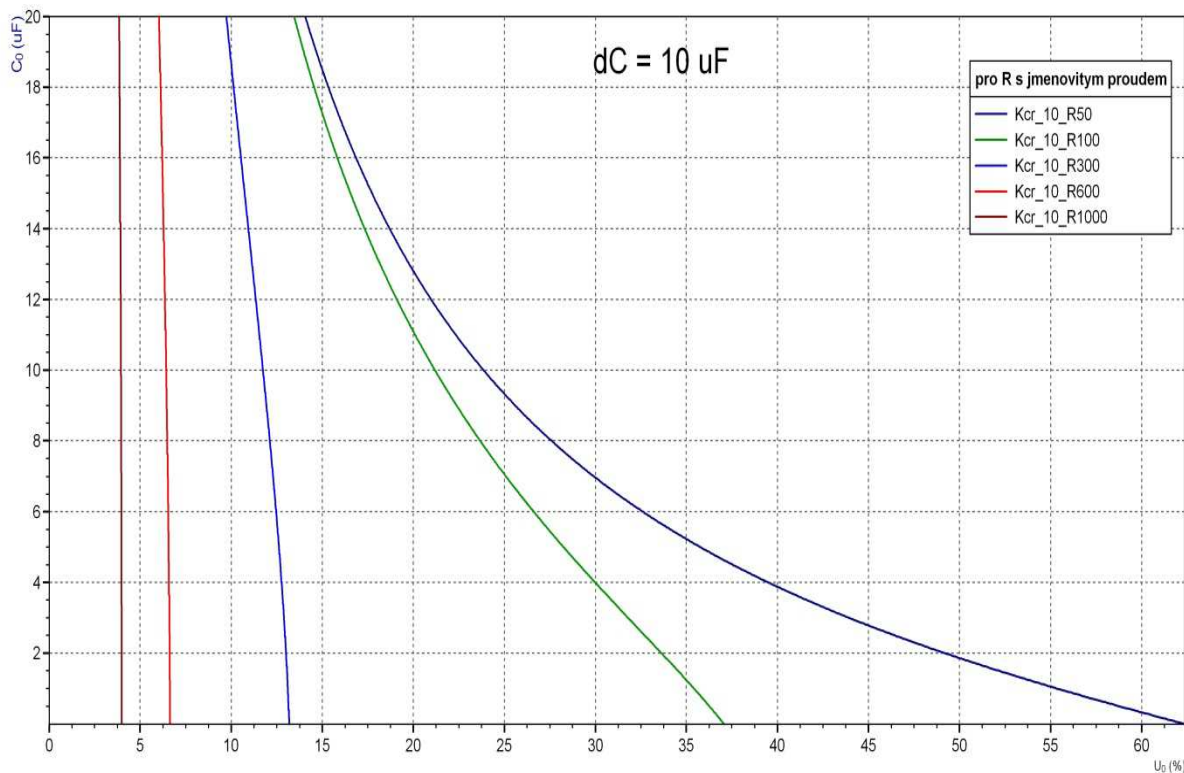
Graf 47 Velikost U_0 pro uzlové odporníky v síti 22 kV se jmenovitými proudy uzlových odporníků 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A v závislosti na poměru celkové zemní fázové kapacity sítě k hodnotě připojované kapacity ΔC o velikosti $1 \mu\text{F}$

Na grafech Graf 48 a Graf 49 jsem znázornil křivky průběhu koeficientu k_{CR} pro různé hodnoty uzlového odporníku a pro připojované kapacity $\Delta C = 1 \mu\text{F}$, $\Delta C = 10 \mu\text{F}$ v závislosti na nulové složce napětí a hodnotě zemní fázové kapacity sítě. Z průběhu

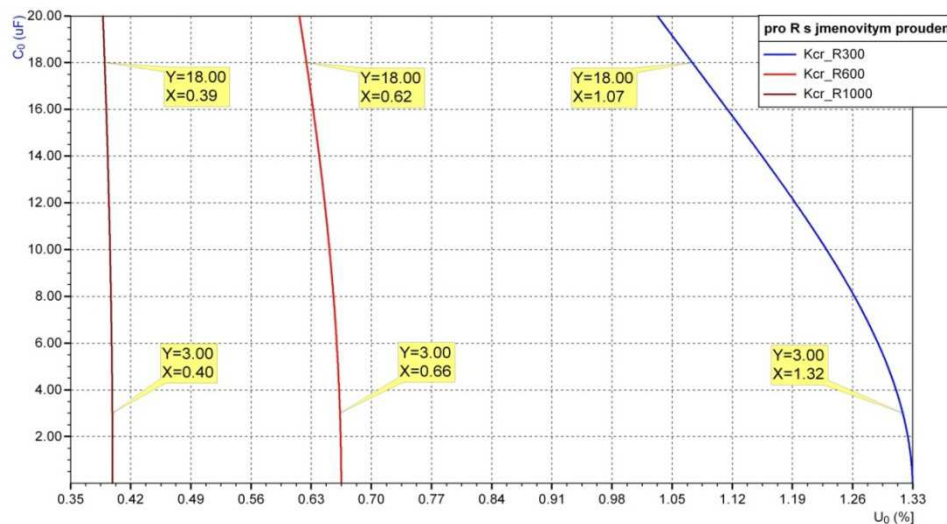
křivek je patrné, že pro uzlové odporů se jmenovitými proudy 300 A, 600 A a hlavně 1000 A způsobí již nepatrná chyba měření nulové složky napětí velkou chybu určení hodnoty fázové zemní kapacity C_0 viz Graf 50.



Graf 48 Graf pro určení fázové zemní kapacity C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na velikosti U_0 pro uzlové odporů v síti 22 kV se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A po připojení kapacity $\Delta C = 1 \mu F$ do jedné fáze

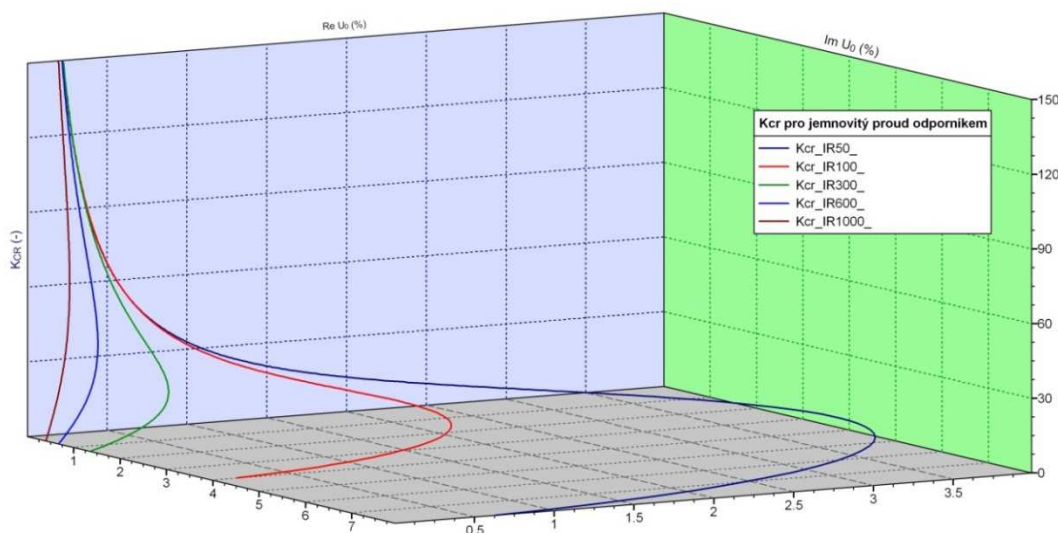


Graf 49 Graf pro určení fázové zemní kapacity C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na velikosti U_0 pro uzlové odporů v síti 22 kV se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A po připojení kapacity $\Delta C = 10 \mu F$ do jedné fáze



Graf 50 Graf pro určení C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na U_0 pro uzlové odporníky se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A v síti 22 kV po připojení přídatné kapacity $\Delta C = 1 \mu\text{F}$ do jedné fáze, chyba měření nulové složky napětí na úrovni několika setin procenta způsobí velkou chybu v určení fázové zemní kapacity

Z rovnice (6.54) vyplývá, že nulová složka napětí je komplexní hodnota. To znamená, že u nulové složky napětí nebude docházet pouze ke změně její velikosti, ale i k vektorovému natočení. Vektorové natočení nulové složky napětí bude závislé na velikosti uzlového odporu a poměru připojované kapacity vůči celkové zemní fázové kapacitě sítě. Z grafu Graf 51 je patrné, že vliv změny vektorového natočení nulové složky napětí se s rostoucí hodnotou koeficientu k_{CR} bude zmenšovat. Pro absolutní hodnoty koeficientu k_{CR} nad 80 již změna vektorového natočení nebude významná. Pro tyto hodnoty koeficientu vychází nulové složky napětí velmi nízké a měření nulové složky napětí bude pak zatíženo velkou chybou, která vylučuje reálné použití této metody.



Graf 51 Komplexní hodnota vektoru nulové složky napětí v závislosti na koeficient k_{CR} , při připínané přídatné kapacitě $\Delta C = 0.44 \mu\text{F}$ (to odpovídá délce cca 1 km jednožilového kabelu 22 kV 1x240 AXEKVCE) pro vybrané jmenovité proudové hodnoty uzlových odporníků (hnědá křivka pro jmenovitý proud 1000 A, modrá křivka pro jmenovitý proud 600A, zelená křivka pro jmenovitý proud 300 A, červená křivka pro jmenovitý proud 100 A a fialová křivka pro jmenovitý proud 50 A)

Pro přesnější měření by bylo vhodné, aby po připojení přídavné kapacity došlo k nárůstu hodnoty nulové složky napětí na úroveň mezi cca 10% až 80% fázového napětí. Úroveň hodnoty nulové složky napětí ovlivníme použitím vyšší hodnoty připínaného kondenzátoru ΔC (nízká hodnota koeficientu „ k_{CR} “) a vysokou hodnotou odporu uzlového odporníku. V běžné kabelové síti s uzemněným uzlem přes odporník se však jedná o nereálné požadavky.

6.7 Použití nepřímé metody v odporově uzemněné síti

Jak jsem již uvedl, největším problémem v odporově uzemněné síti je přesné měření nízké hodnoty nulové složky napětí (napětí uzlu sítě proti zemi). Problematika přesnosti měření nulové složky napětí je popsána v kapitole 3.6. Při měření nulové složky napětí je nutné přesně měřit nejen její velikost, ale i fázové natočení. Tento technický problém přesného měření nízké hodnoty nulové složky napětí neumožňuje tuto metodu využívat v reálné síti s uzemněným uzlem přes nízkohomový odporník. Určité využití této metody by bylo možné pouze u sítí malého rozsahu a s vyšší hodnotou uzlového odporu.

7 ZPŘESNĚNÍ METODY PŘIBLIŽNÉHO URČENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU VÝVODU PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ

Hodnotu zemního kapacitního proudu lze v síti s izolovaným uzlem určit z měřené hodnoty poruchového proudu v místě zemního spojení. Proto se pro zjištění hodnoty zemního kapacitního proudu vytváří umělé zemní spojení. Jedná se o přímou metodu, kterou lze použít jak pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu, tak i hodnoty činného zbytkového proudu zemního spojení a zastoupení vyšších harmonických v poruchovém proudu. K tomu je zapotřebí znát úhel mezi nulovou složkou napětí a měřeným poruchovým proudem. Jak již bylo uvedeno, vytváření umělého zemního spojení v síti s sebou přináší riziko rozšíření poruchy na vícefázový zkrat s následným výpadkem části sítě. Proto při měřeních, pokud to situace umožňuje, bývají nejdůležitější vývody převáděny na jiný napájecí systém. Ve svém důsledku má pak ale měřená síť oproti běžnému provoznímu stavu sníženou hodnotu zemního kapacitního proudu.

U sítí s odporově uzemněným uzlem bude místem poruchy protékat jak zemní kapacitní proud, tak i proud uzlovým odporníkem. Pro stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu je nutné spolu s proudem poruchy měřit i nulovou složku napětí.

Další možností je měření nulové složky proudu jednotlivých vývodů při reálném zemním spojení. V sítích, kde jsou použity digitální ochrany se záznamem měřených hodnot, lze záznam využít pro vyhodnocení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu. Při vzniku zemního spojení se v celé síti zvýší hodnota nulové složky napětí. Nulové složky napětí lze využít pro aktivaci záznamu všech ochran v síti. Po vyčtení záznamů proběhlého zemního spojení z ochran je možné vyhodnotit jednotlivé zemní kapacitní proudy ve vývodech a rovněž celkový zemní kapacitní proud sítě.

Jedná se o metodu, která je použitelná na všechny VN sítě s nepřímo uzemněným uzlem nebo s izolovaným uzlem. Tato metoda je využívána v některých energetických společnostech.

Z teorie zemního spojení je známo, že při kovovém zemním spojení se zvýší úroveň fázového napětí ve fázích bez poruchy až na úroveň sdruženého napětí. Se zvýšením hodnot fázového napětí se úměrně zvýší i hodnoty fázového nabíjecího kapacitního proudu. Ve fázi se zemní poruchou napětí klesne až na nulovou hodnotu. Ve vývodech bez zemní poruchy nemůže ve fázi postižené zemní poruchou protékat fázový nabíjecí zemní kapacitní proud, protože napětí fáze proti zemi má nulovou hodnotu. Nulovou složku proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení ve fázi L_1 , jsem vyjádřil vztahem (7.1). Tento vztah platí pouze pro kovové zemní spojení v blízkosti napájecí rozvodny, tedy v místě měření.

$$\begin{aligned}\vec{I}_0 &= \vec{I}_{CL2} + \vec{I}_{CL3} \\ \vec{I}_{CL1} &= 0\end{aligned}$$

(7.1)

Při zjednodušeném výpočtu a kovovém zemním spojení lze nabíjecí zemní kapacitní proudy ve fázích L_2 a L_3 vyjádřit jako vektory v komplexní rovině popsané rovnicemi (7.2).

$$\begin{aligned}\vec{I}_{CL2} &= I_C \left(\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) \right) \\ \vec{I}_{CL3} &= I_C \left(\cos\left(-\frac{\pi}{6}\right) + j \sin\left(-\frac{\pi}{6}\right) \right) \\ \vec{I}_C &= j\omega C\sqrt{3}U\end{aligned}\tag{7.2}$$

Rovnici (7.1) lze doplnit o vztahy z (7.2) a dále upravit.

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_C \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} \right) = \sqrt{3}\vec{I}_C\tag{7.3}$$

Po úpravě dostaneme klasický vztah pro výpočet zemního kapacitního proudu.

$$\begin{aligned}\vec{I}_0 &= \sqrt{3}\vec{I}_C = \sqrt{3}j\omega C(\sqrt{3}U_f) \\ \vec{I}_0 &= 3j\omega CU_f\end{aligned}\tag{7.4}$$

Ve vývodu bez zemní poruchy při zemní poruše v síti lze teoreticky určit hodnotu zemního kapacitního proudu vývodu z naměřené nulové složky proudu vývodu. Tuto hodnotu můžeme získat například ze záznamu zemní ochrany. Hodnota zemního kapacitního proudu ve vývodu bez zemní poruchy nebude ovlivněna způsobem uzemnění uzlu sítě. Této metody lze využít jak v síti s izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem, tak i v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů. V bezporuchovém stavu sítě budou mít fázové zemní nabíjecí kapacitní proudy hodnotu jedné třetiny změřené nulové složky proudu při zemním spojení. Nulová složka proudu vývodu bude mít v bezporuchovém stavu teoreticky nulovou hodnotu.

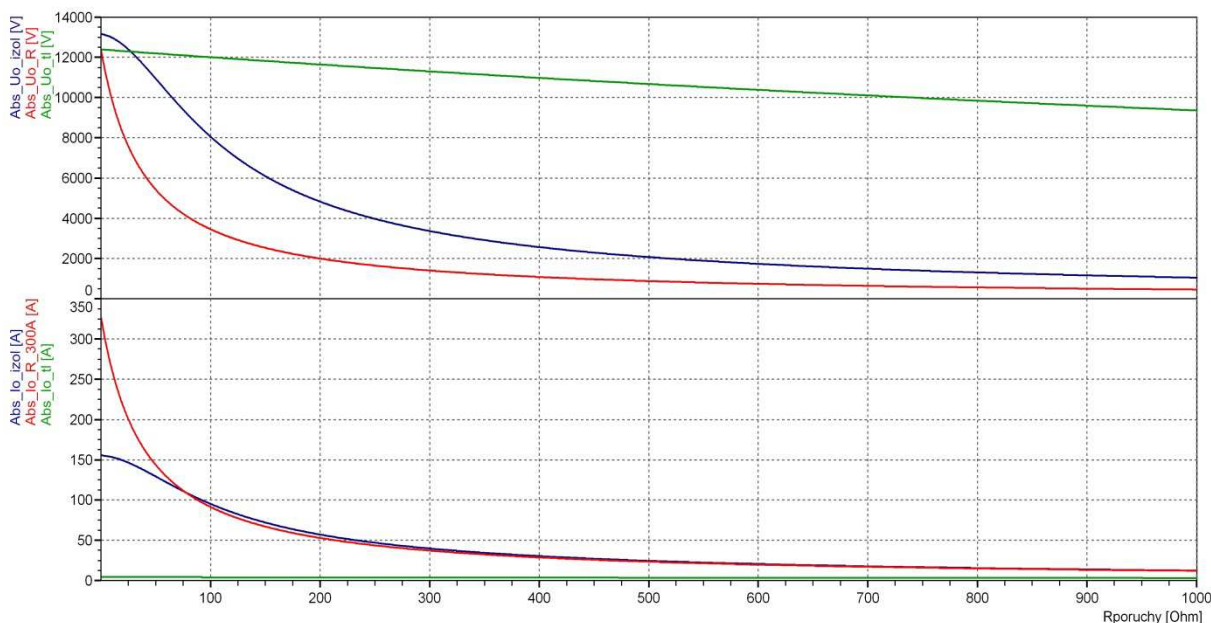
Vztah (7.4) je klasickým vztahem pro výpočet zemního kapacitního proudu místem zemní poruchy v izolované síti. Při kovové zemní poruše má uzel sítě právě hodnotu fázového napětí a pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu postačuje změřit nulovou složku proudu ve vývodu bez poruchy. Nulová složka proudu vývodu bez zemní poruchy při zemní poruše v síti udává hodnotu zemního kapacitního proudu vývodu a fázový nabíjecí zemní kapacitní proud odpovídá třetině hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Celkovou hodnotu zemního kapacitního proudu sítě můžeme získat sečtením všech zemních kapacitních proudů ve vývodech.

7.1 Metoda zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu s využitím záznamu ochran

Moderní zemní ochrany umožňují záznam nulové složky měřených hodnot v době překročení trigeriačních podmínek. Při překročení stanovené meze aktivují zvýšené

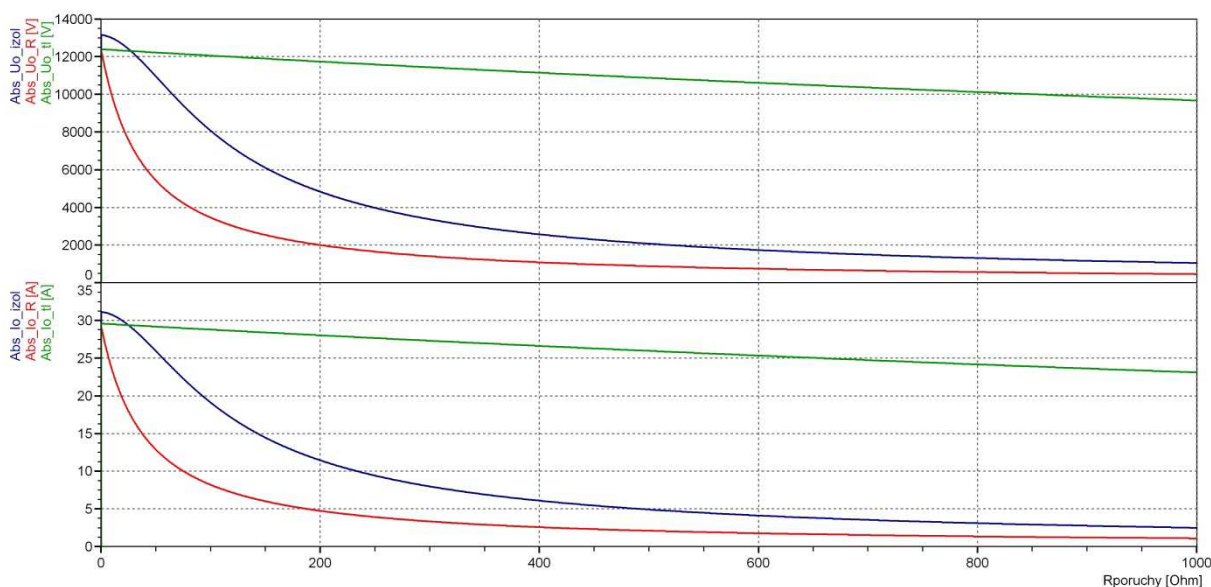
hodnoty nulové složky napětí záznam zemní ochrany a ochrana zaznamená přímo hodnotu nulové složky napětí a proudu vývodu. Ve vývodu bez poruchy poskytuje naměřená nulová složka proudu informace o velikosti zemního kapacitního proudu vývodu a o hodnotě fázového kapacitního nabíjecího proudu vývodu. Jedná se o jednoduchou metodu určování hodnoty zemního nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Metoda vyžaduje pouze vhodné nastavení zemních ochran a vytvoření umělého zemního spojení. Případně je možné vyčkat na reálnou zemní poruchu v síti. Tato metoda je výhodná při zemním spojení s nízkou hodnotou odporu zemní poruchy. Při reálném zemním spojení lze očekávat, že podmínky pro použití metody nebudou vždy optimální. Většina zemních poruch v kabelové síti bude mít odpor poruchy v rozmezí 20 Ω až 100 Ω . U venkovních sítí bývá odpor poruchy ještě vyšší a hodnoty odporu poruchy mohou být na úrovni jednotek k Ω .

Na grafu Graf 52 je znázorněn pokles hodnoty nulové složky napětí v síti 22 kV s izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem a neúčinně uzemněným uzlem přes vyladěnou zhášecí tlumivku v závislosti na odporu poruchy. Zároveň je zde zobrazen pokles nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou. Nulová složka proudu je největší ve vývodu se zemní poruchou u odporově uzemněného uzlu sítě. V těchto sítích bude také docházet k nejrychlejšímu poklesu nulové složky napětí v závislosti na vrůstajícím odporu poruchy. Nejmenší hodnota nulové složky proudu ve vývodu se zemní poruchou je u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů. Zároveň je v těchto sítích nejmenší pokles nulové složky napětí v závislosti na rostoucí velikosti odporu poruchy. Rychlost poklesu nulové složky napětí v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů je závislá jak na velikosti odporu poruchy, tak i na přesnosti vyladění zhášecí tlumivky a svodovém odporu sítě.



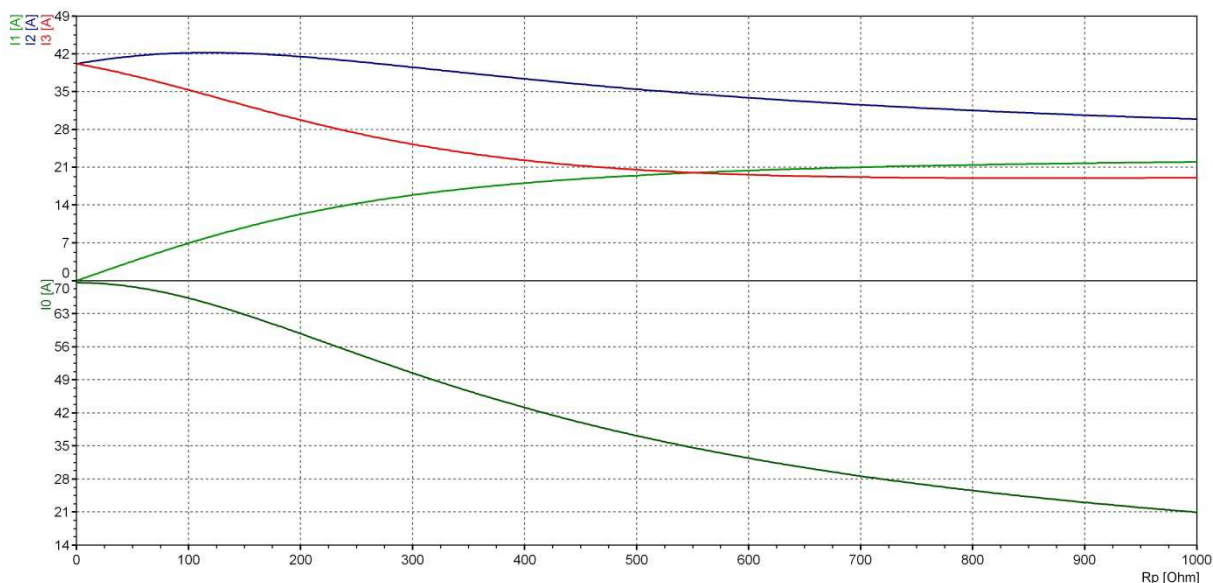
Graf 52 Vliv odporu poruchy ve vývodu se zemní poruchou na velikost hodnoty nulové složky napětí a nulové složky proudu (modrá křivka: izolovaný uzel sítě, červená křivka: odporově uzemněný uzel sítě se jmenovitým proudem odporu 300A, zelená křivka: síť s kompenzací zemních kapacitních proudů s vyladěnou zhášecí tlumivkou)

Pro vývod bez poruchy platí obdobná závislost nulové složky napětí na odporu poruchy jako pro vývod se zemní poruchou. Rozdíl zaznamenáme pouze ve velikosti nulové složky proudu. Ve vývodu se zemní poruchou je nulová složka proudu tvořena nabíjecím proudem vývodu a poruchovým proudem zemního spojení. U vývodu bez poruchy je nulová složka proudu tvořena pouze nabíjecím proudem fázových zemních kapacit. Na následujícím grafu Graf 53 jsem znázornil ovlivnění nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy odporem zemní poruchy. Z grafu je patrné, že závislost nulové složky proudu na odporu poruchy kopíruje průběh nulové složky napětí.



Graf 53 Vliv odporu poruchy ve vývodu bez zemní poruchy na velikost hodnoty nulové složky napětí a nulové složky proudu, zemní kapacitní proud vlastního vývodu je cca 35 A (modrá křivka: izolovaný uzel sítě, červená křivka: odporově uzemněný uzel sítě se jmenovitým proudem odporu 300A, zelená křivka: síť s kompenzací zemních kapacitních proudů s vyladěnou zhášecí tlumivkou)

Nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy je vytvářena kapacitními nabíjecími proudy vývodu ve fázích nepostižených zemní poruchou. Podíváme-li se na hodnoty fázových nabíjecích kapacitních proudů ve vývodu bez poruchy, zjistíme jejich lineární závislost na velikosti fázového napětí, která je dále ovlivněna odporem zemní poruchy. S rostoucím odporem poruchy nebo rostoucí vzdáleností poruchy od rozvodny (kdy se uplatňuje podélná impedance vedení) se zvyšuje napětí ve fázi se zemní poruchou a snižuje se napětí ve fázích bez poruchy. To má za následek pokles hodnoty nulové složky napětí. S rostoucím napětím ve fázi se zemní poruchou se bude v této fázi zvyšovat hodnota nabíjecího proudu. Ve fázích bez poruchy, vlivem poklesu fázového napětí, se bude hodnota nabíjecího proudu snižovat. Tyto změny fázových napětí a změny fázových nabíjecích proudů ovlivňují velikost nulové složky proudu ve vývodu. Příklad ovlivnění nabíjecích kapacitních proudů odporem zemní poruchy jsem zobrazil v grafu Graf 54.



Graf 54 Příklad závislosti fázových kapacitních nabíjecích proudů v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů a nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy na odporu zemní poruchy v síti, fáze L_1 je postižena zemní poruchou

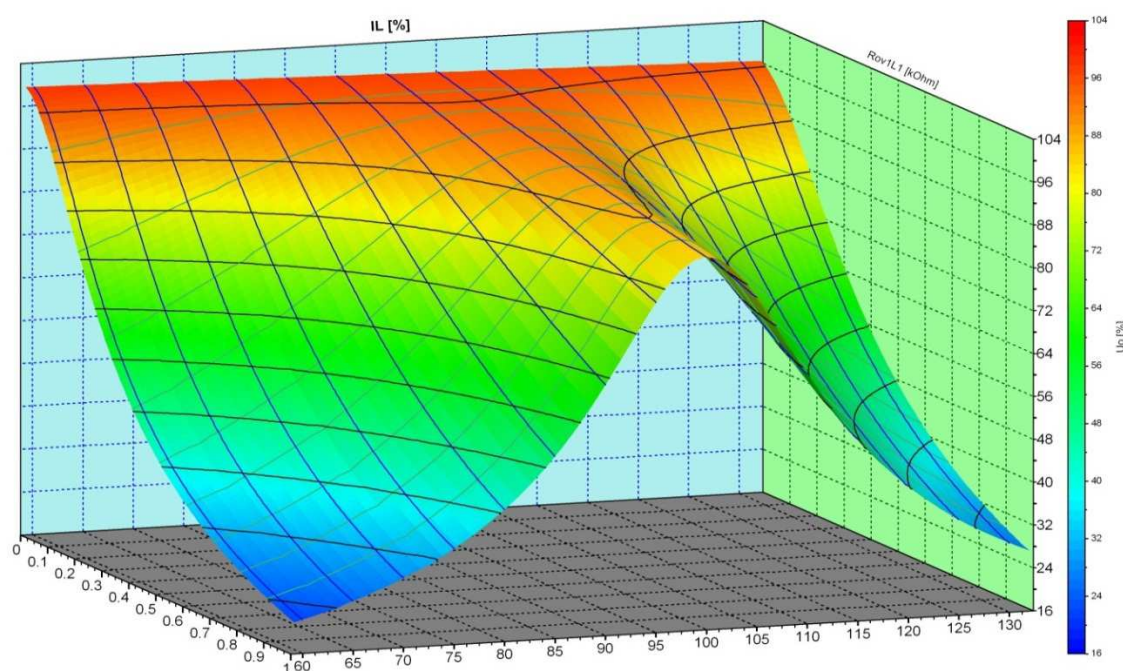
U příkladu zemního spojení v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů (Graf 54) teče při nulovém odporu poruchy ve fázích bez poruchy nabíjecí kapacitní proud 40,15 A. Jedná se o nabíjecí kapacitní proud ve fázích L_2 a L_3 , kdy v těchto fázích je proti zemi sdružená hodnota napětí. Celková nulová složka proudu vývodu má hodnotu 69,45 A, což odpovídá výpočtu dle vztahu (7.4). Pro odpor poruchy 100Ω je nulová složka proudu vývodu 66,3 A a tomu odpovídá i nabíjecí kapacitní proud vývodu ve fázích bez zemní poruchy dle vztahu (7.4) s hodnotou 38,2 A. V uvedeném příkladu bude vypočtený nabíjecí proud pro daný odpor poruchy o 5% menší než skutečná hodnota nabíjecího proudu. S rostoucí hodnotou odporu zemní poruchy se bude chyba určování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu výrazněji zvyšovat.

7.2 Vlivy snižující přesnost přibližného určení zemního kapacitního proudu vývodu

Přesnost hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu určená dle metody popsané v kapitole 7.1 je závislá na odporu poruchy zemního spojení. Způsob uzemnění uzlu sítě ovlivňuje míru závislosti na odporu zemní poruchy. U sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů bude hrát roli i přesnost vyladění zhášecí tlumivky. Proto jsem se v této části práce zaměřil na eliminaci vlivu zemního odporu poruchy a přesnost této metody. Odpor poruchy nemůžeme ovlivnit a bývá časově proměnlivý i proudově závislý. U většiny případů dochází se vzrůstajícím proudem zemního spojení k poklesu odporu zemní poruchy. V praxi jsem zaznamenal i případy, kdy po zvýšení proudu poruchy (například v důsledku připnutí sekundárního odporu do pomocného výkonového vinutí zhášecí tlumivky) došlo ke zvýšení odporu zemní poruchy. Odpor zemní poruchy ovlivňuje velikost fázových napětí a velikost nulové složky napětí. Změna fázových napětí ovlivňuje velikost nabíjecího kapacitního proudu a tím je ovlivněna i velikost nulové složky proudu vývodu. Vedle odporu poruchy má vliv na velikost nulové složky napětí a proudu ve vývodu i impedance vedení

z napájecí rozvodny (místa měření nulové složky napětí a proudu) do místa poruchy a rovněž způsob uzemnění uzlu sítě. Tvar křivek v grafu Graf 54 se tak bude měnit podle aktuálních parametrů sítě.

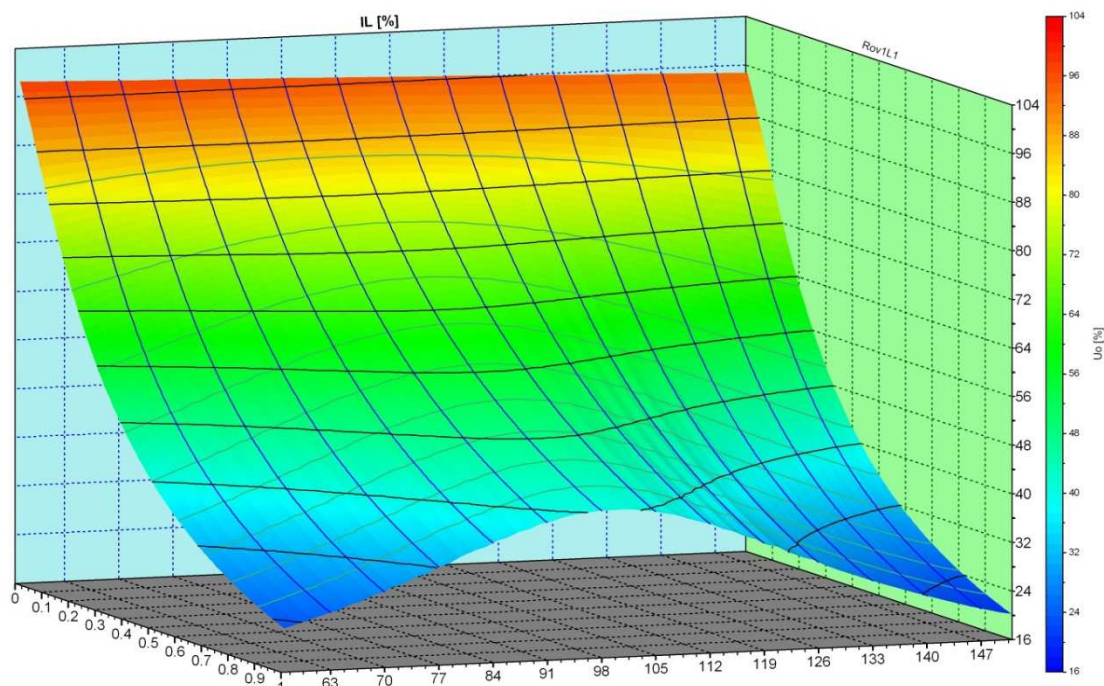
Nejvíce vlivů můžeme sledovat u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů. Zde musíme uvažovat vliv odporu poruchy, přirozené nesymetrie sítě, vzdálenosti poruchy od napájecí rozvodny, velikosti svodového proudu sítě a vliv přesnosti vyladění zhášecí tlumivky na velikost nulové složky napětí a proudu ve vývodu bez zemní poruchy. Přesnost vyladění zhášecí tlumivky je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících velikost nulové složky napětí a tím i velikost nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy. Na následujícím grafu Graf 55 jsem zobrazil průběh velikosti nulové složky napětí v závislosti na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky.



Graf 55 Závislost velikosti nulové složky napětí na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu)

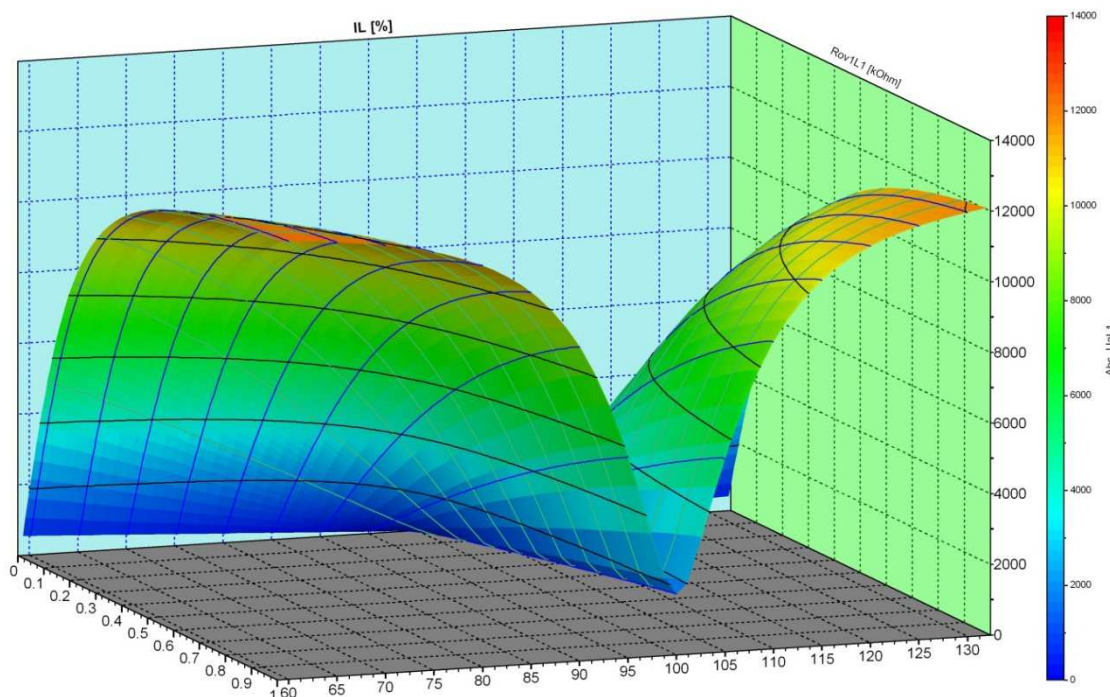
Při vyladěné zhášecí tlumivce v síti s nízkou hodnotou tlumení (činný svodový proud je menší než 1% z kapacitního proudu sítě) dochází k mírnému poklesu nulové složky napětí v závislosti na odporu poruchy. Hodnota nulové složky je i při odporu poruchy cca 1 k Ω stále na úrovni 80%.

Při běžném až mírně zvýšeném tlumení (svodový proud je na úrovni 1 až 2% z kapacitního proudu sítě) bude s rostoucím odporem poruchy pokles nulové složky napětí výraznější. Stále však bude mít významný vliv přesnost vyladění zhášecí tlumivky. Při extrémním tlumení (činný svodový proud bude na úrovni cca 10% z kapacitního proudu sítě) bude již výrazně omezen vliv přesnosti vyladění zhášecí tlumivky na velikost nulové složky napětí (Graf 56). Nulová složka napětí bude s rostoucím odporem poruchy výrazněji klesat. Pouze při přesném vyladěné zhášecí tlumivky bude přesahovat hodnotu cca 40% z hodnoty fázového napětí sítě při odporu zemní poruchy 1 k Ω .

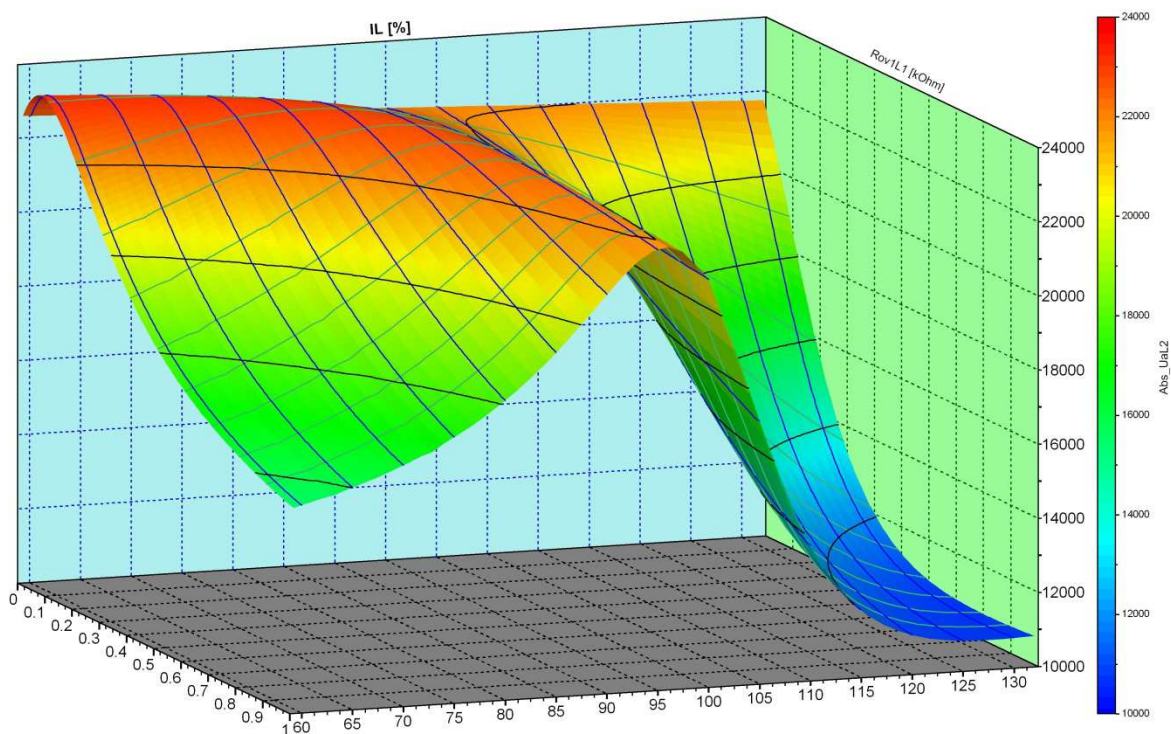


Graf 56 Závislost velikosti nulové složky napětí na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s extrémním tlumením (velmi vysoká hodnota činného svodového proudu cca 10% z kapacitního proudu sítě)

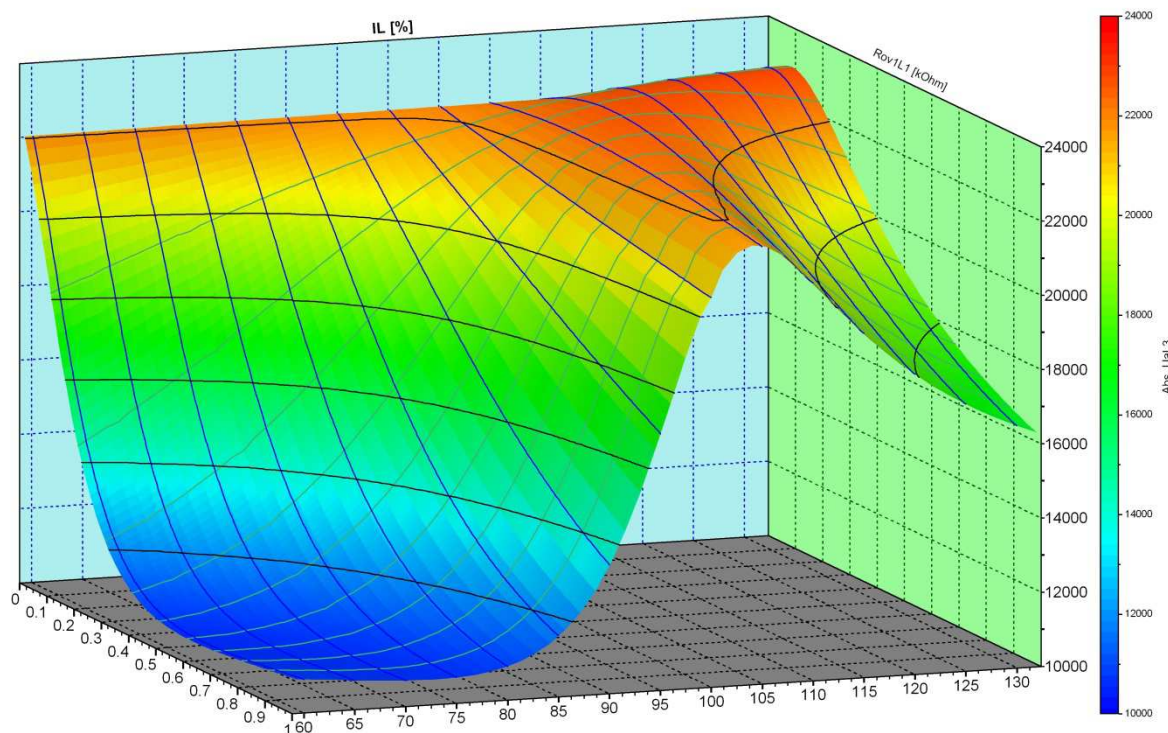
Nulová složka napětí je dána vektorovým součtem fázových napětí. Je-li odporem poruchy a přesností vyladění zhášecí tlumivky ovlivněna nulová složka napětí budou odporem poruchy ovlivněna i fázová napětí. Na následujících grafech Graf 57, Graf 58 a Graf 59 jsem zobrazil průběhy fázových napětí v závislosti na přesnosti vyladění zhášecí tlumivky a odporu poruchy.



Graf 57 Závislost fázového napětí ve fázi se zemní poruchou L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)



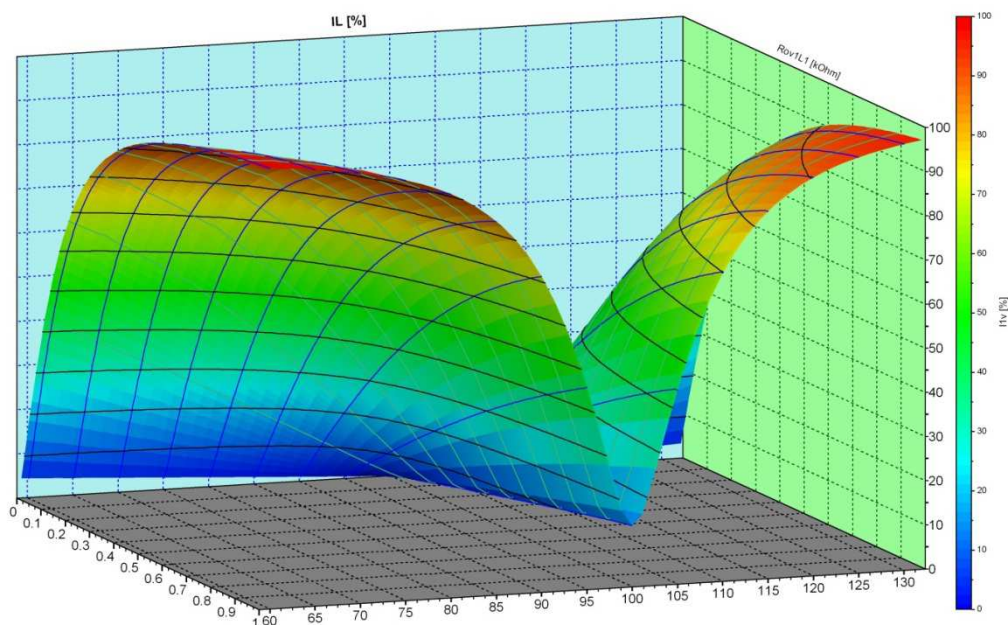
Graf 58 Závislost fázového napětí L_2 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)



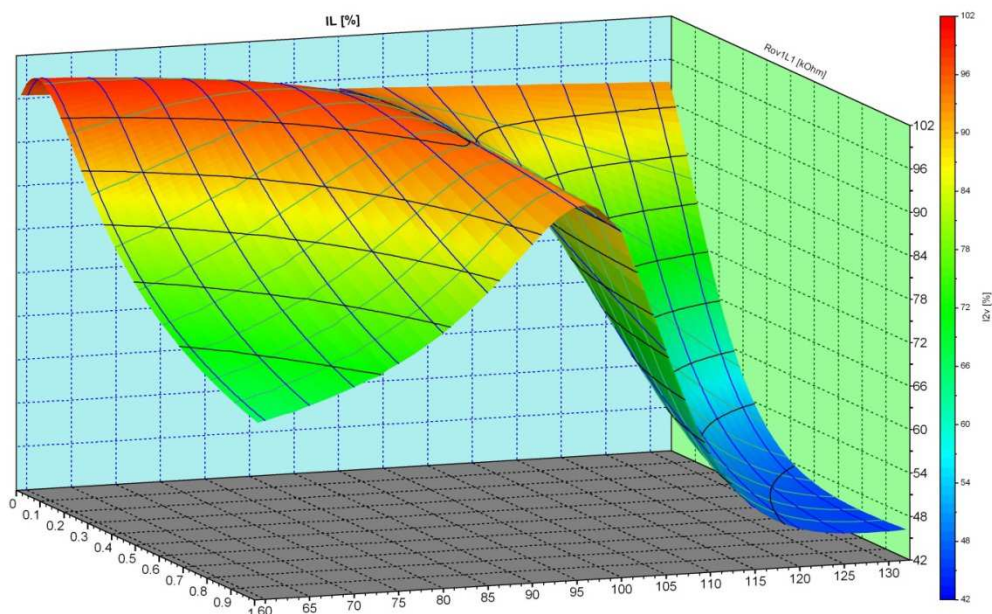
Graf 59 Závislost fázového napětí L_3 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)

Je-li fázový zemní nabíjecí kapacitní proud ovlivněn velikostí fázového napětí, budou i změny fázových nabíjecích proudů korespondovat se změnami fázových napětí. Zobrazením procentní velikosti fázových zemních nabíjecích kapacitních proudů v závislosti na změně odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky jsem získal následující grafy Graf 60, Graf 61 a Graf 62.

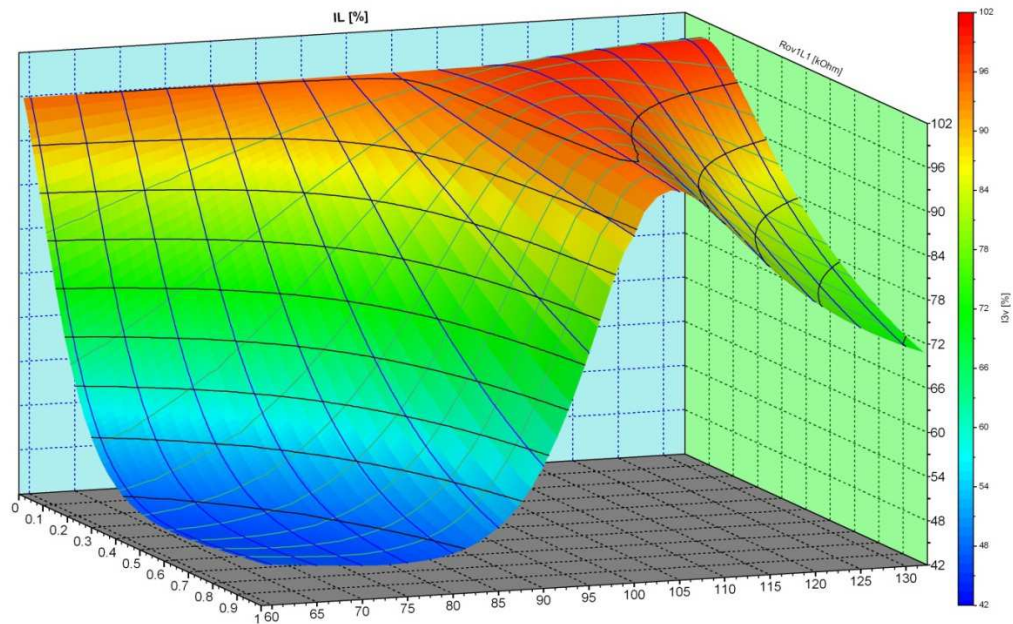
Z porovnání grafů (Graf 60 s grafem Graf 57, Graf 61 s grafem Graf 58 a Graf 62 s grafem Graf 59) jsem dále vycházel při návrhu metody korekce vlivu odporu poruchy na určení hodnoty nabíjecího proudu vývodu.



Graf 60 Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)



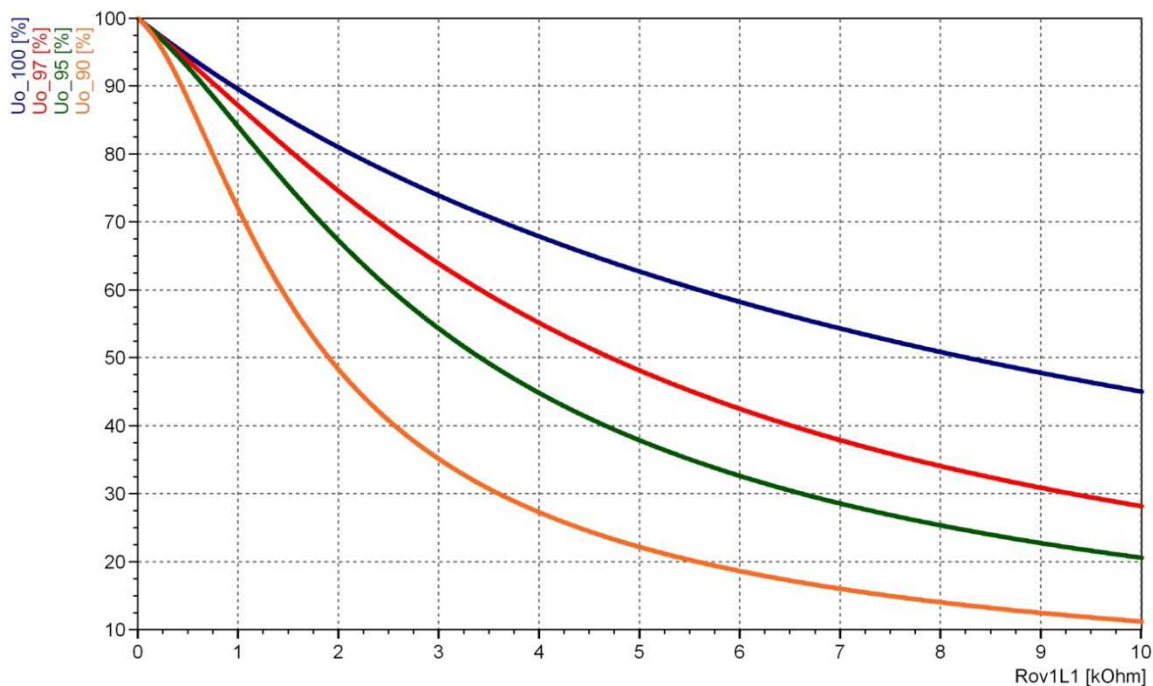
Graf 61 Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_2 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)



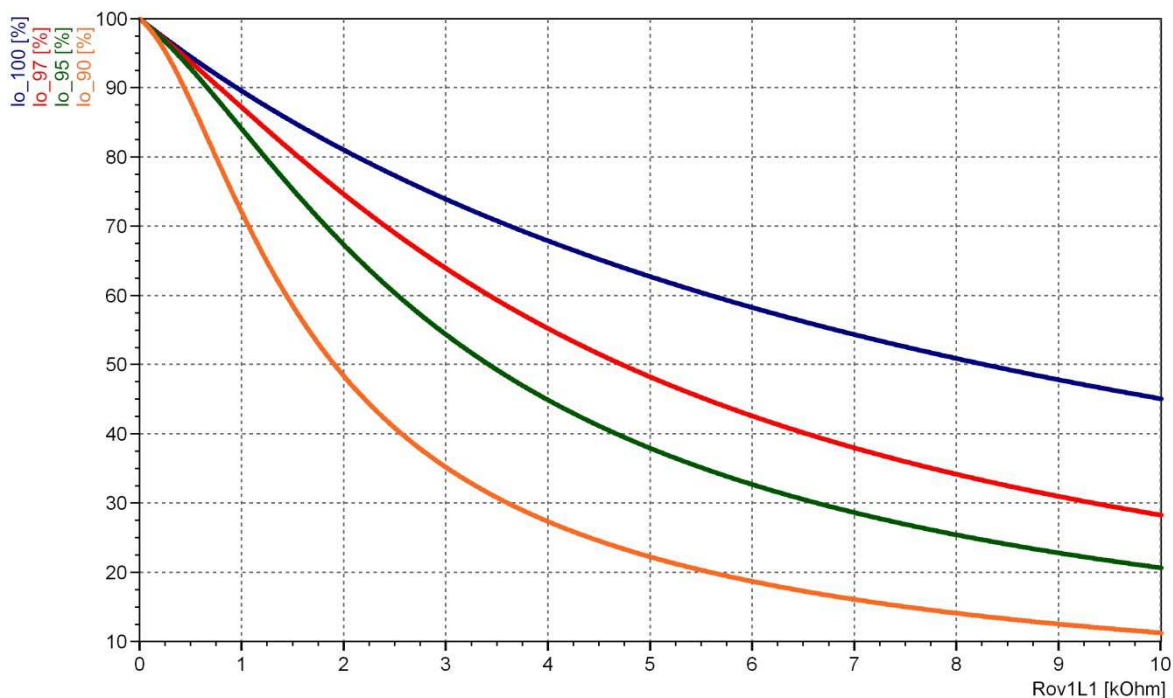
Graf 62 Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_3 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)

Při běžném provozu sítě s automatickým laděním zhášecí tlumivky bývá rozladění zhášecí tlumivky do cca 3%. V některých případech se můžeme setkat i s vyšším rozladěním. Rozladění vyšší než 10% z celkového zemního kapacitního proudu sítě se nepřipouští, pokud nejsou přijata zvláštní opatření pro provoz sítě s vyšší hodnou zbytkového proudu. Zhášecí tlumivka bývá nejčastěji provozována jako mírně podladěná. Z grafů je patrné, že při vyladění zhášecí tlumivky v rozmezí 97% až 100% z hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (což odpovídá reálnému provozu sítě) nedochází k výrazným změnám nulové složky napětí (Graf 63) a nulové složky proudu vývodu bez poruchy (Graf 64) v závislosti na odporu poruchy. Při vyšším rozladění je patrný rychlejší pokles nulové složky napětí a proudu ve vývodu bez zemní poruchy.

Budeme-li měřit na vývodu bez zemní poruchy při zemním spojení v síti nulovou složku proudu, můžeme z této hodnoty určit velikost zemního nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Přesnou hodnotu můžeme však určit pouze za předpokladu, že se jedná o zemní spojení s nulovým odporem poruchy a místo poruchy bude přímo v místě měření (na napájecí rozvodně). Při vzdálenější poruše a při uvažování odporu poruchy budeme však oproti skutečnosti měřit nižší hodnotu nulové složky napětí a proudu ve vývodu bez poruchy, a to vlivem podélné impedance. I stanovená hodnota zemního kapacitního proudu vývodu bude pak nižší, než je skutečný zemní kapacitní proud vývodu.



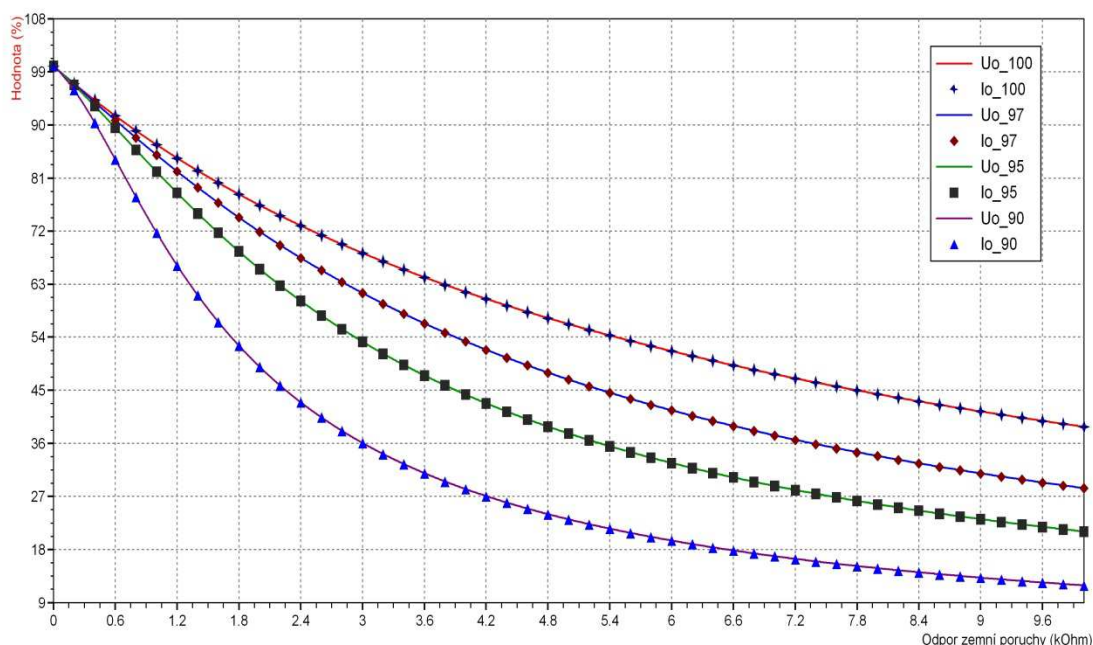
Graf 63 Změny nulové složky napětí v závislosti na odporu poruchy, nulové složky napětí jsou zobrazeny při přesném vyladění zhášecí tlumivky (modrá křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 97% hodnoty zemního kapacitního proudu (červená křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 95% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (zelená křivka) a při naladění zhášecí tlumivky na 90% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (oranžová křivka)



Graf 64 Změny nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy v závislosti na odporu poruchy, nulové složky proudu jsou zobrazeny při přesném vyladění zhášecí tlumivky (modrá křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 97% hodnoty zemního kapacitního proudu (červená křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 95% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (zelená křivka) a při naladění zhášecí tlumivky na 90% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (oranžová křivka)

7.3 Nový návrh metody eliminace vlivu odporu zemní poruchy na stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu

Na základě závislosti nulové složky napětí a nulové složky proudu na odporu poruchy jsem navrhl metodu eliminující chybu určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Záměrem výzkumu bylo nalezení vhodné eliminace odporu zemní poruchy a eliminace podélné impedance vedení. Jedná se o parametry, které při reálném zemním spojení v síti nemůžeme ovlivnit. Z grafu Graf 65 je zřejmé, že procentní pokles nulové složky napětí v síti se zemním spojením je stejný jako pokles nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy. To je dáno lineární závislostí mezi napětím uzlu sítě a nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy. K obdobným zjištěním dospějeme při výpočtu proudu místem zemní poruchy, kde hodnota poruchového proudu je lineárně závislá na impedanci poruchové smyčky. Poruchová smyčka je tvořena odporem poruchy a sériově řazenou impedancí sousledné, zpětné a nulové složky. Nulová složka napětí je opět lineárně závislá na velikosti poruchového proudu a na nulové impedanci sítě.



Graf 65 Změny nulové složky napětí a proudu ve vývodu bez poruchy v závislosti na velikosti odporu poruchy pro různé přesnosti vyladění zhášecí tlumivky (význam čísel u označení křivek: 100 - přesně vyladěná zhášecí tlumivka, 97 - podladění o 3%, 95 - podladění o 5%, 90 – podladění o 10%), průběhy nulové složky proudu jsou zobrazeny pomocí symbolů

Při eliminaci vlivu odporu poruchy jsem vycházel z hodnot, které jsou při zemním spojení k dispozici. Základním předpokladem je, že známe velikost nulové složky napětí při ideálním kovovém zemním spojení. V tomto případě má nulová složka napětí hodnotu rovnou hodnotě fázového napětí. Využijeme-li těchto poznatků, můžeme jednoduchým způsobem určit skutečnou velikost nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy při ideálním kovovém zemním spojení, které nastalo v těsné blízkosti místa měření. Velikost poruchového proudu je ovlivněna velikostí nulové složky napětí.

$$I_{0V} = I_{0VRp} \frac{U_f}{U_{0Rp}} \quad (A; A, V, V)$$

(7.5)

Kde I_{0V} je nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti přepočtená na hodnotu nulové složky proudu při nulovém odporu zemního spojení
 I_{0VRp} je naměřená nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy
 U_f je hodnota fázového napětí v bezporuchovém stavu sítě
 U_{0Rp} je naměřená hodnota nulové složky napětí při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy.

Měření nulové složky napětí je nejčastěji realizováno měřením napětí na otevřeném trojúhelníku. Výsledné měřené napětí odpovídá procentní hodnotě jmenovitého fázového napětí sítě. Provozní napětí v síti bývá často vyšší, než je jmenovitá hodnota napětí. Pro přepočtení je nutné respektovat skutečnou aktuální provozní hodnotu napětí sítě. Vztah (7.5) upravíme přepočtem respektujícím skutečné provozní napětí v síti.

$$I_{0V} = I_{0VRp} \frac{U_f}{U_{0Rp}} \frac{U_n}{U_s} \quad (A; A, V, V, V, V)$$

(7.6)

Kde I_{0V} je nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti přepočtená na hodnotu nulové složky proudu při nulovém odporu zemního spojení
 I_{0VRp} je naměřená nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy
 U_f je hodnota fázového napětí v bezporuchovém stavu sítě
 U_{0Rp} je naměřená hodnota nulové složky napětí při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy
 U_s je provozní napětí sítě (sdružená hodnota napětí) v době zemního spojení
 U_n je jmenovité napětí sítě (sdružená hodnota napětí).

Při měření napětí v síti pomocí měřicích přístrojových transformátorů napětí můžeme využívat přímo procentní hodnoty naměřeného napětí. Budeme-li předpokládat, že měřicí transformátory napětí mají převod ze jmenovitého napětí sítě na 100 V (100% napětí), můžeme vztah (7.6) dále upravit a zjednodušit na vztah (7.7).

$$I_{0V} = I_{0VRp} \frac{10^4}{U_{0Rp} U_s} \quad (A; A, \%, \%)$$

(7.7)

Kde I_{0V} je nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti přepočtená na hodnotu nulové složky proudu při nulovém odporu zemního spojení
 I_{0VRp} je naměřená nulová složka proudu ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy
 U_{0Rp} je naměřená hodnota nulové složky napětí při zemním spojení v síti s neznámou hodnotou odporu poruchy
 U_s je provozní napětí sítě (sdružená hodnota napětí) v době zemního spojení.

V sítích 22 kV bývá nejčastěji udržované provozní napětí mezi 22,7 kV až 23,5 kV. Tzn., že hodnota provozního napětí je cca 103% až 107% ze jmenovitého napětí sítě. I síť VN s jinou jmenovitou hodnotou napětí jsou provozovány obdobně.

Vztah (7.7) umožňuje přepočítat nulovou složku proudu ve vývodu bez zemní poruchy na hodnotu tohoto proudu při jmenovitých parametrech napětí sítě. Tímto přepočtem dochází k výrazné eliminaci nejen vlivu odporu zemní poruchy, ale i vlivu rozdílné hodnoty provozního napětí sítě. Takto upravené hodnoty pak lze mezi sebou porovnávat a dále s nimi pracovat.

Ověření metody:

Při realizaci zemního spojení v síti 22 kV byla ve vývodu bez zemní poruchy zaznamenána procentní hodnota sdruženého napětí, procentní hodnota nulové složky napětí a hodnota nulové složky proudu vývodu. Měření 1 bylo provedeno při nulovém odporu zemní poruchy. Další měření byla realizována jako odporová zemní spojení. Provedl jsem přepočet nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy na hodnotu tohoto proudu při jmenovitých parametrech napětí sítě a výsledek jsem označil jako I_{0V} . Změřené proudy I_{0R} i přepočtené výsledné hodnoty proudů I_{0V} jsou uvedeny v tabulce Tab. 9. Vlastní nabíjecí kapacitní proud vývodu byl v bezporuchovém stavu cca 10 A. Poslední řádka v tabulce udává chybu, která vznikne, pokud nepoužijeme korekci přepočtu I_{0R} na I_{0V} . Hodnota proudu označená jako I_{0V} pak udává hodnotu příspěvku k zemnímu kapacitnímu proudu sítě, který vznikne v měřeném vývodu bez poruchy při jmenovitém napětí a nulovém odporu zemní poruchy v síti.

Bez korekce, eliminující vliv odporu poruchy dle velikosti nulové složky napětí, bych získal chybnou hodnotu fázového zemního kapacitního proudu vývodu. Při měření na vývodu s různou hodnotou odporu poruchy vychází chyba v rozmezí +9,4% až -33,3%.

Tab. 9 Přepočet hodnot naměřené nulové složky proudu vývodu při různých odporech zemní poruchy na kovové zemní spojení a jmenovité napětí

	Měření 1	Měření 2	Měření 3	Měření 4
Aktuální sdružené napětí U_s (%)	105,51	105,49	105,47	105,46
Aktuální hodnota nulové složky napětí U_o (%)	103,7	91,4	74,5	63,3
Naměřený proud I_{0R} (A)	32,5	28,66	23,4	19,8
Přepočtený proud I_{0V} (A)	29,70	29,72	29,78	29,66
Chyba bez korekce (%)	+9,4	-3,6	-21,2	-33,3

Z výsledků je zřejmé, že pro získání přesnější hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu musíme uplatnit přepočet nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy na hodnotu tohoto proudu při jmenovitých parametrech napětí sítě a nulovém odporu zemní poruchy.

8 NOVÉ METODY URČOVÁNÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU VÝVODU Z FÁZOVÝCH PROUDŮ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ

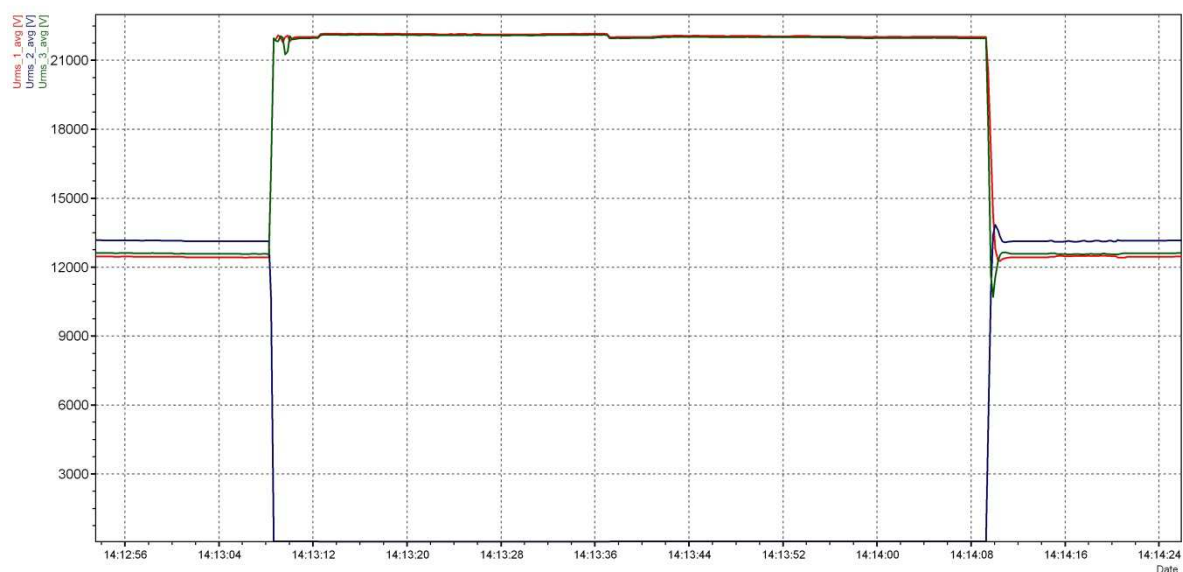
Problematika sítí vysokého napětí je rozsáhlá a stále se objevují nové a nové věci k zamyšlení a zkoumání. V našich podmínkách se nejčastěji setkáváme s VN sítěmi provozovanými s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem. V sítích s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem, dochází při zemním spojení ke změnám fázových napětí (Graf 66). Vedle tohoto známého jevu můžeme sledovat i druhotné jevy vyvolané právě změnou fázových napětí. O těchto jevech se toho příliš nepíše a nespádají do oblasti výraznějšího zájmu. Jedním z takových jevů je změna fázových proudů při zemním spojení (Graf 67). Změny fázových proudů při zemním spojení jsou způsobeny změnou toku proudu přes fázové zemní kapacity. Právě touto problematikou jsem se dále zabýval.

U vedení je definována provozní kapacita a zemní fázová kapacita. U jednofázových kabelových vedení jsou obě kapacity totožné. U jiných typů vedení je vždy nutné rozlišovat mezi provozní kapacitou vedení a zemní fázovou kapacitou vedení. Tyto kapacity způsobují, že i vedení naprázdno bude odebírat nabíjecí kapacitní výkon. Z vedení vysokého napětí jsou pak přes transformátory napájeni odběratelé. Transformátor je netočivý induktivní stroj, který si ze sítě odebírá jalovou energii induktivního charakteru. Přetok jalové energie vedením je nežádoucí. Způsobuje zvýšené proudové zatížení vedení a zvyšuje ztráty. Proto v některých společnostech provozující sítě VN je tato induktivní jalová energie transformátorů kompenzována připojením kompenzačních kondenzátorů na straně nízkého napětí. Velkoodběratelé jsou vyšší cenou za jalovou energii nuceni snižovat odběr jalové energie. Proto se tito odběratelé snaží kompenzovat jalovou energii a odebírají ze sítě převážně energii činného charakteru. Pokud jsou v síti připojeni odběratelé odebírající převážně činný výkon, bude se v síti výrazněji projevovat nabíjecí kapacitní výkon vedení. V mnohých vysokonapěťových sítích můžeme pozorovat odběr jalového výkonu kapacitního charakteru. Tyto sítě jsou překompenzované. Popsaný jev je nejvíce patrný zejména v období nižšího zatížení. Nejvíce k němu přispívají rozsáhlé kabelové sítě se svým kapacitním nabíjecím výkonem.

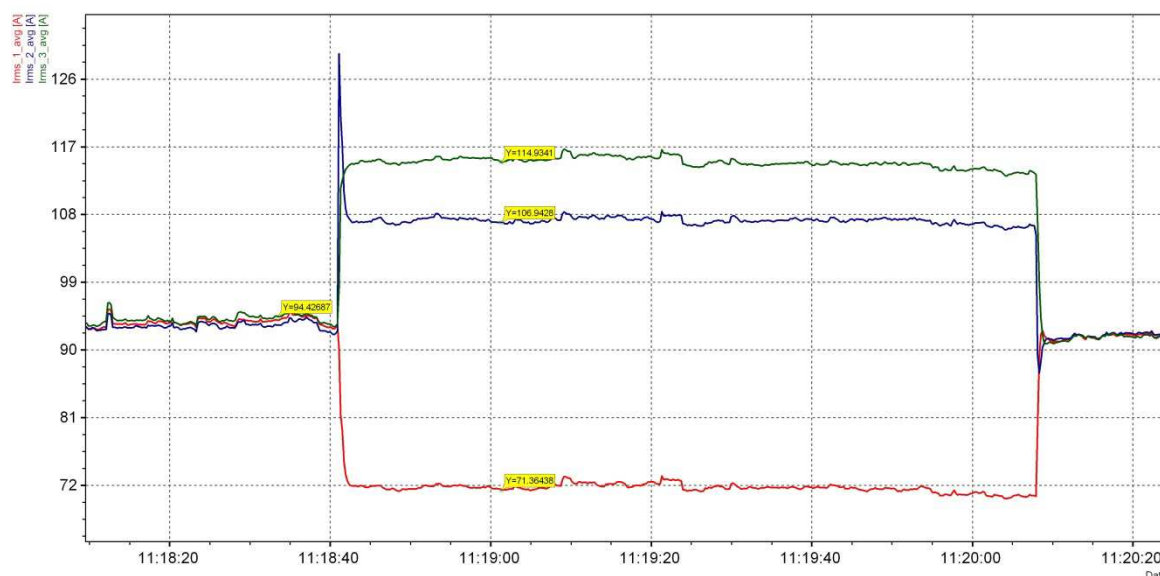
Provozní kapacita vedení je složena ze zemní fázové kapacity a kapacity mezi fázovými vodiči³. Nabíjecí proud fázového vodiče u třífázového venkovního vedení teče přes mezifázové kapacity do dalších fází a přes zemní fázovou kapacitu do země. Obdobně jako u venkovního vedení je tomu i u třífázové kabelového vedení, kde jednotlivé fáze nejsou mezi sebou odděleny stíněním. Třífázová vedení tvořená jednožilovými kabely s uzemněným stíněním jednotlivých žil nemají mezifázové kapacity a uváděná hodnota provozní kapacity je zároveň hodnota zemní fázové kapacity. Kapacitní proud mezi fázemi je kromě velikosti vzájemné mezifázové

³ V příloze 4 je uveden software, který jsem vytvořil k výpočtu kapacit venkovního vedení. Pomocí SW je možné zjišťovat jednotlivé parciální kapacity venkovního vedení a nesymetrii fázových zemních kapacit daného vedení

kapacity ovlivněn velikostí sdruženého napětí. Sdružené napětí se při jednofázových poruchách prakticky nemění a mezifázový nabíjecí kapacitní proud tak zůstává konstantní. Na zemní fázové kapacitě je za běžného provozního (bezporuchového) stavu sítě pouze hodnota fázového napětí úměrná jmenovité hodnotě napětí sítě. Při zemním spojení se u dvou fází bez poruchy zvýší napětí až na hodnotu sdruženého napětí. To znamená, že v těchto fázích bude docházet k nárůstu nabíjecího kapacitního proudu tekoucího právě přes zemní fázové kapacity vedení. Kapacitní proud tekoucí přes mezifázové kapacity se nemění. Zvýšení hodnoty nabíjecího proudu fázových zemních kapacit ovlivní celkový odebíraný proud vývodu. Ve fázi se zemním spojením napětí fáze proti zemi klesne až na nulovou hodnotu, a to v závislosti na odporu poruchy a impedanci vedení mezi místem měření a místem poruchy. To znamená, že při nulovém fázovém napětí danou fází nebude protékat nabíjecí proud zemní fázové kapacity. Mezi fázemi bude stále stejná hodnota sdruženého napětí. Proto nebude ovlivněna hodnota nabíjecího proudu tekoucího přes mezifázové kapacity a nebude ovlivněn ani proud připojeného odběru. Ve skutečnosti dojde jen k nepatrné změně mezifázového napětí a tím i malé změně odebíraného proudu. Změny fázových napětí pak ovlivňují fázové proudy vedení. Tento případ je zachycen na reálném záznamu fázových proudů ve vývodu bez zemní poruchy při zemním spojení v rozsáhlé kabelové síti (Graf 66, Graf 67).



Graf 66 Časový záznam průběhu změny fázových napětí při zemním spojení v distribuční síti 22 kV s kompenzací zemních kapacitních proudů



Graf 67 Časový záznam průběhu fázových proudů ve vývodu bez poruchy při zemním spojení ve VN síti

8.1 Aplikace metodiky výzkumu

Pro stanovení nového způsobu určování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu jsem výzkum zaměřil na analýzu změny hodnot fázových proudů při zemním spojení. Nejprve jsem vycházel z empirických poznatků. Analyzoval jsem záznamy zemních poruch a soustředil jsem se na změny fázových proudů ve vývodech při zemním spojení. Provedl jsem rozbor poruchových záznamů z různých zkoušek zemního spojení a vyhodnocoval jsem velikost fázových proudů před zemní poruchou, v době zemní poruchy a po zemní poruše. V dalším kroku výzkumu jsem se podrobně zabýval zjištěnou změnou fázových proudů při zemním spojení s cílem přesného popsání jevu a jeho vysvětlení. Pro usnadnění výzkumu jsem opět využil matematický model, kde jsem mohl simulovat různé poruchové stavy. Poslední krok výzkumu byl zaměřen na syntézu zjištěných výsledků s možností praktického využití tohoto jevu k určování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Cílem bylo stanovit relativně jednoduchou v praxi použitelnou metodu pro určování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Pro praktické použití je nutné se zaměřit na takový způsob výpočtu, který vyžaduje nejmenší počet vstupních dat a lze jej jednoduchým způsobem využívat při běžném softwarovém vybavením počítačů, například v MS Excel. Zároveň je důležitá snadná dostupnost vstupních dat. Obecně je upřednostňováno využívání běžně získaných hodnot z provozního měření na rozvodnách nebo ze záznamů ochran.

8.2 Rozbor změny fázových proudů v síti při zemním spojení

Při rozboru jsem předpokládal, že jednotlivé fáze jsou přibližně stejně zatíženy (symetrická zátěž) a jednotlivé fáze mají přibližně stejnou velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu. Proudové zatížení vedení je dáno vektorovým součtem odebraného proudu připojeného odběru, mezifázového kapacitního proudu vedení a fázového zemního kapacitního proudu vedení. Při zemním spojení je ovlivněna

celková velikost fázových proudů vývodu vyvolaná změnou nabíjecích fázových zemních kapacitních proudů tohoto vývodu. Uvedené změny nabíjecích fázových zemních kapacitních proudů vývodu se projevují jak ve změně jejich velikosti, tak i v jejich rozdílném vektorovém natočení. Vektorové natočení zemního kapacitního proudu vývodu je vyvoláno změnou vektorového natočení fázových napětí v důsledku zemní poruchy v síti. Rozdílné hodnoty fázového nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu tak ovlivní celkovou hodnotu fázových proudů vývodu. Na základě analýzy naměřených hodnot jsem dospěl k poznatku, že fáze se zemním spojením nejčastěji vykazuje nejmenší proudovou změnu a zpravidla se v této fázi proud nepatrně zvýší. Stane se tak v případě induktivního charakteru odběru. Je to způsobeno poklesem nabíjecího fázového zemního kapacitního proudu ve fázi se zemní poruchou. Při kovovém zemním spojení je hodnota fázového nabíjecího zemního kapacitního proudu ve fázi se zemní poruchou teoreticky rovna nule. Před poruchou tento fázový kapacitní proud kompenzoval odebíraný induktivní proud připojených odběrů.

Ve fázích bez poruchy bude v jedné fázi docházet ke zvýšení proudové hodnoty a v další fázi k poklesu proudové hodnoty zatížení. Tyto změny jsou rovněž ovlivněny nabíjecími proudy fázových zemních kapacit při zemním spojení (viz Graf 67). Zde se mi nabídla otázka, jakým způsobem mohu tyto změny fázových zemních kapacitních proudů využít pro stanovení zemních kapacitních proudů jednotlivých vývodů, případně k přibližnému určení celkového zemního kapacitního proudu sítě.

Obecně můžeme popsat fázové proudy tekoucí do vývodu následujícími rovnicemi:

$$I_{L1} = I_{Z1} + I_{C01}$$

$$I_{L2} = I_{Z2} + I_{C02}$$

$$I_{L3} = I_{Z3} + I_{C03}$$

(8.1)

Kde	I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}	fázové proudy vývodu
	I_{Z1}, I_{Z2}, I_{Z3}	proudy zátěže včetně mezifázových nabíjecích kapacitních proudů
	$I_{C01}, I_{C02}, I_{C03}$	zemní fázové nabíjecí kapacitní proudy.

Pro další analýzu jsem zavedl následující zjednodušující předpoklady:

- odběratelé jsou připojeni mezifázově, nejsou zde jednofázové odběry
- odebíraný proud je přibližně symetrický a stejný ve všech fázích
- mezifázový nabíjecí kapacitní proud zahrneme do odběru a pro výpočet budeme uvažovat, že změny fázových proudů způsobuje pouze zemní fázový nabíjecí proud
- zemní fázová kapacita vývodu je ve všech fázích stejná (symetrická síť).

Uvedené zjednodušující předpoklady v odrážkách a) a b) jsou v našich sítích splněny, protože pro připojení odběratelů používáme třífázové transformátory. Odběry jsou zpravidla symetrické. Symetrické zatížení posuzujeme z pohledu rozdílu fázových proudů v místě měření (součet všech odběrů), nikoli z pohledu symetrického zatížení jednotlivých odběrů. Přehodnocení zavedených podmínek je nutné u sítí vysokého

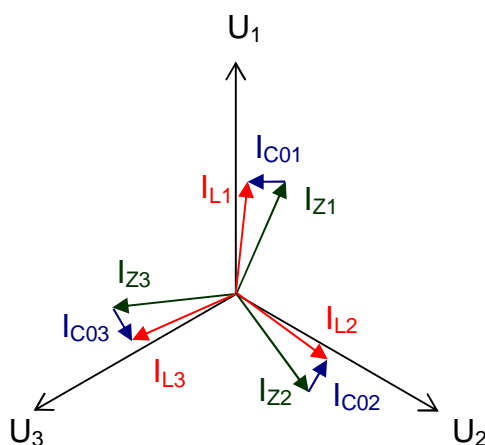
napětí, například v Anglii, Irsku a sítích, kde se používají pro napájení jednofázové transformátory primárně zapojené mezi dvě fáze (připojené na sdružené napětí sítě)⁴.

Fázový proud I_L vývodu obsahuje proud odebíraný napájenými odběry I_Z a nabíjecí proud zemních fázových kapacit vývodu I_C . Proud I_Z zahrnuje i mezifázové nabíjecí proudy vedení. Vektorové složení fázového proudu vývodu je znázorněno na Obr. 30. Fázový proud můžeme popsat následující rovnicí vycházející z kosinové věty.

$$I_L = \sqrt{I_Z^2 + I_C^2 - 2I_Z I_C \cos(\gamma)} \quad (A; A, A, A, A, A, rad)$$

(8.2)

Kde I_L fázový proud vedení
 I_Z proud odebíraný připojeným odběrem
 I_C zemní kapacitní proud vedení
 γ úhel mezi odebíraným proudem I_Z připojených odběrů a zemním kapacitním proudem I_C .



Obr. 30 Vektory fázových napětí, vektorový součet proudů odběru a nabíjecího kapacitního proudu v bezporuchovém stavu sítě

Při jednofázové poruše v sítích VN s izolovaným nebo nepřímým uzemněným uzlem nebudou poruchou ovlivněny proudy mezifázově připojené zátěže. Dojde pouze ke změně toku nabíjecích fázových zemních kapacitních proudů vedení. Vektory fázových napětí při jednofázové poruše mění nejen svoji velikost, ale dochází i ke změně jejich vektorového natočení Obr. 31. Při zemním spojení dochází ke změnám velikosti fázových napětí, což ovlivňuje velikost fázového zemního kapacitního proudu. Změna velikosti toku nabíjecího proudu a jeho vektorového natočení ovlivní celkové proudy ve fázích u vývodu bez poruchy. U fáze se zemní poruchou dochází k poklesu hodnoty fázového napětí až na nulovou hodnotu. U fází bez poruchy dochází ke zvýšení fázového napětí až na hodnotu sdruženého napětí.

⁴ **Poznámka:** Jednofázové distribuční transformátory se používají u sítí vysokého napětí s přímo uzemněným středem. Zapojení jednofázových transformátorů mezi dvě fáze u sítí s izolovaným nebo nepřímým uzemněným uzlem způsobuje výrazné nesymetrické zatížení. U těchto sítí proto metodu určování zemního kapacitního proudu vývodu z fázových proudů při zemním spojení nelze použít.

Předpokládáme-li jednofázovou poruchu ve fázi L_1 , kdy vlivem poruchy dojde ke spojení fáze L_1 se zemí bez odporu zemní poruchy, bude mít napětí ve fázi L_1 proti zemi nulovou hodnotu. Pak nemůže přes zemní fázovou kapacitu ve fázi L_1 protékat do země zemní kapacitní proud. Před zemní poruchou protékal fází L_1 zemní kapacitní nabíjecí proud spolu s proudem zátěže (Obr. 30). Při zemním spojení ve fázi L_1 bude v postižené fázi na vývodech bez zemní poruchy protékat již jen proud zátěže. Potom jsem mohl pro proud ve fázi L_1 u vývodu bez poruchy stanovit následující podmínku:

$$I_L = I_Z \quad (8.3)$$

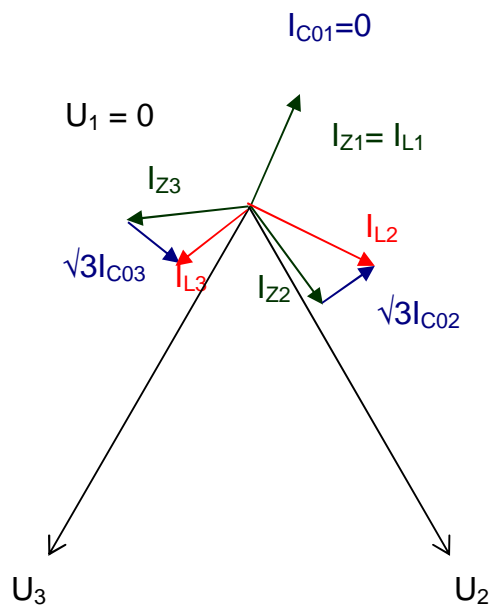
Ve fázi L_2 (která je natočená oproti L_1 po směru hodinových ručiček) dojde ke zvýšení hodnoty fázového napětí. Při ideálním zemním spojení bude hodnota fázového napětí zvýšena až na hodnotu sdruženého napětí. Zároveň dojde ke změně natočení fázového napětí oproti stavu před poruchou. Vektor fázového napětí bude mít stejnou hodnotu i orientaci jako vektor sdruženého napětí mezi fázemi L_1 a L_2 . Napětí mezi fázemi L_1 a L_2 v bezporuchovém stavu sítě svírá úhel 120° , při zemním spojení se úhel zvýší o 30° na hodnotu 150° (vůči fázi L_1). V důsledku zvýšení fázového napětí bude docházet k nárůstu fázového zemního kapacitního proudu. Změna natočení fázoru napětí se projeví i ve změně natočení zemního kapacitního fázového proudu (kapacitní proud předbíhá napětí o 90°) vůči proudu zátěže vývodu.

Proud fáze L_2 ve vývodu bez poruchy při kovovém zemním spojení v síti jsem popsal rovnicí:

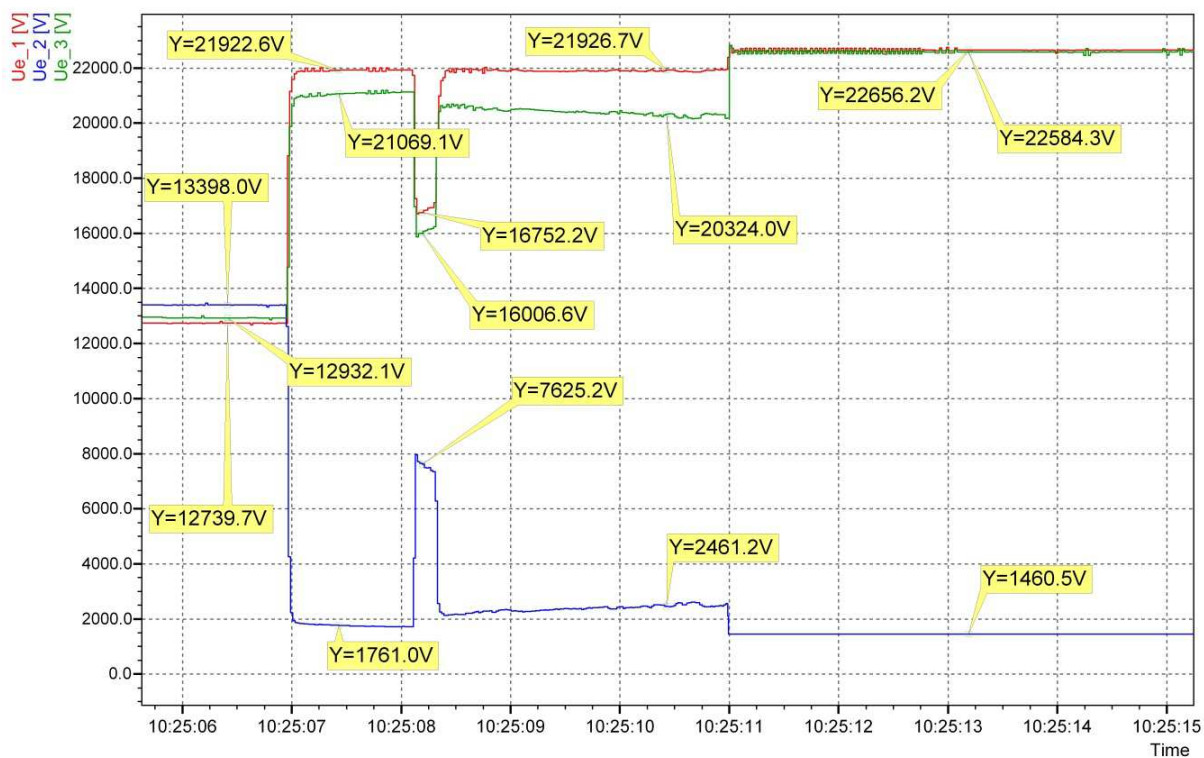
$$I_{L2} = \sqrt{I_Z^2 + 3I_C^2 - 2\sqrt{3}I_ZI_C \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right)} \quad (A; A, A, A, A, rad) \quad (8.4)$$

Ve fázi L_3 dojde také ke zvýšení hodnoty nabíjecího proudu (úměrné zvýšení velikosti proudu v závislosti na zvýšené hodnotě fázové napětí) a zároveň i k jeho vektorovému natočení, obdobně jako ve fázi L_2 . Vliv změny vektorového natočení má však opačný smysl, než u fáze L_2 . Ve fázi L_3 dochází ke snížení velikosti úhlu vůči fázi L_1 o 30° . Proud fáze L_3 ve vývodu bez poruchy při kovovém zemním spojení v síti jsem popsal rovnicí:

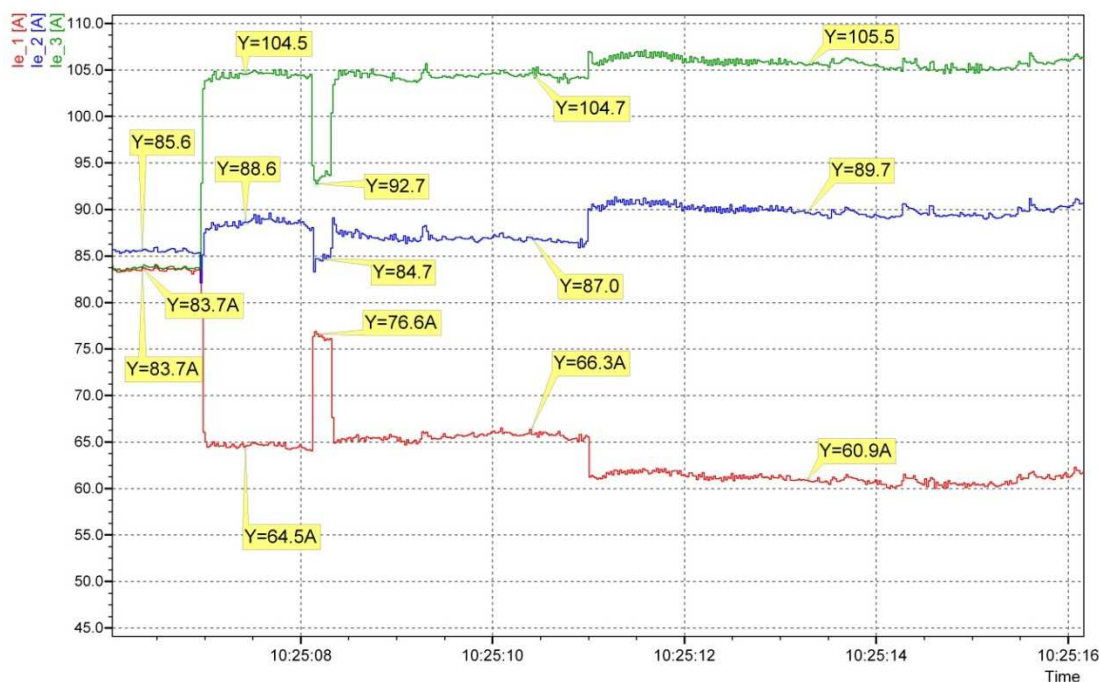
$$I_{L3} = \sqrt{I_Z^2 + 3I_C^2 - 2\sqrt{3}I_ZI_C \cos\left(\gamma - \frac{\pi}{6}\right)} \quad (A; A, A, A, A, rad) \quad (8.5)$$



Obr. 31 Vektory fázových napětí, součet proudů zatížení I_Z a nabíjecího kapacitního proudu I_{C0} při jednofázové zemi poruše ve vývodu



Graf 68 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV při zemním spojení v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů



Graf 69 Časový průběh fázových proudů v zatíženém vývodu distribuční sítě 22 kV při zemním spojení, zemní porucha není na tomto vývodu

Z předchozích rovnic je patrné, že fázová zemní kapacita bude při zemním spojení ovlivňovat velikost fázových proudů, což je patrné i ze záznamu fázových proudů reálného zemního spojení v rozsáhlé kabelové síti (Graf 69). Výpočet fázové zemní kapacity ve vývodu bez poruchy jsem zúžil na problematiku řešením výše uvedených rovnic. Celý problém jsem tak zredukoval na řešení dvou nelineárních rovnic o dvou neznámých. Skutečnou hodnotu zatížení vývodu bez vlivu fázové zemní kapacity lze určit ve fázi s poruchou, která má při kovovém zemním spojení nulovou hodnotu napětí proti zemi. Pro řešení rovnic je nutné znát hodnoty fázových proudů ve vývodu před poruchou a hodnoty fázových proudů v době zemní poruchy. Tyto hodnoty můžeme získávat například ze záznamu měření proudového zatížení jednotlivých vývodů, případně ze záznamu vývodových ochran rozvodny.

8.3 Výpočet nabíjecího kapacitního proudu vývodu

Syntézou výsledků analýzy změn fázových proudů ve vývodu bez poruchy při zemním spojení v síti jsem dospěl k návrhu rovnic popisujících poměry ve vývodu. Rovnice (8.2) popisuje fázový proud před vznikem zemní poruchy. Z této rovnice jsem si vyjádřil hodnotu úhlu γ , což je úhel, který svírá vektor fázového zemního kapacitního proudu vůči vektoru proudu zátěže.

$$\gamma = \arccos\left(\frac{I_C^2 + I_Z^2 - I_L^2}{2I_C I_Z}\right) \quad (\text{rad}; A, A, A, A, A)$$

(8.6)

Kde I_L fázový proud před zemním spojením
 I_C zemní nabíjecí kapacitní proud vývodu
 I_Z proud připojené zátěže vývodu, včetně mezifázového nabíjecího kapacitního proudu
 γ úhel mezi vektory proudů I_C a I_Z

Při vzniku kovového zemního spojení v síti bude na vývodu bez poruchy ve fázi se zemní poruchou protékat pouze proud odebíraný připojenou zátěží I_Z . V rovnici (8.6) máme dvě neznámé. Jednou neznámou je velikost úhlu γ a druhou je velikost kapacitního proudu sítě. Pro výpočet jsem potřeboval definovat ještě jednu nezávislou rovnici.

Ve fázích bez poruchy se bude projevovat fázový zemní kapacitní proud. Úpravou rovnice (8.4) jsem si vyjádřil hodnotu zemního kapacitního proudu.

$$I_C = \sqrt{\frac{1}{3} \left(I_{L_{\max}}^2 - I_Z^2 + 2\sqrt{3} I_C I_Z \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right) \right)} \quad (A; A, A, A, A, A, rad) \quad (8.7)$$

Kde I_L fázový proud před zemním spojením
 I_C zemní nabíjecí kapacitní proud vývodu
 I_Z proud připojené zátěže vývodu, včetně mezifázového nabíjecího kapacitního proudu
 $I_{L_{\max}}$ proudová hodnota fáze, kde došlo ke zvýšení proudu ve vývodu
 γ je úhel mezi vektory proudů I_C a I_Z .

Obdobně jsem mohl postupovat i úpravou rovnice (8.5).

Ze stejné výchozí rovnice (8.4) jsem si vyjádřil kapacitní proud způsobem popsaným rovnicí (8.8).

$$I_C = \frac{3I_C^2 + I_Z^2 - I_{L_{\max}}^2}{2\sqrt{3} I_Z \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right)} \quad (A; A, A, A, A, A, rad) \quad (8.8)$$

Kde I_L fázový proud před zemním spojením
 I_C zemní nabíjecí kapacitní proud vývodu
 I_Z proud připojené zátěže vývodu, včetně mezifázového nabíjecího kapacitního proudu
 $I_{L_{\max}}$ proudová hodnota fáze, kde došlo ke zvýšení proudu ve vývodu
 γ je úhel mezi vektory proudů I_C a I_Z .

8.4 Změnová metoda přibližného určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu

Jako první metodu pro přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu jsem využil soustavu dvou nelineárních rovnic. Tuto metodu jsem pracovníčně označil jako změnovou metodu vycházející ze změny fázového proudu v důsledku zemního spojení v síti. Změnovou metodu jsem rozdělil na dvě varianty. Variantu s použitím rovnic (8.6) a (8.7) jsem označil jako variantu s odmocninou a při použití rovnic (8.6) a (8.8) jsem další variantu uvedené metody nazval podílovou variantou. Pro obě varianty řešení jsem nejprve použil numerickou metodu prostých iterací a poté postupných iterací Gauss-Seidlova typu.

Pro ověření varianty s odmocninou výše popsané změnové metody výpočtu jsem použil údaje z příkladu provedeného na matematickém modelu. Modeloval jsem proudové zatížení vývodu $I_Z = 100$ A s nabíjecím zemním kapacitním proudem vývodu $I_C = 50$ A. Vycházel jsem z předpokladu, že modelovaný proud zátěže má induktivní charakter a je vůči napětí natočen o 10° ($\cos(\varphi) = 0,985$), čemuž odpovídá hodnota

úhlu $\gamma = 80^\circ$ (úhel mezi I_Z a I_C). Výsledné vstupní hodnoty pro výpočet zemního nabíjecího kapacitního proudu jsem uvedl v tabulce Tab. 10.

Tab. 10 Vstupní hodnoty pro výpočet fázového nabíjecího kapacitního proudu I_C získané z matematického modelu

Před poruchou	
Fázový proud před poruchou = I_L	103,7474 A
Při poruše	
Proud ve fázi s poruchou = I_Z	100.0 A
Proud ve fázi se zvýšeným proudem = I_{Lmax}	153,0489 A
Proud ve fázi s poklesem proudu = I_{Lmin}	79,7909 A

Pro výpočet pomocí prostých iterací jsem zvolil hodnoty uvedené v Tab. 10. Za počáteční hodnoty jsem zvolil zemní kapacitní proud vývodu $I_C = 15$ A a úhel $\gamma = 90^\circ$. Počáteční podmínka $\gamma = 90^\circ$ odpovídá správné hodnotě úhlu pro čistě činné zatížení vývodu. Pro možnost porovnání rychlosti konvergence jednotlivých variant jsem všechny testovací iterační výpočty prováděl na 3 desetinná místa. To znamená, že u dvou po sobě následujících iterací se na úrovni jedné tisícin již výsledná hodnota nemění. Výpočet pomocí prostých iterací konverguje k řešení po 4 provedených iteracích s odchylkou na úrovni jedné tisícin viz Tab. 11. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o přibližné určení, postačuje nám již přesnost v řádu jednotek ampér. Této přesnosti bylo dosaženo po 2. iteraci.

Tab. 11 Výsledky prostých iterací

iterace	I_C (A)	γ (°)
0	15.000	90.000
1	60.072	76.302
2	50.275	79.896
3	49.991	80.004
4	50.000	80.000
5	50.000	80.000

Dále jsem testoval výpočet pomocí postupných iterací Gauss-Seidlova typu. Tento způsob výpočtu obecně konverguje k výsledku rychleji než prosté iterace. Pro výpočet jsem použil stejné výchozí hodnoty jako u prostých iterací. V našem případě však došlo ke snížení rychlosti konvergence. Přesnosti na 3 desetinná místa jsem dosáhl až po 16 iteracích viz Tab. 12. Přesnosti v řádu jednotek ampér bylo numerickou metodou postupných iterací dosaženo po provedení 6 iterací.

Tab. 12 Výsledky metody postupných iterací

Iterace	I_c (A)	γ (°)
0	15.000	90.000
1	60.072	87.806
2	35.198	79.704
3	55.716	80.760
4	46.843	79.784
5	51.419	80.133
6	49.305	79.943
·		
·		
·		
15	50.001	80.000
16	50.000	80.000
17	50.000	80.000

Rovnice (8.7) obsahuje odmocninu, což v mnoha případech způsobuje zhoršení konvergence i vhodného odhadu počátečních hodnot pro numerické iterační metody.

Při hledání vhodnějšího přibližného určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu jsem proto vyzkoušel další variantu této změnové metody, kterou jsem nazval jako podílovou. Výpočet jsem provedl na rovnici (8.6) popisující hodnotu úhlu γ a na rovnici (8.8) pro stanovení zemního fázového kapacitního proudu. K řešení obou rovnic jsem opět použil prostou i postupnou iterační metodu. Při spuštění výpočtu se stejnými počátečními hodnotami z předchozího výpočtu se ukázalo, že řešení těchto rovnic nekonverguje k výsledku.

Během ověřování změnové metody jsem našel reálné příklady, kdy soustava rovnic (8.6) a (8.7) nekonvergovala a soustava rovnic (8.6) a (8.8) konvergovala. Při testování byly zaznamenány příklady, kdy nekonvergovala ani jedna z variant změnové metody. V této podobě jsou obě výše pospané varianty metody pro praktické použití nevhodné. Proto jsem se zaměřil na hledání vhodnější metody, která umožňuje spolehlivější výpočet.

8.5 Rozdílová metoda přibližného určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu

U předchozí změnové metody a jejích variant řešení nastávají problémy s konvergencí prosté i postupné iterace. Další metoda je oproti předchozí metodě založena na rozdílu fázových proudů při zemním spojení, a to ve fázích bez poruchy. Opět jsem se zabýval vývodem bez zemní poruchy, kde v době zemní poruchy v jiném, než sledovaném vývodu nebo vývodech, vznikne vlivem rozdílu fázových napětí v síti rozdíl ve fázových proudech vývodu.

Namísto volby zadávání maximální, případně minimální hodnoty fázového proudu vývodu jsem zvolil volbu zadávání rozdílu kvadrátu fázových proudů vývodu ve fázích bez poruchy. Toto zadávání hodnot je z hlediska výpočtu výhodnější. Z rozdílu rovnic pro maximální a minimální hodnotu fázového proudu vývodu jsem odvodil následující vztah.

$$I_{L_{\max}}^2 - I_{L_{\min}}^2 = 2\sqrt{3}I_C I_Z \left(\cos\left(\gamma - \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right) \right)$$

(8.9)

Pro úpravu výrazů trigonometrických funkcí jsem použil součtové vzorce funkce kosinus. Výraz s trigonometrickými funkcemi jsem postupnou úpravou zjednodušil:

$$\cos\left(\gamma - \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right) = \cos(\gamma)\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + \sin(\gamma)\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) - \cos(\gamma)\cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + \sin(\gamma)\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)$$

$$\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{2}$$

$$\cos\left(\gamma - \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\gamma + \frac{\pi}{6}\right) = 2\sin(\gamma)\sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \sin(\gamma)$$

Z předchozího vztahu jsem si vyjádřil hodnotu fázového nabíjecího proudu zemních kapacity:

$$I_C = \frac{I_{L_{\max}}^2 - I_{L_{\min}}^2}{2\sqrt{3}I_Z \sin(\gamma)} \quad (A; A, A, A, rad)$$

(8.10)

Kde I_C zemní nabíjecí kapacitní proud vývodu
 $I_{L_{\max}}$ proudová hodnota fáze, kde došlo ke zvýšení proudu ve vývodu
 $I_{L_{\min}}$ proudová hodnota fáze, kde došlo ke snížení proudu ve vývodu
 I_Z proud připojené zátěže vývodu, včetně mezifázového nabíjecího kapacitního proudu
 γ je úhel mezi vektory proudů I_C a I_Z .

Rovnice (8.10) vyjadřuje hodnotu zemního kapacitního proudu vývodu. Pro jeho výpočet potřebujeme znát velikost úhlu γ , stejně jako v předchozích případech. Znovu jsem použil rovnici (8.6) pro výpočet velikosti úhlu γ . Pro výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu jsem řešil soustavu dvou nelineárních rovnic (8.6) a (8.10). Výpočet jsem testoval na příkladech z matematického modelu. Užitím rovnic (8.6) a (8.10) pro výpočet nabíjecího fázového zemního kapacitního proudu vývodu jsem dosáhl rychlejší konvergence postupné iterace. Pro porovnání jsem použil stejná vstupní data z předchozího příkladu uvedená v tabulce Tab. 10 a výsledky jednotlivých iterací jsem zobrazil v následující tabulce Tab. 13. Tato rozdílová metoda na uvedeném příkladu dává přesnost výpočtu na jeden ampér již po 1. iteraci. Přesnosti na 3 desetinná místa bylo dosaženo při 4. iteraci.

Tab. 13 tabulka výsledků rozdílové metody za použití prostých iterací

iterace	I_C (A)	γ (°)
0	15.000	90.000
1	49.240	80.289
2	49.956	80.017
3	49.997	80.001
4	50.000	80.000
5	50.000	80.000

Rozdílová metoda vyžaduje pro výpočet znalost fázových proudů vývodu před zemním spojením v síti. V mnohých sítích je dnes zatížení trvale monitorováno a data

jsou předávána do řídicího systému k dalšímu zpracování a archivování. Naměřená data z řídicího systému je tedy pak možné využít i pro určení hodnoty zemního fázového kapacitního proudu vývodu. Implementací této rozdílové metody do řídicího systému lze monitorovat změny rozsahu jednotlivých vývodů. Při jednofázových poruchách v síti je možné provádět aktualizace zemních kapacitních proudů jednotlivých vývodů i automaticky. Součtem zemních kapacitních proudů jednotlivých vývodů můžeme stanovit hodnotu celkového zemního kapacitního proudu sítě.

8.6 Metoda rychlého odhadu pro přibližné určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu

Předchozí rozdílová metoda je založena na řešení dvou nelineárních rovnic. Pro rychlé orientační stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu je však zdoluhavá. Iterační numerické metody vyžadují výpočet na počítači nebo programovatelné kalkulačce.

Rovnice (8.10) udává výpočet hodnoty fázového zemního kapacitního proudu sítě. Pro použití rovnice (8.10) musíme znát proud zátěže a úhel γ . Pokud budeme znát tyto hodnoty, můžeme hodnotu zemního kapacitního proudu vypočítat přímo z rovnice (8.10) bez nutnosti řešení soustavy dvou nelineárních rovnic.

Hodnoty odebíraného proudu a účinníku lze získat například z moderních elektroměrů, které zaznamenávají naměřené čtvrt hodinové hodnoty. V obecném případě nezahrnuje proud zátěže mezifázové kapacitní proudy vedení. Tyto mezifázové kapacitní proudy však nejsou obsaženy v kabelové síti tvořené jednožilovými kabely. V tomto případě je tedy zaznamenaná proudová hodnota z elektroměrů požadovaným proudem zátěže I_z .

Úhel γ mezi vektory proudu zátěže a nabíjecím zemním fázovým kapacitním proudem je nutné vypočítat pomocí účinníku, a tedy ze znalosti úhlu φ , dle následujícího vztahu. V případě, že budeme mít vedení zatížené pouze činnou zátěží, bude mít úhel γ hodnotu 90° . V ostatních případech platí vztah:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (\text{rad}; \text{rad})$$

(8.11)

Kde γ je úhel mezi vektory proudů I_C a I_z
 φ je úhel mezi vektorem napětí a vektorem odebíraného proudu zátěže.

Známe-li proud zátěže a úhel γ můžeme přistoupit k výpočtu fázového nabíjecího zemního kapacitního proudu. Fázový nabíjecí zemní kapacitní proud I_C vypočítáme dle vztahu (8.12). Tento vztah vychází z rovnice (8.10) a je doplněn o přepočet úhlu φ na úhel γ .

$$I_C = \frac{I_{L\max}^2 - I_{L\min}^2}{2\sqrt{3}I_z \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)} \quad (\text{A}; \text{A}, \text{A}, \text{A}, \text{rad})$$

(8.12)

Kde	I_C	zemní nabíjecí kapacitní proud vývodu
	I_{Lmax}	proudová hodnota fáze, kde došlo ke zvýšení proudu ve vývodu
	I_{Lmin}	proudová hodnota fáze, kde došlo ke snížení proudu ve vývodu
	I_Z	proud připojené zátěže vývodu, včetně mezifázového nabíjecího kapacitního proudu
	φ	je úhel mezi vektorem napětí a vektorem odebíraného proudu zátěže.

Pro kontrolní výpočet jsem znovu použil vstupní data z tabulky Tab. 10 a hodnotu pro úhel $\gamma = 80^\circ$ (úhel 10° mezi vektory U a I odpovídá účinníku cca 0,985). Dosazením vstupních hodnot do vztahu (8.12) jsem získal hodnotu pro fázový zemní nabíjecí proud $I_C = 50,000$ A.

Pro výpočet může být obtížné získat přesnou hodnotu úhlu γ . Proto jsem provedl výpočet hodnoty nabíjecího proudu z předchozího příkladu s úmyslně zadanou chybnou hodnotou úhlu γ . Výsledky jsem zaznamenal do tabulky Tab. 14. Z uvedených hodnot je patrné, že v tomto příkladu při účinníku zátěže v rozmezí 0,94 až 1 (tedy při úhlu γ v rozmezí 70° až 90°) vychází rozdíl mezi skutečnou a přibližně určenou hodnotou fázového zemního kapacitního proudu sítě menší než 5%. Velikost chyby je ovlivněna přesností přibližného určení účinníku zátěže. U nízkých hodnot účinníku bude mít nepřesnost zadání úhlu γ významnější vliv.

Tab. 14 tabulka výsledků metody rychlého odhadu pro přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu dle (8.12) pro kapacitní proud 50 A při úhlu $\gamma = 80^\circ$

účinník	úhel γ ($^\circ$)	I_C (A)	chyba (%)
1	90	49,240	1,52
0,996	85	49,428	1,14
0,985	80	50,000	0
0,966	75	50,977	-1,95
0,940	70	52,401	-4,80
0,906	65	54,331	-8,66
0,866	60	56,858	-13,72
0,819	55	60,111	-20,22
0,766	50	64,279	-28,56

Je-li připojený odběr vybaven systémem kompenzace jalového výkonu, lze reálně předpokládat, že hodnota účinníku může být na úrovni cca 0,94 až 1. Aplikace výpočtu dle vztahu (8.12) se zadáním úhlu γ v rozmezí 70° až 80° se bude ve velké většině případů blížit reálným hodnotám. Při skutečném účinníku odebíraného proudu v uvažovaném rozmezí cca 0,94 až 1 bude chyba přibližného určení hodnoty nabíjecího zemního fázového kapacitního proudu vývodu do 5%. Vhodná volba hodnoty úhlu bude ovlivněna znalostí místních poměrů v zatížení vývodů. Určitá nepřesnost přibližného určení úhlu nezpůsobí výrazné zhoršení chyby metody rychlého odhadu. Metodu rychlého odhadu lze tedy použít pro orientační určení hodnoty zemního fázového kapacitního proudu vývodu.

8.7 Porovnání jednotlivých metod určování zemního kapacitního proudu vývodu

Řešení modelového příkladu za použití první a druhé varianty změnové metody stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu prostými iteracemi mělo rychlejší konvergenci než při použití postupných iterací Gauss-Seidlova typu. U obou variant uvedených změnových metod není konvergence vždy zaručena. Při praktickém použití dochází k větší chybě přibližného určení fázového zemního kapacitního proudu sítě. Chyba výpočtu se projevuje již při malé nepřesnosti zadávaných vstupních dat. To omezuje praktické využití této metody.

Další metoda, označená jako rozdílová metoda, využívá kvadrátu rozdílu fázových proudů ve fázích bez poruchy. Tato metoda konvergovala na testovaných příkladech vždy k výsledku, a to jak na modelovaných příkladech, tak i při zadávání dat z reálného měření. Rozdílová metoda je méně závislá i na přesnosti zadání úhlu γ mezi vektory zemního kapacitního proudu vývodu a proudu zátěže. To se příznivě projevuje na rychlosti konvergence metody a nižší závislosti na počátečním startovacím vektoru. Požadované přesnosti výsledku dosahovala tato metoda již po několika krocích prosté i postupné iterace.

Metoda rychlého odhadu vychází z rozdílové metody. Tato metoda umožňuje rychlý a dostatečně přesný výpočet za předpokladu, že máme možnost správně zadat hodnotu úhlu γ . V opačném případě je nutné předpokládat vyšší nepřesnost. Pro tyto případy je výhodnější využít rozdílovou metodu.

8.7.1 Testování metod

Změnovou metodu, rozdílovou metodu i metodu rychlého odhadu jsem testoval v testu č. 1 a č. 2 na základě reálných vstupních dat získaných měřením proudu vývodu bez zemní poruchy při zemním spojení v síti 22 kV. Na testovacích příkladech jsem mohl ověřit schopnost reálného použití těchto metod a rychlost konvergence.

Při testu č. 3 jsem zadal vstupní data z matematického modelu, abych mohl ověřit, zda testované metody při přesném zadání vstupních dat dosáhnou správných výsledných hodnot. Při testování změnové a rozdílové metody jsem sledoval počet iterací, kterých bylo zapotřebí k dosažení přesnosti na 3 desetinná místa. U metody rychlého odhadu jsem jako vstupní data zadával vypočtené hodnoty proudů a odhadovanou hodnotu úhlu γ . Úhel γ jsem zadával v hodnotách krajních mezi doporučeného rozsahu, tedy 80° a 70° . Pro porovnání jsem použil i hodnotu úhlu 60° .

Test č. 1 – se zadáním vstupních dat z reálného měření

Pro porovnání metod jsem použil vstupních dat naměřených při reálném zemním spojení v rozsáhlé kabelové síti 22 kV ve vývodu bez zemního spojení. Pro test byla použita data zaznamenaná před poruchou a po uzemnění fáze se zemní poruchou. Data získaná při zemní poruše jsou uvedena v tabulce Tab. 15 a v grafu Graf 69 jsou vynesena v čase 10:25:13.

Tab. 15 Vstupní údaje z reálného měření pro test č. 1

Před zemní poruchou	
Fázový proud před poruchou I_L	83,7 A
Při zemní poruše	
Odpor poruchy R_P	< 10 Ω
Proud ve fázi s poruchou I_Z	89,7A
Proud ve fázi se zvýšeným proudem I_{Lmax}	105,5 A
Proud ve fázi s poklesem proudu I_{Lmin}	60,9 A

Pro porovnání změnové a rozdílové metody jsem použil stejné hodnoty startovacího vektoru uvedeného v následující tabulce Tab. 16.

Tab. 16 Startovací vektor pro výpočet zemního kapacitního proudu sítě změnovou a rozdílovou metodou

Popis zadávání startovacího vektoru	hodnota
Nabíjecím zemním fázovým proudem I_C	15 A
Úhel γ mezi proudem I_Z a proudem I_C	80°

Tab. 17 Porovnání výsledků a rychlosti konvergence změnové a rozdílové metody výpočtu zemního kapacitního proudu sítě po jednotlivých iteracích, u změnové metody jsou výsledky uvedeny pro prostou a postupnou iteraci

Iterace	Změnová metoda				Rozdílová metoda (Prosté iterace)	
	Prosté iterace		Postupné iterace		I_C (A)	γ (°)
	I_C (A)	γ (°)	I_C (A)	γ (°)		
0	15,000	80,000	15,000	80,000	15,000	80,000
1	22,286	61,650	31,228	68,913	27,063	68,584
2	27,039	68,132	22,954	67,629	25,655	68,343
3	24,703	68,580	26,691	68,527	25,698	68,351
4	25,809	68,373	24,862	68,171	25,696	68,351
5	25,274	68,264	25,731	68,358	25,697	68,351
6	25,530	68,317	25,312	68,272	25,697	68,351
7	25,407	68,292	25,512	68,314		
8	25,466	68,304	25,416	68,294		
9	25,438	68,298	25,462	68,303		
10	25,452	68,301	25,440	68,299		
11	25,445	68,300	25,451	68,301		
12	25,448	68,300	25,445	68,300		
13	25,447	68,300	25,448	68,300		
14	25,447	68,300	25,447	68,300		
15			25,447	68,300		

Výsledky výpočtů pro změnovou a rozdílovou metodu jsou uvedeny v tabulce Tab. 17.

Ověření přesnosti uvedených výsledků jsem pak provedl zpětným výpočtem, kdy ze získaných výsledků jsem vypočítal znovu vstupní hodnoty. Procentní odchylky zpětně vypočtených vstupních hodnot od původně zadaných naměřených hodnot jsou uvedeny v tabulce Tab. 18.

Tab. 18 Zpětný výpočet vstupních hodnot proudů I_L , I_{Lmax} a I_{Lmin} z výsledků změnové a rozdílové metody, pro zpětný výpočet byly využity hodnoty nabíjecího kapacitního proudu I_C a úhlu γ z Tab. 17 a proud ve fázi se zemní poruchou $I_Z = 89,7A$

Vstupní hodnoty		Zpětný výpočet vstupních hodnot pro metody			
Před zemní poruchou		Změnová metoda		Rozdílová metoda	
Veličina	I (A)	I (A)	Odchylka (%)	I(A)	Odchylka (%)
Proud I_L	83,7 A	83,7	0	83,7	0
Při zemní poruše					
Proud I_{Lmax}	105,5 A	105,5	0	105,77	+0,26
Proud I_{Lmin}	60,9 A	61,5	+0,98	61,36	+0,76

U změnové metody byla pro výpočet použita vstupní hodnota proudu I_{Lmax} , což se samozřejmě projevilo nulovou chybou při zpětném výpočtu uvedeného vstupního proudu. U rozdílové metody, která využívá vstupních hodnot I_{Lmax} i I_{Lmin} , vychází odchylka při zpětném výpočtu u obou vstupních dat. Výsledky obou metod jsou srovnatelné.

Výsledky metody rychlého odhadu pro přibližné určení nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu pro různá zadání hodnoty úhlu γ udává tabulka Tab. 19.

Tab. 19 Výsledné hodnoty určené metodou rychlého odhadu

Metoda rychlého odhadu			
γ (°)	I_C (A)	Střední hodnota I_C (A)	Procentní odchylka od střední hodnoty (%)
80	24,252	25,33	-4,26
70	25,417		+0,34
68,351	25,696		+1,44
68,300	25,706		+1,48
60	25,579		+0,98

Metoda rychlého odhadu dává v tomto případě nejmenší odchylku pro úhel $\gamma = 70^\circ$. Tato hodnota odpovídá doporučenému rozmezí pro jeho zadání. Pro porovnání jsem použil i hodnoty úhlu γ vypočtené rozdílovou a změnovou metodou. Pro zadané hodnoty úhlu γ je odchylka od střední hodnoty menší než 5% a získané výsledky korespondují s výsledky získanými rozdílovou a změnovou metodou.

Všechny metody udávají přibližnou hodnotu nabíjecího kapacitního proudu vývodu cca 25 A. Metoda rychlého odhadu má největší odchylku při zadávané hodnotě úhlu $\gamma = 80^\circ$. Naopak při zadání úhlu $\gamma = 70^\circ$ je odchylka nejnižší. Výhodou této metody je, že nepotřebuje znát hodnotu fázového proudu před poruchou. To umožňuje provést přibližné určení hodnoty zemního nabíjecího kapacitního proudu pouze ze znalosti fázových proudů v době zemního spojení. Oproti jiným metodám musíme pro tuto metodu zadat hodnotu úhlu γ , který získáme výpočtem z rovnice (8.11) na základě znalosti nebo přibližného určení účinníku zátěže. V případě, že není známa hodnota účinníku, lze v obecném případě uvažovat téměř činný odběr s účinníkem 0,98 až 0,94, čemuž odpovídá úhel $\varphi = 10^\circ$, respektive úhel $\varphi = 20^\circ$. Tomu odpovídá úhel $\gamma = 80^\circ$, respektive 70° .

Změnová metoda konverguje v obou variantách k přibližně stejnému výsledku. Je nutné si uvědomit, že obě varianty využívají pouze jedné hodnoty fázového nabíjecího proudu při zemní poruše, tj. maximální nebo minimální. Úhel γ je vypočten z naměřených údajů před zemním spojením. Za časový úsek od měření před vznikem zemního spojení až po nové měření v době zemního spojení dojde s vysokou pravděpodobností ke změně zatížení. Nevýhoda této metody spočívá v pomalejší konvergenci a větší závislosti na vhodné volbě startovacího vektoru.

U rozdílové metody přispívá zadávání rozdílu kvadrátu fázových hodnot proudu k rychlejší konvergenci. To se projevilo snížením závislosti konvergence na volbě startovacího vektoru.

Test č. 2 – se zadáním vstupních dat z reálného měření

Pro další test metod výpočtu nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu jsem opět využil dat naměřených při reálné zemní poruše uvedených v tabulce Testování změnové a rozdílové metody jsem zahájil startovacím vektorem z tabulky Tab. 16. Pro uvedená data změnová metoda v obou variantách divergovala. Při aplikaci rozdílové metody tato metoda po 10 iteracích konvergovala k hodnotě nabíjecího proudu $I_C = 26,572$ A a úhlu $\gamma = 55,445^\circ$.

Tab. 20. Časový průběh této poruchy je zároveň zobrazen na grafu Graf 67. Získané výsledky jsou zobrazeny v tabulce Tab. 21. Metoda rychlého odhadu při volbě úhlu $\gamma = 70^\circ$ vede k hodnotě kapacitního proudu vývodu 23,2 A. Pro úhel $\gamma = 80^\circ$ dostáváme hodnotu 23,6 A. Při úhlu $\gamma = 60^\circ$ je vypočtená hodnota kapacitního proudu 27,2 A.

Testování změnové a rozdílové metody jsem zahájil startovacím vektorem z tabulky Tab. 16. Pro uvedená data změnová metoda v obou variantách divergovala.

Při aplikaci rozdílové metody tato metoda po 10 iteracích konvergovala k hodnotě nabíjecího proudu $I_C = 26,572$ A a úhlu $\gamma = 55,445^\circ$.

Tab. 20 Vstupní údaje z reálného měření pro test č. 2

Před zemní poruchou	
Fázový proud před poruchou I_L	94,4 A
Při zemní poruše	
Odpor poruchy R_P	< 10 Ω
Proud ve fázi s poruchou I_Z	106,9 A
Proud ve fázi se zvýšeným proudem I_{Lmax}	114,9 A
Proud ve fázi s poklesem proudu I_{Lmin}	71,4 A

Po změně úhlu ve startovacím vektoru uvedeného v tabulce Tab. 16, kde do startovacího vektoru jsem zadal úhel $\gamma = 70^\circ$, změnová metoda již konvergovala. U změnové metody jsem pomocí prostých iterací dosáhl přibližného určení na 3 desetinná místa po 21 iteracích ($I_C = 28,173$ A a úhlu $\gamma = 56,666^\circ$). Postupnými iteracemi jsem u téže metody dosáhl stejného výsledku za 23 iterací. Aplikováním stejného startovacího vektoru na rozdílovou metodu s řešením pomocí postupných iterací jsem získal přibližné určení s platností na 3 desetinná místa již po 8 iteracích ($I_C = 26,572$ A a úhlu $\gamma = 55,445^\circ$).

Tab. 21 Výsledky testu č. 2

Úhel γ ($^\circ$)	Metoda rychlého odhadu	Změnová metoda		Rozdílová metoda	
	I_C (A)	I_C (A)	Úhel γ ($^\circ$)	I_C (A)	Úhel γ ($^\circ$)
80	23,6	Diverguje		26,6	55,4
70	23,2	28,2	56,7	26,6	55,4
60	27,2				

Tab. 22 Zpětný výpočet vstupních hodnot proudů I_L , I_{Lmax} a I_{Lmin} z výsledků změnové a rozdílové metody, pro zpětný výpočet byly využity hodnoty nabíjecího kapacitního proudu I_C a úhlu γ z Tab. 21 a proud ve fázi se zemní poruchou $I_Z = 106,9$ A

Vstupní hodnoty		Zpětný výpočet vstupních hodnot pro metody			
Před zemní poruchou		Změnová metoda		Rozdílová metoda	
	I (A)	I (A)	Odchylka (%)	I(A)	Odchylka (%)
Proud I_L	94,4 A	94,4	0	94,4	0
Při zemní poruše					
Proud I_{Lmax}	114,9 A	114,9	0	113,0	-1,65
Proud I_{Lmin}	71,4 A	67,0	-6,16	68,2	-4,48

V tabulce Tab. 22 jsou výraznější odchylky oproti předchozímu testu č. 1. Přesto jsou výsledky obou metod opět srovnatelné. Závěry z předchozího testu proto platí i pro tento příklad.

Test č. 3 – se zadáním vstupních dat z matematického modelu

Pro ověření přesnosti metod přibližného určení fázového zemního kapacitního proudu jsem pro zadání využil dat z matematického modelu sítě. U tohoto testu můžeme ověřit přesnost výpočtu jednotlivých metod, protože je zde přesně známá hodnota zemního kapacitního proudu vývodu. V následujícím příkladu jsem nastavil proud zátěže $I_Z = 100$ A. Hodnotu účinníku $\cos(\varphi)$ jsem měnil od 0,985 pro kapacitní zátěž až po účinník 0,866 pro zátěž induktivní. Sít' jsem modeloval s hodnotou fázového nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu $I_C = 15$ A. Na základě těchto vstupních údajů z tabulky Tab. 23 jsem provedl výpočet fázových proudů před zemním spojením v síti a v době zemního spojení. Fázové proudy v době zemního spojení odpovídají hodnotám ve vývodu bez zemní poruchy.

Tab. 23 Vstupní údaje z matematického modelu pro test č. 3

Vstupní údaje pro proud zátěže I_Z (A)						
úhel φ (°)	-10	0	10	15	20	30
$I_{před\ poruchou}$	103,66	101,12	98,51	97,20	95,91	93,41
Zemní spojení ve fázi L_1	I_{L1} (A)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	I_{L2} (A)	94,33	89,87	85,64	83,67	81,82
	I_{L3} (A)	118,39	115,21	111,59	109,64	107,60

Pro změnovou a rozdílovou metodu jsem zvolil pouze jeden startovací vektor. Zadal jsem fázový kapacitní proud sítě $I_C = 30$ A a úhel $\gamma = 70^\circ$. V tabulce Tab. 24 jsem uvedl počty iterací pro jednotlivé metody, které bylo zapotřebí k dosažení přesného výsledku alespoň na 3 desetinná místa. Sloupce jsou označeny dle použité metody. Podle očekávání je nejúspěšnější rozdílová metoda. Ve všech případech tato

metoda konvergovala, a to vždy s nejnižším počtem iterací. Změnová metoda ve variantě s odmocninou pro daný startovací vektor ani v jednom případě nekonvergovala. Podílová varianta změnové metody konvergovala pouze pro úhel γ větší než 75° .

Metoda rychlého odhadu při volbě úhlu 80° dává přijatelný výsledek s přesností na 1 A ve všech případech kromě případu, kdy při nabíjecím zemním kapacitním proudu $I_C = 15$ A je hodnota úhlu $\gamma = 60^\circ$. Pro tento případ je dosaženo přesnějšího výsledku při volbě úhlu $\gamma = 70^\circ$, ale pro vyšší hodnoty úhlu γ nastává opět vyšší chyba výpočtu. Avšak pro případ, kdy je zvolena správná hodnota úhlu $\gamma = 60^\circ$, dosáhneme přesného výsledku pouze v případě, že jako vstupní hodnotu úhlu γ zadáme přesně tuto hodnotu. V ostatních případech zmíněného zadání dává metoda rychlého odhadu výrazně vyšší chybu výpočtu. Jednotlivé výsledky testu jsou uvedeny v tabulce Tab. 25.

Tab. 24 Tabulka udávající počet iterací k dosažení výsledku s přesností na 3 desetinná místa

I_C (A)	Úhel γ ($^\circ$)	Počet iterací pro dosažení správné hodnoty		
		Při použití rozdílové metody	Při použití změnové metody s prostou iterací	
			Varianta s odmocninou	Podílová varianta
15.0	100	5	divergentní	5
	90	2	divergentní	11
	80	4	divergentní	58
	75	5	divergentní	divergentní
	70	1	divergentní	divergentní
	60	10	divergentní	divergentní

Tab. 25 Výsledky testu metody rychlého odhadu

Správná hodnota		Výsledky metody rychlého odhadu pro zadaný úhel γ		
I_C (A)	Úhel γ ($^\circ$)	80°	70°	60°
15.0	100	15,002	15,723	17,060
	90	15,233	15,964	17,322
	80	15,003	15,723	17,060
	75	14,716	15,422	16,734
	70	14,314	15,001	16,277
	60	13,191	13,825	15,001

Testy ukázaly, že rozdílovou metodu lze doporučit k praktickému použití, neboť spolehlivě konverguje k výsledku. Metoda rychlého odhadu pro doporučené rozmezí zadání úhlu γ umožňuje výpočet hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu při odběru s účinníkem vyšším než 0,9. Změnovou metodu z důvodů závislosti na volbě

startovacího vektoru a nižší spolehlivosti konvergence nelze pro praktické použití doporučit.

8.8 Výpočet příspěvku k zemnímu kapacitnímu proudu sítě

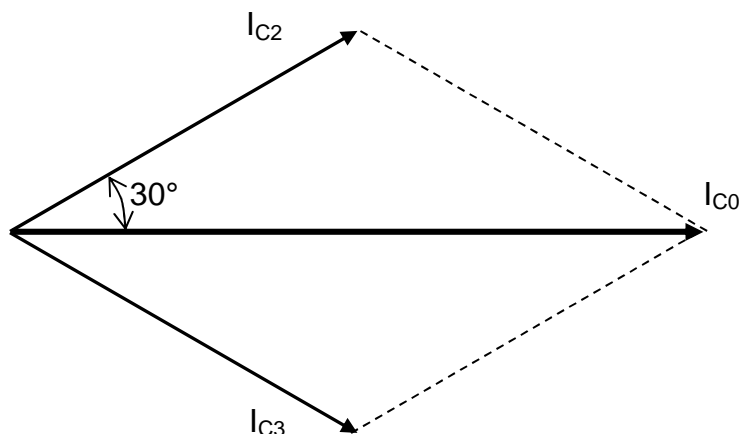
Řešením soustavy dvou nelineárních rovnic jsem získal hodnoty nabíjecích proudů zemních fázových kapacit ve vývodu. Tyto nabíjecí kapacitní proudy v místě měření jsou určeny hodnotou fázové zemní kapacity příslušného vývodu sítě. Jedná se o fázovou hodnotu zemního kapacitního proudu od místa měření ke konci vývodu, a to včetně příspěvků od všech připojených odboček z kmene vedení. Velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu je ovlivněna velikostí fázové zemní kapacity vývodu a velikostí fázového napětí. V bezporuchovém stavu sítě, kdy fázová napětí mají téměř stejné velikosti, mají nabíjecí zemní fázové kapacitní proudy ve všech fázích přibližně stejnou velikost. Vektorový součet fázových nabíjecích zemních kapacitních proudů je zpravidla blízky nule. Nabíjecí zemní kapacitní proud ve fázi se zemní poruchou bude téměř nulový (téměř nulová hodnota fázového napětí). Při zemní poruše ve fázi L_1 je vektorový součet proudů ve vývodu zobrazen na Obr. 32. Proud I_{C2} a I_{C3} jsou fázové zemní kapacitní proudy ve fázích bez zemního spojení. Vlivem zvýšeného napětí ve zdravých fázích dochází ke zvýšení hodnoty i nabíjecího kapacitního proudu těchto fází. Při kovovém zemní spojení se hodnota napětí v uvedených fázích zvýší až na hodnotu sdruženého napětí. Na Obr. 32 je velikost nabíjecích proudů fáze L_2 a L_3 již zvětšena oproti bezporuchovému stavu dle vztahu:

$$I_{C2} = \omega C_0 U_{12} = \omega C_0 \sqrt{3} U_{L2} \quad (A; \text{rad. } s^{-1}, F, V)$$

$$I_{C3} = \omega C_0 U_{13} = \omega C_0 \sqrt{3} U_{L3} \quad (A; \text{rad. } s^{-1}, F, V)$$

(8.13)

Kde	I_{C2}	fázový nabíjecí zemní kapacitní proud při zemním spojení ve fázi bez poruchy L_2
	I_{C3}	fázový nabíjecí zemní kapacitní proud při zemním spojení ve fázi bez poruchy L_3
	C_0	fázová zemní kapacita
	ω	úhlová frekvence $2\pi f$
	U_{12}	sdružená hodnota napětí mezi fázemi L_1 a L_2
	U_{13}	sdružená hodnota napětí mezi fázemi L_1 a L_3
	U_{L2}	fázová hodnota napětí ve fázi L_2
	U_{L3}	fázová hodnota napětí ve fázi L_3 .



Obr. 32 Vektorový součet fázových zemních kapacitních proudů při kovovém zemním spojení v síti

Příspěvek k celkovému zemnímu kapacitnímu proudu VN sítě jsem stanovil dle následujícího vztahu, který je patrný z obrázku Obr. 32. Tento vztah platí za předpokladu, že nabíjecí proudy I_C ve fázích bez poruchy mají stejnou velikost.

$$I_{cf} = 2I_C \cos(30^\circ) = 2I_C \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \cdot I_C \quad (\text{A}; \text{A})$$

(8.14)

Kde I_{cf} fázový nabíjecí zemní kapacitní proud při zemním spojení ve fázi bez poruchy
 I_C zemní kapacitní proud.

Do rovnice (8.14) jsem dosadil za fázový zemní kapacitní proud výraz z rovnice (8.13). Hodnota fázového zemního kapacitního proudu sítě se určuje na základě znalosti hodnoty fázové zemní kapacity dle vztahu:

$$I_C = 3\omega C_0 U_f \quad (\text{A}; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{F}, \text{V})$$

(8.15)

Kde I_C zemní kapacitní proud
 C_0 fázová zemní kapacita
 ω úhlová frekvence $2\pi f$
 U_f fázová hodnota napětí sítě.

Z těchto rovnic lze dopočítat i hodnotu zemní fázové kapacity C_0 .

$$C_0 = \frac{I_C}{3\omega U_f} = \frac{I_{cf}}{\sqrt{3} \cdot \omega U_f} \quad (\text{F}; \text{A}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{V})$$

(8.16)

Kde C_0 fázová zemní kapacita
 I_C zemní kapacitní proud
 I_{cf} fázový nabíjecí zemní kapacitní proud při zemním spojení ve fázi bez poruchy
 ω úhlová frekvence $2\pi f$
 U_f fázová hodnota napětí sítě.

V praxi je významnější hodnota příspěvku zemního kapacitního proudu vývodu než hodnota zemní fázové kapacity. Pro přesný výpočet hodnoty fázového zemního kapacitního proudu vývodu je nutné zadávat hodnoty při ideálním zemním spojení nebo při zemním spojení s nízkým odporem poruchy. Při výpočtu z hodnot získaných při odporové zemní poruše bude výsledná hodnota zemního kapacitního proudu vývodu nižší než skutečná. Pro vyšší hodnoty odporu poruchy se bude chyba výpočtu zvyšovat. Z grafů Graf 68 a Graf 69 je patrné, že první část zemního spojení měla vyšší hodnotu odporu zemní poruchy. V druhé části zemní poruchy došlo k přizemnění fáze se zemní poruchou v napájecí rozvodně přes reaktor s impedancí 6Ω . V následující tabulce Tab. 26 jsem zapsal naměřené hodnoty odpovídající grafu Graf 69. Uvedená data byla získána měřením ve vývodu s proměnnou hodnotou odporu zemní poruchy a relativně malým časovým odstupem měření před zemní poruchou a po jejím vzniku. V první části zemní poruchy byl odpor poruchy cca 130Ω (měření č. 1. až 3.). Měření č. 2, proběhlo v okamžiku připnutí uzlového odporu se jmenovitým

proudem 500 A. Připnutím odporu došlo k výraznému ovlivnění fázových napětí a fázových proudů. Měření č. 4 odpovídá době přizemnění fáze v napájecí rozvodně.

Výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu jsem následně provedl rozdílovou metodou. Pro výpočet jsem použil vstupní data z tabulky Tab. 26. Vypočtené hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu jsem uvedl v tabulce Tab. 28. Pro porovnání výsledků získaných z různých vstupních dat, která odpovídají jednotlivým měřením, je v tabulce uvedena střední hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Na přesnosti změřených vstupních dat bude záviset i přesnost rozdílové metody. Pokud při zemním spojení bude nulová složka napětí vyšší než 70% fázové hodnoty napětí, lze očekávat výsledky s přesností vhodnou pro praktické využití.

Tab. 26 Tabulka vstupních hodnot pro výpočet nabíjecího fázového zemního kapacitního proudu

Naměřené hodnoty před poruchou				
Fázový proud před poruchou I_L (A)	83,7			
Naměřené hodnoty při poruše				
Pořadí měření	1.	2.	3.	4.
Proud ve fázi bez poruchy, kde došlo k jeho zvýšení I_{Lmax} (A)	104,5	92,7	104,7	105,5
Proud ve fázi s poruchou I_z (A)	88,6	84,7	87,0	89,7
Proud ve fázi bez poruchy, kde došlo k jeho snížení I_{Lmin} (A)	64,5	76,6	66,3	60,9

V případě měření č. 2. došlo k poklesu nulové složky napětí až na hodnotu 44,3% (Tab. 27), proto má výsledná hodnota ve srovnání s ostatními výsledky podstatně vyšší nepřesnost. Z tohoto důvodu není vhodné uvedený výsledek použít pro další zpracování, případně je nutné počítat s tím, že výsledek bude zatížen vyšší chybou. V našem případě není tedy výsledek zařazen do výpočtu průměrné hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu a průměrná hodnota byla určena pouze z měření č. 1, 3 a 4.

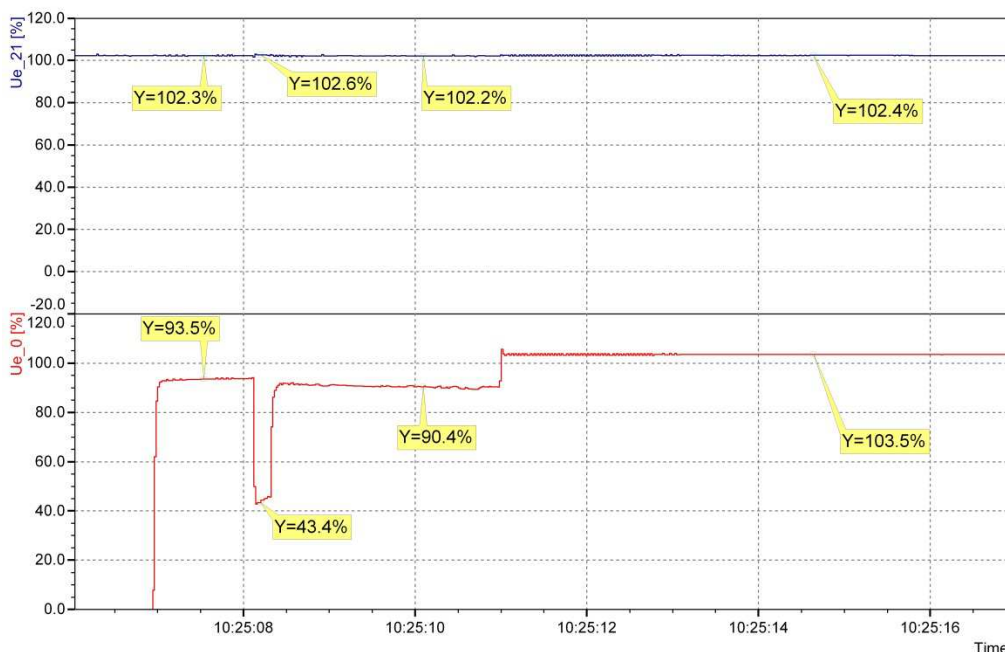
Tab. 27 Tabulka vybraných naměřených vstupních údajů pro přepočítání výsledků rozdílové metody na jmenovité parametry sítě

Hodnoty napětí pro přepočítání hodnot kapacitního proudu vývodu I_c				
Pořadí měření	1.	2.	3.	4.
U_{12} (%)	102,3	102,2	102,2	102,4
U_0 (%)	93,5	44,3	90,4	103,5

Tab. 28 Vypočtené hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu a zemního kapacitního proudu vývodu s uvedenými procentními odchylkami od střední hodnoty z měření č. 1,3, a 4.

Hodnoty kapacitního proudu vývodu získané rozdílovou metodou				
Pořadí měření	1.	2.	3.	4.
Kapacitní proud vývodu I_C (A)	23,4	9,4	22,7	25,7
Úhel γ (°)	70,4	80,7	74,15	68,3
Střední hodnota I_C z měření 1., 3., 4. (A)	23,93			
Procentní odchylka hodnoty I_C od střední hodnoty (%)	-2,22	-60,72	-5,14	+7,39

Pro eliminaci vlivu odporu zemní poruchy na výpočet hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu je vhodné využít přepočtení popsané v kapitole 7.3. Pro přepočtení je nutné znát hodnotu sdruženého napětí a hodnotu nulové složky napětí. V tabulce Tab. 27 jsou uvedeny naměřené hodnoty odpovídající grafu Graf 70.

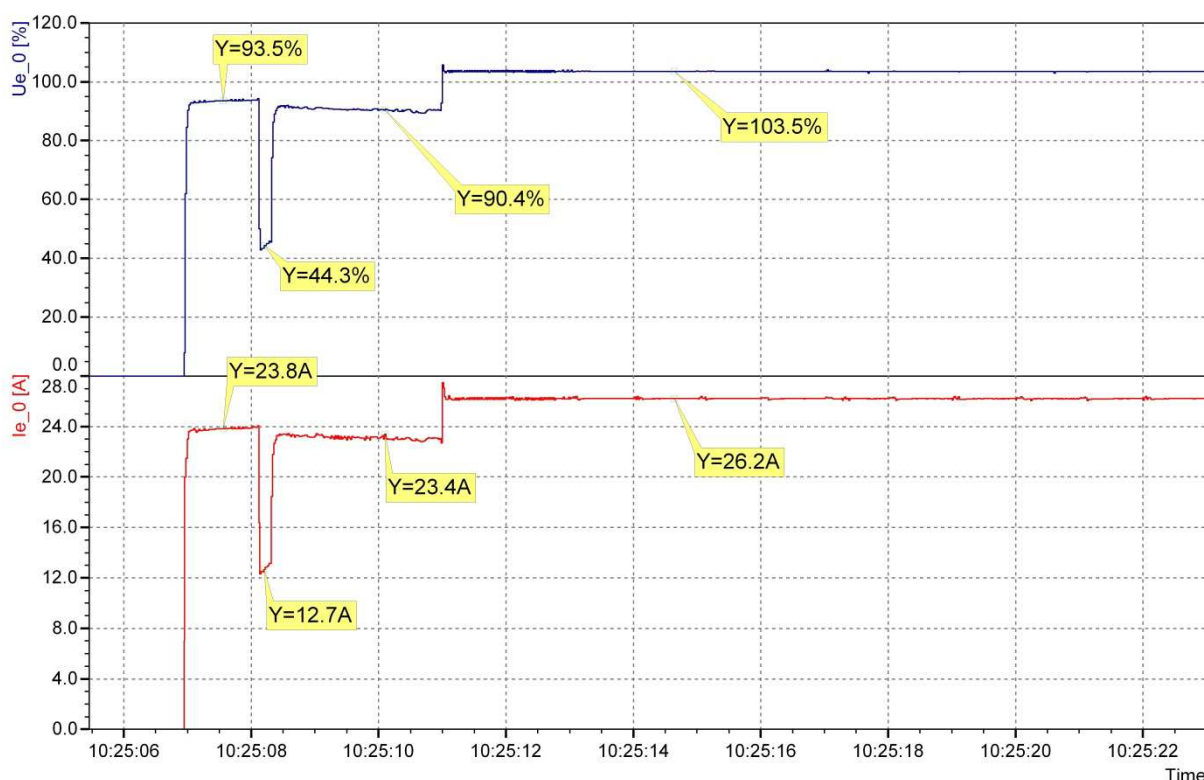
**Graf 70** Časový průběh procentní hodnoty sdruženého napětí a nulové složky napětí v síti při zemním spojení s vyznačenými hodnotami napětí v čase odečtu hodnot pro měření 1 až 4

Výsledky nabíjecího kapacitního proudu vývodu uvedené v tabulce Tab. 28 byly přepočteny na hodnotu nulové složky proudu při nulovém odporu zemního spojení. Tyto přepočtené hodnoty jsou zapsány v tabulce Tab. 29. Z uvedených hodnot je patrné, že došlo k výraznému sjednocení hodnot nabíjecího kapacitního proudu vývodu a vliv odporu zemní poruchy je značně eliminován. Kromě měření č. 2 je již odchylka menší než 1%. I u tohoto měření došlo k poklesu vypočtené odchylky hodnoty nabíjecího kapacitního proudu. Odchylka u měření č. 2 poklesla z hodnoty cca 60% na 15%.

Tab. 29 Určené hodnoty nabíjecího kapacitního proudu a kapacitního proudu nulové složky proudu vývodu při reálném zemním spojení v síti 22 kV s udáním procentních odchylek od střední hodnoty

Přepočet výsledků získaných rozdílovou metodou				
Měření	1.	2.	3.	4.
I_C (A)	24,45	20,79	24,51	24,25
I_{0C} (A)	73,34	62,37	73,54	72,74
Střední hodnota I_C z měření 1. 3, 4 (A)	24,40			
Procentní odchylka I_C od střední hodnoty (%)	-0,21	-14,80	+0,45	-0,61

V případě neznámé hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu nelze přesnost výpočtu posoudit. Proto jsem pro porovnání výsledků použil stávající metodu určení hodnoty kapacitního proudu vývodu popsanou v kapitole 7.1. V grafu Graf 71 je zobrazena jak hodnota nulové složky napětí, tak i hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Na grafu je zřetelná závislost určení hodnoty nabíjecího kapacitního proudu na odporu zemní poruchy. Z uvedeného důvodu je nutné pro vzájemné porovnání použít přepočet výsledků na jmenovité parametry sítě.



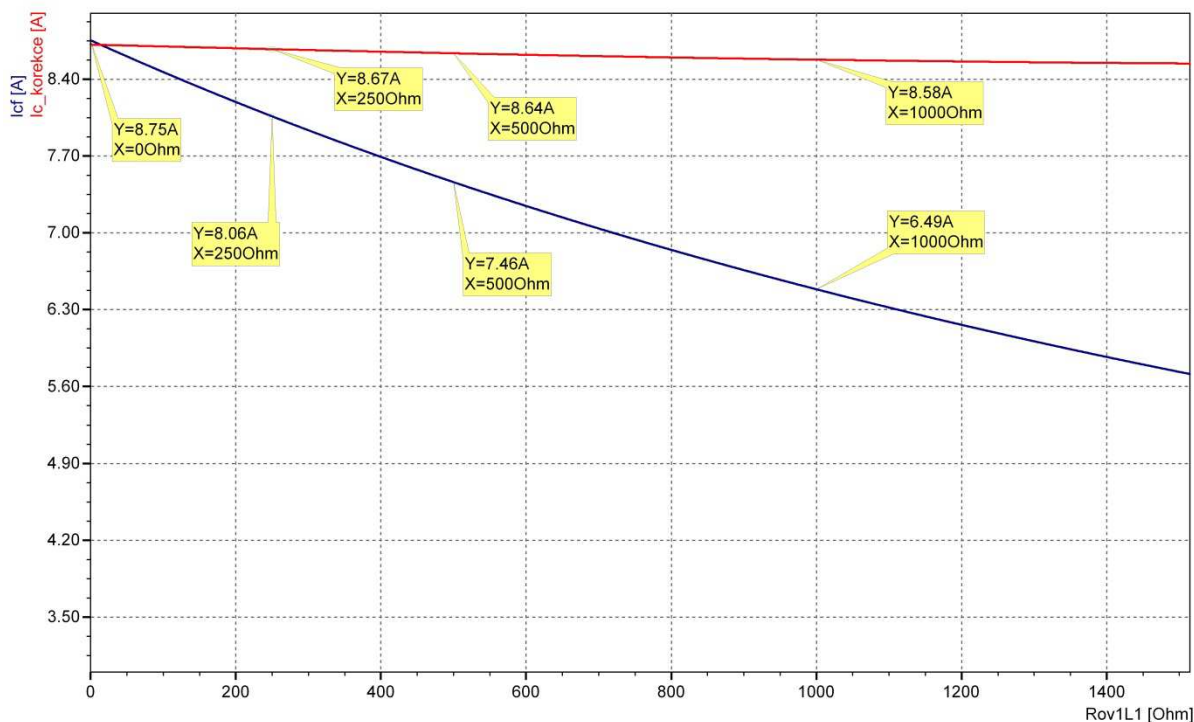
Graf 71 Časový průběh změřené procentní hodnoty nulové složky napětí a hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu

Tab. 30 Hodnoty kapacitního proudu vývodu zjištěné z naměřené nulové složky proudu vývodu při zemním spojení a jejich přepočítání na jmenovité parametry sítě

Hodnoty kapacitního proudu I_C získané z měření nulové složky proudu vývodu				
Měření	1.	2.	3.	4.
I_C (A)	23,8	12,7	23,4	26,2
I_{0C} (A)	74,65	84,15	75,98	74,16
Střední hodnota I_C z měření 1. 3, 4 (A)	24,47			
Procentní odchylka hodnoty I_C od střední hodnoty	-2,74	-48,10	-4,37	+7,07
Přepočítání výsledků získaných rozdílovou metodou				
I_C (A)	24,88	28,05	25,33	24,72
I_{0C} (A)	74,65	84,15	75,98	74,16
Střední hodnota I_C z měření 1. 3, 4 (A)	24,98			
Procentní odchylka I_C od střední hodnoty (%)	-0,40	+12,29	+1,40	-1,04

Porovnáním údajů v tabulce Tab. 29 a tabulce Tab. 30 je patrná shoda udávané hodnoty kapacitního proudu vývodu. V tabulce Tab. 29, kde jsou uvedeny hodnoty vypočtené rozdílovou metodou, je u měření č. 1,3 a 4 menší rozptyl odchylky než u hodnot získaných z nulové složky proudu vývodu. Měření č. 2 je naopak přesnější za použití vyhodnocení nabíjecího kapacitního proudu vývodu z nulové složky proudu.

Následující příklad slouží k ověření přesnosti výsledků rozdílové metody s použitím výše zmíněného přepočtu nulové složky proudu dle kapitoly 7.3. Pro ověření jsem použil opět matematický model sítě, kde jsem měnil odpor zemní poruchy od 0Ω až do 1500Ω . V příkladu jsem zadal fázový zemní kapacitní proud vývodu $8,75 \text{ A}$. Vlivem rostoucího odporu poruchy klesal i poruchový proud a rozdíl fázových proudů se snižoval. Výsledné hodnoty fázových proudů jsem pak použil pro výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu ve vývodu s využitím rozdílové metody. V grafu Graf 72 znázorňuje modrá křivka výslednou hodnotu zemního kapacitního proudu bez uvedeného přepočtu a červená křivka znázorňuje výslednou hodnotu zemního kapacitního proudu vývodu přepočtenou na jmenovité parametry sítě dle vztahu (7.5). V ideálním případě by přepočtený zemní kapacitní proud měl mít konstantní hodnotu. V našem případě vykazuje s rostoucím odporem poruchy mírný pokles. Tento pokles je způsoben zaokrouhlením zadávaných výsledků z matematického modelu.



Graf 72 Závislost zemního kapacitního proudu vývodu na odporu zemní poruchy (modrá křivka) a jeho přepočtená hodnota na kovové zemní spojení (červená křivka)

Z grafu Graf 72 je patrné, že přepočtem hodnoty zemního kapacitního proudu výrazně snížíme chybu určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. I při velkém odporu poruchy (cca 1 k Ω) bude chyba menší než 2%. Bez korekce by byla chyba vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu vyšší než 25%.

8.9 Použitelnost rozdílové metody

Metodu výpočtu fázového nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu a příspěvku vývodu k celkovému zemnímu poruchovému proudu lze využívat v sítích s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem. Metodu lze aplikovat pouze na vývody, ve kterých není zemní spojení. Základní podmínkou využití metody je získání naměřených hodnot fázových proudů ve vývodu, a to těsně před zemní poruchou a v době zemní poruchy. Pro přepočet hodnoty fázového zemního nabíjecího proudu vývodu je nutné znát i hodnotu nulové složky napětí v síti v době zemního spojení a aktuální hodnotu provozního napětí sítě. Pro získání potřebných dat lze s výhodou využívat dat z monitorovacích systémů rozveden. Rovněž je možné využít záznamů z ochrany vývodů. U sítí s odporově uzemněným uzlem dochází k rychlému vypínání jednofázových poruch. U vzdálených poruch jsou vypínací časy nastaveny zpravidla na 200 ms až 0,4 ms. U poruch v blízkosti napájecí rozvodny mohou být vypínací časy vývodu se zemní poruchou nastaveny od 800 ms až do 1,8 s v závislosti na počtu stupňů selektivního chránění. Moderní ochrany, vzájemně propojené komunikační linkou, mohou vypínat i blízké zemní poruchy v časech 0,2 až 0,4s. S ohledem na krátkou dobu trvání zemní poruchy v odporově uzemněných sítích nebudou mnohé systémy, monitorující zatížení vývodů, schopny zachytit s dostatečnou přesností změny fázových proudů ve vývodech v době zemního spojení. Některé systémy

umožňují zatížení vývodu monitorovat pouze s periodou delší než 0,5 s. Je to ovlivněno zejména rychlostí převodníku proudu, který převádí proud z úrovně 1 A, respektive 5 A (výstup z měřících transformátorů proudu), na stejnosměrnou proudovou smyčku. V odporově uzemněné síti jsou hlavní zdrojem dat pro použití rozdílové metody záznamy ze zemních ochran.

Pro praktické použití je vhodná pouze rozdílová metoda. Tato metoda má nejrychlejší konvergenci. Metodu lze využívat například při testech zemních směrových ochran, kdy je v síti vytvářeno umělé zemní spojení. Pro měření na vývodech bez zemní poruchy lze využívat záznamů ochran vývodu nebo záznamů z instalovaných měřících přístrojů. Provedeme-li v síti dvě zemní spojení na různých vývodech, můžeme po zpracování záznamů ochran na vývodech bez zemní poruchy určit hodnoty zemních kapacitních proudů na všech vývodech. Této metody lze využívat jak v sítích s izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem, tak i v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů.

9 NABÍJECÍ KAPACITNÍ PROUDY A EKONOMIKA PROVOZU SÍTÍ VN

Tuto kapitolu jsem věnoval problematice ztrát na vedení způsobených nabíjecím kapacitním proudem. Jedná se o relativně novou problematiku, která je nejvíce aktuální ve skandinávských zemích. Pro řešení uvedeného problému je potřebná znalost hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Proto jsem i tuto problematiku zařadil do své práce.

V současné době se neustále zvyšuje podíl kabelových vedení v sítích VN. Díky tomu stoupá i vliv zemního kapacitního proudu na provoz sítě. Jak jsem již uvedl, v některých zemích Evropy, především ve skandinávských zemích, se uvažuje o postupné kabelizaci i dlouhých úseků vedení, která napájejí důležité odběratele nebo vzdálené obce a malá města. Důvodem je zejména nízká poruchovost kabelových vedení a jejich nezávislost na povětrnostních podmínkách. V době přírodních povětrnostních kalamiť vyvolaných silnou bouřkovou činností, vichřicemi, námrazou nebo silným sněžením velmi často dochází k závažným poruchám na venkovním vedení. V důsledku těchto poruch bývají některé lokality i několik dní bez elektrické energie. I na našem území dochází v důsledku vlivu počasí k poškození VN sítí a některé lokality se ocitají i několik hodin bez dodávky elektrické energie.

U kabelových vedení se stává problémem vysoká hodnota nabíjecího kapacitního proudu. Nabíjecí kapacitní proud způsobuje proudové zatěžování kabelového vedení i ve stavu naprázdno. Tento kapacitní proud způsobuje rovněž překompenzování sítí vysokého napětí a odběr jalové energie kapacitního charakteru. Zejména v době nižšího odběru je překompenzování patrné. Odebíraný jalový výkon z napájecího transformátoru má pak kapacitní charakter.

Jednožilová kabelová vedení typu AXEKVCE o průřezu 120 mm^2 pro napěťovou hladinu 22 kV mají udávanou měrnou kapacitu $0,23 \mu\text{F}/\text{km}$. Této kapacitě odpovídá nabíjecí proud cca $0,91 \text{ A}/\text{km}$. Při zemním spojení bude fázemi bez poruchy protékat zvýšená hodnota nabíjecího kapacitního proudu. Zvýšení hodnoty nabíjecího proudu je způsobeno zvýšením fázového napětí až na úroveň sdruženého napětí. Velikost nabíjecího proudu ve fázích bez poruchy vzroste na úroveň $1,59 \text{ A}/\text{km}$. Ve fázi s poruchou bude napětí proti zemi minimální, proto můžeme hodnotu nabíjecího proudu této fáze zanedbat. Zatížitelnost kabelového vedení o průřezu 120 mm^2 při uložení v zemi s uspořádáním vodičů do trojúhelníka je cca 285 A. Budeme-li uvažovat zvýšenou hodnotu nabíjecího proudu při zemním spojení, zjistíme, že plného zatížení na počátku kabelového vedení dosáhneme v případě, že kabelové vedení bude mít délku cca 180 km.

Průtok nabíjecího kapacitního proudu zatěžuje napájecí vedení a způsobuje ztráty energie. Ztráty na vedení jsou lineárně závislé na odporu vedení a kvadraticky závislé na proudovém zatížení vedení. Proto zejména snížení hodnoty nabíjecího kapacitního proudu může ovlivnit ekonomiku přenosu elektrické energie.

Ztráty na odporu určíme dle základního vztahu:

$$P = R \cdot I^2 \quad (W; \Omega, A)$$

(9.1)

Pro jednoduchost jsem uvažovat pouze vedení bez odboček. Nabíjecí proud tohoto vedení je lineárně závislý na délce vedení. Hodnota nabíjecího proudu se vzdáleností od počátku vedení lineárně klesá. Na konci vedení bude hodnota nabíjecího proudu nulová. Nabíjecí proud jsem vyjádřil jako funkci vzdálenosti od počátku vedení vztahem:

$$I_C(l) = \omega C_p U_f (L-l) \quad (A; \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, F, V, \text{km}, \text{km})$$

(9.2)

Kde	$I_C(l)$	nabíjecí kapacitní proud ve vzdálenosti „l“ od počátku vedení
	ω	úhlová frekvence $2\pi f$
	C_p	provozní kapacita vedení
	U_f	fázová hodnota napětí sítě
	L	délka kabelového vývodu
	l	vzdálenost od počátku vedení.

Kapacitní nabíjecí proud vyvolá na elementu vedení dl s odporem R dílčí činné ztráty dle vztahu (9.1). Celkové činné ztráty na vedení jsem popsal rovnicí:

$$P = \int_0^L R (\omega C_p U_f (L-l))^2 dl \quad (W; \Omega \cdot \text{m}^{-1}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, F, V, \text{m}, \text{m})$$

(9.3)

Po úpravě rovnice (9.3) a výpočtu integrálu jsem získal vztah pro výpočet činných ztrát na vedení v jedné fázi způsobených průtokem nabíjecího kapacitního proudu vývodu.

$$P = R \cdot I_{Cm}^2 \frac{L^3}{3} \quad (W; \Omega \cdot \text{m}^{-1}, A \cdot \text{m}^{-1}, \text{m})$$

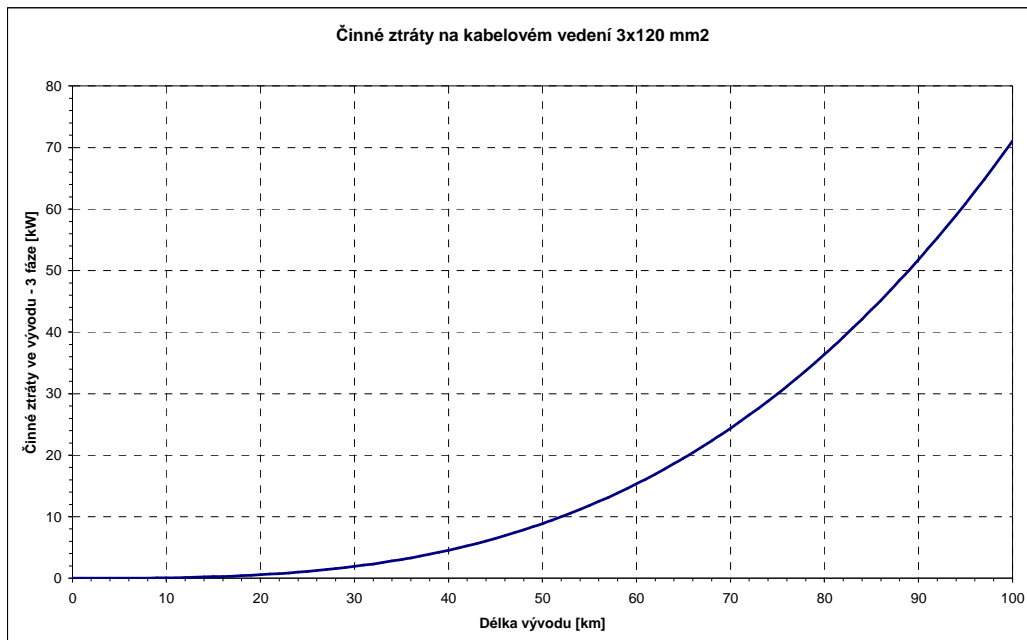
(9.4)

Kde	P	činné ztráty na vedení způsobené průtokem nabíjecího kapacitního proudu
	R	hodnota odporu vedení vztahovaná na jeden metr délky
	I_{Cm}	hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztahovaná na jeden metr vedení dle vztahu (9.2)
	L	délka vývodu.

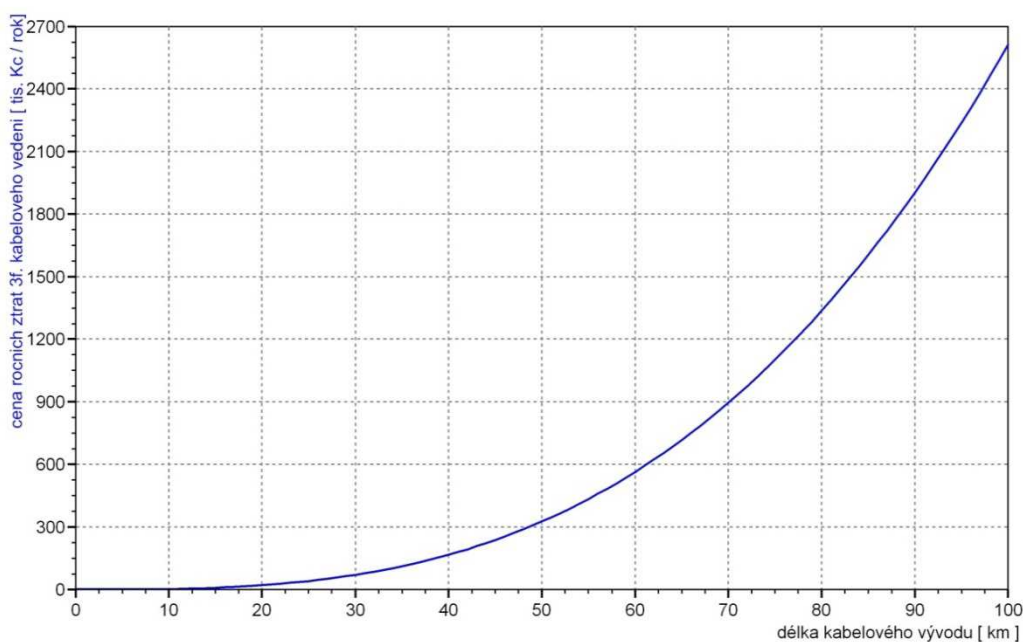
Grafické zobrazení závislosti činných ztrát kabelového vývodu 22-AXEKVCE o průřezu 120 mm^2 na velikosti nabíjecího kapacitního proudu vlastního kabelu jsem zobrazil na grafu Graf 73. Nabíjecí kapacitní proud je závislý na délce kabelového vedení ($0,23 \mu\text{F}/\text{km}$). Pro výpočet ztrát jsem uvažoval odpor jádra $0,253 \Omega/\text{km}$. Z grafu je patrné, že pro dlouhé vývody bude ztrátový výkon ovlivňovat celkovou účinnost přenosu elektrické energie.

Ocenění ztrát na vedení ovlivňuje ekonomiku přenosu elektrické energie zejména na dlouhém kabelovém vývodu. Cena ztrát zároveň udává ekonomickou mez pro návratnost vynaložených investic do opatření zaměřených na snížení ztrát. Pro ekonomické porovnání účelnosti vynaložených investic jsem uvažoval cenu elektrické energie $1400 \text{ Kč}/\text{MWh}$, která byla aktuální v době provádění výzkumu. Z grafu Graf 74

je patrné, že cena ročních ztrát pro kabelové vývody delší než 30 km přesahuje 70.000 Kč/rok. U vývodu s délkou 100 km je to více než 2.600.000,- Kč/ rok. Pro delší vývody je tedy investice do eliminace ztrát výhodná. Snížení ztrát na dlouhém kabelovém vývodu může znamenat nejen významné finanční úspory při distribuci, ale i z toho plynoucí úspory při výrobě elektrické energie.



Graf 73 Činný ztrátový výkon jedné fáze kabelového vedení způsobený kapacitním nabíjecím proudem v závislosti na délce kabelového vývodu

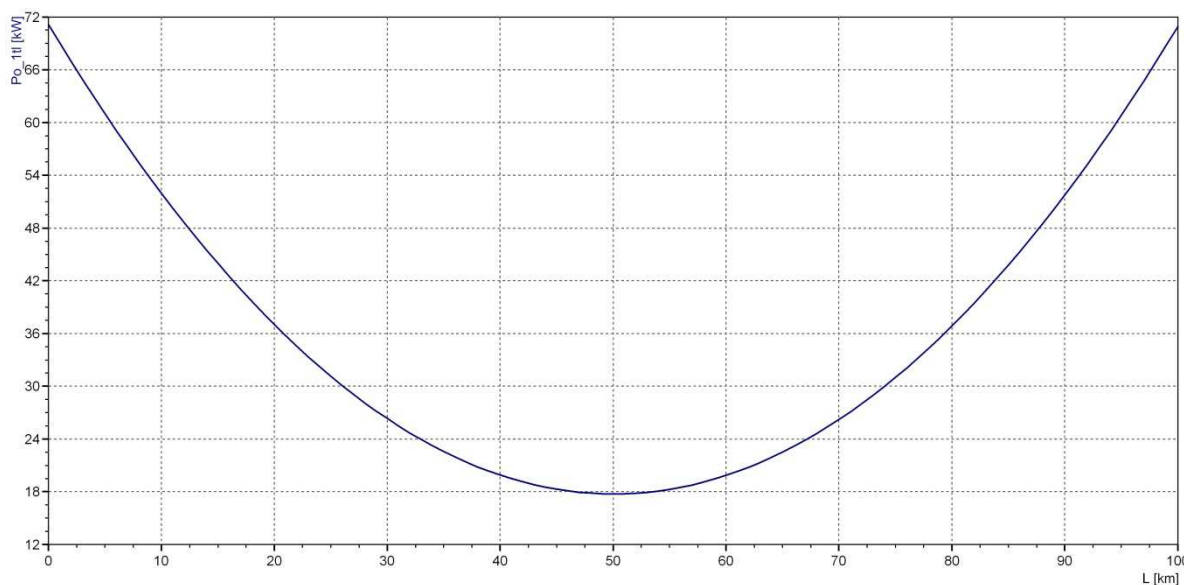


Graf 74 Ocenění ročních ztrát na třífázovém kabelovém vedení způsobených nabíjecím kapacitním proudem při uvažované ceně za elektrickou energii 1400 Kč/ MWh

9.1 Dekompensace nabíjecího proudu při zachování neutrálního účinníku

Eliminace nabíjecího kapacitního proudu může být vyvolána požadavkem na dodržení předepsané hodnoty účinníku v předávacím místě. Při nízkém odběru induktivního jalového výkonu může docházet k překompenzování jalového výkonu nabíjecím kapacitním proudem vedení. Dekompensace nabíjecího kapacitního proudu spojená s podmínkou udržení požadovaného účinníku v předávacím bodě může rovněž přispět ke snížení ztrát na vedení. Tato problematika je důležitá zejména v sítích s vyššími hodnotami nabíjecího kapacitního proudu a s delšími vývody.

Snížení ztrát na vedení je spojeno se snížením hodnoty nabíjecího proudu vedení (kvadratická závislost) nebo snížením odporu vedení (lineární závislost). S ohledem na kvadratickou závislost ztrát na protékajícím proudu je výhodnější se zaměřit na snížení hodnoty proudu než na snížení hodnoty odporu vedení. Snížení nabíjecího kapacitního proudu vývodu docílíme instalací třífázové dekompenzační tlumivky.



Graf 75 Ovlivnění ztrát kabelového vedení s délkou 100 km a průřezem $3 \times 120 \text{ mm}^2$ v síti 22 kV nabíjecím kapacitním proudem vedení v závislosti na vzdálenosti instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení

Instalací dekompenzační tlumivky v polovině vývodu dosáhneme největšího účinku (viz Graf 75) vedoucího ke snížení ztrát způsobených nabíjecím kapacitním proudem. Bude-li mít dekompenzační tlumivka stejný výkon jako je nabíjecí kapacitní proud vývodu, snížíme nabíjecí proud vedení na poloviční hodnotu a vedení bude vykazovat pouze čtvrtinové ztráty. Na počátku vedení bude stále dodržena hodnota požadovaného účinníku. Další možností je rozdělit výkon jedné dekompenzační tlumivky mezi dvě tlumivky s polovičním výkonem. Tyto dekompenzační tlumivky polovičního výkonu je nejvýhodnější instalovat ve vzdálenosti 25% a 75% z celkové délky vývodu. Ztráty ve vývodu způsobené nabíjecím kapacitním proudem pak poklesnou na úroveň pouhých 6,25% ze ztrát před dekompenzací.

Obecně můžeme využívat i větší počet dekompenzačních tlumivek. Teoreticky nejlepších výsledků dosáhneme rozdělením vedení na „n“ stejně dlouhých úseků. Počet úseků bude dán počtem dekompenzačních tlumivek. Dekompenzační tlumivky pak instalujeme vždy do středu úseku vedení. Výsledné ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem při dekompenzaci „n“ tlumivkami jsem vyjádřil vztahem (9.5)

$$P = R \cdot I_{Cm}^2 \frac{L^3}{3(2.n)^2} \quad (W; \Omega m^{-1}, A.m^{-1}, m, -)$$

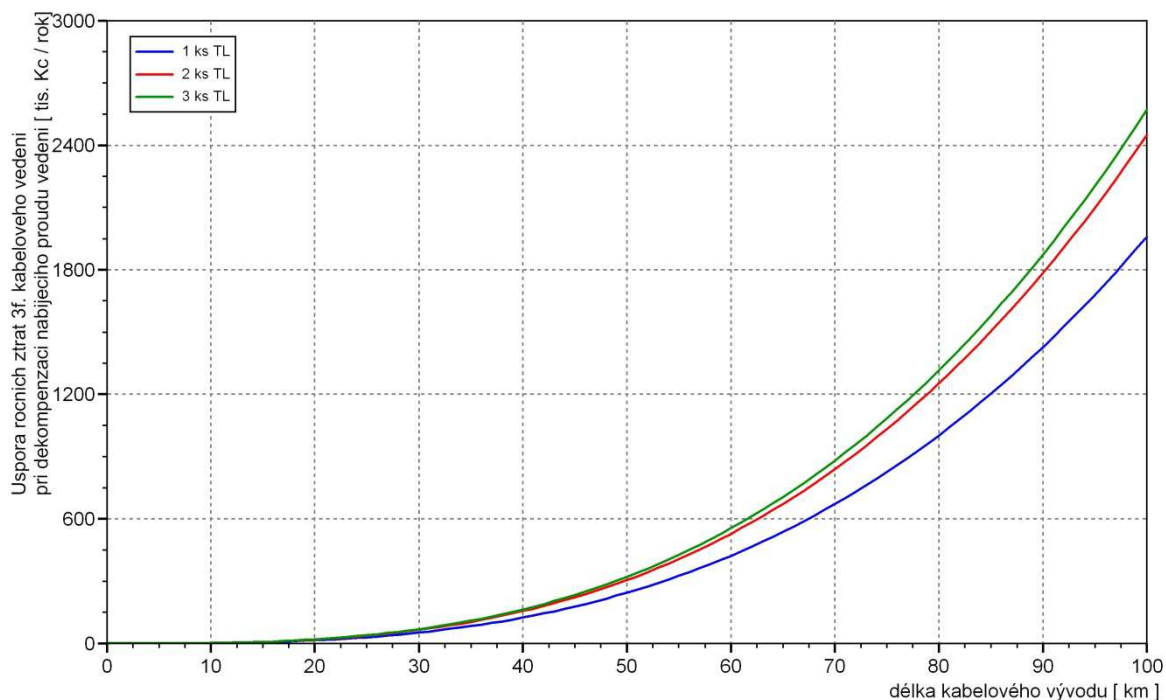
(9.5)

Kde	P	činné ztráty na vedení způsobené průtokem nabíjecího kapacitního proudu při dekompenzaci „n“ tlumivkami
	R	hodnota odporu vedení vztažená na jeden metr délky
	I_{Cm}	hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztažená na jeden metr vedení dle vztahu (9.2)
	L	délka vývodu
	n	počet dekompenzačních tlumivek ($n \geq 1$).

Nejvýznamnějšího snížení ztrát dosáhneme instalací jedené, případně dvou dekompenzačních tlumivek. Při instalaci většího počtu tlumivek již není další pokles celkových ztrát tolik výrazný a navíc nelze očekávat rychlou návratnost investičních nákladů vložených do instalovaných zařízení. V tabulce Tab. 31 jsem uvedl procentní ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem při instalaci až 4 dekompenzačních tlumivek.

Tab. 31: Procentní velikost ztrát vedení způsobená průtokem nabíjecího proudu ovlivněná počtem dekompenzačních tlumivek

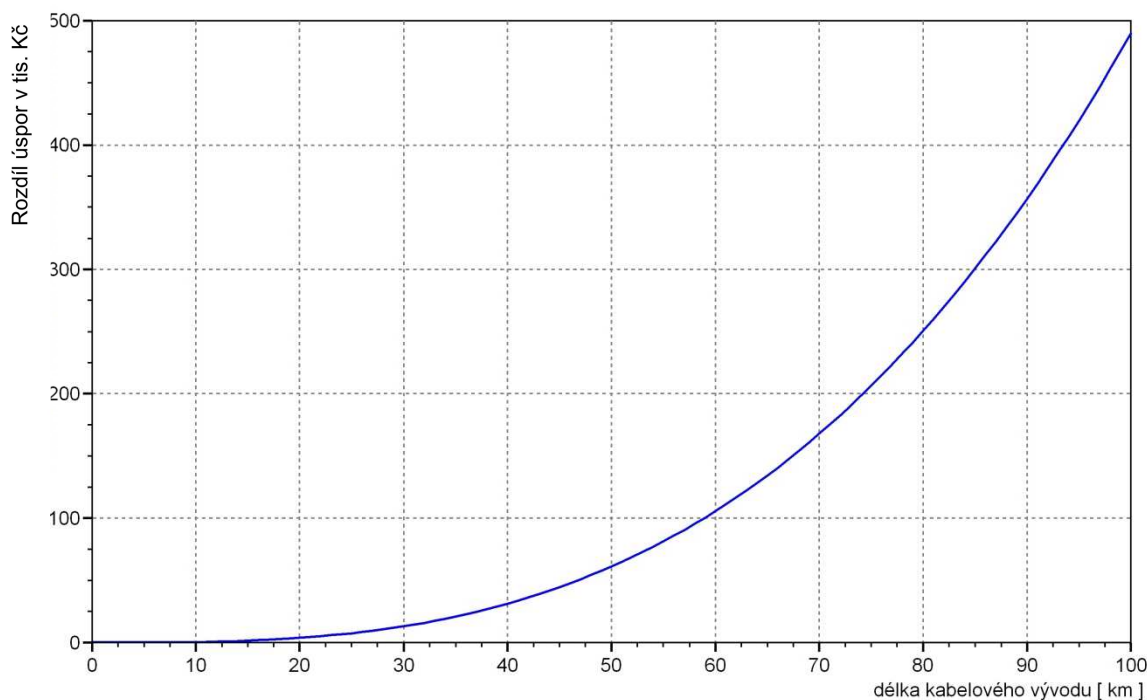
Počet dekompenzačních tlumivek	Procentní ztráty na vedení s dekompenzací vztažené k vedení bez dekompenzace
0	100,00%
1	25,00 %
2	6,25 %
3	2,77 %
4	1,56 %



Graf 76 Teoretické roční úspory při snížení ztrát na třífázovém kabelovém vedení při dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu jednou tlumivkou (modrá křivka), dvěma tlumivkami (červená křivka) nebo třemi tlumivkami (zelená křivka) při uvažované ceně 1400 Kč/MWh

Na grafu Graf 76 jsem zobrazil teoretické roční úspory při využití dekompenzačních tlumivek (bez respektování ztrát v tlumivkách). Úspory vycházejí opět z ceny elektrické energie 1400 Kč/MWh. Z grafu je patrné, že použití dvou dekompenzačních tlumivek přináší nižší ztráty než použití jedné dekompenzační tlumivky dvojnásobného výkonu. Samozřejmě, že použití tří tlumivek s třetinovým výkonem bude znamenat další snížení ztrát. Toto snížení ztrát však již není tolik rozdílné oproti ztrátám na vedení se dvěma dekompenzačními tlumivkami. Navíc tři dekompenzační tlumivky představují mnohem výraznější nárůst investičních nákladů. Volba počtu dekompenzačních tlumivek, které použijeme pro dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu vedení, je opět hlavně ekonomickou otázkou. Investiční náklady na instalaci dekompenzační tlumivky nejsou lineárně závislé na výkonu instalované tlumivky. Při řešení otázky volby počtu dekompenzačních tlumivek je vhodné zjistit velikost rozdílu úspor. Pro názornost jsem rozdíl ztrát při použití jedné a dvou dekompenzačních tlumivek vyjádřil v grafu Graf 77.

Z grafu Graf 77 je patrné, že rozdíl úspor mezi instalací jedné nebo dvou dekompenzačních tlumivek se dle očekávání zvyšuje s délkou vývodu.



Graf 77 Rozdíl ročních úspor při instalaci jedné nebo dvou dekompenzačních tlumivek, uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh, graf zobrazuje úsporu bez uvažování vlastních ztrát dekompenzačních tlumivek

9.2 Dekompensace nabíjecího kapacitního proudu pro snížení ztrát na vedení

Sledujeme-li pouze ekonomiku provozu vývodu, pak neplatí podmínka, že na začátku vývodu nebo v předávacím bodě musí být předepsaná hodnota účinníku. V této kapitole jsem se proto zaměřil na řešení úlohy dekompenzace nabíjecího proudu vývodu pouze z pohledu snížení ztrát. V tomto případě se můžeme zaměřit na sledování snížení ztrát vedení pouze z pohledu optimalizace výkonu dekompenzační tlumivky a volby nejefektivnějšího místa instalace dekompenzační tlumivky. V předchozí kapitole jsem popisoval případ dekompenzace vývodu na hodnotu neutrálního účinníku. Zde vychází optimální volba místa instalace dekompenzační tlumivky v blízkosti poloviny délky vývodu a její výkon bude odpovídat nabíjecímu kapacitnímu výkonu vývodu.

Ztráty na vývodu lze určit vztahem (9.5). Uvedené ztráty jsou závislé na druhé mocnině proudu a třetí mocnině délky vývodu. Pro krátké vývody mají ztráty nízké hodnoty. Význam ztrát se uplatňuje zejména pro delší vývody. Vhodnou volbou místa pro připojení dekompenzační tlumivky snížíme hodnotu nabíjecího proudu vedení a tím ovlivníme i velikost ztrát na vedení. Na druhou stranu nám vznikají ztráty v dekompenzační tlumivce. Tyto ztráty bývají na úrovni procenta ze jmenovitého jalového výkonu dekompenzační tlumivky. Pro snížení celkových ztrát je nutné uvažovat jak ztráty na vedení, tak i ztráty v dekompenzační tlumivce. Pro dosažení úspor musí samozřejmě platit, že součet ztrát na vedení a ztrát v dekompenzačních tlumivkách musí být menší než ztráty na vedení před dekompenzací nabíjecího kapacitního proudu. Dekompensaci nabíjecího kapacitního proudu je výhodné

realizovat pouze u vývodů s extrémně vysokou hodnotou nabíjecího kapacitního proudu.

Pro jednoduchost jsem uvažoval vývod bez odboček s instalovanou jednou dekompenzační tlumivkou. Tento vývod jsem při výpočtu rozdělil na dva úseky vymezené místem instalace dekompenzační tlumivky. Místo instalace dekompenzační tlumivky jsem označil jako místo „D“. V prvním úseku vývodu od jeho začátku až po místo „D“ budou ztráty na vedení ovlivněny induktivním proudem dekompenzační tlumivky I_L . Za místem instalace dekompenzační tlumivky budou ztráty na vedení ovlivněny pouze kapacitním proudem zbývající části vývodu. Tento proud jsem označil jako $I_C(l)$ a vyjádřil vztahem:

$$I_C(l) = I_{Cm} \cdot (L - l) \quad (A; A \cdot m^{-1}, m, m) \quad (9.6)$$

Kde $I_C(l)$ nabíjecí kapacitní proud vývodu za místem „D“ ve vzdálenosti „l“ od počátku vedení
 I_{Cm} hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztážená na jeden metr vedení
 L celková délka vývodu
 l vzdálenost místa výpočtu $I_C(l)$ měřená od počátku vývodu (nejmenší uvažovaná hodnota je zde rovna vzdálenosti místa „D“ od počátku vývodu).

Proud vedením $I_V(l)$ ovlivněný induktivním proudem dekompenzační tlumivky I_{LT} jsem popsal funkcí (9.7). Jedná se o proud v úseku vedení od počátku vývodu až po místo instalace dekompenzační tlumivky „D“.

$$I_V(l) = I_{Cm} \cdot (L - l) - I_{LT} \quad (A; A \cdot m^{-1}, m, m, A) \quad (9.7)$$

Kde $I_V(l)$ proud vývodu v úseku od počátku vedení až po místo instalace „D“ ve vzdálenosti „l“ od počátku vedení
 I_{LT} proud dekompenzační tlumivky
 I_{Cm} hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztážená na jeden metr vedení
 L celková délka vývodu
 l vzdálenost místa výpočtu I_V měřená od počátku vývodu (uvažovaná hodnota bude v úseku od počátku vedení až po místo instalace „D“, největší hodnota je zde rovna vzdálenosti místa „D“ od počátku vývodu).

Pro odvození výpočtu ztrát prvního úseku vedení do místa „D“ jsem vycházel ze ztrát na elementárním úseku vedení s délkou „dl“. Ztráty jsem popsal rovnicí (9.8).

$$P_1 = R \int_0^D (I_C(l) - I_{LT})^2 dl \quad (W; \Omega m^{-1}, A, A) \quad (9.8)$$

Kde P_1 činné ztráty na vedení od počátku vedení k místu „D“
 R hodnota odporu vedení vztážená na jeden metr délky
 $I_C(l)$ nabíjecí kapacitní proud ve vzdálenosti „l“ od počátku vývodu do místa „D“
 I_{LT} induktivní proud dekompenzační tlumivky
 D vzdálenost místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení.

Při volbě dekompenzačního výkonu tlumivky jsem opět vycházel z hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Nabíjecí kapacitní proud jsem vyjádřil jako

funkci vzdálenosti od počátku vedení dle (9.6) bez uvažování instalace dekompenzační tlumivky v místě „D“.

Induktivní proud dekompenzační tlumivky jsem vyjádřil jako „K“ násobek hodnoty nabíjecího proudu jednotkové délky vedení. Hodnota „K“ udává délku vývodu, pro kterou dekompenzační tlumivka eliminuje nabíjecí kapacitní proud.

$$I_{LT} = I_{Cm} K \quad (A; Am^{-1}, m)$$

(9.9)

Kde I_{LT} induktivní proud dekompenzační tlumivky
 I_{Cm} hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztažená na jeden m vedení
 K délka vývodu, pro kterou dekompenzační tlumivka eliminuje nabíjecí kapacitní proud.

Po dosažení obou rovnic (9.6) a (9.9) do vztahu (9.8) jsem provedl výpočet pro první úsek vedení od počátku vývodu až po místo instalace dekompenzační tlumivky „D“.

$$P_1 = RI_{Cm}^2 \int_0^D (L-l-K)^2 dl \quad (W; \Omega m^{-1}, Am^{-1}, m, m, m)$$

(9.10)

$$P_1 = RI_{Cm}^2 \left(L^2 D - LD^2 - 2LKD + KD^2 + K^2 D + \frac{D^3}{3} \right) \quad (W; \Omega m^{-1}, Am^{-1}, m, m, m)$$

(9.11)

Kde P_1 činné ztráty na vedení od počátku vedení k místu „D“
 R hodnota odporu vedení vztažená na jeden metr délky
 I_{Cm} hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztažená na jeden metr vedení
 L celková délka vývodu
 l vzdálenost místa výpočtu l_v měřená od počátku vývodu (uvažovaná hodnota bude v úseku od počátku vedení až po místo instalace „D“, největší hodnota je rovna vzdálenosti místa „D“ od počátku vývodu)
 D vzdálenost místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení
 K délka vývodu, pro kterou dekompenzační tlumivka eliminuje nabíjecí kapacitní proud.

Druhý úsek je tvořen vedením od místa instalace dekompenzační tlumivky až na konec vývodu. Pro výpočet ztrát na tomto úseku platí vztah (9.5), který jsem upravil pro výpočet ztrát za místem instalace dekompenzační tlumivky (9.12).

$$P_2 = R I_{Cm}^2 \frac{(L-D)^3}{3} \quad (W; \Omega m^{-1}, Am^{-1}, m, m)$$

(9.12)

Kde P_2 činné ztráty na vedení od místa „D“ do konce vedení
 R hodnota odporu vedení vztažená na jeden metr délky
 I_{Cm} hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztažená na jeden metr vedení
 L celková délka vývodu
 D vzdálenost místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení.

Celkové ztráty na vedení jsem vyjádřil následujícím vztahem, který je součtem ztrát obou úseků vedení.

$$P = P_1 + P_2 \quad (W; W, W)$$

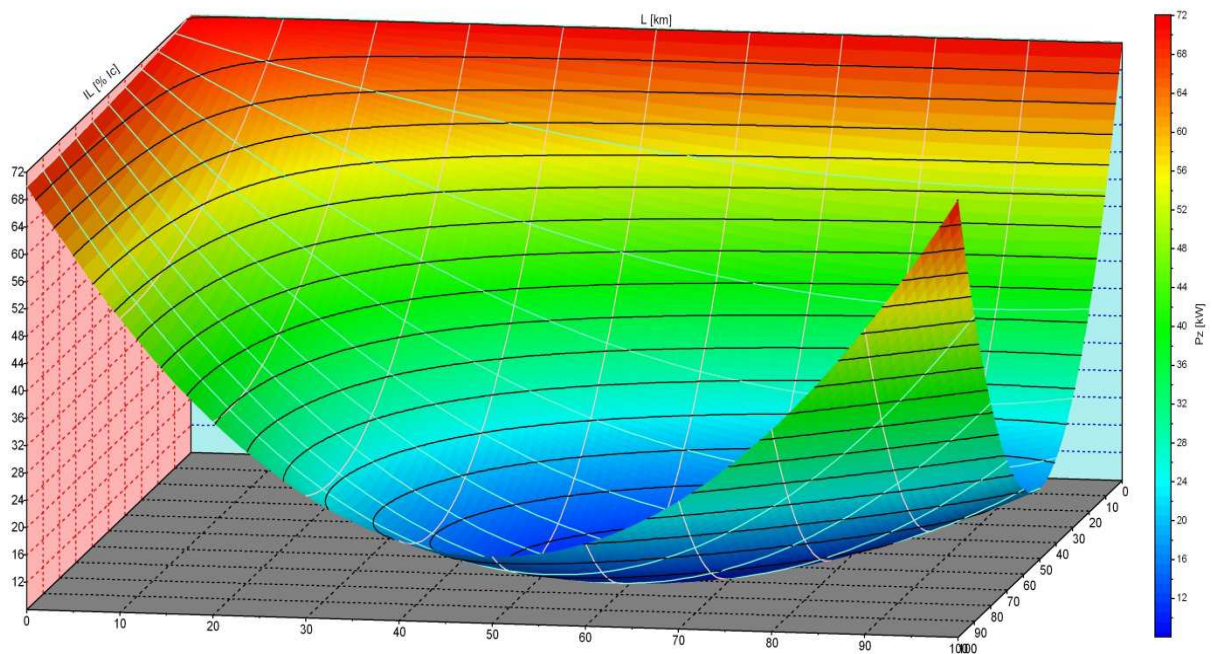
(9.13)

$$P = RI_{Cm}^2 \left(L^2 D - LD^2 - 2LKD + KD^2 + K^2 D + \frac{D^3}{3} + \frac{(L-D)^3}{3} \right) \quad (W; \Omega m^{-1}, Am^{-1}, m, m, m)$$

(9.14)

Kde	P	celkové činné ztráty na vedení
	P_1	činné ztráty na vedení od počátku vedení k místu „D“
	P_2	činné ztráty na vedení od místa „D“ do konce vedení
	R	hodnota odporu vedení vztahovaná na jeden metr délky
	I_{Cm}	hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztahovaná na jeden metr vedení
	L	celková délka vývodu
	D	vzdálenost místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení
	K	délka vývodu, pro kterou dekompenzační tlumivka eliminuje nabíjecí kapacitní proud.

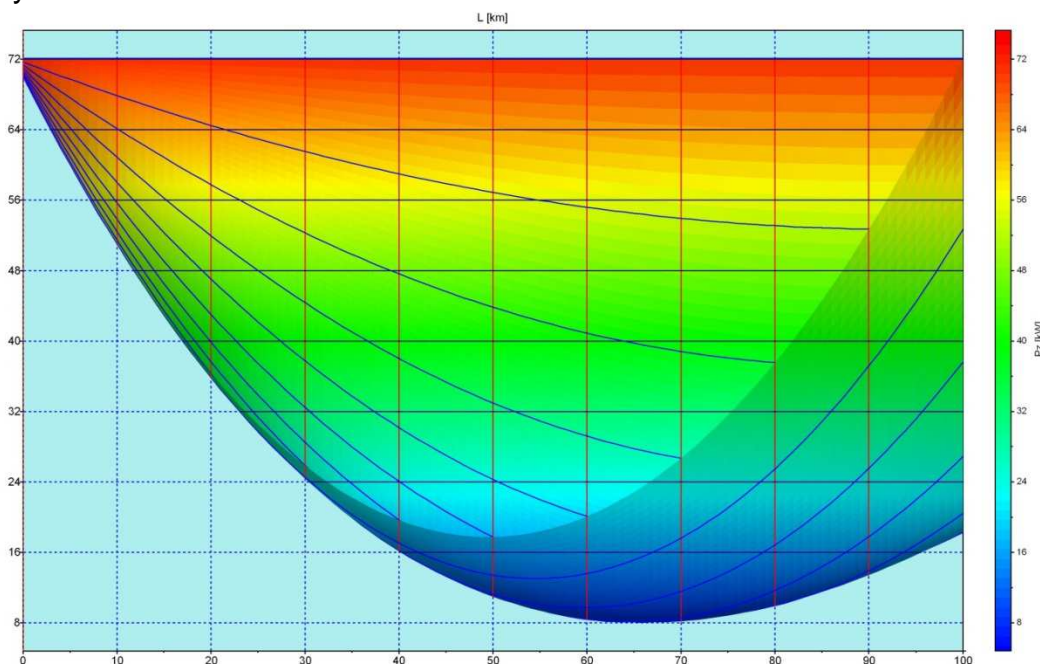
Pro optimalizaci výkonu dekompenzační tlumivky a místa její instalace „D“ jsem provedl výpočty ztrát na vedení pro různé hodnoty dekompenzačního výkonu a pro různá místa instalace. Vypočtené výsledné ztráty jsem zobrazil v grafu (Graf 78).



Graf 78 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na procentní velikosti proudu dekompenzační tlumivky a na místě „D“ instalace dekompenzační tlumivky

Tento graf zobrazuje i speciální případ, kdy požadujeme plnou dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Dekompenzační tlumivka v tomto případě musí mít stejný výkon jako je nabíjecí výkon vedení (v grafu pro $I_{LT} = 100\%$). Ztráty na vedení pak budou závislé pouze na místě instalace dekompenzační tlumivky. Minimální ztráty na vedení v tomto případě nastanou při instalaci dekompenzační

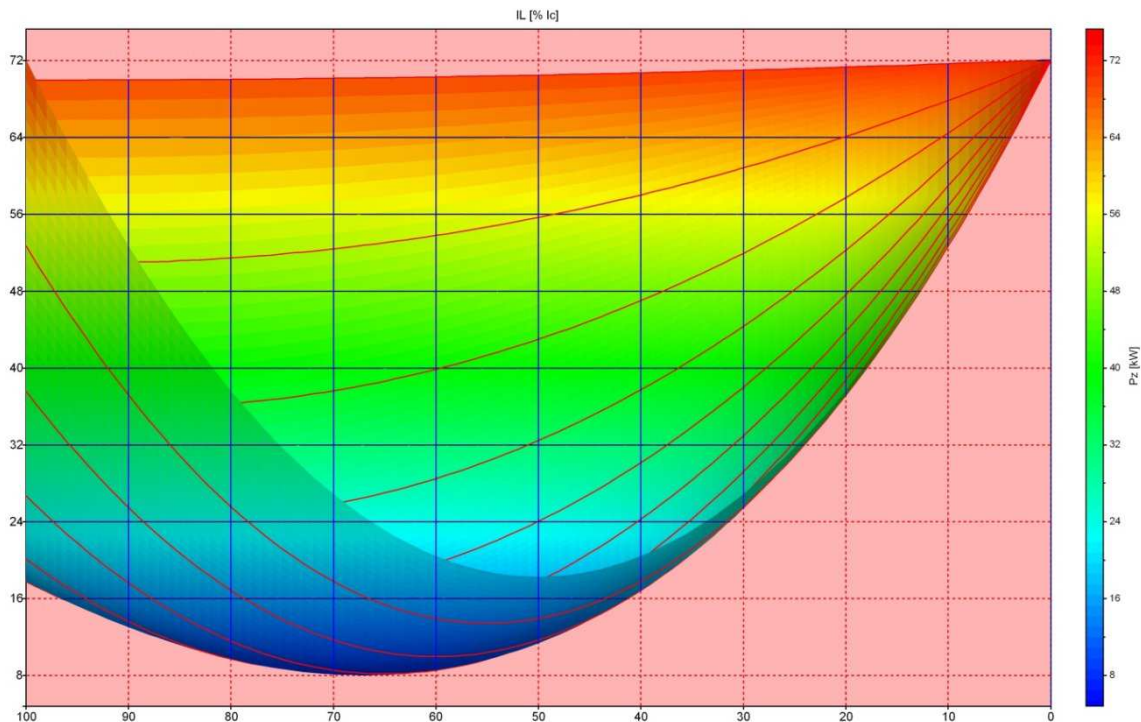
tlumivky do poloviny délky vývodu. Průběh ztrát je patrný na bočním pohledu 3D grafu viz Graf 79. Instalací dekompenzační tlumivky do poloviny vývodu dosáhneme nejnižších ztrát pouze pro plný dekompenzační výkon, který odpovídá nabíjecímu výkonu vývodu. Z grafu je však patrné, že se nejedná o absolutní minimum. Pro dosažení absolutního minima je nutné vhodně zvolit místo instalace dekompenzační tlumivky a její dekompenzační výkon. Splnění první podmínky je dosaženo při instalaci dekompenzační tlumivky do místa vzdáleného 66,67% celkové délky vývodu od počátku vedení. Druhou podmínkou je zajištění optimálního dekompenzačního výkonu tlumivky.



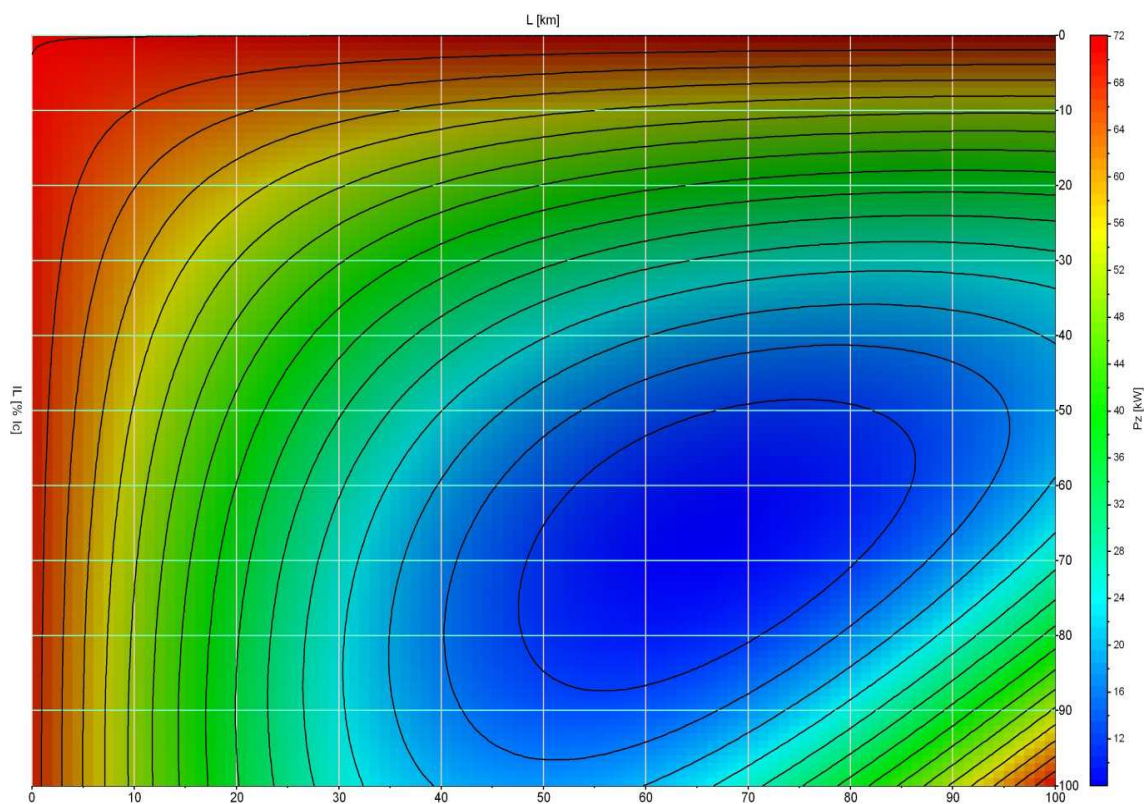
Graf 79 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, boční pohled na graf zobrazuje závislost ztrát na procentní vzdálenosti místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení

Dalším extrémním případem je instalace dekompenzační tlumivky na konec vedení a určení jejího optimálního dekompenzačního výkonu. Z grafu Graf 80 je patrné, že minimum ztrát pro tento případ nastane při volbě výkonu dekompenzační tlumivky na úrovni 50% nabíjecího výkonu vedení. Opět je z grafu patrné, že absolutní minimum nastane při hodnotě výkonu dekompenzační tlumivky 66,7% nabíjecího výkonu vývodu.

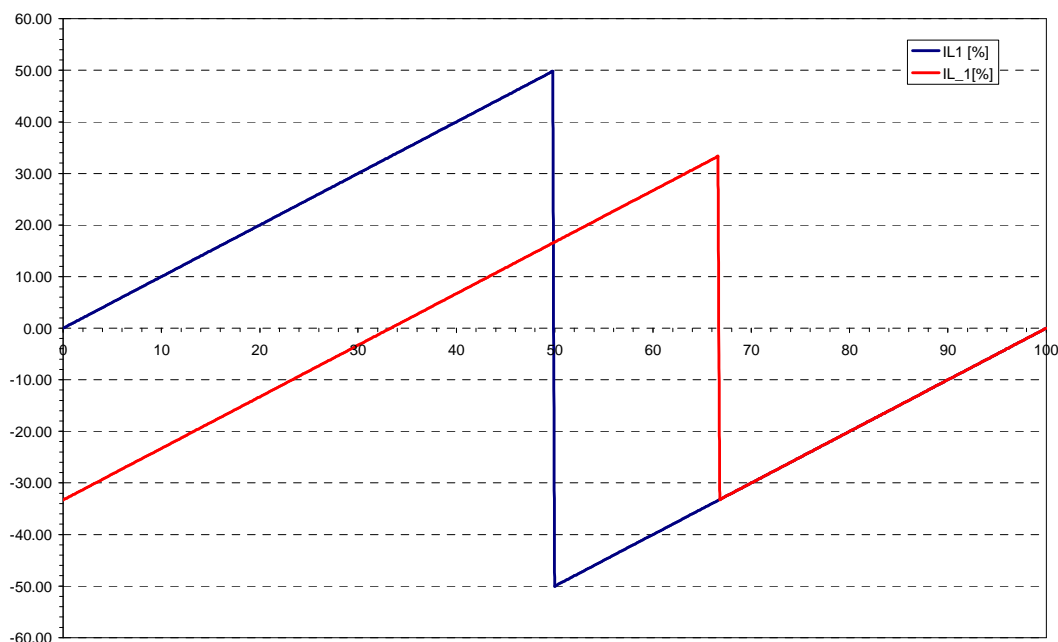
Při pohledu shora na Graf 78 je patrná oblast minimálních ztrát pro místo instalace dekompenzační tlumivky ve vzdálenosti 66,7% celkové délky vývodu od počátku vedení a pro dekompenzační proud tlumivky na úrovni 66,7% nabíjecího proudu vývodu (Graf 81). Ztráty na vedení poklesnou v tomto případě až na 11,11% ztrát vedení před dekompenzací. Oproti dekompenzaci plného nabíjecího výkonu zde vystačíme s nižším výkonem dekompenzační tlumivky a dosahujeme dalšího výrazného snížení ztrát na vedení (Graf 82). Tato optimalizace se projeví jak ve snížení ztrát, tak i v úspoře investičních nákladů za nižší výkon dekompenzační tlumivky.



Graf 80 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, boční pohled na graf zobrazuje závislost ztrát na procentní hodnotě proudu dekompenzační tlumivky vztažené k celkové hodnotě nabíjecího proudu vedení



Graf 81 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, pohled shora zobrazuje oblast minimálních ztrát pro místo instalace dekompenzační tlumivky a pro dekompenzační proud tlumivky



Graf 82 Nabíjecí a dekompenzační fázové proudy na vedení při instalaci dekompenzační tlumivky s výkonem 100% do 50% délky vývodu (modrá křivka) a při instalaci dekompenzační tlumivky s výkonem 66,7% do 66,7% délky vývodu (červená křivka)

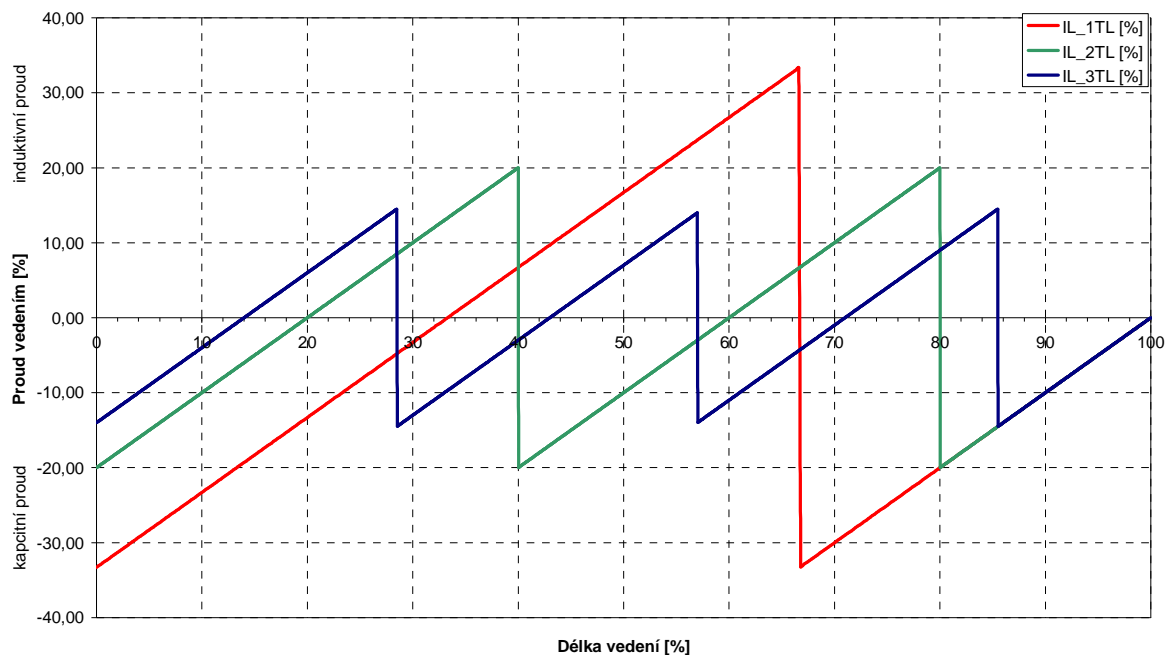
Je jasné, že původní vztah odvozený za podmínky dodržení předepsaného účinníku (9.5) není pro výpočet dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu z pohledu zajištění minima ztrát na vedení příliš vhodný. Celkové ztráty na vedení při použití „n“ optimalizovaných dekompenzačních tlumivek jsem vyjádřil vztahem (9.15). Snížením výkonu dekompenzační tlumivky dochází rovněž ke snížení absolutní hodnoty ztrát v tlumivce.

$$P = RI_{Cm}^2 \frac{L^3}{3(2n+1)^2} \quad (W; \Omega m^{-1}, A.m^{-1}, m, -)$$

(9.15)

Kde	P	činné ztráty na vedení způsobené průtokem nabíjecího kapacitního proudu při dekompenzaci „n“ tlumivkami
	R	hodnota odporu vedení vztažená na jeden metr délky
	I_{Cm}	hodnota nabíjecího kapacitního proudu vývodu vztažená na jeden metr vedení dle vztahu (9.2)
	L	délka vývodu
	n	počet dekompenzačních tlumivek ($n \geq 1$).

Dle vztahu (9.15) docílíme nejefektivnější snížení požadovaného dekompenzačního výkonu při použití právě jedné dekompenzační tlumivky, kdy ztráty poklesnou na 11,11% původních ztrát před dekompenzací. Pro dvě dekompenzační tlumivky se sníží ztráty na vedení až na hodnotu 4% původních ztrát před dekompenzací. Těchto ztrát dosáhneme při instalaci dekompenzačních tlumivek s výkonem 2x 40% z nabíjecího výkonu vývodu při umístění tlumivek do vzdálenosti 40% a 80% délky vývodu. Další rozhodnutí o vhodnosti použití dekompenzace pro daný vývod bude ovlivněno velikostí vlastních ztrát dekompenzačních tlumivek.



Graf 83 Proudové charakteristiky na vedení s dekompenzací nabíjecího kapacitního proudu v závislosti na vzdálenosti od počátku vedení při použití různého počtu dekompenzačních tlumivek (s jednou - červená křivka, se dvěma - zelená křivka a se třemi - modrá křivka), 100% proudu odpovídá nabíjecímu kapacitnímu proudu vývodu bez dekompenzace

9.3 Dekompenzační třífázové tlumivky

Cílem instalace dekompenzačních tlumivek je vedle splnění legislativních požadavků na dodržení předepsaného účinku i snížení proudového zatížení přívodního vedení a snížení ztrát na dlouhých vývodech. Proto musíme volit dekompenzační tlumivky s nízkými ztrátami. Ztráty v dekompenzačních tlumivkách by se měly pohybovat na úrovni do 1% ze jmenovitého jalového výkonu tlumivek. Tlumivky s vyššími ztrátami vyžadují nižší pořizovací investice, ale provozní náklady způsobené zvýšenými ztrátami jsou pak vyšší.

Pro názornost jsem porovnal použití jedné dekompenzační tlumivky o výkonu 4 MVar s použitím dvou dekompenzačních tlumivek o výkonech 2 MVar, a to v síti 22 kV s délkou kabelového vývodu 100 km.

Vlastní ztráty všech dekompenzačních tlumivek jsem počítal variantně pro 1% a 4% z jejich jmenovitého výkonu. Dále jsem uvažoval, že tlumivky kompenzují celý nabíjecí výkon kabelového vedení. Místo instalace tlumivek je pro jednu tlumivku 50 km od počátku vedení, pro dvě tlumivky 25 km a 75 km od počátku vedení. Činné ztráty tlumivky jsou přenášeny přes vedení do místa jejich instalace. Přenos výkonu po vedení na pokrytí ztrát tlumivek rovněž způsobí další zvýšení ztrát na vedení. Odhad nákladů spojených s instalací a provozem dekompenzačních tlumivek jsem uvedl v následující tabulce Tab. 32.

Tab. 32 Odhadované investiční a provozní náklady na dekompenzaci kabelového vedení 3x120 mm² typu 22-AXEKVCE o délce 100 km (uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh)

Výkon dekompenzační tlumivky	Ztráty dekompenzační tlumivky	Odhad investičních nákladů (tis. Kč)	Roční ztráty tlumivky (MWh)	Ocenění ztrát tlumivky za rok (tis. Kč/rok)	Ztráty na vedení způsobené ztrátami tlumivky (W)	Ocenění ztrát přenosu výkonu k pokrytí ztrát tlumivky (tis. Kč/rok)	Roční pokrytí provozních ztrát (tis. Kč/rok)
4 MVar	1%	1500	350,4	490,56	41,82	0,512	491,1
4 MVar	4%	900	1401,6	1962,24	669,1	8,206	1970,4
2x2 MVar	1%	2600	350,4	490,56	31,36	0,385	490,9
2x2 MVar	4%	1700	1401,6	1962,24	501,8	6,154	1968,4

Z údajů v Tab. 32 a grafů Graf 74, Graf 76 je zřejmé, že pro dlouhé kabelové vývody instalace dekompenzačních tlumivek přinese finanční úspory pouze v případě, že budeme volit dekompenzační tlumivku s velmi nízkými ztrátami. Tyto tlumivky jsou sice investičně nákladnější, ale jejich provozní náklady jsou výrazně nižší. U dekompenzačních tlumivek se ztrátami na úrovni 1% můžeme očekávat návratnost vynaložených investic do uvažovaného kabelového vedení s délkou 100 km cca do 2 let. Pro kratší vývody se bude návratnost investic výrazněji prodlužovat.

Pro vývod s délkou 50 km jsem v tabulce Tab. 33 uvedl přibližné investiční a provozní náklady dekompenzační tlumivky. Zde jsem zanedbal ztráty způsobené přenosem ztrátového výkonu tlumivek po vedení. Velikost těchto ztrát je nevýznamná.

Tab. 33 Odhadované investiční a provozní náklady na dekompenzaci kabelového vedení 3x120 mm² typu 22-AXEKVCE o délce 50 km (uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh)

Dekompenzační tlumivka	Ztráty dekompenzační tlumivky	Odhad ceny (tis. Kč)	Roční ztráty v tlumivkách (MWh)	Ocenění ztrát za rok (tis. Kč/rok)
2 MVar	1%	1300	175,2	245,28
2x1 MVar	1%	2100	175,2	245,28

9.4 Dekompensace nabíjecího kapacitního proudu

Jak již bylo zmíněno, celá problematika dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu může mít dva pohledy. Jeden pohled je legislativní a druhý je čistě ekonomický. Z pohledu provozovatele VN sítě je otázka snížení ztrát na vedení otázkou ekonomickou. Je však nutné určit, jaký vývod označíme za „dlouhý“ z hlediska ztrát způsobených kapacitním nabíjecím proudem a kdy je vhodné tento kapacitní proud dekompenzovat. Opět narážíme na problematiku znalosti nabíjecích kapacitních proudů jednotlivých vývodů. Z předchozích výsledků je zřejmé, že dekompenzace dlouhého kabelového vedení má ekonomické výhody. Dekompensace navíc snižuje i proudové zatížení vývodu, zejména mezi začátkem vývodu a místem instalace dekompenzační tlumivky. Při rozhodování o použití dekompenzace kabelového vedení budeme vycházet z ocenění ztrát na vedení, které jsou způsobeny nabíjecím kapacitním proudem, a z ocenění vlastních ztrát dekompenzační tlumivky.

Dekompenzační tlumivka má vlastní ztráty, které způsobuje průtok proudu vinutím zhášecí tlumivky, ztráty v magnetickém obvodu tlumivky a přídavné ztráty. Pro dekompenzaci je nutné sledovat velikost všech ztrát dekompenzační tlumivky. Tyto tlumivky jsou trvale zatížené, a proto velikost všech jejich ztrát ovlivňuje ekonomiku provozu. Při dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu vedení je základním požadavkem snížení ztrát a snížení proudového zatížení vedení. Velikost celkových ztrát tlumivky je úměrná jejímu reaktivnímu výkonu. Volba výkonu tlumivky je lineárně závislá na délce dekompenzovaného vývodu. Činné ztráty dekompenzační tlumivky jsem vyjádřil jako závislost na délce dekompenzovaného vývodu vtahem:

$$P_L = p\omega C_p U_f^2 L \quad (W; -, rad.s^{-1}, F.m^{-1}, V, m)$$

(9.16)

Kde	P_L	činné ztráty tlumivky
	p	poměrná hodnota činných ztrát k jalovému výkonu tlumivky
	ω	úhlová frekvence $2\pi f$
	C_p	hodnota fázové provozní kapacity vztažená na jeden metr vedení
	U_f	hodnota fázového napětí sítě
	L	celková délka kabelového vedení.

Jak již bylo uvedeno, ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem dle vztahu (9.4) mají kubickou závislost na délce vývodu. Z poměru ztrát vedení bez dekompenzace ke ztrátám dekompenzační tlumivky spolu se ztrátami na vedení při dekompenzaci (dle (9.5)) lze určit, zda pomocí dekompenzace dosáhneme celkového snížení ztrát. V případě, že poměr těchto ztrát je větší než jedna, docílíme instalací dekompenzačních tlumivek snížení ztrát. V případě, že je poměr menší než jedna, budou ztráty na vedení při dekompenzaci vyšší než bez dekompenzace. Je-li poměr ztrát roven právě jedné, nazývám tento poměr kritickým poměrem. V tomto případě nedojde k poklesu ani k nárůstu ztrát na vedení. Určením konkrétní délky vedení odpovídající kritickému poměru dostáváme hodnotu, kterou jsem označil jako kritickou délku vedení D_K . Kritická délka vedení udává, kdy pro daný typ vedení a daný typ dekompenzační tlumivky, budou celkové ztráty při instalaci dekompenzace stejné jako bez dekompenzace. V tabulkách Tab. 34, Tab. 35, Tab. 36 a Tab. 37 jsou uvedeny

kritické délky pro různá kabelová vedení. Vedení, která jsou delší, než je udávaná kritická délka, budou po instalaci dekompenzačních tlumivek vykazovat snížení ztrát. Pro snížení kritické délky vedení je nejefektivnější snížit ztráty v tlumivce, což ovšem znamená zvýšení investic. Další možností je optimalizovat počet dekompenzačních tlumivek.

Tab. 34: Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 1% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení

kabel 22-AXEKVCE					
S (mm ²)	R (Ω/km)	C (μF/km)	I _c (A/km)	Kritická délka vedení D _K	
				pro 1 tl (km)	pro 2 tl (km)
50	0.641	0.24	0.96	29	26
70	0.443	0.27	1.08	33	31
95	0.32	0.31	1.24	36	33
120	0.253	0.33	1.32	40	35
150	0.206	0.36	1.44	42	38
185	0.164	0.4	1.60	46	40
240	0.125	0.44	1.76	49	44
300	0.1	0.49	1.96	51	46
400	0.0778	0.55	2.19	55	49
500	0.0605	0.6	2.39	60	53
630	0.0469	0.68	2.71	64	57

Tab. 35: Vypočtené kritické délky kabelového vedení 35 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 1% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení

Kabel 35-AXEKVCE					
S (mm ²)	R (Ω/km)	C (μF/km)	I _c (A/km)	Kritická délka vedení D _K	
				pro 1 tl (km)	pro 1 tl (km)
50	0.641	0.13	0.83	40	35
70	0.443	0.14	0.89	46	41
95	0.32	0.16	1.02	50	45
120	0.253	0.17	1.08	55	49
150	0.206	0.18	1.14	59	53
185	0.164	0.2	1.27	63	56
240	0.125	0.22	1.40	69	61
300	0.1	0.24	1.52	73	66
400	0.0778	0.26	1.65	80	71
500	0.0605	0.29	1.84	86	77
630	0.0469	0.32	2.03	93	83

Tab. 36: Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 0,5% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení

kabel 22-AXEKVCE					
S (mm ²)	R (Ω/km)	C (μF/km)	I _c (A/km)	Kritická délka vedení D _K	
				pro 1 tl (km)	pro 1 tl (km)
50	0.641	0.24	0.96	21	19
70	0.443	0.27	1.08	24	21
95	0.32	0.31	1.24	26	23
120	0.253	0.33	1.32	28	25
150	0.206	0.36	1.44	30	27
185	0.164	0.4	1.60	32	28
240	0.125	0.44	1.76	35	31
300	0.1	0.49	1.96	37	33
400	0.0778	0.55	2.19	39	35
500	0.0605	0.6	2.39	42	38
630	0.0469	0.68	2.71	45	40

Tab. 37: Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV při optimalizaci dekompenzačních tlumivek a instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 0,5%

kabel 22-AXEKVCE							
S (mm ²)	R (Ω/km)	C (μF/km)	I _c (A/km)	Kritická délka vedení d a kapacitní proud vývodu I _c			
				D _K (km) pro 1 tl	I _c (A)	D _K (km) pro 2 tl	I _c (A)
50	0.641	0.24	0.96	16	15.3	17	16.3
70	0.443	0.27	1.08	18	19.4	19	20.5
95	0.32	0.31	1.24	19	23.5	21	26.0
120	0.253	0.33	1.32	21	27.7	22	29.0
150	0.206	0.36	1.44	22	31.6	24	34.5
185	0.164	0.4	1.60	24	38.3	25	39.9
240	0.125	0.44	1.76	26	45.6	27	47.4
300	0.1	0.49	1.96	28	54.7	29	56.7
400	0.0778	0.55	2.19	29	63.6	31	68.0
500	0.0605	0.6	2.39	32	76.6	34	81.4
630	0.0469	0.68	2.71	34	92.3	36	97.7

Na základě výsledků uvedených v tabulkách vychází dle očekávání optimalizovaná dekompenzace ekonomicky výhodnější než klasická, kde je nutné brát v potaz i splnění legislativních požadavků na dodržení stanoveného účinníku v předávacím místě. Zatímco u optimalizované dekompenzace je hlavním aspektem snížení výkonu dekompenzační tlumivky a tím i jejích ztrát, u klasické dekompenzace vyvolané legislativními požadavky můžeme ekonomiku dekompenzace ovlivnit pouze místem instalace tlumivky. Z hlediska optimalizace snížení ztrát i investičních nákladů je pak výhodné instalovat pouze jednu dekompenzační tlumivku. Návrh optimalizované dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu vedení představuje

mnohem složitější úlohu, než je klasická kompenzace účinníku v předávacím místě. Výsledky uvedené na jednoduchých příkladech však ukazují ekonomický význam uvedené problematiky.

9.5 Dekompenzace v městské kabelové síti

Městské kabelové sítě jsou zpravidla tvořeny kmenovým vedením s odbočkami. Z vedení jsou ve spínacích stanicích napájeny transformátory. V mnohých energetikách je pro kmenové vedení používán jednotný průřez kabelového vedení. Délka kmene dosahuje zpravidla délky od 3 km do 10 km. Dále je zde použito větší množství transformátorů. Tyto transformátory jsou elektrické stroje s odběrem induktivního jalového výkonu. Transformátory rovněž přispívají k dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu vedení.

Transformátor je charakterizován parametry nakrátko a naprázdno. Pro výpočet jeho odebíraného induktivního výkonu jsou důležité parametry naprázdno. Jedná se o proud naprázdno i_0 a výkon naprázdno P_0 . Proud naprázdno je zpravidla udáván v procentech. Pomocí proudu naprázdno a ztrát naprázdno můžeme určit hodnotu odebíraného jalového výkonu naprázdno.

$$Q_T = \sqrt{\left(\frac{i_0}{100} S_n\right)^2 - P_0^2} \quad (VAr; \%, VA, W)$$

(9.17)

Kde	Q_T	jalový výkon transformátoru při chodu naprázdno
	i_0	proud transformátoru naprázdno
	S_n	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru
	P_0	výkon transformátoru naprázdno.

Kabelová vedení svým nabíjecím kapacitním výkonem výrazným způsobem přispívají k překompenzování kabelové sítě VN. Proto u kabelových sítí není vhodné kompenzovat transformátory připojením kompenzačních kondenzátorů. Připojení odběrů s mírně induktivním charakterem napomáhá snižovat překompenzování kabelové sítě VN. Možnost řízení účinníku u připojených odběratelů se proto z hlediska provozovatele VN sítí jeví jako účinná metoda pro dekompenzaci kabelových sítí.

Z následujících příkladů je patrné, že distribuční transformátory a induktivní výkon napájecího transformátoru dekompenzují pouze relativně krátké úseky kabelového vedení.

Příklad 1:

- Distribuční transformátor 400 kVA, $i_0 = 0,6\%$, $P_0 = 1\text{kW}$
- Vypočtený induktivní výkon naprázdno je 2,18 kVAr.
- Jalový výkon transformátoru dekompenzuje 32 m kabelového vedení o průřezu 240 mm².

Příklad 2:

- Transformátor 110 kV/ 23 kV o výkonu 40 MVA, $i_0 = 0,15\%$, $P_0 = 20\text{kW}$
- Vypočtený induktivní výkon naprázdno je cca 57 kVAr.
- Jalový výkon napájecího transformátoru dekompenzujeme cca 1,2 km kabelového vedení o průřezu 240 mm².

Je nutné vzít v úvahu i skutečnost, že kompenzace jalového výkonu transformátorů v kabelové nebo smíšené síti přispívá k překompenzování VN sítí. Z tohoto hlediska lze tuto kompenzaci považovat za neefektivní. Avšak využití jalového výkonu transformátorů k dekompenzaci kapacitního nabíjecího proudu VN sítě přispívá ke snížení ztrát na vedení způsobených tokem nabíjecího proudu.

9.6 Snížení proudového zatížení vedení

Omezení absolutní hodnoty zatížení kabelového vedení přispívá ke snížení ztrát na vedení. Proudové zatížení ovlivňuje i hodnotu teploty vodičů. Při snížení proudového zatížení dochází k poklesu teploty vodiče, což se projevuje snížením hodnoty odporu vodiče. Řešení požadavku na snížení hodnoty proudového zatížení vývodů vede opět k problematice zjišťování hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu.

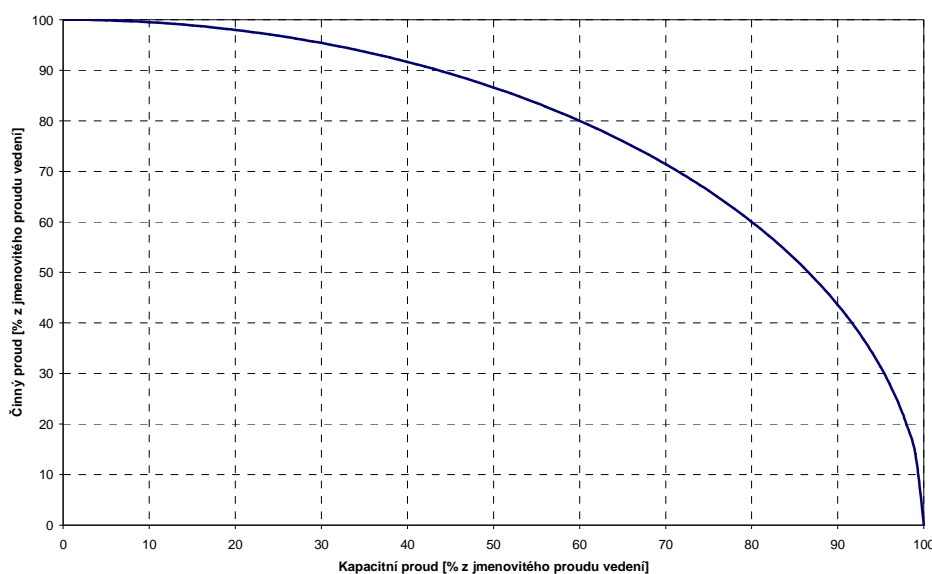
Užití dekompenzačních tlumivek pro snížení ztrát je výhodné především pro dlouhé vývody. Další záměry k užití dekompenzačních tlumivek mohou být vyvolány z důvodu snížení proudového zatížení vývodu o nabíjecí kapacitní proud. Maximální hodnota nabíjecího proudu vedení je vždy na počátku vedení. Tuto hodnotu jsem určil ze vztahu (9.2), kde za vzdálenost od počátku vedení „l“ jsem dosadil nulovou vzdálenost odpovídající počátku vývodu. Po úpravě vztahu (9.2) jsem získal rovnici pro výpočet maximálního fázového nabíjecího proudu vedení v ustáleném bezporuchovém stavu.

$$I_C = \omega C_p U_f L \quad (A; \text{rad.s}^{-1}, F.m^{-1}, V, m)$$

(9.18)

Kde

I_C	nabíjecí kapacitní proudu vedení
ω	úhlová frekvence $2\pi f$
C_p	hodnota fázové provozní kapacity vztažená na jeden metr vedení
U_f	fázová hodnota napětí sítě
L	celková délka kabelového vedení.



Graf 84 Procentní omezení přenosu činného proudu v závislosti na procentní hodnotě nabíjecího kapacitního proudu vedení

Běžný proud odběru má činný nebo mírně induktivní charakter. Zatížení kabelového vedení se skládá z nabíjecího kapacitního proudu, proudu činné zátěže a proudu induktivní zátěže. Induktivní a kapacitní proudy se navzájem eliminují. Proud činného zatížení se vektorově sčítá s kapacitním proudem. Ve svém důsledku to znamená, že nabíjecí kapacitní proud do velikosti cca 40% z dovoleného proudového zatížení vedení omezuje přenos činného proudu jen o cca 10% z dovoleného proudového zatížení vedení. Významné proudové omezení nastává až při hodnotě nabíjecího kapacitního proudu nad 70% z dovoleného proudového zatížení vedení (viz Graf 84).

10 ZÁVĚR

Výsledky práce mají jak teoretický, tak i praktický význam pro sítě VN. Práce byla orientována na analýzu způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění. Výzkum jsem opíral o analýzu poruchových stavů z hlediska různých způsobů uzemnění uzlu VN sítí a syntézu získaných i teoretických poznatků s požadavky provozovatelů na chránění uvedených sítí. Navázal jsem při tom na zkušenosti, které jsem získal při uplatnění patentů uvedených v 13.1. Jedná se o patent věnovaný řešení třífázové kompenzace zemních kapacitních proudů a symetrizace fázových napětí v sítích (systém SVS) a o patent zaměřený na zvýšení spolehlivosti zemních směrových ochran v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů (systém SRA).

Metodika výzkumu vycházela z analýzy chování základních parametrů sítě i jejích vývodů. Analyzoval jsem vybrané parametry sítě, které jsou ovlivněny fázovou hodnotou nabíjecího zemního kapacitního proudu. Chování vybraných parametrů jsem sledoval na vytvořeném matematickém modelu sítě, kde jsem mohl vytvářet různé provozní a poruchové stavy. Výsledky získané z matematického modelu jsem porovnával s daty získanými z reálného provozu VN sítě. Jednalo se především o změny fázových napětí a změny fázových proudů ve VN síti provozované s neúčinně uzemněným nebo izolovaným uzlem. U sledovaných parametrů se jednalo o amplitudové a fázové změny. Po té jsem se při hledání nových metod zaměřil na posouzení vhodnosti využití parametrů sítě, jakými jsou fázová napětí, fázové proudy, nulové složky napětí a nulové složky proudu. Základem bylo zkoumání chování jednotlivých složek napětí a jejich ovlivnění příčnými parametry sítě. Dalším krokem použitým při výzkumu byla syntéza. Syntézou výsledků získaných z analýzy vybraných parametrů sítě, teoretických rozborů a provozních požadavků jsem dospěl k návrhu nových metod pro stanovení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě a jednotlivých vývodů. V tomto kroku jsem zjišťoval chování VN sítě jako celku v závislosti na definovaných podnětech. Získané výsledky jsem pak ověřoval experimentálně na reálné síti.

Zvolená metodika výzkumu umožnila nalezení více metod pro zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu sítě i vývodu. Ukázala se jako vhodná i pro porovnání získaných výsledků a ověření jejich praktického použití.

10.1 Vyhodnocení výsledků výzkumu

Výsledky analýzy potvrzují vliv zemního kapacitního proudu vývodu na zemní ochrany především u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů. Pro rozsáhlé vývody, kde nabíjecí kapacitní proudy vývodů představují vyšší procentní hodnotu z celkového kapacitního proudu sítě, dochází k ovlivnění zemních ochran také v sítích s izolovaným nebo odporově uzemněným uzlem. Z tohoto důvodu je nutné se i v těchto sítích zabývat hodnotou zemního kapacitního proudu vývodu. Právě pro vývody s extrémně vysokou hodnotou zemního kapacitního proudu představují chyby

měření nulové složky napětí a nulové složky proudu další negativní ovlivnění funkce zemních směrových ochran. Při nastavování ochran v těchto vývodech je pak nutné zohlednit i možné chyby měření. Proto jsem se v rámci výzkumu věnoval hledání nové prakticky použitelné metody zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu v sítích s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem. Zaměřil jsem se na jevy, které jsou pozorovány v sítích VN při zemním spojení. Jedná se zejména o změny fázových proudů na vývodech při zemním spojení a vliv fázové zemní kapacitní nesymetrie na provoz VN sítě.

Na základě výsledků výzkumu navrhuji možnosti praktického využití nových metod pro určení hodnoty zemních kapacitních proudů vývodů nebo celé sítě. Nové způsoby jsem prakticky ověřil v reálné síti, a to především z pohledu různých variant výpočtových metod. Jedná se o nepřímou metodu, změnovou, rozdílovou metodu a metodu rychlého odhadu.

Nepřímá metoda určení hodnoty zemních kapacitních proudů sítě je založená na vytváření umělé fázové zemní kapacitní nesymetrie. Je vhodná pouze pro použití v sítích s izolovaným uzlem. Její použití se jeví jako výhodnější v porovnání s dosud používanou metodou umělého vytváření zemního spojení s přímým měřením hodnoty poruchového proudu. Vzhledem k tomu, že se jedná se o nepřímou metodu, není nutné v síti vytvářet umělé zemní spojení. Tato nepřímá metoda je tedy bezpečnější a neohrožuje izolační stav sítě na rozdíl od používané přímé metody. Uspokojivých výsledků bylo dosaženo i při běžném provozním měření, kdy měřená napětí byla odečítána z běžného přenosného voltmetru s postupným měřením napětí v jednotlivých fázích na sekundárních stranách napěťových měničů. Při současném měření napětí všech tří fází, například síťovým analyzátozem, postačuje jen krátká doba měření. Zpravidla postačí připojení přídavné kapacity na několik sekund. K praktickému využití jsem metodu doplnil o uživatelský software pro výpočet hodnoty zemní fázové kapacity a zemního fázového proudu z naměřených hodnot fázových napětí v síti bez připojené přídavné kapacity a s připojenou přídavnou kapacitou. Nepřímou metodu jsem několikrát úspěšně aplikoval v průmyslových sítích. Zájem o uvedenou metodu očekávám také v zahraničí, kde při přechodu z izolovaného uzlu sítě na kompenzaci zemních kapacitních proudů je nutné stanovit výkony zhášecí tlumivky.

Po instalaci jednoúčelové automatiky, nebo po implementaci metody do řídicího systému, lze pro pravidelnou kontrolu rozsahu sítě celý proces zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu zautomatizovat. Popsaný systém pak můžeme využívat k dlouhodobému sledování rozsahu sítě. Automatika umožňuje nejen sledování hodnoty zemního kapacitního proudu sítě, ale může sledovat i změny v hodnotách svodového proudu. Použití automatiky nevyžaduje přítomnost obsluhy a zároveň dochází k maximálně možnému zkrácení doby měření.

Změnová metoda, rozdílová metoda a metoda rychlého odhadu jsou založeny na rozboru změny fázových proudů při zemním spojení. Jsou zaměřeny na možnost

zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu v sítích s izolovaným nebo nepřímo uzemněným uzlem. Umožňují stanovit hodnotu nabíjecího zemního kapacitního proudu vývodu a výpočet hodnoty proudového příspěvku vývodu k celkovému zemnímu kapacitnímu proudu sítě. Nevyžadují instalaci měřících přístrojů v místě poruchy. Proto je lze využívat i při běžném zemním spojení v síti VN a není nutné vytvářet umělá zemní spojení. Potřebná data lze získat například ze systému monitorujícího zatížení vývodů z rozvodny. Jak již bylo uvedeno, znalost hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu je velmi důležitá pro nastavení zemních směrových ochran v sítích s kompenzací zemních kapacitních proudů a v sítích s izolovaným uzlem. V extrémně rozsáhlých sítích je znalost zemního kapacitního proudu důležitá i u sítí s uzlem uzemněným přes nízkohomový odpor. Vlivem extrémně vysoké hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu může i v těchto sítích docházet k ovlivnění funkce zemních nadproudových ochran.

V rámci ověřování možnosti praktického použití nových metod bylo dosaženo nejlepších výsledků při použití rozdílové metody. Tato metoda vychází z rozdílu kvadrátů fázových proudů sledovaného vývodu při zemním spojení ve VN síti. Další metoda označená jako změnová není pro praktické použití vhodná, vzhledem k tomu, že v některých případech nekonverguje k výsledku. Poslední metoda, kterou jsem nazval metodou rychlého odhadu, je vhodná pouze na rychlé orientační použití. Pro praktické použití výše popsaného způsobu zjišťování hodnoty zemní fázové kapacity vývodu proto doporučuji především rozdílovou metodu. Pro jednoduchou aplikaci rozdílové metody jsem napsal software, který umožňuje výpočet hodnoty zemní fázové kapacity vývodu. Popis softwaru je uveden v příloze č. 5 této práce.

Dalším produktem výzkumu je návrh nového způsobu korekce vypočtených hodnot zemních kapacitních proudů na jmenovité hodnoty napětí v síti. Tato korekce eliminuje i vliv odporu zemního spojení. Jedná se o přepočtení nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy na hodnotu tohoto proudu při jmenovitých parametrech napětí sítě a nulovém odporu zemní poruchy. Zavedením uvedeného přepočtu při praktickém stanovení zemního kapacitního proudu vývodů i celé sítě můžeme eliminovat vliv odporu zemní poruchy na přesnost výsledků. Zpřesnění výsledků je důležité zejména v případech, kdy hodnotu zemního kapacitního proudu určujeme při reálném zemním spojení v síti a kdy neznáme velikost odporu zemní poruchy. Např. u rozdílové metody umožňuje výše popsaný přepočet vyhodnocovat velikost hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu bez vlivu odporu zemní poruchy. Jak jsem již uvedl, v příloze č. 5 je popsán software na výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu rozdílovou metodou. Tento software zahrnuje i možnost zpřesnění hodnoty nabíjecího kapacitního proudu eliminací vlivu odporu zemního spojení.

Výzkum jsem zakončil vyhodnocením vlivu nabíjecího kapacitního proudu vývodu na ekonomiku rozvodu elektrické energie v síti VN, a to u vývodů, kde hodnoty nabíjecího kapacitního proudu nabývají vysoké hodnoty. Vysoké hodnoty nabíjecího kapacitního proudu zvyšují ztráty na vedení, které lze částečně eliminovat

dekompenzací. V této části navazují na předchozí závěry, které se týkají stanovením hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodů. Přitom nezáleží na způsobu uzemnění uzlu sítě. Návrh dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu s ohledem na snížení ztrát musí zohledňovat počet dekompenzačních tlumivek, jejich výkon a místo instalace. Dalším velmi důležitým ukazatelem jsou vlastní ztráty instalované dekompenzační tlumivky. Tyto ztráty ovlivňují využitelnost dekompenzačních tlumivek pro snížení celkových ztrát na vedení. Problematiku dekompenzace je nutné řešit individuálně pro každou síť. Poznatky uvedené v této práci slouží jako návod pro postup při řešení dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu. Odvozené vztahy v kapitole 9 jsou určeny pro výpočet výkonu a počet dekompenzačních tlumivek pro jednoduchý paprskový vývod.

V našich podmínkách není často problematika dekompenzace nabíjecích kapacitních proudů v sítích VN řešena. V současné době je ojedinele řešena v průmyslových podnicích nebo u lokálních VN sítí s připojenými lokálními zdroji. S touto problematikou jsem se setkal zejména v případech eliminace nabíjecího kapacitního proudu z důvodů překompenzování odebíraného jalového výkonu. Vliv nabíjecího proudu na ekonomiku přenosu elektrické sítě je téma budoucnosti a lze očekávat, že s neustále rostoucím podílem kabelových vedení bude nabývat na významu. Vliv výběru místa instalace dekompenzačních tlumivek a optimalizace výkonu dekompenzačních tlumivek nebyla dosud řešena komplexně. Znalost nabíjecích kapacitních proudů jednotlivých vývodů umožňuje určit vývody, kde tyto proudy dosahují velmi vysokých hodnot a lze zde tedy očekávat možnost zvýšených ztrát.

10.2 Resumé (CZ)

Moderní zařízení poskytují přesnější a podrobnější informace o provozu VN sítí. Výsledky výzkumu vycházející z analýzy aktuálních poměrů v síti umožňují zvyšovat úroveň poznatků a směřovat požadavky na vývoj nových technologií využívaných v provozu i chránění sítí. Přispívají tak ke zvýšení bezpečnosti a provozní spolehlivosti sítí VN.

Znalost hodnoty zemního kapacitního proudu sítě je jedním z nejdůležitějších parametrů pro správné nastavení systému chránění a bezpečného provozu VN sítě. Proto byl cíl této práce zaměřen na rozšíření možností zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu sítě a hodnoty zemního kapacitního proudu u jednotlivých vývodů v síti. Výzkum pro stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu zaměřený na využití hodnoty fázové zemní kapacity sítě nebo jejich jednotlivých vývodů vycházel z empirických poznatků, provedených analýz a získaných teoretických výsledků. Produktem výzkumu jsou dvě v praxi použitelné nové metody stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu. První metoda je nepřímá a je určena pro zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu v síti s izolovaným uzlem. Druhou metodu jsem nazval rozdílovou. Ta je určena pro zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů a je vhodná pro všechny typy sítí s neúčinně uzemněným nebo izolovaným uzlem. Pro tyto sítě jsem zároveň navrhl novou metodu ke zpřesnění stávajícího způsobu určování fázové zemní kapacity vývodu. V praxi se používají i jiné metody na zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Nově navržené metody rozšiřují možnosti zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu.

S rozvojem kabelových sítí a postupným nahrazování venkovních vedení kabelovým vedením dochází k výraznému nárůstu hodnoty fázového zemního kapacitního nabíjecího proudu vedení. V práci jsem proto dále rozpracoval vliv nabíjecího kapacitního proudu vedení na velikost ztrát. V některých případech lze zvýšené ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem eliminovat i pouhou změnou konfigurace sítě. Ne vždy je však možné tohoto opatření využít. Proto jsem se věnoval i problematice dekompenzace fázového zemního kapacitního proudu. Poukázal jsem na vliv místa instalace dekompenzačních zařízení na vlastní ztráty vedení. Tento náhled na dekompenzaci nabíjecích fázových zemních kapacitních proudů má při provozu rozsáhlých kabelových sítí i ekonomický význam. Z provozního, bezpečnostního i ekonomického hlediska je vhodné, aby pro řízení sítí VN byla k dispozici alespoň přibližná hodnota zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů.

10.3 Resume (GB)

Modern equipment provides more accurate and more detailed information on MV networks operation. The results of the research based upon an analysis of contemporary conditions in the networks enable to increase the level of knowledge, and to aim the requirements for new technology development used in both, network operation and network protection. Thus, they contribute to increase in safety and operational reliability of MV networks.

The establishment of an earth capacitive current value in a network is one of the most essential parameters for the correct protection system setting and safe MV network operation. Therefore, the aim of this thesis is focused on expansion of methods of the network's earth capacitive current value determination and the determination of each feeder's earth capacitive current value in the network.

Focusing on the utilization of the value of network's phase earth capacity or its constituent feeders, the research for earth capacitive current establishment proceeds from empirical knowledge, performed analyses and gained theoretical results verified in practical use. The products of the research are two new methods of earth capacitive current value establishment, which can be used in practice. The first method is indirect and is designated for establishment of earth capacitive current value in networks with insulated neutral point. The second method is called 'differential'. This is designated for each feeder's earth capacitive current value establishment and is suitable for all kinds of networks with ineffectively earthed or insulated neutral point. For these networks, a new method was drafted to give more accuracy to existing means of feeder's phase earth capacity. In practice, other methods for feeder's earth capacitive current establishment are also used. The newly designed methods expand possibilities of earth capacitive current value establishment.

With the development of cable networks and gradual replacement of rural overhead lines by cable lines, there is a rapid increase in phase earth capacitive charging current in lines. The thesis elaborates the impact of earth capacitive charging current on the loss extend. In some cases, increased losses in lines caused by earth capacitive charging current can be eliminated only by a change in network configuration. However, this measure cannot be always used. Therefore, the issue of phase earth capacitive current decompensation is elaborated. Attention is called to the impact of the point of decompensation equipment installation on line losses. This approach to decompensation of earth capacitive charging currents has an economic contribution for extensive cable networks operation as well. From the operational, safety, and economic point of view, it is appropriate to MV network operation to have at least an approximate value of each feeder's earth capacitive current at one's disposal.

10.4 Přínosy disertační práce

Výsledky práce lze aplikovat na reálný provoz sítí VN. Nové metody zaměřené na zjišťování a zpřesnění hodnoty zemního kapacitního proudu sítě i vývodů umožní zvýšení přesnosti nastavení zemních ochran. Důsledkem bude vyšší spolehlivosti ochran při detekci průtoku poruchového proudu zemního spojení v síti VN.

Zjišťování vývodů s extrémně vysokou hodnotou nabíjecího kapacitního proudu přispěje k odhalení vývodů, kde vlivem průtoku nabíjecího kapacitního proudu vznikají vyšší ztráty. Tyto ztráty je možné eliminovat a tím přispět ke zlepšení ekonomiky provozu VN sítí. V práci jsou popsány dva pohledy na dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu vývodu. Ekonomické vyhodnocení ztrát stanovuje výhodnost použití dekompenzace v daném vývodu.

Na základě stanovení cílů disertační práce lze přínosy disertační práce rozdělit na několik částí. První část tvoří souhrn teoretických a praktických poznatků, z kterých vychází výzkum pro nalezení nové metody určování hodnoty zemního kapacitního proudu. Rozbor uvedených poznatků mi umožnil objektivně posoudit, zda navrhované metody mohou být prakticky použitelné a případně upozornit na technická omezení jejich použitelnosti.

Další část práce zahrnuje návrh nové nepřímé metody pro určení hodnoty zemního kapacitního proudu sítě s izolovaným uzlem. Nepřímá metoda určování hodnoty zemního kapacitního proudu v sítích s izolovaným uzlem vychází z teorie nesymetrie fázových napětí v síti VN s neúčinně uzemněným nebo izolovaným uzlem. Tuto metodu jsem popsal teoreticky a zároveň jsem ji dopracoval až k praktickému použití. Pro praktické použití jsem vytvořil SW, který použití této metody velmi usnadňuje i v běžném provozu. Možnost využití uvedené nepřímé metody se při praktickém ověřování prokázala. Oproti přímé metodě zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu se při použití nepřímé metody snižuje riziko vzniku vícefázového zemního zkratu.

Třetí částí práce se zabývá porovnáním zmíněných metod a lze ji označit jako doporučení nové rozdílové metody pro určování zemního kapacitního proudu ve vývodech v síti s izolovaným nebo neúčinně uzemněným uzlem. Metoda rychlého odhadu je vhodná pouze pro orientační stanovení hodnoty zemního kapacitního proudu ve vývodech. Změnovou metodu vzhledem k problémům s divergencí nelze pro praktické použití doporučit. Rozdílovou metodu však lze doporučit jako nový způsob určování hodnoty zemního kapacitního proudu u všech typů sítí, kromě sítí s přímo uzemněným uzlem. Nový návrh zjišťování zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů rozdílovou metodou umožňuje z měřených provozních dat (fázových napětí a fázových proudů ve vývodech) určit hodnoty zemního kapacitního proudu jednotlivých vývodů.

Čtvrtou částí je návrh způsobu zpřesnění stávajících metod určení velikosti zemního kapacitního proudu. Pro získání přesnější hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu musíme uplatnit přepočtení nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy na hodnotu tohoto proudu při jmenovitých parametrech napětí sítě a nulovém

odporu zemní poruchy. Zpřesnění lze použít jak u stávající metody založené na měření hodnoty nulové složky proudu vývodu tak, i u rozdílové metody.

Poslední část disertační práce se zabývá ztrátami na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem vývodu. Jedná se opět o problematiku, která z tohoto pohledu nebyla dosud řešena. Uvedená problematika úzce souvisí s nabíjecím kapacitním proudem vývodu. Důležitým závěrem je, že ztráty na vedení jsou ovlivněny místem instalace dekompenzačních tlumivek a volbou jejich výkonu. Tato problematika bude s rostoucím podílem kabelových vedení nabývat na větším významu. Hlavní využití lze očekávat v energetikách, kde dochází k nahrazování dlouhých venkovních linek kabelovým vedením. Tento trend je dnes patrný zejména v severských zemích. Postupem času lze očekávat, že i v našich podmínkách bude obdobná problematika více než aktuální.

11 DOPORUČENÍ K DALŠÍMU VÝZKUMU

Velikost zemního kapacitního proudu sítě a zemního kapacitního proudu v jednotlivých vývodech ovlivňuje celkovou spolehlivost systému chránění a bezpečnost provozu VN sítí. Doporučení k dalšímu výzkumu je tedy soustředěno na možnosti aplikování výsledků práce pro praktické využití v této oblasti. Výsledky práce je proto vhodné směřovat do oblasti automatizace provozu sítí VN.

V tomto směru je možné soustředit další výzkum na automatické sledování a vyhodnocování změn rozsahu sítě. Těmto změnám lze např. přizpůsobovat nastavení zemních směrových ochran.

Stanovení celkové hodnoty zemního kapacitního proudu v síti s odporově uzemněným uzlem je stále nejvíce problémové. Zde je možné zaměřit výzkum na návrh elektronického přístroje, který by např. na základě injektování proudu do sítě umožnil stanovit celkovou hodnotu zemního kapacitního proudu sítě.

Během provozu je možné rovněž včas vyhodnotit stav, kdy hodnota ochranného uzemnění v síti neodpovídá bezpečné hodnotě dotykového napětí při zemním spojení. Na základě této informace lze přistoupit k opatřením, která opět zajistí bezpečný provoz sítě. Tímto opatřením může být pouhá změna konfigurace sítě nebo i radikálnější způsoby, např. snížení hodnoty nebezpečného dotykového napětí úpravou ochranného uzemnění, případně změnou způsobu uzemnění uzlu sítě nebo změnou systému chránění.

12 POUŽITÁ LITERATURA

12.1 Odborná literatura

- [1] GULDBRAND, A. *Earth Faults in Extensive Cable Network*. Lund University, Sweden. 2009. ISBN 978-91-88934-49-9.
- [2] LEHTONEN, M. HAKOLA, T. *Neutral Earthing and Power System Protection*. ABB Transmit Oy. 1996. ISBN 952-90-7913-3.
- [3] MAYER, D. *Úvod do teorie elektrických obvodů*. SNTL/ALFA, Praha. 1981. ISBN 04-505-81.
- [4] MAYER, D., POLÁK, J. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. SNTL/ALFA, Praha. 1983. ISBN 04-523-83.
- [5] REISS, L., MALÝ, K. PAVLÍČEK, Z., BÍZIK, J. *Teoretická elektroenergetika II*. SNTL/ALFA, Bratislava. 1978.
- [6] REKTORYS, K. a spol. *Přehled užití matematiky*. SNTL, Praha. 1981. ISBN 04-003-81.
- [7] VITÁSEK, E. *Numerické metody*. SNTL, Praha. 1987. ISBN 04-009-87.

12.2 Normy

- [8] NORMA ČSN 33 3070. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. 1981.
- [9] NORMA ČSN EN 50160 ed. 3. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. 2011.
- [10] NORMA ČSN EN 61936-1 Oprava 1. *Elektrické instalace nad AC 1 kV – část 1: Všeobecná pravidla*. 2012.
- [11] NORMA ČSN EN 50522. *Uzemňování elektrických instalací AC nad 1 kV*. 2011.

12.3 Patenty

- [12] PATENT č. 296038. *Zapojení pro kompenzaci činné a jalové složky proudu v místě zemního spojení a vyrovnávání fázových napětí v bezporuchovém stavu sítě*. Původce: ŽÁK, F., Datum udělení patentu: 27. 10. 2005.
- [13] PATENT č. 299236. *Způsob zvyšování spolehlivosti zemních ochran a zapojení k jeho provádění*. Původce: ŽÁK, F., Datum udělení patentu: 15. 4. 2008.

13 PŘEHLED PUBLIKACÍ A JINÝCH AKTIVIT V RÁMCI DOKTORSKÉHO STUDIA

13.1 Seznam udělených patentů

- [1] Název: „*Circuit and method for Compensating Capacitive Earth Currents in Networks.*“
Původce: Ing. František Žák
Číslo dokumentu: EP2130277
Datum udělení patentu: 19. 6. 2013.
- [2] Název: „*Způsob a zapojení pro provozování elektrických sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů, sítí s vysokookhmovým uzemněním nebo sítí s izolovaným uzlem při výskytu zemní poruchy.*“
Původce: Ing. František Žák
Číslo dokumentu: 299798
Datum udělení patentu: 20. 10. 2008.
- [3] Název: „*Způsob zvyšování spolehlivosti zemních ochran a zapojení k jeho provádění.*“
Původce: Ing. František Žák
Číslo dokumentu: 299236
Datum udělení patentu: 15. 4. 2008.
- [4] Název: „*Zapojení pro kompenzaci činné a jalové složky proudu v místě zemního spojení a vyrovnávání fázových napětí v bezporuchovém stavu sítě.*“
Původce: Ing. František Žák
Číslo dokumentu: 296038
Datum udělení patentu: 27. 10. 2005.

13.2 Publikační činnost mezinárodní, recenzovaná

- [5] ŽÁK, F. *Determination of The Value of The Capacitive Earth-fault Current in Distribution Networks Operated with The Isolated Neutral Point.* In Transactions on Electrical Engineering, článek byl přijat a bude publikován 30. 6. 2014. ISSN 1805-3386.
- [6] ŽÁK, F. *Operation of Distribution Networks.* In Dienluc, Vietnam, březen 2012. ISSN 0868-361X.

13.3 Publikační činnost v tuzemsku, recenzovaná

- [7] ŽÁK, F. *Nová nepřímá metoda měření hodnoty zemního kapacitního proudu.* In ELEKTRO, článek byl přijat a bude publikován 30. 10. 2014. ISSN 1210-0889.
- [8] ŽÁK, F. *Změny fázových proudů v distribučních sítích při zemním spojení.* In ELEKTRO, duben 2014. ISSN 1210-0889.
- [9] ŽÁK, F. *Vliv používání moderních světelných zdrojů na síť.* In SVĚTLO, březen 2013. ISSN 1212-0812.

13.4 Příspěvky na tuzemských, recenzovaných, mezinárodních konferencích

- [10] NOHÁČOVÁ, L., ŽÁK, F., MERTLOVÁ, J. *Eliminace vlivu nesymetrie příčných parametrů.* In Proceedings of the 14th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2013. Ostrava: VSB - Technical University, 2013. s. 479-483. ISBN: 978-80-248-2988-3.
- [11] NOHÁČOVÁ, L., ŽÁK, F., MERTLOVÁ, J. *Vliv nesymetrie příčných parametrů – identifikace a eliminace v distribučních sítích.* In Proceedings of the 18th Expert Technical Conference Electric Power Engineering 2013. Poděbrady: EGÚ Praha Engineering, a.s., 2013. s. 1-10. ISBN: 978-80-8774-10-6.

13.5 Příspěvky na zahraničních konferencích

- [12] VANČATA, P., ŽÁK, F. *Verbesserung der Systemfunktion in gelöschten Netzen – Benutzung der Sekundärwiderstände*. In VDE 2014: Konferenz Nürnberg: 3.ETG „Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV“, příspěvek byl přijat, bude publikován 16. 9. 2014 a prezentován 16. - 17. 9. 2014.
- [13] VANČATA, P., ŽÁK, F. *Einsatzmöglichkeiten und Praxis-Erfahrungen mit der Erdung der erdschlussbetroffenen Phase*. In VDE 2014: Konferenz Nürnberg: 3.ETG „Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV“, příspěvek byl přijat do hlavní sekce, bude publikován 16. 9. 2014 a prezentován 16. - 17. 9. 2014.

13.6 Příspěvky na tuzemských mezinárodních konferencích

- [14] ŽÁK, F. *Kompenzace sítí*. Mezinárodní konference ČEZ Distribuční služby - Trendy energetiky v evropském kontextu IX, Špindlerův Mlýn, 16. -17. 4. 2014.
- [15] ŽÁK, F. *Zjišťování hodnoty zemního kapacitního proudu v distribučních sítích*. ČBÚ, MONTANEX: Elektrická zařízení používaná při hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, jejich bezpečnost a nové trend, Ostravice, 24. -25. 4. 2014.
- [16] ŽÁK, F. *Jednofázové zemní poruchy, záznamy jednofázových poruch v distribuční síti*. ČBÚ, MONTANEX: Elektrická zařízení používaná při hornické činnosti a činnosti prováděné hornickým způsobem, jejich bezpečnost a nové trendy, Ostrava, 27. - 28. 4. 2010.

13.7 Příspěvky na tuzemských konferencích

- [17] ŽÁK, F. *Zemní spojení a kompenzace*. ČK CIRED – skupina „Ochrany“, 31. schůzka skupiny, příspěvek byl přijat a bude prezentován, Věstonice, 28. - 29. 5. 2014.
- [18] ŽÁK, F. *Dekompenzace zemního kapacitního nabíjecího proudu*. ČK CIRED – skupina „Ochrany“, 30. schůzka skupiny, Tábor, 4. 11. 2013.
- [19] ŽÁK, F. *Uzemňování fáze se zemní poruchou*. ČK CIRED - skupina „Ochrany“, 29. schůzka skupiny, Věstonice, 27. - 28. 5. 2013.
- [20] ŽÁK, F. *Provoz uzlu. Systém uzemňování fáze se zemní poruchou. Ostrovní provoz: zdroje, nechtěné ostrovní provoz, přetoky výkonů*. IX. ročník Odborného semináře v Třeboni, EGE, spol. s r.o., Třeboň, 22. 10. - 24. 10. 2013.
- [21] ŽÁK, F. *Základní způsoby uzemnění uzlu sítě. Bezpečnost provozu distribuční sítě. Problematika Smart Grids. Popis distribuční sítě ve vybraných lokalitách v Evropě i ve světě*. VIII. ročník Odborného semináře v Třeboni, EGE, spol. s r.o., Třeboň, 30. 10. - 1. 11. 2012.
- [22] ŽÁK, F. *Základní způsoby uzemnění uzlu sítě, zkratky a zemní spojení, vztahy a výpočty elektrických veličin při poruchových stavech. Fotovoltaické elektrárny. Ostrovní provoz. Evropské VN sítě*. VII. ročník Odborného semináře v Třeboni, EGE, spol. s r.o., Třeboň, říjen 2011.

13.8 Pedagogická činnost

13.8.1 Přednášky a školení

- [23] ŽÁK, F., VANČATA, P. *Compensation of earth capacitive currents in Vietnam*. Školení zahraničních odborníků, EGE, spol. s r.o., České Budějovice, květen 2014.
- [24] ŽÁK, F. *Provoz uzlu distribučních sítí VN*. Přednáška, ZČU, říjen 2013.
- [25] ŽÁK, F. *Zemní spojení a lokalizace poruch*. Přednáška, ZČU, říjen 2012.
- [26] ŽÁK, F. *Earth Fault in Distribution Networks and Means of Neutral Point Earthing*. Školení zahraničních odborníků, EVN Ho Chi Minh City, Vietnam, říjen 2012.
- [27] ŽÁK, F. *Problematika uzemnění uzlu sítě a poruchové stavy ve VN síti*. Školení krajských inspektorů bezpečnosti práce, SÚIP, Opava, červen 2012.
- [28] ŽÁK, F. *Problematika uzemnění uzlu sítě a poruchové stavy ve VN síti*. Školení provozních pracovníků EDU ČEZ, Dukovany, červen 2012.
- [29] ŽÁK, F. *Koncepce provozu uzlu transformátorů 110/22 kV a systém chránění vývodů 22 kV*.

Přednáška, ZSE, Bratislava, červen 2012.

- [30] ŽÁK, F. *Earth Fault in Distribution Networks and Means of Neutral Point Earthing*. Školení zahraničních odborníků, EVN Hanoi, Vietnam, květen 2012.
- [31] ŽÁK, F. *Operation of Distribution Networks and a Neutral Point Earthing*. Školení zahraničních odborníků, EGE, spol. s r.o., České Budějovice, květen 2012.
- [32] ŽÁK, F. *Provozu uzlu. Systém uzemňování fáze se zemní poruchou. Bezpečnost a rizika úrazu elektrickým proudem při zemním spojení*. Školení provozních pracovníků PRE a.s., Tuchlovice, leden 2012.

13.8.2 Vedení diplomových prací

- | | | | |
|------|------|--|-------------------|
| [33] | 2014 | <i>Analýza a simulace zemních poruch v distribučních sítích VN.</i> | Jiří Škrleta |
| [34] | 2014 | <i>Zemní ochrany v distribučních sítích.</i> | Aleš Vozka |
| [35] | 2014 | <i>Přechod z přímo uzemněného uzlu sítě na kompenzaci zemních kapacitních proudů.</i> | Jakub Vaněk |
| [36] | 2014 | <i>Dekompenzace nabíjecího kapacitního proudu vedení.</i> | Pavel Hawelka |
| [37] | 2013 | <i>Návrh řešení provozu uzlu kabelových sítí VN.</i> | Jan Srbený |
| [38] | 2013 | <i>Nesymetrie v sítích VN, vliv uspořádání vodičů a kabelových vedení.</i> | Pavla Zahálková |
| [39] | 2013 | <i>Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny – návrh lokální úpravy sítě VN.</i> | Petr Zeman |
| [40] | 2012 | <i>Způsoby provozování uzlů elektrických sítí.</i> | David Jílek |
| [41] | 2012 | <i>Vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny – návrh lokální úpravy sítě VN.</i> | Martin Buršík |
| [42] | 2012 | <i>Ovlivňování sítí VN přenosem poruch ze sítí VVN.</i> | Vlastimil Souček |
| [43] | 2011 | <i>Návrh lokálních úprav sítě VN pro vyvedení výkonu z fotovoltaické elektrárny.</i> | Jan Kočí |
| [44] | 2011 | <i>Vliv nesymetrie fázových napětí na provoz distribuční sítě.</i> | Jiří Papay |
| [45] | 2011 | <i>Porovnání vlivu způsobu uzemnění uzlu sítě na ekonomické dopady.</i> | Tomáš Vrchota |
| [46] | 2010 | <i>Způsob provedení přechodu izolované sítě na uzemněnou s uzlem sítě přes plynule nastavitelnou tlumivku.</i> | Jan Lála |
| [47] | 2009 | <i>Zvýšení spolehlivosti zemních ochrany v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů.</i> | Ladislav Maroušek |
| [48] | 2009 | <i>Přechod izolované sítě na síť s uzlem uzemněným přes plynule laditelnou zhashecí tlumivku.</i> | Jan Bíbr |

13.9 Tvorba aplikačních SW

- [49] Vývoj SW pro telemechaniky RTU ABB 560: ARNT – řízení napětí transformátorů 110 kV/22 kV (35 kV), ALZT – automatika ladění zhashecích tlumivek, ARNT – automatika připínání sekundárního odporu.
- [50] Vývoj SW pro telemechaniku RTU ABB 210, 560: TRONIC – hlídání regulace napětí (přepínání odboček) napájecích transformátorů 110kV/vn.
- [51] SW Borland C++: IFV pro modelování poruchových stavů v distribuční síti.
- [52] SW Borland C++: Výpočet zemní fázové kapacity vedení.
- [53] SW Borland C++: Nová metoda přibližného určení zemního kapacitního proudu v síti s izolovaným uzlem.
- [54] SW Borland C++: Software pro výpočet zemní fázové kapacity vedení.
- [56] SW Borland C++: Software pro výpočet I_c rozdílovou metodou.
- [56] SW Borland C++: Výpočet nastavení zemních směrových ochrany typu GSC.

14 SEZNAM GRAFŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

14.1 Seznam grafů

Graf 1 Změny okamžitých hodnot fázových napětí při jednofázovém odporovém zkratu v síti s přímo uzemněným uzlem	8
Graf 2 Změny efektivních hodnot fázových napětí na sekundární straně NN distribučního transformátoru při jednofázovém odporovém zkratu v síti VN s přímo uzemněným uzlem	8
Graf 3 Okamžité hodnoty fázových napětí v době propalování zemní poruchy v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem a následným rozšířením poruchy na třífázový zkrat, hodnoty fázových napětí jsou uvedeny v procentních hodnotách jmenovitého sdruženého napětí sítě	10
Graf 4 Okamžité hodnoty fázových proudů vývodu v době zemního spojení v síti s uzemněným uzlem přes uzlový odporník se jmenovitým proudem 1000 A.....	10
Graf 5 Okamžité hodnoty fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem v době vypnutí zemního spojení (bez popisu os)	12
Graf 6 Změny fázových napětí vyvolané zapnutím zátěže v síti 6 kV s izolovaným uzlem	12
Graf 7 Změny fázových napětí vyvolané změnou zatížení připojené technologie v síti 6 kV s izolovaným uzlem	13
Graf 8 Změny sdružených napětí vyvolané změnou fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem odpovídající změnám na Graf 7	13
Graf 9 Okamžité hodnoty fázových napětí v síti 6 kV s izolovaným uzlem v době vypnutí zemní poruchy a následný vznik ferorezonance	14
Graf 10 Zbytkový proud zemního spojení s uvedenými hodnotami proudu vyšších harmonických	15
Graf 11 Časové průběhy fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v době vzniku zemního spojení	16
Graf 12 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v době ukončení přerušovaného zemního spojení.....	16
Graf 13 Změny fázových napětí a nulové složky napětí při ladění zhášecí tlumivky v nesymetrické síti 35 kV	17
Graf 14 Změny fázových napětí v síti 22 kV s uzemněným uzlem přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku v okamžiku poruchy v napájecí síti 110 kV	17
Graf 15 Vliv nabíjecího zemního kapacitního proudu kabelové sítě na překompenzování odebíraného jalového výkonu induktivního charakteru v distribuční síti 22 kV v pracovní den, kapacitní charakter jalového výkonu má zápornou hodnotou Q_T _avg	26
Graf 16 Vliv nabíjecího zemního kapacitního proudu kabelové sítě na překompenzování odebíraného jalového výkonu induktivního charakteru v distribuční síti 22 kV v den pracovního klidu, kapacitní charakter jalového výkonu má zápornou hodnotou Q_T _avg.....	27
Graf 17 Časový průběh fázových napětí a fázových proudů při zemním spojení v síti 6 kV s izolovaným uzlem a s následným rozšířením poruchy na třífázový zkrat	32
Graf 18 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem (uzlový odporník se jmenovitým proudem 300A) při jednofázové poruše	36
Graf 19 Fázové proudy ve vývodu při jednofázové poruše ve fázi L_1 v síti 22 kV s odporově uzemněným uzlem (jmenovitý proud uzlového odporníku je 1000 A).....	37
Graf 20 Časový průběh fázových napětí a fázových proudů při vzniku zemního spojení v kabelové síti 22 kV – měřeno na napájecím transformátoru 110kV/23 kV, zemní kapacitní proud sítě byl na úrovni 450 A	39
Graf 21 Závislost rozdílu úhlu mezi proudem nulové složky napětí u vývodu se zemní poruchou a bez zemní poruchy na procentní velikosti kapacity vývodu vztažené k celkové zemní fázové kapacitě pro různé přesnosti vyladění zhášecí tlumivky (vyladěno, přeladěno – induktivní proud zhášecí tlumivky je větší než zemní kapacitní proud sítě, podladěno – induktivní proud zhášecí tlumivky je menší než zemní kapacitní proud sítě)	43
Graf 22 Závislost rozdílu úhlu mezi proudem nulové složky napětí u vývodu se zemní poruchou a bez zemní poruchy na procentní velikosti kapacity vývodu vztažené k celkové zemní fázové kapacitě pro různé hodnoty velikosti činného proudu zhášecí tlumivky (vliv přidavného odporu)	44
Graf 23 Chyba stanovení úhlu nulové složky napětí vyvolaná amplitudovou chybou měření napětí na otevřeném trojúhelníku za podmínky, že oba napěťové měřicí transformátory mají ve fázích bez zemní poruchy stejně velkou amplitudovou chybu měření, ale s opačným znaménkem	51
Graf 24 Vliv fázové chyby měřících napěťových transformátorů se zapojeným vinutím do otevřeného trojúhelníka na procentní amplitudovou chybu měření nulové složky napětí	53

Graf 25 Vliv fázové chyby měřicího transformátoru napětí na chybu určení fáze nulové složky napětí měřené na svorkách otevřeného trojúhelníka	54
Graf 26 Poměr nulové složky proudu k proudu I_{0di} v závislosti na chybě úhlu měření nulové složky proudu.....	61
Graf 27 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázi L_2	62
Graf 28 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 , chyby úhlů ve fázích mají opačná znaménka (viz vztah (3.40),(3.41))	63
Graf 29 Detail grafu Graf 28 závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 v rozsahu 0 až 9°, chyby úhlů ve fázích mají opačná znaménka (viz vztah (3.40),(3.41)).....	64
Graf 30 Závislost procentní chyby velikosti nulové složky proudu na úhlové chybě měření proudu ve fázích L_2 a L_3 , chyby úhlů ve fázích mají stejná znaménka (viz vztah (3.42), (3.43))	64
Graf 31 Závislost natočení nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy na chybě měření úhlů fázových proudů ve fázích L_2 a L_3 (červená křivka: stejná velikost chyby úhlů ve fázi L_2 a L_3 se stejným znaménkem dle (3.47); zelená křivka: nulová hodnota chyby úhlů, křivka leží na ose x, stejná velikost chyby úhlů ve fázi L_2 a L_3 s rozdílným znaménkem dle (3.49); modrá křivka: chyba úhlu ve fázi L_2 – dle(3.45)).....	66
Graf 32 Úhel mezi U_0 a I_0 jako funkce procentní hodnoty činné složky poruchového proudu vtažené k zemnímu kapacitnímu proudu	68
Graf 33 Ferorezonance v síti 6 kV vzniklá po vypnutí zemního spojení v síti, v grafu je znázorněn časový průběh fázových napětí a časový průběh nulové složky napětí	69
Graf 34 Rezonanční křivka – závislost nulové složky napětí U_0 (%) na proudovém nastavení zhasací tlumivky I_0 (A), modrá křivka znázorňuje průběh nulové složky napětí 50 Hz a červená křivka znázorňuje průběh měřené hodnoty nulové složky napětí včetně všech harmonických (RMS), hodnota rezonančního proudu zhasací tlumivky je na úrovni cca 7 až 8 A	72
Graf 35 Rezonanční křivka – závislost nulové složky napětí U_0 (%) na proudovém nastavení zhasací tlumivky I_0 (A), modrá křivka znázorňuje průběh nulové složky napětí 50 Hz a červená křivka znázorňuje průběh měřené hodnoty nulové složky napětí včetně všech harmonických (RMS), hodnota rezonančního proudu zhasací tlumivky je na úrovni cca 17 A, vrchol rezonanční křivky pro 3. harmonickou je za hodnotou maximálního proudového nastavení zhasací tlumivky.....	72
Graf 36 Detail okamžitých hodnot fázových napětí (horní polovina grafu) a nulové složky napětí (dolní polovina grafu) při proudovém nastavení zhasací tlumivky blízko stavu paralelní rezonance, červená křivka znázorňuje nulovou složku napětí s frekvencí 50 Hz.....	73
Graf 37 Detail okamžitých hodnot fázových napětí (horní polovina grafu) a nulové složky napětí (dolní polovina grafu) při proudovém nastavení zhasací tlumivky blízko stavu paralelní rezonance pro 3. harmonickou, červená křivka znázorňuje nulovou složku napětí s frekvencí 150 Hz.....	73
Graf 38 Závislost procentní velikosti nulové složky napětí U_0 na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1	85
Graf 39 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L1} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1	86
Graf 40 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L2} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1	86
Graf 41 Závislost procentní velikosti fázového napětí U_{L3} na hodnotě zemní fázové kapacity sítě C_0 a hodnotě připojované kapacity ΔC do fáze L_1	87
Graf 42 Vliv procentní velikosti nulové složky napětí na hodnotu koeficientu „ k_C “ pro určení celkové zemní kapacity v izolované síti při použití kondenzátoru s kapacitou 1 μF	90
Graf 43 Závislost chyby stanovení zemní fázové kapacity na velikosti nulové složky napětí při měření nulové složky napětí s chybou $\pm dU$, kde $dU = 1\% U_0$	95
Graf 44 Závislost chyby stanovení zemní fázové kapacity na velikosti nulové složky napětí při měření nulové složky napětí s absolutní chybou $\pm dU$, kde $dU = 0.5V$ z měřené sekundární hodnoty nulové složky napětí (měření na otevřeném trojúhelníku napěťových měřicích transformátorů).....	95
Graf 45 Absolutní hodnota koeficientu k_{CR} (-) pro přípínanou kapacitou 1 μF v odporově uzemněné síti 22 kV a pro uzlový odporník s různými jmenovitými proudy 50 A (254 Ω), 100 A (127 Ω), 300 A (42,3 Ω), 600 A (21,16 Ω), 1000 A (12,7 Ω) v závislosti na absolutní hodnotě nulové složky napětí U_0 (%).....	106

Graf 46	Závislost nulové složky napětí U_0 na velikosti uzlového odporu R_0 (udávaného jmenovitou proudovou hodnotou) a na velikosti poměru celkové zemní fázové kapacity k připojované kapacitě $\Delta C = 1\mu F$	106
Graf 47	Velikost U_0 pro uzlové odporníky v síti 22 kV se jmenovitými proudy uzlových odporníků 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A v závislosti na poměru celkové zemní fázové kapacity sítě k hodnotě připínané kapacity ΔC o velikosti $1\mu F$	107
Graf 48	Graf pro určení fázové zemní kapacity C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na velikosti U_0 pro uzlové odporníky v síti 22 kV se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A po připojení kapacity $\Delta C = 1\mu F$ do jedné fáze	108
Graf 49	Graf pro určení fázové zemní kapacity C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na velikosti U_0 pro uzlové odporníky v síti 22 kV se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A, 100 A a 50 A po připojení kapacity $\Delta C = 10\mu F$ do jedné fáze	108
Graf 50	Graf pro určení C_0 z křivek k_{CR} v závislosti na U_0 pro uzlové odporníky se jmenovitými proudy 1000 A, 600 A, 300 A v síti 22 kV po připojení přídavné kapacity $\Delta C = 1\mu F$ do jedné fáze, chyba měření nulové složky napětí na úrovni několika setin procenta způsobí velkou chybu v určení fázové zemní kapacity	109
Graf 51	Komplexní hodnota vektoru nulové složky napětí v závislosti na koeficient k_{CR} , při připínané přídavné kapacitě $\Delta C = 0.44\mu F$ (to odpovídá délce cca 1 km jednožilového kabelu 22 kV 1x240 AXEKVCE) pro vybrané jmenovité proudové hodnoty uzlových odporníků (hnědá křivka pro jmenovitý proud 1000 A, modrá křivka pro jmenovitý proud 600A, zelená křivka pro jmenovitý proud 300 A, červená křivka pro jmenovitý proud 100 A a fialová křivka pro jmenovitý proud 50 A)	109
Graf 52	Vliv odporu poruchy ve vývodu se zemní poruchou na velikost hodnoty nulové složky napětí a nulové složky proudu (modrá křivka: izolovaný uzel sítě, červená křivka: odporově uzemněný uzel sítě se jmenovitým proudem odporu 300A, zelená křivka: síť s kompenzací zemních kapacitních proudů s vyladěnou zhášecí tlumivkou)	113
Graf 53	Vliv odporu poruchy ve vývodu bez zemní poruchy na velikost hodnoty nulové složky napětí a nulové složky proudu, zemní kapacitní proud vlastního vývodu je cca 35 A (modrá křivka: izolovaný uzel sítě, červená křivka: odporově uzemněný uzel sítě se jmenovitým proudem odporu 300A, zelená křivka: síť s kompenzací zemních kapacitních proudů s vyladěnou zhášecí tlumivkou).....	114
Graf 54	Příklad závislosti fázových kapacitních nabíjecích proudů v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů a nulové složky proudu ve vývodu bez poruchy na odporu zemní poruchy v síti, fáze L_1 je postižena zemní poruchou	115
Graf 55	Závislost velikosti nulové složky napětí na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu)	116
Graf 56	Závislost velikosti nulové složky napětí na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s extrémním tlumením (velmi vysoká hodnota činného svodového proudu cca 10% z kapacitního proudu sítě)	117
Graf 57	Závislost fázového napětí ve fázi se zemní poruchou L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	117
Graf 58	Závislost fázového napětí L_2 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	118
Graf 59	Závislost fázového napětí L_3 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	118
Graf 60	Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	119
Graf 61	Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_2 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěna při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	119

Graf 62 Závislost fázového nabíjecího kapacitního proudu fáze L_3 při zemní poruše ve fázi L_1 na odporu poruchy a přesnosti vyladění zhášecí tlumivky, zhášecí tlumivka je vyladěná při $I_{LT} = 100\%$, porucha je modelována v síti s nízkým tlumením (nízká hodnota činného svodového proudu do 1% z kapacitního proudu sítě)	120
Graf 63 Změny nulové složky napětí v závislosti na odporu poruchy, nulové složky napětí jsou zobrazeny při přesném vyladění zhášecí tlumivky (modrá křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 97% hodnoty zemního kapacitního proudu (červená křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 95% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (zelená křivka) a při naladění zhášecí tlumivky na 90% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (oranžová křivka)	121
Graf 64 Změny nulové složky proudu ve vývodu bez zemní poruchy v závislosti na odporu poruchy, nulové složky proudu jsou zobrazeny při přesném vyladění zhášecí tlumivky (modrá křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 97% hodnoty zemního kapacitního proudu (červená křivka), při naladění zhášecí tlumivky na 95% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (zelená křivka) a při naladění zhášecí tlumivky na 90% hodnoty zemního kapacitního proudu sítě (oranžová křivka)	121
Graf 65 Změny nulové složky napětí a proudu ve vývodu bez poruchy v závislosti na velikosti odporu poruchy pro různé přesnosti vyladění zhášecí tlumivky (význam čísel u označení křivek: 100 - přesně vyladěná zhášecí tlumivka, 97 - podladění o 3%, 95 - podladění o 5%, 90 – podladění o 10%), průběhy nulové složky proudu jsou zobrazeny pomocí symbolů.....	122
Graf 66 Časový záznam průběhu změny fázových napětí při zemním spojení v distribuční síti 22 kV s kompenzací zemních kapacitních proudů	126
Graf 67 Časový záznam průběhu fázových proudů ve vývodu bez poruchy při zemním spojení ve VN síti	127
Graf 68 Časový průběh fázových napětí v síti 22 kV při zemním spojení v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů.....	131
Graf 69 Časový průběh fázových proudů v zatíženém vývodu distribuční sítě 22 kV při zemním spojení, zemní porucha není na tomto vývodu.....	132
Graf 70 Časový průběh procentní hodnoty sdruženého napětí a nulové složky napětí v síti při zemním spojení s vyznačenými hodnotami napětí v čase odečtu hodnot pro měření 1 až 4... 149	149
Graf 71 Časový průběh změřené procentní hodnoty nulové složky napětí a hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu.....	150
Graf 72 Závislost zemního kapacitního proudu vývodu na odporu zemní poruchy (modrá křivka) a jeho přepočtená hodnota na kovové zemní spojení (červená křivka)	152
Graf 73 Činný ztrátový výkon jedné fáze kabelového vedení způsobený kapacitním nabíjecím proudem v závislosti na délce kabelového vývodu	156
Graf 74 Ocenění ročních ztrát na třífázovém kabelovém vedení způsobených nabíjecím kapacitním proudem při uvažované ceně za elektrickou energii 1400 Kč/ MWh	156
Graf 75 Ovlivnění ztrát kabelového vedení s délkou 100 km a průřezem $3 \times 120 \text{ mm}^2$ v síti 22 kV nabíjecím kapacitním proudem vedení v závislosti na vzdálenosti instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení	157
Graf 76 Teoretické roční úspory při snížení ztrát na třífázovém kabelovém vedení při dekompenzaci nabíjecího kapacitního proudu jednou tlumivkou (modrá křivka), dvěma tlumivkami (červená křivka) nebo třemi tlumivkami (zelená křivka) při uvažované ceně 1400 Kč/ MWh	159
Graf 77 Rozdíl ročních úspor při instalaci jedné nebo dvou dekompenzačních tlumivek, uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh, graf zobrazuje úsporu bez uvažování vlastních ztrát dekompenzačních tlumivek	160
Graf 78 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na procentní velikosti proudu dekompenzační tlumivky a na místě „D“ instalace dekompenzační tlumivky . 163	163
Graf 79 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, boční pohled na graf zobrazuje závislost ztrát na procentní vzdálenosti místa instalace dekompenzační tlumivky od počátku vedení	164
Graf 80 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, boční pohled na graf zobrazuje závislost ztrát na procentní hodnotě proudu dekompenzační tlumivky vztažené k celkové hodnotě nabíjecího proudu vedení	165
Graf 81 Ztráty na vedení způsobené nabíjecím kapacitním proudem v závislosti na místě instalace dekompenzační tlumivky a na proudu dekompenzační tlumivky, pohled shora zobrazuje oblast minimálních ztrát pro místo instalace dekompenzační tlumivky a pro dekompenzační proud tlumivky.....	165

Graf 82 Nabíjecí a dekompenzační fázové proudy na vedení při instalaci dekompenzační tlumivky s výkonem 100% do 50% délky vývodu (modrá křivka) a při instalaci dekompenzační tlumivky s výkonem 66,7% do 66,7% délky vývodu (červená křivka)	166
Graf 83 Proudů na vedení s dekompenzací nabíjecího kapacitního proudu v závislosti na vzdálenosti od počátku vedení při použití různého počtu dekompenzačních tlumivek (s jednou - červená křivka, se dvěma - zelená křivka a se třemi - modrá křivka), 100% proudu odpovídá nabíjecímu kapacitnímu proudu vývodu bez dekompenzace.....	167
Graf 84 Procentní omezení přenosu činného proudu v závislosti na procentní hodnotě nabíjecího kapacitního proudu vedení	173

14.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Jednofázové distribuční transformátory v síti VN s přímo uzemněným uzlem	7
Obr. 2 Pohled do uzlového odporu sítě 22 kV se jmenovitým proudem 1000 A.....	9
Obr. 3 Zhášecí tlumivka s 24-hodinovým provozem a maximálním kompenzačním proudem 550 A v síti 22 kV	14
Obr. 4 Zhášecí tlumivka a napájecí transformátor 110 kV / 22 kV.....	20
Obr. 5 Fázorový diagram napěťových a proudových poměrů v síti se zemním spojením ve vývodu bez zemního spojení	28
Obr. 6 Fázorový diagram napěťových a proudových poměrů v síti se zemním spojením ve vývodu se zemní poruchou	29
Obr. 7 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s odporově uzemněným uzlem při zemním spojení ve vývodu, (I_{0R} – proud uzlovým odporníkem, I_{0Ci} – kapacitní proud vývodu, I_{0Wi} svodový proud vývodu, I_{0C} kapacitní proud sítě, I_{0W} – svodový proud sítě, I_{0i} – nulová složka proudu vývodu se zemní poruchou)	34
Obr. 8 Obloukové zemní spojení v síti s kompenzací zemních kapacitních proudů.....	37
Obr. 9 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku	38
Obr. 10 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku, kde vlastní kapacitní proud vývodu je vzhledem k celkové zemní kapacitě sítě nevýznamný	39
Obr. 11 Fázorový diagram proudových poměrů ve vývodu se zemní poruchou pro síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku, kde vlastní kapacitní proud vývodu má vzhledem k celkové zemní kapacitě sítě vysokou hodnotu	40
Obr. 12 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s uzlem uzemněným přes induktivní reaktanci v době zemního spojení ve vývodu, kde vlastní kapacitní proud vývodu představuje významný podíl celkového zemního kapacitního proudu sítě, vliv připínání sekundárního odporu R_2 se projeví na vektorové natočení nulové složky proudu vývodu I_{0i} vůči nulové složce napětí U_0	42
Obr. 13 Fázorový diagram proudových poměrů v síti s uzlem uzemněným přes induktivní reaktanci v době zemního spojení ve vývodu, kde vlastní kapacitní proud vývodu představuje významný podíl celkového zemního kapacitního proudu sítě, vliv rozladění tlumivky ($I_{L(1)}$ podladění, $I_{L(2)}$ přeladění) ovlivní vektorové natočení nulové složky proudu vývodu I_{0i} ($I_{0(1)}$ podladění, $I_{0(2)}$ přeladění)	43
Obr. 14 Zapojení měřících transformátorů napětí (modře je znázorněno zapojení terciálního vinutí do otevřeného trojúhelníka pro měření nulové složky napětí, černá zobrazuje zapojení sekundárních obvodů měření fázového napětí, červeně je znázorněno zapojení primárních obvodů).....	47
Obr. 15 Vektorový součet fázových napětí zapojených do otevřeného trojúhelníka v ideálně symetrické síti.....	48
Obr. 16 Vektorový součet fázových napětí zapojených do otevřeného trojúhelníka při kovovém zemním spojení v síti.....	48
Obr. 17 Schéma zapojení měřících transformátorů proudu pro měření nulové složky proudu I_0	56
Obr. 18 Schéma zapojení měřících transformátorů proudu pro měření nulové složky proudu I_0 podle Hollmgreenova zapojení	57
Obr. 19 Schéma zapojení součtového měřícího transformátoru proudu pro měření nulové složky proudu I_0	58
Obr. 20 Znázornění natočení vektoru naměřené složky nulového proudu od skutečného nulového proudu způsobené chybovým proudem I_{0di}	60
Obr. 21 Schéma pro modelování provozních i poruchových stavů v VN síti	76

Obr. 22 Jednoduché schéma pro ověření možnosti zjišťování zemního kapacitního proudu sítě umělým vytvořením fázové zemní kapacitní nesymetrie v síti v izolované síti.	79
Obr. 23 Schéma pro odvození vztahů výpočtu zemní fázové kapacity při uměle vyvolané nesymetrii v síti s izolovaným uzlem.....	84
Obr. 24 Schéma pro zjednodušený výpočet zemní fázové kapacity C_0 pomocí připojené přídavné kapacity ΔC	88
Obr. 25 Vektorový diagram fázových napětí v nesymetrické síti	91
Obr. 26 Vektorový diagram fázových napětí a vnitřního napětí zdroje pro určení vektorového natočení fázového napětí U_{L1} vůči vnitřnímu fázovému napětí zdroje E	93
Obr. 27 Možná zapojení 3-fázového kondenzátoru zapojeného do hvězdy a výsledná kapacita pro jednofázové zapojení.....	97
Obr. 28 Možná zapojení 3-fázového kondenzátoru zapojeného do trojúhelníka a výsledná kapacita pro jednofázové zapojení	97
Obr. 29 Impedance nulové složky je dána paralelním zapojením fázové zemní kapacity a uzlového odporu.....	103
Obr. 30 Vektory fázových napětí, vektorový součet proudů odběru a nabíjecího kapacitního proudu v bezporuchovém stavu sítě.....	129
Obr. 31 Vektory fázových napětí, součet proudů zatížení I_Z a nabíjecího kapacitního proudu I_{C0} při jednofázové zemní poruše ve vývodu	131
Obr. 32 Vektorový součet fázových zemních kapacitních proudů při kovovém zemním spojení v síti..	146

14.3 Seznam tabulek

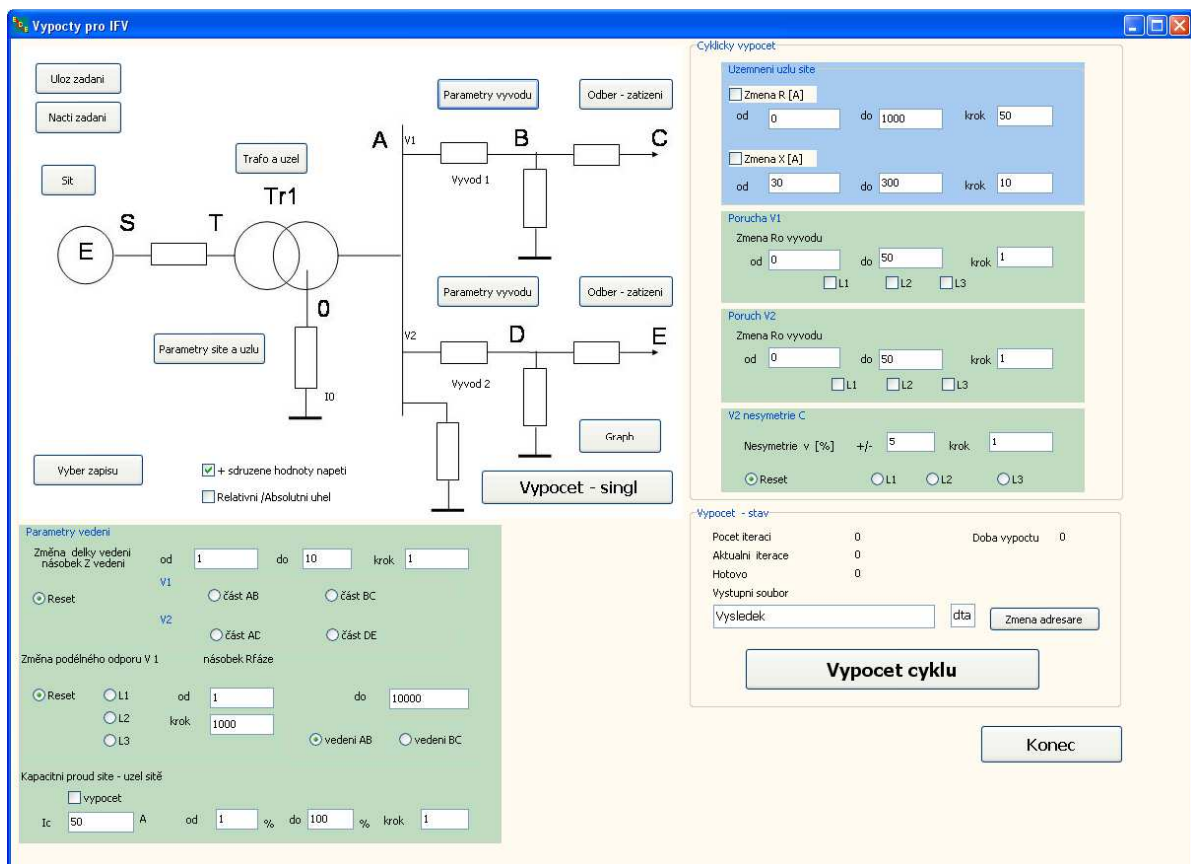
Tab. 1 Naměřené hodnoty fázových napětí (procentní hodnoty síťového napětí) v síti 6 kV pro výpočet zemního kapacitního proudu.....	98
Tab. 2 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 1. měření.....	100
Tab. 3 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 1. měření.....	100
Tab. 4 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 2. měření.....	101
Tab. 5 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 2. měření.....	101
Tab. 6 Naměřených napětí při určování hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou v izolované síti – 3. měření.....	102
Tab. 7 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou s přídavnou kapacitou $\Delta C = 2 \mu F$ a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 3. měření.....	102
Tab. 8 Vypočtené hodnoty zemního kapacitního proudu nepřímou metodou s přídavnou kapacitou $\Delta C = 2,66 \mu F$ a naměřená hodnota proudu zemního spojení v izolované síti – 3. měření.....	102
Tab. 9 Přepočtené hodnoty naměřené nulové složky proudu vývodu při různých odporech zemní poruchy na kovové zemní spojení a jmenovité napětí	124
Tab. 10 Vstupní hodnoty pro výpočet fázového nabíjecího kapacitního proudu I_C získané z matematického modelu.....	134
Tab. 11 Výsledky prostých iterací	134
Tab. 12 Výsledky metody postupných iterací.....	135
Tab. 13 tabulka výsledků rozdílové metody za použití prostých iterací.....	136
Tab. 14 tabulka výsledků metody rychlého odhadu pro přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu dle (8.12) pro kapacitní proud 50 A při úhlu $\gamma = 80^\circ$	138
Tab. 15 Vstupní údaje z reálného měření pro test č. 1	140
Tab. 16 Startovací vektor pro výpočet zemního kapacitního proudu sítě změnovou a rozdílovou metodou.....	140
Tab. 17 Porovnání výsledků a rychlosti konvergence změnové a rozdílové metody výpočtu zemního kapacitního proudu sítě po jednotlivých iteracích, u změnové metody jsou výsledky uvedeny pro prostou a postupnou iteraci	140
Tab. 18 Zpětný výpočet vstupních hodnot proudů I_L , I_{Lmax} a I_{Lmin} z výsledků změnové a rozdílové metody, pro zpětný výpočet byly využity hodnoty nabíjecího kapacitního proudu I_C a úhlu γ z Tab. 17 a proud ve fázi se zemní poruchou $I_Z = 89,7 A$	141
Tab. 19 Výsledné hodnoty určené metodou rychlého odhadu.....	141
Tab. 20 Vstupní údaje z reálného měření pro test č. 2	143
Tab. 21 Výsledky testu č. 2	143
Tab. 22 Zpětný výpočet vstupních hodnot proudů I_L , I_{Lmax} a I_{Lmin} z výsledků změnové a rozdílové metody, pro zpětný výpočet byly využity hodnoty nabíjecího kapacitního proudu I_C a úhlu γ z Tab. 21 a proud ve fázi se zemní poruchou $I_Z = 106,9 A$	144

Tab. 23	Vstupní údaje z matematického modelu pro test č. 3	144
Tab. 24	Tabulka udávající počet iterací k dosažení výsledku s přesností na 3 desetinná místa	145
Tab. 25	Výsledky testu metody rychlého odhadu	145
Tab. 26	Tabulka vstupních hodnot pro výpočet nabíjecího fázového zemního kapacitního proudu	148
Tab. 27	Tabulka vybraných naměřených vstupních údajů pro přepočet výsledků rozdílové metody na jmenovité parametry sítě	148
Tab. 28	Vypočtené hodnoty nabíjecího kapacitního proudu vývodu a zemního kapacitního proudu vývodu s uvedenými procentními odchylkami od střední hodnoty z měření č. 1,3, a 4.....	149
Tab. 29	Určené hodnoty nabíjecího kapacitního proudu a kapacitního proudu nulové složky proudu vývodu při reálném zemním spojení v síti 22 kV s udáním procentních odchylek od střední hodnoty	150
Tab. 30	Hodnoty kapacitního proudu vývodu zjištěné z naměřené nulové složky proudu vývodu při zemním spojení a jejich přepočet na jmenovité parametry sítě	151
Tab. 31:	Procentní velikost ztrát vedení způsobená průtokem nabíjecího proudu ovlivněná počtem dekompenzačních tlumivek	158
Tab. 32	Odhadované investiční a provozní náklady na dekompenzaci kabelového vedení 3x120 mm ² typu 22-AXEKVCE o délce 100 km (uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh).....	168
Tab. 33	Odhadované investiční a provozní náklady na dekompenzaci kabelového vedení 3x120 mm ² typu 22-AXEKVCE o délce 50 km (uvažovaná cena energie je 1400 Kč/MWh)	168
Tab. 34:	Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 1% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení	170
Tab. 35:	Vypočtené kritické délky kabelového vedení 35 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 1% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení	170
Tab. 36:	Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV pro instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 0,5% při požadavku dodržení neutrálního účinníku na počátku vedení	171
Tab. 37:	Vypočtené kritické délky kabelového vedení 22 kV při optimalizaci dekompenzačních tlumivek a instalaci 1 a 2 dekompenzačních tlumivek s vlastními ztrátami 0,5%	171

PŘÍLOHA 1: SOFTWARE PRO MODELOVÁNÍ PORUCHOVÝCH STAVŮ SÍŤE

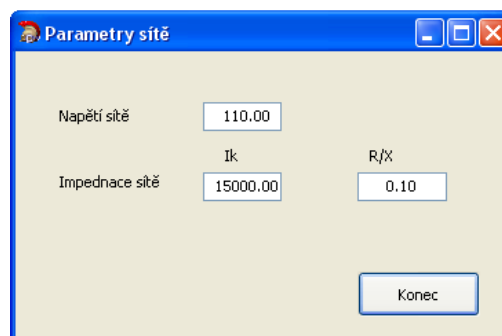
Program pro výpočet napěťových a proudových poměrů ve VN síti je vytvořen v jazyce Borland C++ a je určen pro výpočty ustálených provozních i poruchových stavů ve VN síti. Umožňuje modelovat jednofázové poruchy v bodech B a D, dvoufázové souměrné zemní poruchy B nebo D, dvoufázové nesouměrné zemní poruchy (jedna porucha v bodě B a druhá v bodě D), dvoufázové a třífázové zkraty v bodech C, E nebo zemní zkraty v bodech B a D. dále je možné realizovat změnu způsobu uzemnění uzlu sítě na soustavu s přímo uzemněným uzlem, izolovaným uzlem, odporově uzemněným uzlem nebo s kompenzací zemních kapacitních proudů. Vybrané výpočty je možné provádět pro měnící se vstupní parametry se zadávaným krokem výpočtu.

Modelovaná síť obsahuje jeden napájecí bod označený jako „Síť“ dále transformátor s vyvedeným uzlem a síť s dvěma vývody se zadaným zatížením na konci vývodu.



Screen 1: Hlavní menu pro výpočty v software IFV

Hlavní menu slouží pro zadávání vstupních dat, nastavení výpočtů, spouštění výpočtů a uložení dat do textového souboru.



Screen 2: Okno pro zadání základních parametrů sítě

Zde je okno pro zadávání parametrů napájecího zdroje – vnitřní napětí sítě a zkratová impedance sítě. Tyto parametry jsou důležité při zkratových výpočtech nebo při modelovaném velkém zatížení sítě.

Screen 3: Okno pro zadání základních parametrů uzemnění uzlu sítě

Okno je určené pro výběr a zadávání parametrů způsobu uzemnění uzlu sítě a zadávání celkové hodnoty fázové zemní kapacity sítě včetně třífázového zatížení napájecího transformátoru.

1. Izolovaný uzel: pro výpočty s izolovaným uzlem se zaškrtně položka „Izolovaný uzel“. Vyplněné hodnoty činného proudu a jalového proudu budou ignorovány.
2. Nejprve se zruší výběr „Izolovaný uzel“. Tím je možné měnit parametry uzemnění uzlu sítě. Pro odporově uzemněný uzel se do editačního okna „činný proud“ zadává jmenovitý proud odporníkem, do okénka jalový proud se zadá „0“.
3. Při modelování kompenzace zemních kapacitních proudů je opět nutné nejprve zrušit výběr modelování sítě s izolovaným uzlem. Do editačního okna „činný proud“ se zadá činný proud reprezentující ztráty tlumivky (cca 1% z induktivního proudu tlumivky). Do editačního okna jalový proud se zadá požadované proudové nastavení zhášecí tlumivky. Induktivní charakter jalového výkonu tlumivky má kladnou hodnotu.
4. Svodový proud sítě se zadává procentní hodnotou vztaženou k zemnímu kapacitnímu proudu sítě (zadává se zpravidla od 0,1% do 4%). Pro některé kabelové sítě s PVC kabely může být zadávána hodnota až 10% z kapacitního proudu sítě.
5. Fázový zemní nabíjecí kapacitní proud je jedním z nejdůležitějších údajů při modelování jednofázových poruch v sítích s neúčinně uzemněným uzlem nebo s izolovaným uzlem. Hodnota fázového nabíjecího proudu sítě se zadává v základních jednotkách a tato hodnota musí být snížena o fázový nabíjecí kapacitní proud dvou modelovaných vývodů. Při zemním spojení bude místem poruchy protékat zemní kapacitní proud odpovídající třínásobku hodnoty fázového zemního nabíjecího kapacitního proudu sítě, sečteného s nabíjecími proudy dvou modelovaných vývodů.
6. Poslední dvě editační okna slouží pro zadávání třífázového zatížení transformátoru. Zadává se činný a jalový zatěžovací výkon. Napájecí transformátor je pak zatížen tímto výkonem zvětšeným o zatížení dvou modelovaných vývodů.

The 'Trafo' dialog box contains the following parameters:

U1	110.00	kV
U2	22.00	kV
uk	11.00	%
Sn	25.00	MVA
Pk	13.00	kW

A 'Konec' button is located at the bottom right of the dialog.

Screen 4: Okno pro zadání základních parametrů napájecího transformátoru sítě

Pro výpočet se zadávají parametry transformátoru:

1. U1 : primární napětí
2. U2 : sekundární napětí
3. uk : napětí nakrátko
4. Sn : jmenovitý výkon transformátoru
5. Pk : ztráty nakrátko

The 'Vyvod 1 v miste "B" 1' dialog box is divided into several sections:

- Zadavani parametru vyvodu 1:**
 - Pretrzeny:** L1, L2, L3 (checkboxes)
 - Impedance do dozvodny:** L1, L2, L3 (checkboxes), with input fields for Odpor (2.00) and Reaktance (3.00) for each phase. A unit 'Ohm' is indicated.
 - Impedance na konec vedeni:** L1, L2, L3 (checkboxes), with input fields for Odpor (2.00) and Reaktance (3.00) for each phase. A unit 'Ohm' is indicated.
 - Pricne parametry:**
 - zemni spoj. kovove: L1, L2, L3 (radio buttons)
 - vyp zem: (checked radio button)
 - svodovy odpor: L1, L2, L3 (input fields with value 1000.000)
 - fazovy kapacitni proud: L1, L2, L3 (input fields with values 15.000, 15.010, 15.000)
 - Unit 'Ic [A]' is indicated.
- Buttons:** 'Execut' (twice), 'Default' (twice), and 'Konec'.

Screen 5: Okno pro zadání základních parametrů vývodu

Okna zadávání vývodů jsou shodná pro modelované vývody ABC a ADE. Parametry pro první vývod jsou zadávány v bodě „B“ a pro druhý vývod v bodě „D“. Směr k napájecí rozvodně je označen jako „impedance do rozvodny“ a směr na konec vedení, kde je připojena zátěž, je označen jako „impedance na konec vedení“. Příčné parametry vývodů jsou zadávány pouze v bodech „B“ a „D“.

1. Impedance do rozvodny:
 - a. Zatržením políčka s označením fáze je možné simulovat přetržení vodiče.
 - b. Odpor a reaktance: zde se zadávají hodnoty odporu a reaktance vedení mezi napájecí rozvodnou a bodem zadávání.
2. Impedance na konec vedení:
 - a. Zatržením políčka s označením fáze je možné simulovat přetržení vodiče.
 - b. Odpor a reaktance: zde se zadávají hodnoty odporu a reaktance vedení mezi bodem zadávání a koncem vedení (odběrem).
3. Příčné parametry:
 - a. Zaškrtnutím jednoho z polí s označením fáze lze simulovat kovové zemní spojení v dané fázi.
4. Svodový odpor:
 - a. Složí pro zadávání svodového odporu v jednotlivých fázích. Odpor se zadává v ($k\Omega$). Pokud je zadána nulová hodnota svodového odporu do jedné fáze bude se jednat o výpočet kovového zemního spojení. Zadáním odporu lze modelovat odporové zemní poruchy.
 - b. Při zadání nulové hodnoty do dvou fází bude proveden výpočet dvoufázového zemního zkratu. Při zadání nulové hodnoty svodového odporu v bodě „B“ a v jiné fázi v bodě „D“ provedený výpočet bude odpovídat dvoufázovému nesouměrnému zkratu.
 - c. Fázový kapacitní proud vývodu (nabíjecí zemní kapacitní proud vývodu) se zadává přímo proudovou hodnotou v (A). Zadáním rozdílné hodnoty nabíjecího proudu ve fázích se modeluje síť s fázovou kapacitní nesymetrií.

	IR	IX		
L1-L2	50.00	10.00	A	$\cos(\phi) = 0.98$
L2-L3	50.00	10.00	A	$\cos(\phi) = 0.98$
L3-L1	50.00	10.00	A	$\cos(\phi) = 0.98$

Symetrické zatizení

Vypnit zatez podle L1 Vynulovat zatez

Konec

Screen 6: Okno pro zadání základních parametrů zatížení vývodu

Okno zadávání zátěže vývodu (mezifázové zatížení)

1. IR: zadávání činného proudu zátěže (mezifázově, zapojeno do trojúhelníka)
2. IX: zadávání jalového proudu zátěže (mezifázově, zapojeno do trojúhelníka)

Napětí v uzlu	abs()	uhel	Re-{}	Im-{}
S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
E	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Uo	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Výstup IFV

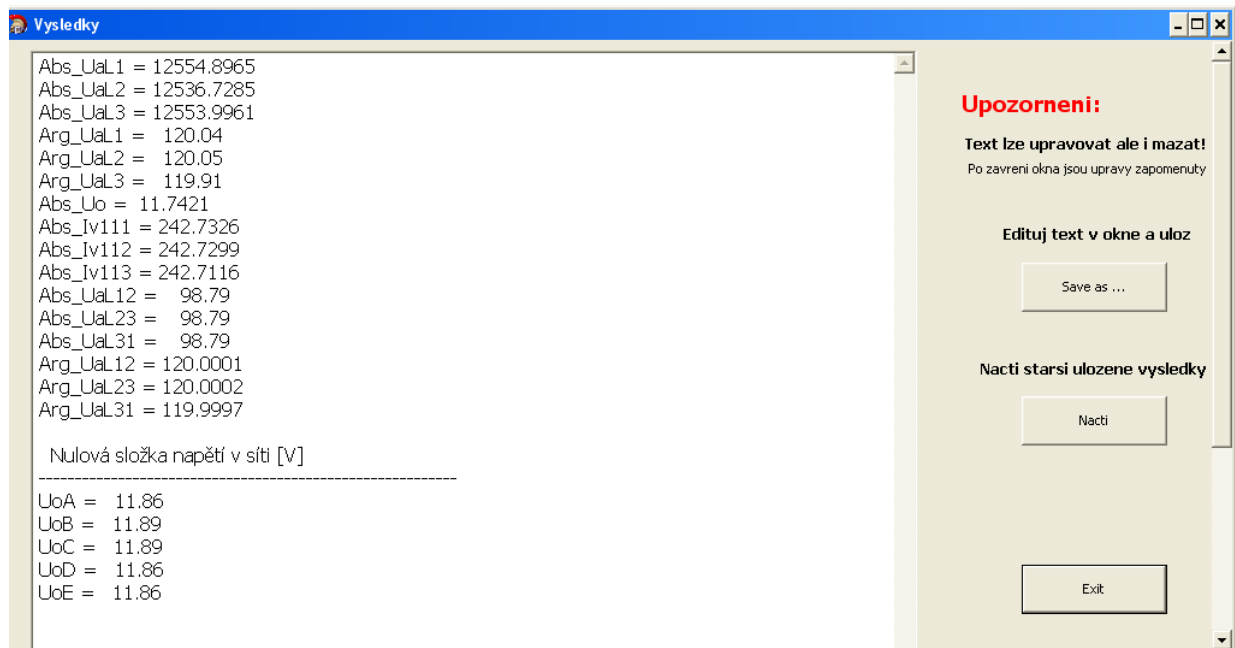
Proud	abs()	uhel	Re-{}	Im-{}
S - A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A - B	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I _o AB	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
B - C	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I _o BC	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
A - D	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I _o AD	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
D - E	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I _o DE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

clear all set all Konec

Screen 7: Okno pro zadání požadovaných výstupních dat

Okno pro zadávání výpisu výsledků

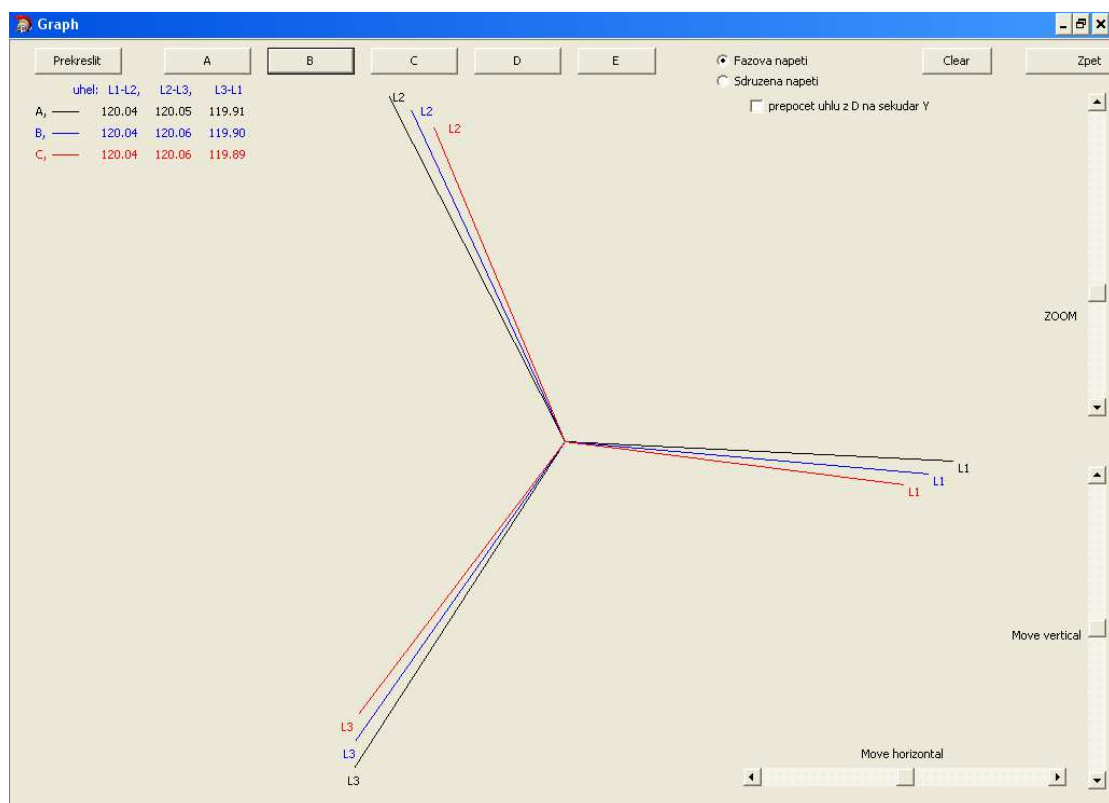
1. Napětí v uzlech
 - a. Absolutní hodnota napětí
 - b. Úhel natočení fázoru napětí – vtaženo k napětí fáze L1 zdroje
 - c. Reálná část komplexního čísla vektoru napětí
 - d. Imaginární část komplexního čísla vektoru napětí.
2. Proud mezi uzly
 - a. Absolutní hodnota proudu
 - b. Úhel natočení fázoru proudu – vtaženo k napětí fáze L1 zdroje
 - c. Reálná část komplexního čísla vektoru proudu
 - d. Imaginární část komplexního čísla vektoru proudu.



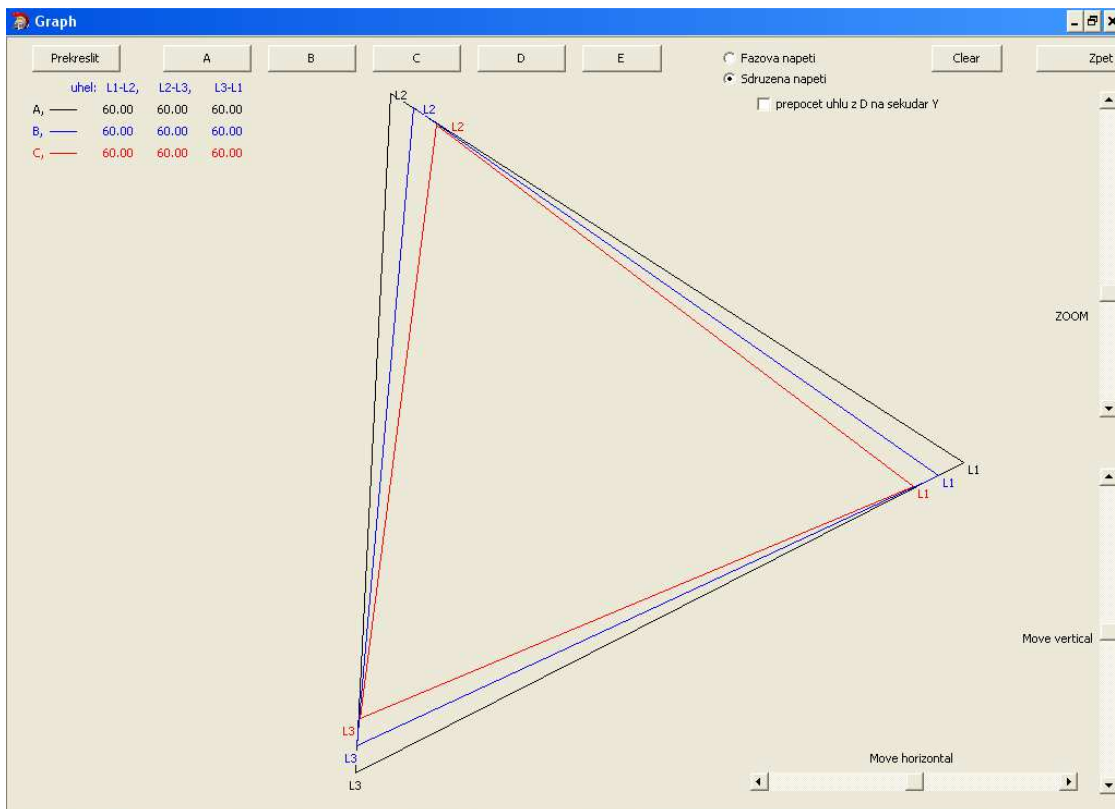
Screen 8: Okno výsledků výpočtu (pro jeden výpočet)

Toto okno slouží k zobrazení výsledků pro jednoduchý výpočet nad zadanými vstupními daty (nejsou zde měněny vstupní data s krokem výpočtu) - v okně je možné upravovat text, kopírovat, uložit atd.

Tlačítko Graph vytvoří grafické zobrazení vektorů napětí po předchozím jednoduchém výpočtu aktivovaném tlačítkem „Vypocet-singl“. Jsou zde zobrazovány vektory fázových nebo sdružených napětí ve vybraných uzlech (tlačítka A, B, C, D, E) na sekundární straně transformátoru. Vektory fázových napětí jsou vtaženy k napětí zdroje ve fázi L1.

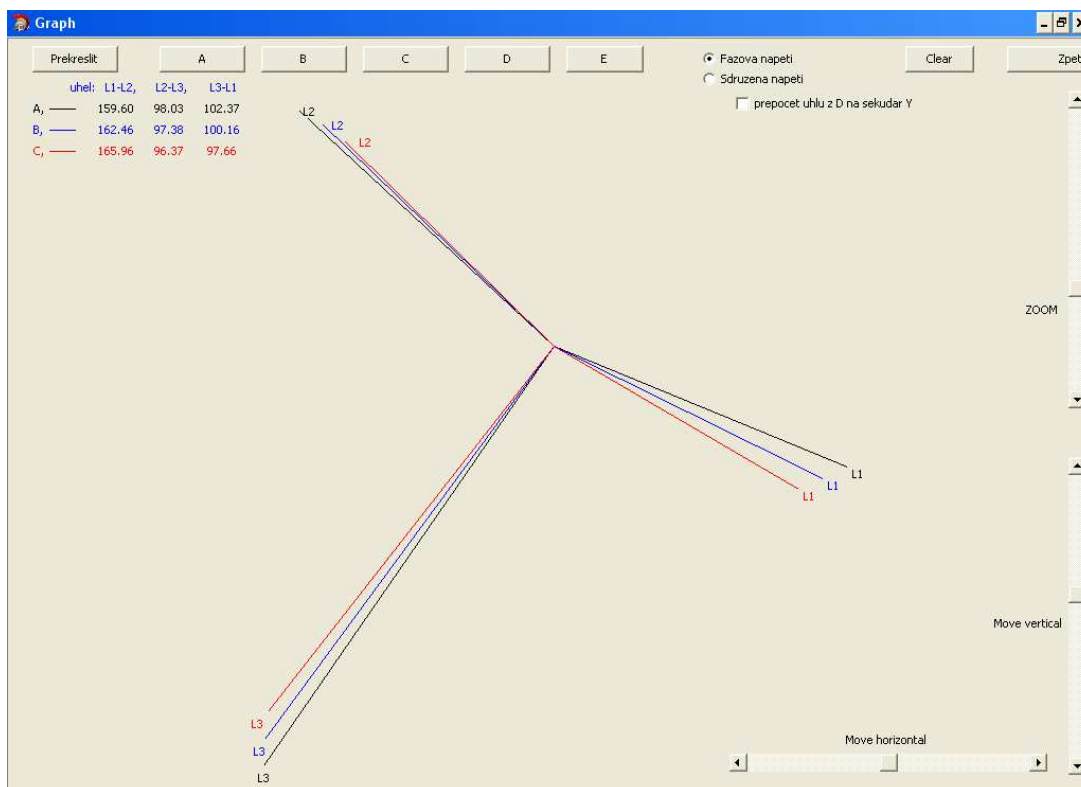


Screen 9: Okno grafického zobrazení vektorů napětí na sekundární straně distribučního transformátoru (při navolení fázových napětí)



Screen 10: Okno grafického zobrazení vektorů napětí na sekundární straně distribučního transformátoru (při navolení sdružených napětí pro zapojení D)

Zobrazení vektorů sdružených napětí v uzlech A, B, C v síti bez zemního spojení.



Screen 11: Okno grafického zobrazení vektorů napětí na sekundární straně distribučního transformátoru (při navolení fázových napětí při odporovém dvoufázovém zemním zkratu)

Okno grafického výstupu jednoduchého výpočtu pro zobrazení napětí na sekundární straně distribučního transformátoru umožňuje následující funkce:

- Zobrazení vektorů napětí ve vybraných uzlech
- Plynulá změna velikosti měřítka
- Posun vektorů po ploše
- Přepínání mezi vektory fázových napětí nebo sdružených napětí.

Stisknutím tlačítka „**Výpočet cyklu**“ se provede výpočet se změnou vstupních dat. Data se mění v zadaném rozsahu změny hodnoty a se zadaným krokem. Výsledky výpočtu jsou ukládány do prostého textového souboru. Tento soubor výsledků je možné načíst do tabulkových procesorů (např. MS Excel, FlexPro), kde je můžeme dále zpracovávat nebo vytvářet grafy. Velikost výstupního souboru není omezena. Při dalším zpracování je nutné si uvědomit omezené možnosti programů jako je MS Excel. Je tedy nutné volit vhodné meze a krok výpočtu, aby bylo možné výstupní soubor dále graficky zpracovat

Tabulka 1: Příklad dat načtených z textového souboru v programu MS Excel pro ladění zhášecí tlumivky v rozsahu 10A až 100A se zadaným krokem ladění 5A, rezonanční vrchol je v okolí proudového nastavení zhášecí tlumivky 60 A

IXuzel	Abs_UaL1	Abs_UaL2	Abs_UaL3	Abs_Uo
10.00	12662.29	12639.78	12661.89	14.91
15.00	12663.19	12638.13	12662.64	16.55
20.00	12664.33	12636.07	12663.56	18.60
25.00	12665.81	12633.44	12664.72	21.23
30.00	12667.83	12629.94	12666.21	24.72
35.00	12670.71	12625.08	12668.21	29.59
40.00	12675.17	12617.85	12671.00	36.83
45.00	12682.93	12606.04	12675.12	48.74
50.00	12699.47	12583.38	12681.40	71.87
55.00	12753.50	12525.30	12686.22	134.79
60.00	13066.52	12579.18	12329.56	433.44
65.00	12631.91	12795.36	12538.02	150.00
70.00	12629.97	12729.75	12604.58	76.16
75.00	12635.37	12705.14	12623.59	50.69
80.00	12639.17	12692.59	12632.27	37.94
85.00	12641.79	12685.02	12637.19	30.30
90.00	12643.67	12679.96	12640.35	25.22
95.00	12645.08	12676.35	12642.55	21.59
100.00	12646.17	12673.64	12644.16	18.88

PŘÍLOHA 2: SOFTWARE PRO VÝPOČET U_0 Z FÁZOVÝCH HODNOT NAPĚTÍ SÍTĚ

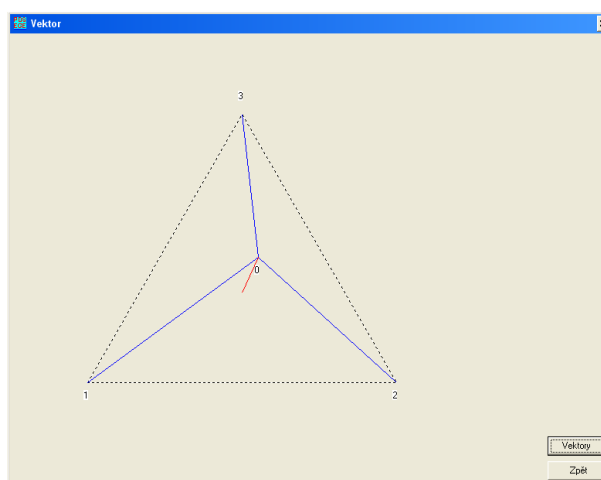
Při práci s naměřenými fázovými hodnotami napětí jsem potřeboval určit velikost nulové složky napětí a její vektorové natočení. Jednalo se zejména o sítě, kde nebyla měřena nulová složka napětí. Při analýze jsem měl k dispozici pouze absolutní hodnoty fázových napětí. Proto jsem vytvořil krátký SW v jazyce Borland C++ k výpočtu hodnoty nulové složky napětí a jejího vektorového natočení vztaženého k fázovému napětí L_1 .

Pro výpočet je nutné zadat velikost sdružené hodnoty napětí a dvou fázových napětí. Napětí je možné zadávat jako procentní hodnota sdruženého napětí (napětí přímo měřené na výstupu z měřících transformátoru napětí) nebo přímo absolutní hodnotou napětí. U třetího, nejméně přesného údaje fázového napětí se označí pole „Estimace“. Toto fázové napětí bude dopočítáno společně s hodnotou nulové složky napětí po stisknutí tlačítka „Vypocet Ufazove“.

Tento výpočet jsem využíval i ke kontrole přesnosti měření fázových měřících transformátorů napětí a kontrole přesnosti měření nulové složky napětí.

Screen 12: Okno pro zadání velikostí napětí a zobrazení výsledků výpočtu

Po výpočtu nulové složky napětí můžeme stisknutím tlačítka Vektor zobrazit vektory fázových napětí a vektor nulové složky napětí.



Screen 13: Okno pro zobrazení vektorů fázového napětí a nulové složky napětí

PŘÍLOHA 3: SOFTWARE PRO NEPŘÍMOU METODU PŘÍBLIŽNÉHO URČENÍ ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU V SÍTÍ S IZOLOVANÝM UZLEM

Použití nepřímé metody přibližného určení zemního kapacitního proudu v sítích s izolovaným uzlem vyžaduje řešení soustavy dvou nelineárních rovnic. Pro praktické použití této metody jsem vytvořil SW v jazyce Borland C++. Tento SW urychluje a zjednodušuje zpracování naměřených dat.

Pro výpočet je nutné zadat velikost jmenovité hodnoty sdruženého napětí (jmenovité napětí sítě), aktuální hodnotu sdruženého napětí sítě, hodnotu připojované kapacity v μF a velikost dvou fázových napětí. Fázová napětí se zadávají před připojením a po připojení kapacity mezi fází L1 a zem. Stiskem tlačítka „Výpočet“ se zobrazí hodnota fázové zemní kapacity sítě, přibližně určená velikost zemního kapacitního proudu sítě při aktuální hodnotě sdruženého napětí sítě. Dále je zobrazena velikost zemního kapacitního proudu sítě při jmenovité hodnotě sdruženého napětí v síti. Výpočet je doplněn o zobrazení přibližného určení velikosti činného poruchového proudu a přepočítání tohoto proudu na procentní hodnotu ze zemního kapacitního proudu sítě. Toto přibližné určení velikosti zemního kapacitního proudu vývodu je velice závislé na přesnosti zadávaných údajů. Již malá nepřesnost způsobuje velké odchylky této metody.

Měření Ic nepřímou metodou

Napětové poměry
 Popis měření - označení: [Test]
 Datum měření: [27.1.2014]

Nominální napětí sítě: [6000] [V]
 Naměřené napětí: [6093] [%] [V]

Zadávaní naměřených hodnot fázových napětí

Před připojením testovací kapacity

UL 10	[3518]	[V]
UL 20	[3517]	[V]
UL 30	[3518.4]	[V]

Velikost testovací kapacity
 Cn = [2] [uF]

Po připojení testovací kapacity

UL 10	[3374]	[V]
UL 20	[3595]	[V]
UL 30	[3588.7]	[V]

Výpočet

Vypočtené hodnoty

Zemní kapacita	a zemní kapacitní proud	Svodový odpor	a svodový proud
Co =	15.604 [uF]	Rsvod =	6.3 [kOhm]
Ic =	51.7 [A]	Iw =	1.68 [A]
Ic pro Un =	50.9 [A]	Iw =	3.2 [%] z Ic

Zápis dat Konec

Screen 14: Okno pro zadání vstupních údajů a zobrazení výsledků výpočtu

Výpis programu: Část programu pro výpočet zemní kapacity a zemního kapacitního proudu sítě nepřímou metodou

```
//-----
#include <math.h>
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop
#include "stdio.h"
#include "Unit2.h"
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma resource "*.dfm"

bool ActualData = false;
```

```

TForm2 *Form2;
typedef struct {
    double re,im;
} COMPLEX;

COMPLEX C_nasob(COMPLEX X, COMPLEX Y) // nasobeni dvou komplexnich cisel
{
    COMPLEX a;
    a.re = X.re*Y.re - X.im*Y.im;
    a.im = X.re*Y.im + X.im*Y.re;
    return a;
}

//-----
COMPLEX C_podil(COMPLEX X, COMPLEX Y) // deleni dvou komplexnich cisel
{
    COMPLEX a;
    a.re = (X.re*Y.re + X.im*Y.im)/(Y.re*Y.re+Y.im*Y.im);
    a.im = -(X.re*Y.im - X.im*Y.re)/(Y.re*Y.re+Y.im*Y.im);
    return a;
}

//-----
COMPLEX C_soucet(COMPLEX X, COMPLEX Y) // soucet dvou komplexnich cisel
{
    COMPLEX a;
    a.re = X.re + Y.re;
    a.im = Y.im + X.im;
    return a;
}

//-----
COMPLEX C_rozdil(COMPLEX X, COMPLEX Y) // rozdil dvou komplexnich cisel
{
    COMPLEX a;
    a.re = X.re - Y.re;
    a.im = X.im - Y.im;
    return a;
}

//-----
void TForm2:: vypocet()
{
    const float pi = 3.141592654;
    double alfa;
    double Un;
    double a,b,c;
    double x,y,z;
    COMPLEX u01,u11;
    COMPLEX ca,cb;

    // Testovaci kapacita
    z = Edit1->Text.ToDouble()*1e-6;
    // Nominalni napeti
    Un = Edit2->Text.ToDouble(); // hodnota nominalniho napeti ve [V]
    // pred pripojenim Cn
    a = Edit3->Text.ToDouble(); // sdruzena hodnota napeti
    b = Edit4->Text.ToDouble(); // fazova hodnota napeti v L1 pred pripojenim Cn
    c = Edit5->Text.ToDouble(); // fazova hodnota napeti L2
    if (RadioButton1->Checked) {
        a = a/100*Un;
        b = b/100*Un;
        c = c/100*Un;
    }
    // sdruzene napeti U12 je v realne ose - prepocet U01 do tohoto souradneho systemu
    alfa = acos((a*a+b*b-c*c)/(2*a*b)); // uhel mezi U12 a U01
    x = pi/3-alfa; // vypocet tretiho napeti - pro kontrolu
    x = sqrt(a*a+b*b-2*a*b*cos(x));
    Edit6->Text = FloatToStrF(x,ffFixed,5,1);
    u01.re = b*cos(alfa); // realna cast U01
    u01.im = b*sin(alfa); // imaginarni cast U01
    // po pripojeni Cn
    a = Edit3->Text.ToDouble(); // sdruzena hodnota napeti
    b = Edit7->Text.ToDouble(); // fazova hodnota napeti v L1 p5ed pripojenim Cn
    c = Edit8->Text.ToDouble(); // fazova hodnota napeti L2
    if (RadioButton1->Checked) {
        a = a/100*Un;
        b = b/100*Un;
        c = c/100*Un;
    }
    alfa = acos((a*a+b*b-c*c)/(2*a*b)); // uhel mezi U12 a U01
    x = pi/3-alfa; // vypocet tretiho napati - pro kontrolu

```

```

    x = sqrt(a*a+b*b-2*a*b*cos(x));
    Edit9->Text = FloatToStrF(x,ffFixed,5,1);
    u11.re = b*cos(alfa); // realna cast U01
    u11.im = b*sin(alfa); // imaginarni cast U01
// vypocet pomeru 3*Xc*(U01/U10-1)
    x = u11.re*u11.re+u11.im*u11.im;
    ca.re = (u01.re*u11.re+u01.im*u11.im)/x-1;
    ca.im = (u01.im*u11.re - u01.re*u11.im)/x;
// nahradni seriova impednace
    ca.re = ca.re * 3/(100*pi*z);
    ca.im = ca.im * 3/(100*pi*z);
// prepocet na paralelni impednaci
    cb.im = fabs((ca.re*ca.re + ca.im*ca.im)/ca.re);
    cb.re = fabs((ca.re*ca.re + ca.im*ca.im)/ca.im);
    x = 1/(cb.im*100*pi)*1e6; // kapacita vedeni v uF
    Panel1->Caption = FloatToStrF(x,ffFixed,5,3);
    z = a;
    y = x*1e-6* 100.0*pi*sqrt(3.0)*z; // kapacitni proud site pri Us
// zapis vysledku na orazovku
    Panel2->Caption = FloatToStrF(y,ffFixed,5,1);
    x = sqrt(3.0)*z/cb.re;
    Panel4->Caption =FloatToStrF(x,ffFixed,5,2);
    Panel3->Caption =FloatToStrF(cb.re/1000,ffFixed,5,1);
    Panel5->Caption =FloatToStrF(x/y*100,ffFixed,5,1);
    Panel6->Caption =FloatToStrF(y*Un/a,ffFixed,5,1);
    Edit2->SetFocus();
}
//-----
__fastcall TForm2::TForm2(TComponent* Owner) : TForm(Owner)
{}
//-----
void __fastcall TForm2::Button1Click(TObject *Sender)
{ // tlacitko ukonceni - navrat do uvodniho okna
  Close();
}
//-----
void __fastcall TForm2::Button2Click(TObject *Sender)
{ // stisknuto tlacitko zahajeni vypoctu
  vypocet();
  ActualData = true;
  Button3->Enabled = true;
}
//-----
void __fastcall TForm2::Button3Click(TObject *Sender)
{ // stisknuto tlacitko zapisu vysledku do souboru
  String S;
  ActualData = false;
  Button3->Enabled = false;
  FILE* f;
// vyber a otevreni souboru
  SaveDialog1->Filter="*.ICO";
  SaveDialog1->FilterIndex=1;
  SaveDialog1->DefaultExt="*.ICO";
  if (SaveDialog1->Execute() ) {
    S = SaveDialog1->FileName;
// otevreni souboru pro zapis dat na konec souboru
    f=fopen(SaveDialog1->FileName.c_str(), "a");
// zapis dat: přepis z textového pole do souboru
    fprintf(f,"%s ;",Edit10->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit11->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit2->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit3->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit1->Text.c_str());
    fprintf(f,"%i ;",RadioButton1->Checked);
    fprintf(f,"%i ;",RadioButton2->Checked);
    fprintf(f,"%s ;",Edit4->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit5->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit6->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit7->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit8->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Edit9->Text.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Panel1->Caption.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Panel2->Caption.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Panel3->Caption.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Panel4->Caption.c_str());
    fprintf(f,"%s ;",Panel5->Caption.c_str());

```

```
        fprintf(f,"%s\n",Panel6->Caption.c_str());
// zavření souboru
        fclose(f);
    }
//-----

void __fastcall TForm2::RadioButton2Click(TObject *Sender)
{
// nastavení jednotek pro napětí - volty
    Label9->Caption = "[V]";
    Label10->Caption = "[V]";
    Label11->Caption = "[V]";
    Label16->Caption = "[V]";
    Label17->Caption = "[V]";
    Label18->Caption = "[V]";
}
//-----

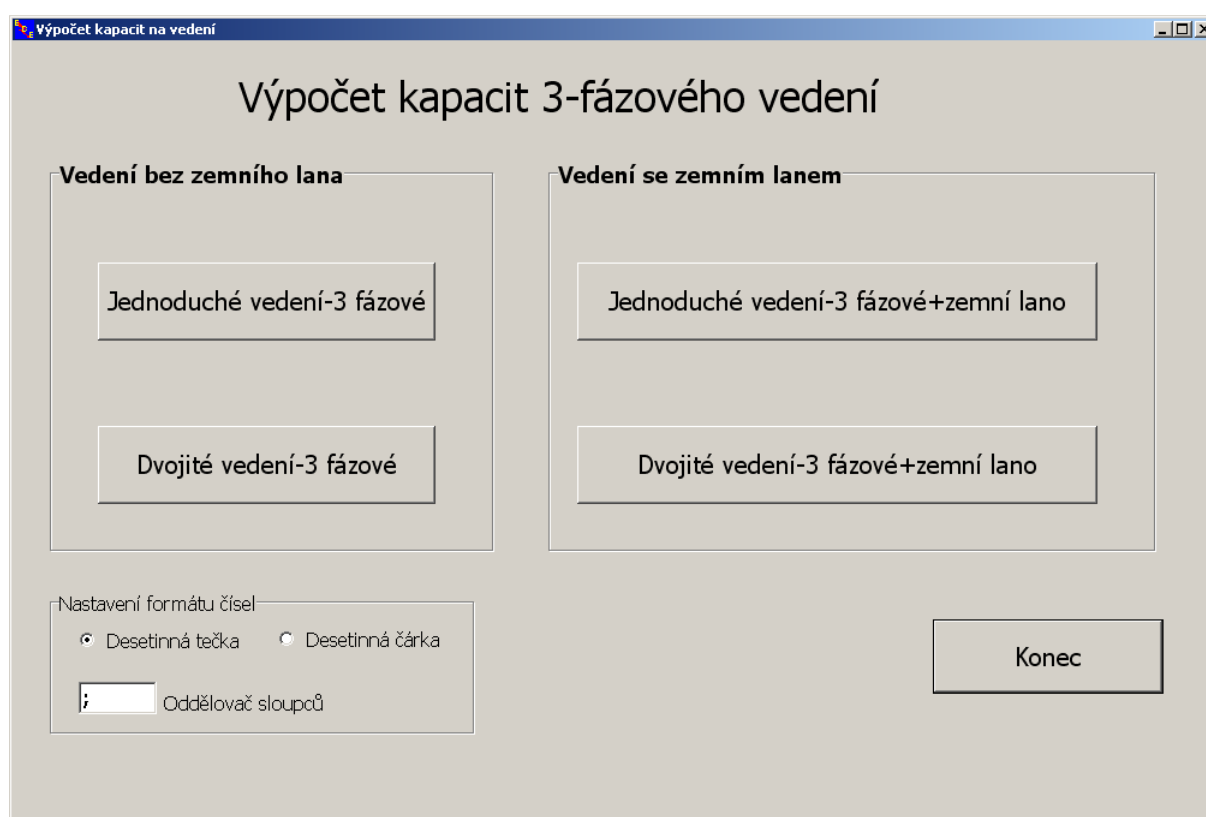
void __fastcall TForm2::RadioButton1Click(TObject *Sender)
{
// nastavení jednotek pro napětí - procenta
    Label9->Caption = "[%]";
    Label10->Caption = "[%]";
    Label11->Caption = "[%]";
    Label16->Caption = "[%]";
    Label17->Caption = "[%]";
    Label18->Caption = "[%]";
}
//-----

void __fastcall TForm2::MonthCalendar1Click(TObject *Sender)
{
    Edit11->Text = MonthCalendar1->Date.DateString();
}
//-----
```

PŘÍLOHA 4: SOFTWARE PRO VÝPOČET ZEMNÍ FÁZOVÉ KAPACITY VEDENÍ

Zemní fázová kapacita vedení je jedním z důležitých parametrů ovlivňující způsob uzemnění uzlu a provoz sítě. Pro venkovní sítě bývá tento parametr udáván pouze orientačně. Přesnou hodnotu fázové zemní kapacity pro daný typ vedení je nutné změřit, případně vypočítat. Venkovní linky bývají i zdrojem fázové kapacitní nesymetrie. Proto je vhodné vypočítat nejen celkovou fázovou zemní kapacitu vedení, ale i fázovou zemní kapacitu jednotlivých fází. Tím můžeme posoudit, do jaké míry bude daný typ vedení ovlivňovat fázovou napěťovou nesymetrii v síti.

SW pro výpočet fázové zemní kapacity vedení rozlišuje vedení bez zemních lan a se zemním lanem a dále jednoduché vedení nebo dvojitě vedení (obdobou je i souběh dvou linek). Prvním krokem výpočtu je výběr typu vedení, pro který chceme provést výpočet.



Screen 15: Hlavní menu pro výběr typu vedení

Pro výpočet fázové zemní kapacity u jednoduchého vedení se zadává jmenovité napětí sítě (tento údaj není důležitý, protože kapacita vedení nezávisí na velikosti napětí, ale na geometrických parametrech a uspořádání vodičů). Dále je nutné zadat průměr vodiče a délku vedení. Průměr vodiče již významně ovlivňuje výpočet. Délku vedení lze zadat například 1 km pro výpočet měrné fázové zemní kapacity vedení nebo celkovou délku vedení pro výpočet celkové fázové zemní kapacity vedení. Pro zadávání konfigurace vodičů jsou určeny rozměrové parametry uspořádání vodičů. První parametr je výška jednotlivých fázových vodičů nad zemí. Druhým parametrem jsou horizontální vzdálenosti od vodiče fáze L1 (za fázi L1 zpravidla volíme vodič na levém kraji vedení). Udávaná vzdálenost může mít i zápornou hodnotu v případě, že příslušný fázový vodič je nalevo od fáze L1. Po zadání těchto parametrů provedeme výpočet stiskem tlačítka „Vypocet“. Po výpočtu se v okně zobrazí výsledné hodnoty provozní kapacity vedení a fázové zemní kapacity vedení pro jednotlivé fáze. Rovněž je zobrazena střední hodnota vypočtených kapacit. Pro zobrazení si můžeme volit požadovaný počet desetinných míst a jednotku zobrazené kapacity. Pro výpočet měrné fázové kapacity

Disertační práce:

Analýza způsobů uzemnění uzlů sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN

František Žák

(vztaženo na 1 km vedení) doporučuji volit jednotku nF. Stiskem tlačítka „Vysledky detail“ se dostáváme do nového okna s detailním zobrazením výsledků parciálních kapacit.

Vypocet kapacit vedeni bez zemního lana

Jmenovité napeti site: kV Prumer vodice: [m]
Delka vedeni: [km]

Vyska vodice nad zemi:

Faze L1	<input type="text" value="8"/>	
Faze L2	<input type="text" value="9.3"/>	[m]
Faze L3	<input type="text" value="8"/>	

Horizontální vzdalenost od vodice L1

Faze L1-L1	<input type="text" value="0"/>	
Faze L1- L2	<input type="text" value="0.81"/>	[m]
Faze L1- L3	<input type="text" value="1.62"/>	

Pocet desetinych mist: uF nF

Provozni kapacita	Zemni kapacita
Ce1 = 9.632 nF	Co1 = 4.389 nF
Ce2 = 9.832 nF	Co2 = 4.177 nF
Ce3 = 9.632 nF	Co3 = 4.389 nF
stred Ce = 9.699 nF	stred Co = 4.319 nF

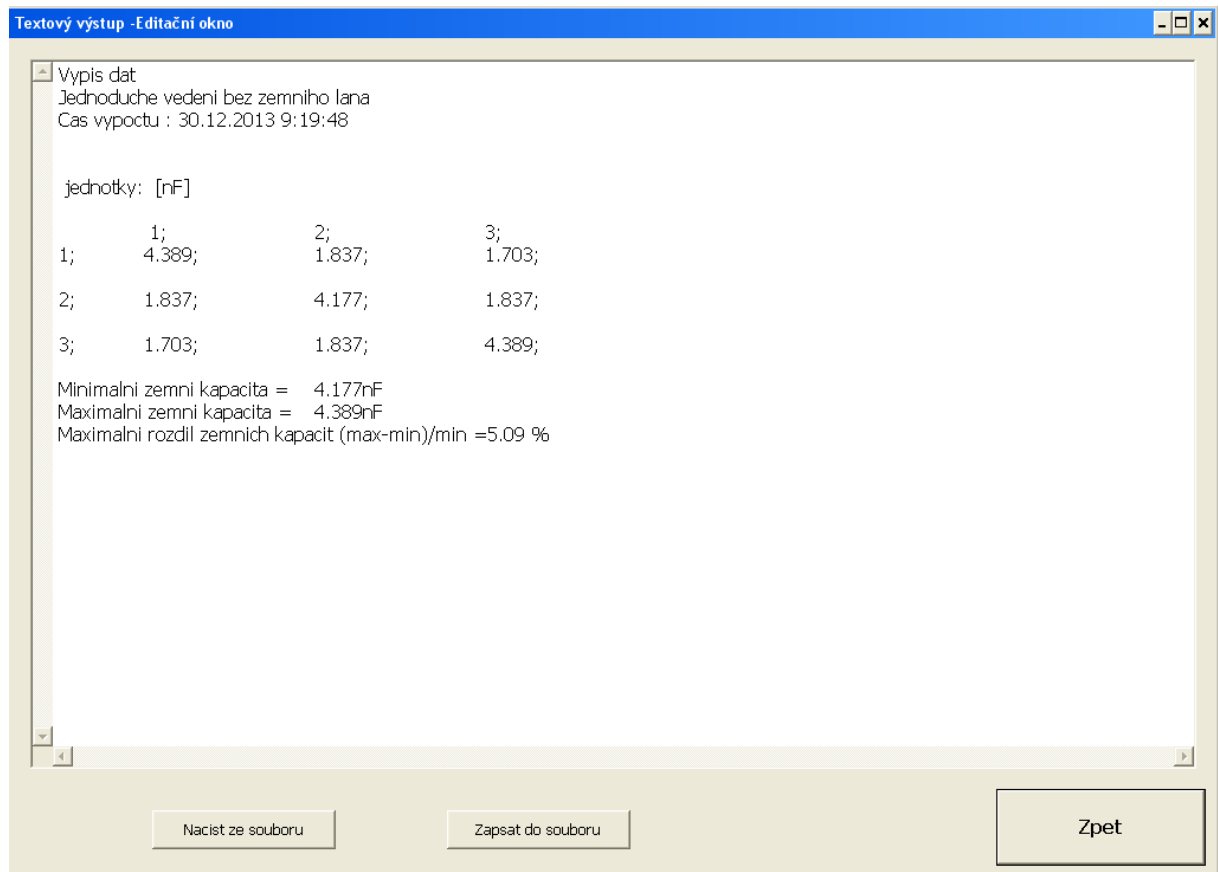
Vypocet

Vysledky detail

Zpet do menu

Screen 16: Okno pro zadávání parametrů sítě pro výpočet kapacity jednoduchého vedení bez zemního lana a pro zobrazení výsledků

V okně s detailním zobrazením výsledků máme zobrazeny i parciální kapacity vedení. Zde můžeme texty upravovat a doplňovat dle potřeby a následně uložit do souboru. Provedené úpravy v editačním okně budou při novém výpočtu nebo při návratu do hlavního menu smazány. Pro uchování výsledku je tedy vhodné výsledky ukládat do textového souboru s potřebným popisem nebo komentářem. Výsledky lze běžným způsobem také kopírovat do textového editoru při psaní zprávy.

**Screen 17: Okno zobrazení výsledků všech kapacit na vedení**

Obdobou výpočtu fázových zemních kapacit je i výpočet fázových zemních kapacit dvojitého vedení. Zde se zadávají obě vedení obdobným způsobem. Zadání je doplněno o horizontální vzdálenost mezi vodiči fáze L1 prvního a druhého vedení. V případě, že vedení obsahuje jedno zemní lano, zadává se výška zemního lana nad zemí a jeho horizontální vzdálenost od vodiče fáze L1 prvního vedení. Ostatní postup výpočtu a zobrazení výsledků je shodný s postupem pro jednoduché vedení.

Vypočet kapacit na dvojitém vedení se zemním lanem

Jmenovité napětí sítě: 22 kV Průměr vodiče: 0.02 [m] Průměr vodiče: 0.02 [m] Průměr zemního lana: 0.02 [m]
 Délka vedení: 1 [km]

Výška vodiče nad zemí: Výška zemního lana nad zemí:

Fáze L1: 16	Fáze L1: 16	
Fáze L2: 19.8 [m]	Fáze L2: 19.8 [m]	27.6 [m]
Fáze L3: 23.6	Fáze L3: 23.6	

Horizontální vzdálenost od vodiče L1 L1 V1 -> L1 V2: 5.4 [m] Horizontální vzdálenost od vodiče L1

Fáze L1-L1: 0	Fáze L1-L1: 0	
Fáze L1-L2: -0.8 [m]	Fáze L1-L2: 0.8 [m]	Fáze L1-Z: 2.7 [m]
Fáze L1-L3: 0	Fáze L1-L3: 0	

Počet desetinných míst: 5 uF nF

Vypočet

Detail výsledku

Provozní kapacita	Zemní kapacita	Provozní kapacita	Zemní kapacita
Cp1	Ce1	Cp1	Ce1
Cp2	Ce2	Cp2	Ce2
Cp3	Ce3	Cp3	Ce3
Střední hodnota	Střední hodnota	Střední hodnota	Střední hodnota

Zpet do menu

Screen 18: Okno pro zadávání parametrů sítě při výpočtu kapacity dvojitého vedení se zemním lanem a pro zobrazení výsledků

Textový výstup -Editační okno

Vypis dat
 Dvojité vedení bez zemního lana
 Čas výpočtu : 30.12.2013 9:18:41

jednotky: [nF]

1;	2;	3;	4;	5;	6;
3.756;	1.444;	0.615;	1.045;	0.624;	0.418;
1.444;	3.274;	1.444;	0.624;	0.631;	0.618;
0.615;	1.444;	3.849;	0.418;	0.618;	0.997;
1.045;	0.624;	0.418;	3.756;	1.444;	0.615;
0.624;	0.631;	0.618;	1.444;	3.274;	1.444;
0.418;	0.618;	0.997;	0.615;	1.444;	3.849;

Vedení 1
 Minimalní zemní kapacita = 3.274nF
 Maximalní zemní kapacita = 3.849nF
 Maximalní rozdíl zemních kapacit (max-min)/min =17.57 %

Vedení 2
 Minimalní zemní kapacita = 3.274nF
 Maximalní zemní kapacita = 3.849nF
 Maximalní rozdíl zemních kapacit (max-min)/min =17.57 %

Nacist ze souboru Zapsat do souboru Zpet

Screen 19: Zobrazení výpočtu kapacit dvojitého vedení se zemním lanem

PŘÍLOHA 5: SOFTWARE PRO VÝPOČET ZEMNÍHO KAPACITNÍHO PROUDU VÝVODU ROZDÍLOVOU METODOU

Výpočet hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu založený na rozdílové metodě vyžaduje řešení soustavy dvou nelineárních rovnic. Jedná se o určení hodnoty zemního nabíjecího kapacitního proudu vývodu, když na jiném vývodu je v síti zemní spojení. Rozdílová metoda je podrobně popsána v kapitole 8.5. Program je doplněn i o metodu přibližného určení zemního kapacitního proudu vývodu, která je popsána v kapitole 8.6. Pro jednoduchou aplikaci těchto metod jsem vytvořil program. V programu si můžeme zvolit, zda použijeme rozdílovou metodu nebo metodu odhadu pro přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Tato metoda nevyžaduje zadání proudu před zemní poruchou. Program rovněž umožňuje přepočítání výsledku obou metod na jmenovité hodnoty napětí sítě při kovovém zemním spojení.

Screen 20: Zobrazení okna programu pro výpočet nabíjecího kapacitního proudu při navolení rozdílové metody

Při navolení rozdílové metody musíme zadat hodnotu fázového proudu vývodu před zemní poruchou („I fázový“). Výhodné je zadat hodnotu proudu z fáze, ve které vznikne zemní spojení. Další možností je zadat průměrnou hodnotu fázových proudů vývodu před poruchou. Při zemní poruše se zadává naměřená maximální hodnota proudu ve fázi bez poruchy v době zemního spojení v síti („I max při poruše“) a naměřená hodnota fázového proudu v druhé fázi bez poruchy („I min při poruše“). Posledním proudovým údajem je proud ve fázi se zemní poruchou („I fáze s poruchou“). Pro výpočet rozdílové metody se zadává požadovaná přesnost výpočtu. Přednastavená je přesnost 1%. Při stisku tlačítka „Výpočet“ bude proveden výpočet rovnic metodou postupných iterací a výpočet bude ukončen při dosažení požadované „přesnosti“. Přesností je zde uvažován rozdíl výsledků dvou po sobě následujících iterací, kdy změna vypočtených hodnot je menší než zadaná přesnost. Dalším omezením je dosažení 100 iterací, kdy výpočet bude bez ohledu na přesnost přerušeno. V poli „Výsledky“ je zobrazen počet iterací potřebných k dosažení požadované přesnosti, vypočtená hodnota fázového nabíjecího kapacitního proudu I_C a vypočtená hodnota úhlu gama. V poli „Korekce“ se provádí automaticky přepočítání nabíjecího kapacitního proudu I_C na jmenovité napěťové poměry v síti. Pro přepočítání je zde možno zadávat skutečné procentní hodnoty provozního napětí sítě a procentní hodnotu nulové složky napětí při zemním spojení. Přednastaveny jsou procentní jmenovité hodnoty (100%). Do editačního pole „Nabíjecí kapacitní proud I_C “ je automaticky přepisována hodnota z pole „Výsledky“. Zadáním jiné hodnoty fázového nabíjecího kapacitního proudu sítě se provede přepočítání na jmenovité parametry sítě. Pod editačním oknem jsou zobrazeny přepočtené hodnoty fázového nabíjecího kapacitního proudu a nulové

složky proudu (proudový příspěvek vývodu k zemnímu spojení). Při výpočtu můžeme využívat i krokovaní iterační metody, kdy po stisknutí tlačítka „jedna iterace“ se provede vždy jen jeden krok výpočtu.

Vypočet Ic
Výpočet zemních kapacitních nabíjecích proudů při zemním spojení
 (ve vývodu bez zemní poruchy)

Metoda
 Rozdílová metoda
 Jednoduchý odhad

odhad úhel gama: DEG
 odhad účinníku zatížení: -

I fázový (před poruchou):
 I max při poruše:
 I min při poruše:
 I fáze s poruchou:

Výsledky
 iterace: **Odhad** Nabíjecí kapacitní proud
 Ic (A) **14.8910**
 Úhel gama (DEG) **zadáno: 80.00**

Korekce Ic
 Provozní napětí: %
 Nulová složka napětí: %
 Nabíjecí kapacitní proud Ic: A
 Nab. kap. proud Ic při Un: **14,96 A**
 Nulová složka proudu vývodu: **44,89 A**

Požadovaná přesnost: %

Vypočet

Autor programu a metody: Ing. František Žák

Screen 21: Zobrazení okna programu pro výpočet nabíjecího kapacitního proudu při navolení metody rychlého odhadu

Metoda odhadu pro přibližné určení hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu nevyžaduje znalost proudu před zemním spojením. Zde se provádí výpočet bez iterační metody. Pro výpočet je nutné zadat odhadovaný úhel gama nebo odhadovaný účinník zatížení vývodu. Obě hodnoty jsou navzájem propojeny a při zadávání jedné hodnoty se automaticky druhá hodnota přepočítá. Dále je nutné zadat fázové proudy ve vývodu při zemní poruše (I_{\max} , I_{\min} a proud fáze se zemní poruchou). Po stisknutí tlačítka „Výpočet“ se zobrazí výsledky.

V následující tabulce jsou zobrazeny výsledky výpočtu rozdílové metody pro různé hodnoty odporu poruchy. Pro výpočet byl použit model sítě s kapacitním proudem 140 A. Modelované provozní napětím v síti bylo 102,89%. Hodnota nabíjecího fázového proudu vývodu je při aktuálních napěťových poměrech 15 A. Při jmenovitém napětí v síti bude hodnota fázového nabíjecího kapacitního proudu na úrovni 14,58 A. Této hodnotě odpovídá zemní kapacitní proud 43,73 A.

Z uvedených údajů je zřejmé, že přibližné určení zemního kapacitního proudu vývodu rozdílovou metodou spolu s korekcí vlivu odporu zemní poruchy dává poměrně přesné výsledky. Vstupní data byla zadávána s přesností na dvě desetinná místa. Při zadávání dat s vyšší přesností lze dosáhnout i vyšší přesnosti. Vypočtené hodnoty fázového nabíjecího proudu vývodu a zemního kapacitního proudu vývodu nejsou závislé na odporu zemní poruchy. Proto lze tuto metodu používat i na reálná zemní spojení v síti.

Tabulka 1. : Výsledky výpočtu nabíjecího kapacitního proudu vývodu rozdílovou metodou na modelovém příkladu s rozdílnou hodnotou odporu poruchy

Zkouška	1.	2.	3.	4.	5.	
Vstupní data pro výpočet	U_s (%)	102,89				
	$I_{set ZT}$ (A)	135 A				
	R_p (Ω)	0	100	500	1000	2000
	U_0 (%)	102,2	99,66	89,5	77,7	59,2
	I_L (A) před poruchou	61,1				
	I_{L1} (A)	64,17	63,46	61,11	59,21	57,66
	I_{L2} (A)	47,25	47,92	50,45	53,01	56,24
	I_{L3} (A)	74,04	73,99	73,39	72,22	69,80
Výsledky	I_C (A)	15,40	15,02	13,51	11,73	9,03
	I_{CP} (A)	14,65	14,65	14,67	14,71	14,81
	I_{0P} (A)	43,94	43,95	44,02	44,12	44,43
	Absolutní chyba (%)	0,47	0,49	0,65	0,88	1,59

Legenda k tabulce 1

- U_s procentní hodnota sdruženého napětí v síti při zemním spojení
- I_L proudové zatížení vývodu před zemním spojením
- R_p odpor poruchy zemního spojení
- U_0 procentní hodnota nulové složky napětí při zemním spojení
- I_{L1} proud fáze 1 vývodu (fáze se zemní poruchou)
- I_{L2} proud fáze 2 vývodu
- I_{L3} proud fáze 3 vývodu
- I_C vypočtený fázový nabíjecí kapacitní proud vývodu
- I_{CP} přepočtená hodnota fázového nabíjecího kapacitního proudu vývodu na jmenovité hodnoty napětí
- I_{0P} přepočtená hodnota nulové složky proudu vývodu na jmenovité hodnoty napětí.