

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ZEMNÍ SPOJENÍ V SÍTÍCH VN - DETEKCE A ZPŮSOBY CHRÁNĚNÍ TĚCHTO SÍTÍ

Autor práce: Bc. Václav Novák

Vedoucí práce: doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav NOVÁK**
Osobní číslo: **E18N0058P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Zemní spojení v sítích vn – detekce a způsoby chránění těchto sítí**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

Diplomová práce „Zemní spojení v sítích vn – detekce a způsoby chránění těchto sítí“ bude zaměřena na tyto body:

1. Uveďte způsoby, jakými se provádí uzemnění uzlu sítě.
2. Zpracujte analýzu jednofázových poruch v distribuční síti vn.
3. Porovnejte jednotlivé možné způsoby identifikace vývodu se zemní poruchou.
4. Vyhodnoťte a na vybraných případech porovnejte vhodnost použitých způsobů chránění.



[Handwritten signature]

Doc. Ing. Karel Holý, Ph.D.

[Handwritten signature]

Prof. Ing. Zdeněk Fenclová, Ph.D.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Přednášky a podklady k předmětu „Elektrické ochrany“.
2. Student si další vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího a konzultanta práce.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan

L.S.

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol. První tři jsou teoretické, kde je popisována distribuční soustavu České republiky, poruchové stavy, provoz sítí a metoda Fortescue. V další kapitole je definována konkrétní síť, je zde naznačen postup při vytváření výpočtového programu. V páté kapitole jsou popisovány možnosti detekce, lokalizace a chránění. V poslední kapitole jsou zobrazeny a okomentovány výsledky při aplikaci vybraných metod.

Klíčová slova

Zemní ochrana, zemní spojení, distribuční síť, izolovaná síť, kompenzovaná síť, odporově uzemněná síť, jednofázová porucha, detekce, lokalizace, metoda Fortescue, sekundární odporník, uzlový odporník.

Abstract

Novák, Václav. *Earth connections in HV networks - detection and ways to protect of these networks* [Zemní spojení v sítích VN - detekce a způsoby chránění těchto sítí]. Pilsen, 2020. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technology and Measurement. Supervisor: Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

The master thesis is divided into six chapters. The first three are theoretical, where are described the distribution system of the Czech Republic, types of the earth faults, different neutral earthing arrangement and the Fortescue method. In the next chapter, the specified network is defined and the procedure for creating a calculation program is indicated. The fifth chapter describes the possibilities of detection, localization and protection. In the last chapter, the results on specific methods are displayed and annotated.

Keywords

Earth protection, earth fault, distribution system, insulated network, compensated network, resistance-earthed network, single line to ground, detection, localization, method of Fortescue, secondary resistor, neutral earthing resistor.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Souhlasím s umístěním diplomové práce v knihovně a s jejím dalším užitím v různých předmětech nebo k vlastní potřebě jednotlivým zájemcům. Také prohlašuji, že veškerý software použitý při řešení této závěrečné práce je legální.

V Plzni dne 17. června 2020

Václav Novák

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. za její aktivní přístup, metodické pokyny a cenné rady, které mě dovedly k vypracování diplomové práce. Stejně hodnotné poděkování patří konzultantovi práce Ing. Františkovi Žákovi, Ph.D. za odborné rady a sdílení praktických zkušeností.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	vii
Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xii
Úvod	1
1 Distribuční sítě vysokého napětí	2
1.1 Druhy poruch	2
1.1.1 Zemní spojení	2
1.1.2 Zemní zkrat	3
2 Způsob uzemnění uzlu s analýzou jednofázových poruch v sítích vn	4
2.1 Síť s izolovaným uzlem	5
2.1.1 Bezporuchový stav	6
2.1.2 Poruchový stav - kovové zemní spojení	7
2.1.3 Poruchový stav - odporové zemní spojení	9
2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku	11
2.2.1 Ladění zhášecí tlumivky	13
2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor	16
2.4 Síť s přechodným uzemněním uzlu	17
3 Metoda souměrných složek	19
3.1 Aplikace metody souměrných složek na síť s obecnou impedancí	21
4 Konkrétní síť	23
4.1 Parametry sítě	23
4.2 Výpočet parametrů	24
4.2.1 Distribuční transformátor 110/23 kV	24
4.2.2 Síť	24
4.2.3 Vývod - část vedení a	25
4.3 Aplikace metody Fortescue	25
4.3.1 Výpočet impedance	25
4.3.2 Výpočet větvových proudů	29
4.3.3 Výpočet napěťových poměrů	34
4.3.4 Výkonové poměry	38

5	Detekce a lokalizace poruch v sítích vysokého napětí	39
5.1	Aktivní metody	39
5.2	Pasivní metody	40
5.2.1	Statické metody	40
5.2.2	Dynamické metody	44
5.3	Indikace a detekce poruchy	46
5.3.1	RCC (Residual Current Compensation) - Swedish Neutral	47
5.3.2	Odpínání úseků postiženého vývodu	47
5.3.3	Spojování postiženého vývodu do kruhu	47
5.3.4	Indikátory poruch	47
6	Aplikace metod využívaných k detekci poruch	49
6.1	Nastavení ochran	49
6.2	Izolovaná soustava	49
6.2.1	Porovnání nulové složky proudu	51
6.2.2	Určení toku nulové složky jalového výkonu	51
6.3	Kompenzovaná soustava	52
6.3.1	Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)	53
6.3.2	Porovnání nulové složky proudu	54
6.3.3	Metoda porovnávání netočivé složky činného výkonu	55
6.4	Odporově uzemněná soustava	57
6.4.1	Porovnání činné složky netočivého proudu ve zdravém a postiženém vývodu	59
6.5	Vyhodnocení a návrh řešení provozu zadané sítě	60
7	Závěr	61
8	Literatura	63
	Přílohy	64

Seznam použitých symbolů a zkratek

$\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$	fázory fázových proudů (A)
\bar{I}_P	fázor poruchového (kapacitního) proudu (A)
\bar{I}_L	fázor proudu zhášecí tlumivky (A)
\bar{I}_R	fázor proudu sekundárního odporníku (A)
\bar{I}_{kap}	fázor celkového kapacitního proudu sítě (A)
$\bar{I}_{(0)}, \bar{I}_{(1)}, \bar{I}_{(2)}$	fázory složkových proudů (A)
\bar{I}_{k0}	fázor kapacitního proudu sítě (A)
\bar{I}_W	fázor svodového proudu (A)
\bar{I}_{k01a}	fázor kapacitního proud vývodu 1, vedení „a“ vůči zemi (A/km)
\bar{I}_{RP}	fázor proudu přes poruchu (A)
\bar{I}_0	fázor nulové složky proudu v místě poruchy (A)
\bar{I}_{0r}	fázor nulové složky proudu v rozvodně (A)
\bar{I}_{celk}	fázor celkového proudu sítě (A)
i_0	proud naprázdno (%)
$\bar{U}_a, \bar{U}_b, \bar{U}_c$	fázory napětí vůči zemi (V)
$\bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$	fázory fázových napětí zdroje (V)
\bar{U}_0	fázor napětí uzlu sítě (V)
\bar{U}_s	složkové napětí (V)
\bar{U}_f	fázor fázového napětí (V)
\bar{U}_L	fázor napětí tlumivky (V)
$\bar{U}_{fa(0)}, \bar{U}_{fa(1)}, \bar{U}_{fa(2)}$	fázory složkových napětí fáze A (V)
$\bar{U}_{(0)}, \bar{U}_{(1)}, \bar{U}_{(2)}$	fázory složkových napětí (V)
u_k	napětí nakrátko (%)
\bar{U}_n	fázor jmenovitého napětí sítě (kV)
$\bar{U}_{(0)vvod}$	fázor nulové složky napětí v rozvodně (V)
\bar{E}	fázor elektromotorického napětí zdroje (V)
a, a^2	operátory natočení v Gaussově rovině (-)
L	indukčnost zhášecí tlumivky (H)
L_{va}	indukčnost vedení vývodu 1, vedení „a“ na kilometr (H/km)
k_{a0}, k_{b0}, k_{c0}	kapacity fází vůči zemi (F)
k_0	kapacita sítě (F)
k_{0C}	celková kapacita sítě (F)
G_{01a}	svod vývodu 1, vedení „a“ (S)
G_0	svodový odpor jedné fáze (S)

R_P	přechodový odpor zemního spojení (Ω)
R_L	odpor tlumivky (Ω)
R_{PO}	sekundární pomocný odporník (Ω)
R	odpor uzlového odporníku (Ω)
R_{va}	odpor vedení na kilometr (Ω)
R_T	činný odpor transformátoru (ω)
R_0	svodový odpor sítě (Ω)
R_{01a}	svodový odpor vývodu 1, vedení „a“ (Ω)
X_L	reaktance tlumivky (Ω)
X_T	reaktance transformátoru (Ω)
X_V	reaktance vedení (Ω)
X_{k0}	reaktance sítě vůči zemi (Ω)
X_{k01a}	reaktance vývodu 1, vedení „a“ vůči zemi (Ω)
Z_V	impedance vedení (Ω)
Z_T	impedance transformátoru (Ω)
$Z_{celk(0)}, Z_{celk(1)}, Z_{celk(2)}$	komplexní složkové impedance (Ω)
$Z_1 - Z_6$	mezivýpočtové impedance (Ω)
$Z_{1a(0)}$	nulová podélná komplexní impedance vývodu 1 vedení „a“ (Ω)
$Z_{10a(0)}$	nulová příčná komplexní impedance vývodu 1 vedení „a“ (Ω)
Z_{celk}	celková komplexní impedance složkové soustavy (Ω)
ω	uhlová rychlost ($rad \cdot s^{-1}$)
OZ	opětovné zapínání
l	délka vývodu (km)
p	převod (-)
S_{NT}	jmenovitý výkon transformátoru (MVA)
dP_k	ztráty nakrátko (kW)
dP_0	ztráty naprázdno (kW)
P_z	činná složka zátěže (kW)
Q_z	jalová složka zátěže (kVAr)
Q_{por}	nulová složka jalového výkonu postiženého vývodu (kVAr)
Q_{zdr}	nulová složka jalového výkonu zdravého vývodu (kVAr)
P_{por}	nulová složka činného výkonu postiženého vývodu (kW)
P_{zdr}	nulová složka činného výkonu zdravého vývodu (kW)

Seznam obrázků

2.1	Možnosti provozu uzlu vn sítě.	4
2.2	Bezporuchový stav izolované soustavy.	6
2.3	Poruchový stav izolované soustavy - kovové zemní spojení.	7
2.4	Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při kovovém zemním spojení.	9
2.5	Poruchový stav izolované soustavy - odporové zemní spojení.	9
2.6	Fázorové diagramy napětí a proudu při odporovém zemním spojení.	10
2.7	Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku.	11
2.8	Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při ideální kompenzaci zemního spojení tlumivkou.	12
2.9	Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při reálné kompenzaci zemního spojení tlumivkou.	13
2.10	Schéma tlumivky s automatikou připínání odporníku k výkonovému vinutí.	14
2.11	Rezonanční křivka.	15
2.12	Připojení zhášecí tlumivky do uzlu trojfázové sítě.	15
2.13	Síť s uzlem uzemněným přes rezistor.	16
2.14	Fázorový diagram zemní poruchy nedaleko transformátoru.	17
2.15	Síť s přechodným uzemněním uzlu transformátoru.	18
3.1	Metoda souměrných složek - rozložení na souslednou, zpětnou, nulovou.	19
3.2	Síť s poruchou - uzemněná přes obecnou impedanci.	21
3.3	Náhradní schéma sítě uzemněné přes obecnou impedanci.	22
4.1	Konkrétní schéma VN sítě.	23
4.2	Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy.	26
4.3	Náhradní schéma nulové složky v kompenzované síti.	26
4.4	Náhradní schéma nulové složky v izolované síti.	27
4.5	Náhradní schéma nulové složky v síti s odporníkem.	28
4.6	Zemní spojení v izolované síti - nulová složka proudu.	30
4.7	Zemní spojení v kompenzované síti - nulová složka proudu.	31
4.8	Rezonanční křivka sítě.	33
4.9	Zemní spojení v kompenzované síti - odporník.	33
4.10	Připínání sekundárních odporníků k tlumivce.	33
4.11	Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v izolované síti.	36
4.12	Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - podladěná tlumivka.	36

4.13	Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - přeladěná tlumivka.	37
4.14	Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - připnutí sekundárního odporníku ($4x1\Omega$).	37
4.15	Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník (300 A).	38
5.1	Napájecí rozvodna - měření netočivé složky proudu a napětí.	40
5.2	Charakteristika admitanční metody.	43
5.3	Průběh netočivé složky I a U při ZS na postiženém a zdravém vývodu.	45
5.4	Qu-diagram tří vývodů, postižený vývod q_0A	46
5.5	Lokalizace poruchy na venkovním vedení pomocí indikátorů.	48
6.1	Izolovaná soustava - nulová složka poruchového proudu v závislosti na odporu poruchy.	50
6.2	Izolovaná soustava - nulová složka napětí v závislosti na odporu poruchy.	50
6.3	Izolovaná soustava - porovnání nulové složky proudu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy	51
6.4	Izolovaná soustava - porovnání nulové složky jalového výkonu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	52
6.5	Izolovaná soustava - porovnání nulové složky činného výkonu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	53
6.6	Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	54
6.7	Kompenzovaná soustava - nulová složka napětí postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	54
6.8	Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého a zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	55
6.9	Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na odporu poruchy.	55
6.10	Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na odporu poruchy v rozmezí $4000 - 5000\Omega$	56
6.11	Kompenzovaná soustava - nulová složka činného výkonu zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	57
6.12	Kompenzovaná soustava - nulová složka činného výkonu postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	57
6.13	Kompenzovaná soustava - nulová složka jalového výkonu postiženého a zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.	58
6.14	Odporová soustava - nulová složka napětí v závislosti na odporu poruchy.	58
6.15	Odporová soustava - nulová složka proudu v závislosti na odporu poruchy.	59

8.1	Ukázka výpočtového programu - parametry sítě.	64
8.2	Ukázka výpočtového programu - parametry sítě.	64
8.3	Ukázka výpočtového programu - izolovaná síť.	65
8.4	Ukázka výpočtového programu - izolovaná síť.	65
8.5	Ukázka výpočtového programu - kompenzovaná síť.	66
8.6	Ukázka výpočtového programu - kompenzovaná síť.	66
8.7	Ukázka výpočtového programu - odporově uzemněná síť.	67
8.8	Ukázka výpočtového programu - odporově uzemněná síť.	67

Seznam tabulek

4.1	Parametry distribučního transformátoru.	23
4.2	Parametry sítě VN.	23
4.3	Parametry vedení a, b (AlFe 95mm ²).	24
4.4	Parametry tlumivky ASR 2.5.	32
4.5	Parametry sekundárního odporníku SR 500A/0,5kV/KB6s.	34
4.6	Parametry uzlového odporníku NER 300A/23kV/KB6s-DB30A.	34
6.1	Izolovaná síť - nastavení ochran.	49
6.2	Hodnoty nulové složky jalového výkonu u zdravého a postiženého vývodu v závislosti na R_P	52
6.3	Kompenzovaná síť - nastavení ochran.	53
6.4	Hodnoty nulové složky činného výkonu u zdravého a postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na R_P	56
6.5	Odporově uzemněná síť - nastavení ochran.	58
6.6	Hodnoty nulové složky činného proudu zdravého a postiženého vývodu v odporově uzemněné síti.	59

Úvod

Elektrizační soustava České republiky je složena ze zdrojů, sítě a spotřebičů. Základním rozdělením soustavy jsou dvě úrovně, přenosová a distribuční. Přenosová soustava označovaná též jako nadřazená tvoří páteř celého systému. Slouží k přenesení elektrické energie k sítím distribučním. Síť je charakteristická napěťovými hladinami 400 a 220 kV, zároveň do ní spadají vybrané vedení o 110 kV. Provozována je s uzlem účinně uzemněným a jsou do ní vyvedeny výkony velkých (systémových) elektráren. Zároveň propojuje soustavy sousedních států. Na přenosovou síť navazuje síť distribuční, která je charakteristická napěťovými hladinami od 110 kV až po síť nízkého napětí. Slouží k zásobování velkoodběratelů (z vyšších napěťových hladin) a zároveň i maloodběratelů (ze sítě nízkého napětí 400/230 V). Na hladině nízkého napětí a 110 kV je síť provozována jako přenosová, tedy s účinně uzemněným uzlem. Na hladině vysokého napětí je síť provozována jako izolovaná, či s neúčinně uzemněným uzlem. K zajištění spolehlivosti a bezpečnosti provozu je nutné systém vhodně a efektivně chránit. Snahou je omezení nežádoucích stavů, zejména poruch. Správné chránění zajistí rychlou a spolehlivou detekci a následnou lokalizaci poruchy.

Předmětem této práce je analýza nejběžnější poruchy, zemního spojení. Cílem je ukázat korektnost aplikace analytického řešení během poruchového stavu. Práce je rozdělena do šesti kapitol. První kapitola popisuje a začleňuje distribuční síť do kontextu celého systému a následně definuje poruchové stavy. Při definici poruchových stavů je podstatným faktorem ovlivňující vlastnosti poruchy způsob uzemnění uzlu transformátoru. Tuto problematiku zmiňuji v druhé kapitole, zároveň jsou zde popsány napěťové a proudové poměry. Třetí kapitola je zaměřena na metodu souměrných složek. Čtvrtá kapitola popisuje konkrétní síť. Jsou zde definovány parametry sítě, postupy výpočtu při aplikaci metody souměrných složek s využitím nástroje MS Excel. Síť byla navržena a celý výpočet konzultován s Ing. Františkem Žákem, Ph.D. V páté kapitole jsou zmíněny aktuální způsoby detekce a lokalizace poruch v sítích vysokého napětí. Šestá kapitola propojuje čtvrtou a pátou kapitolu, neboli vybrané metody detekce jsou aplikovány na konkrétní síť. Závěr práce je věnován vyhodnocení a návrhu řešení provozu dané sítě.

1 Distribuční sítě vysokého napětí

Distribuční soustava je vzájemně propojený funkční systém, který slouží k přivedení elektrické energie k průmyslovým a důlním závodům, elektrické trakci, domácnostem. Úkolem distribuce je zajistit dodávku elektrické energie v požadovaném čase, množství a místě při požadované kvalitě a spolehlivosti dodávky. Soustava je napájena z uzlových stanic přenosové soustavy (400 (220)/110 kV) a také z lokálních elektráren (fotovoltaické zdroje, vodní elektrárny, podnikové elektrárny). Síť je možné rozdělit na sítě distribuční s napěťovými hladinami 10, 22 a 35 kV a na sítě elektrárenské, důlní a průmyslové, kde se objevují napěťové hladiny 3, 6, 10 kV. Způsob a možnosti provozování těchto sítí jsou dány způsobem uzemnění transformátoru vvn/vn. Distribuční síť vysokého napětí je většinou provozována paprskovitě, pokud vyžadujeme větší spolehlivost dodávky, tak se využívá sítí okružních. V městských částech a průmyslu převažuje kabelové vedení, naopak mimo města se využívá venkovního vedení. Stanice vysokého napětí bývají převážně vnitřní (zapouzdrěné, skříňové, kobkové). [1, 2, 12]

1.1 Druhy poruch

1.1.1 Zemní spojení

Nejrozsáhlejší sítí v České republice je síť vysokého napětí, zejména síť 22 kV jako venkovní vedení. Na těchto sítích nejčastěji vznikají jednopólové poruchy, konkrétně zemní spojení. Jelikož v následujících kapitolách budu na zemní spojení hledět z mnoha úhlů, je vhodné shrnout na začátku základní informace.

Zemní spojení vzniká v sítích, kde uzel není spojen přímo se zemí a proud se nemůže na přímo uzavřít se zemí jako u zkratu. Pro zemní spojení je typický pokles napětí na postižené fázi, nárůst napětí na sdruženou hodnotu na fázích zdravých, vznik nulové složky proudu a napětí. Příčinou těchto poruch obvykle bývají vodivé dotyky vodiče se zemí, přeskoky na izolátorech, průrazy izolace. Všechny důsledky zemního spojení budou vysvětleny v dalších kapitolách. Síť je možné za určitých podmínek provoz i se zemním spojením, ale příčina by měla být odstraněna do dvou hodin. Níže uvádím základní dělení zemního spojení.

Zemní spojení je možné dělit dle velikosti přechodového odporu v místě poruchy.

Zemní spojení - kovové (dokonalé)

Přechodový odpor má nulovou hodnotu, respektive jednotky ohmů. Jedná se o zřídkačky objevující se typ zemního spojení. Během tohoto zemního spojení protéká vysoká hodnota poruchového proudu, tedy zemní spojení je dobře detekovatelné.

Zemní spojení - obloukové

Přechodový odpor má hodnotu odporu oblouku a většinou vzniká v rozlehlých sítích, kde hodnota poruchového proudu přesáhne 5 A. Typické pro tento typ zemního spojení je krátkodobé přerušované hoření oblouku, to vede k přepětím a vysokým vybíjecím proudovým špičkám. Obloukové zemní spojení může přejít ve zkrat, a to v případě, že oblouk zasáhne vedlejší fázi.

Zemní spojení - odporové

Jedná se o nejběžnější typ zemního spojení. Hodnota přechodového odporu se pohybuje až k tisícům ohmů. V porovnání s kovovým zemním spojením je na druhém břehu. Poruchový proud nedosahuje takové hodnoty, jelikož je tlumen, tedy vysoko-ohmová zemní spojení jsou velmi obtížně detekovatelná.

Zemní spojení je možné dělit dle doby trvání:

- mžikové zemní spojení → doba trvání do 500 ms,
- krátkodobé zemní spojení → do 5 minut,
- trvalé zemní spojení → porucha trvá, dokud ho obsluha neodstraní,
- přerušované zemní spojení → sekvenčně se opakující zemní spojení.

1.1.2 Zemní zkrat

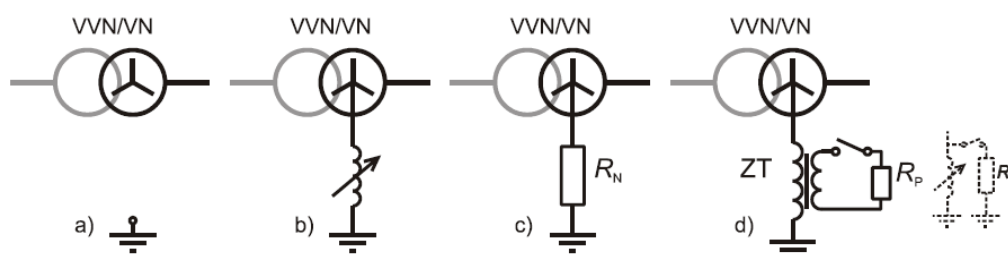
V této práci pracuji i se sítí uzemněnou přes odporník, proto je vhodné zmínit i zemní zkrat. Tento typ poruchy se objevuje v sítích s přímo uzemněným nebo v sítích uzemněných přes uzlový odporník. Impedance mezi uzlem transformátoru a zemí je nulová, respektive do stovek ohmů. Postiženou fází teče vysoká hodnota poruchového proudu, tedy v těchto sítích dbám na rychlé vypnutí. Vysoká hodnota poruchového proudu vede ke snadné detekci. Na druhé straně i zde řeším problém při vysoko-ohmových poruchách.

2 Způsob uzemnění uzlu s analýzou jednofázových poruch v sítích vn

Volba typu provozu sítě nám určuje, jakým způsobem můžeme konkrétní síť provozovat a to z pohledu bezpečnosti, dimenzování, chránění a nepřetržitosti dodávky elektrické energie. Pokud je síť v bezporuchovém stavu, tak se způsob provozu uzlu nijak neprojeví.

Sítě vysokého napětí jsou v České republice provozovány ve třech variantách, s izolovaným uzlem, nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku nebo nepřímo uzemněné přes rezistor. S takto provozovaným uzlem se při vodivém spojení jedné fáze se zemí (např. pták sedící na konzole se dotkl křídlem fázového vodiče) jedná o jednofázovou poruchu. Je vhodné upozornit, že jednofázový zkrat není to samé co zemní spojení. Pokud porucha vznikne v síti, kde je uzel účinně uzemněn, jedná se o jednofázový zkrat, který není možné provozovat a musí dojít k co nejrychlejšímu odpojení postižené fáze. U sítí izolovaných, či neúčinně uzemněných, se při poruše jedná o zemní spojení. Poruchový proud zemního spojení nedosahuje tak vysoké úrovně jako proud jednofázového zkratu a není nutné okamžitého vypnutí postiženého vývodu. Velikost poruchového proudu nám velmi podstatně ovlivňuje rizika úrazu elektrickým proudem, dimenzování vodičů a izolace. [1, 3]

Jelikož je distribuční soustava velmi rozsáhlá a většina poruch je způsobena atmosférickými vlivy, které mají přechodný charakter a v krátkém časovém horizontu sami odezní, tak se u těchto sítí využívá neúčinně uzemněných a izolovaných uzlů transformátorů. Pokud popisují přechodné poruchy, tak mám většinou na mysli venkovní vedení. U kabelového vedení se zpravidla jedná o trvalé zemní spojení, které přechází ve zkrat. Každý typ uzemnění uzlu transformátoru má své individuální vlastnosti a hodí se pro určitý provoz sítě. Na obrázku 2.1 je grafické znázornění a možné způsoby provozu uzlu transformátoru. V České republice se převážná část sítí vn provozuje jako neúčinně uzemněná, kde se přepíná mezi zhášecí tlumivkou a odporníkem, který je umístěn na sekundární straně tlumivky (obr. 2.1 d)). Důvod je očividný, dnešní struktura sítě vysokého napětí je kombinací venkovního a kabelového vedení. Jedná se o provoz s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde se při trvalé poruše připojí paralelně rezistor, který navýší poruchový proud a zajistí tím podmínky pro vybavení ochrany postiže-



Obrázek 2.1: Možnosti provozu uzlu vn sítí.

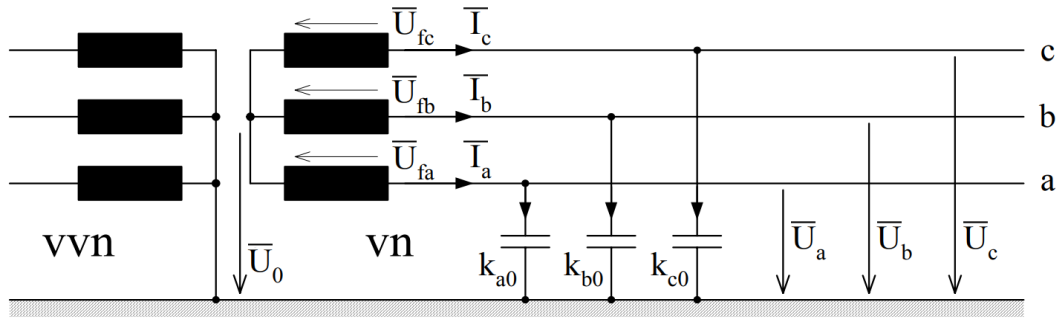
ného vývodu. Malé sítě průmyslových a důlních závodů, popřípadě vlastní spotřeba elektráren, jsou provozovány s izolovaným uzlem.

Rozhodnutí o správném a vhodném uzemnění uzlu transformátoru se řídí dle těchto klíčových faktorů: [1, 2]

- *celkový kapacitní proud soustavy,*
- *úroveň poruchového proudu (kapacitní proud zemního spojení, či zbytkový proud),*
- *ustálená poruchová napětí (stacionární rezonanční přepětí),*
- *přepětí při vzniku jednopólové poruchy,*
- *přepětí při přerušení jednopólové poruchy (vliv elektrického oblouku, rychlost zotavení vn systému),*
- *ferorezonanční přepětí, přenesená napětí,*
- *způsob likvidace poruchy,*
- *možnost dosažení maximální citlivosti ochran,*
- *ovlivnění pomocných obvodů,*
- *porovnávací investiční náklady,*
- *provozní náklady,*
- *bezpečnost s ohledem na hodnoty dotykových a krokových napětí.*

2.1 Síť s izolovaným uzlem

V této soustavě není nulový bod spojený se zemnicí soustavou. Síť s izolovaným uzlem bývají malého rozsahu, a to zejména u průmyslových a důlních závodů. Jsou používány tam, kde zemní proud nepřevyšuje hodnotu 10A. Tento kapacitní proud vychází z fázorového součtu proudů nepostížených fází, které se uzavírají v místě zemního spojení. Nutno podotknout, že proud je závislý na velikosti sítě. Pokud by velikost sítě byla větší a proud by přesáhl hranici 10A kapacitního proudu, byla by potřeba využít kompenzace. [1, 4]



Obrázek 2.2: Bezporuchový stav izolované soustavy.

2.1.1 Bezporuchový stav

Bezporuchový stav sítě je znázorněn na obrázku 2.2, kde uvažují symetrické napětí zdroje, chod sítě naprázdno a kapacity sítě proti zemi. Ostatní parametry zanedbávám. Z obrázku 2.2 plynou rovnice pro napětí a proudy.

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} &= 0 \\
 \bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} &= 0 \\
 \bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} &= 0
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_a &= j\omega k_{a0} \cdot \bar{U}_a \\
 \bar{I}_b &= j\omega k_{b0} \cdot \bar{U}_b \\
 \bar{I}_c &= j\omega k_{c0} \cdot \bar{U}_c
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Jelikož jsem v síti s izolovaným uzlem a využiji první Kirchhoffův zákon, tak rovnice vypadají takto:

$$\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = 0 \tag{2.3}$$

Dosazením rovnic 2.2 do rovnice 2.3 získám:

$$j\omega k_{a0} \cdot \bar{U}_a + j\omega k_{b0} \cdot \bar{U}_b + j\omega k_{c0} \cdot \bar{U}_c = 0 \tag{2.4}$$

Vynásobím rovnice 2.1 $j\omega k_{a0}$, $j\omega k_{b0}$, $j\omega k_{c0}$:

$$\begin{aligned}
 j\omega k_{a0} \cdot \bar{U}_a - j\omega k_{a0} \cdot \bar{U}_0 - j\omega k_{a0} \cdot \bar{U}_{fa} &= 0 \\
 j\omega k_{b0} \cdot \bar{U}_b - j\omega k_{b0} \cdot \bar{U}_0 - j\omega k_{b0} \cdot \bar{U}_{fb} &= 0 \\
 j\omega k_{c0} \cdot \bar{U}_c - j\omega k_{c0} \cdot \bar{U}_0 - j\omega k_{c0} \cdot \bar{U}_{fc} &= 0
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Sečtu rovnice 2.5:

$$j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_0 - j\omega(k_{a0}\bar{U}_{fa} + k_{b0}\bar{U}_{fb} + k_{c0}\bar{U}_{fc}) = 0 \quad (2.6)$$

První člen rovnice je nulový (viz rovnice 2.4). Dále uvažuji, že $\bar{U}_{fb} = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{fa}$ a $\bar{U}_{fc} = \bar{a} \cdot \bar{U}_{fa}$, kde:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.7)$$

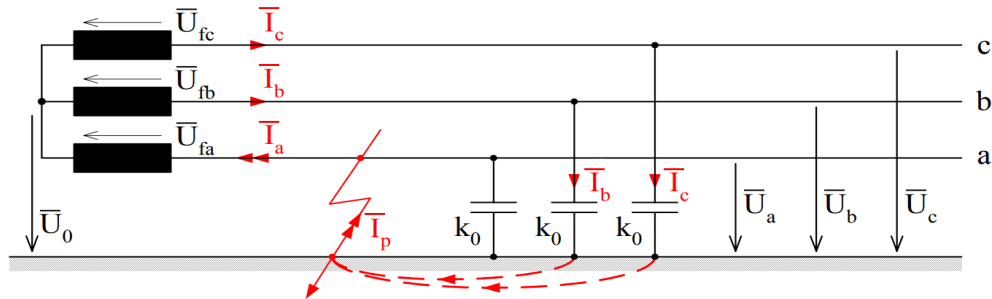
$$\bar{a}^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.8)$$

Po úpravě rovnice 2.6 získám tuto rovnici:

$$\bar{U}_0 = -\frac{k_{a0} + \bar{a}^2 \cdot k_{b0} + \bar{a} \cdot k_{c0}}{k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.9)$$

Z rovnice 2.9 vyplývá, že v kapacitně nesouměrné síti se napětí proti zemi v izolovaném uzlu nerovná nule ($\bar{U}_0 \neq 0$). V kapacitně souměrné síti bude platit, že $k_{a0} = k_{b0} = k_{c0} = k_0$, potom tedy čitatel z rovnice 2.9 bude nula ($k_0 \cdot (1 + \bar{a}^2 + \bar{a}) = 0$) a napětí uzlu proti zemi musí být také nula, tedy $\bar{U}_0 = 0$.

2.1.2 Poruchový stav - kovové zemní spojení



Obrázek 2.3: Poruchový stav izolované soustavy - kovové zemní spojení.

Z obrázku 2.3 lze číst, že poruchový proud je součtem zdravých fází. Napětí fáze s poruchou proti zemi při dokonalém zemním spojení je nulové. Z toho vyplývají tyto rovnice:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.10)$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (2.11)$$

Proudy \bar{I}_b a \bar{I}_c si vyjádřím jako:

$$\bar{I}_b = j\omega k_0 \cdot \bar{U}_b \quad (2.12)$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_0 \cdot \bar{U}_c \quad (2.13)$$

Napěťové rovnice vypadají takto:

$$\begin{aligned} \bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} &= 0 \\ \bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} &= 0 \\ \bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} &= 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

Po dosazení rovnice 2.11 se dostávám k napětí uzlu transformátoru, které klesne na zápornou hodnotu fázového napětí postižené fáze.

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (2.15)$$

Uvažuji $\bar{U}_{fb} = \bar{a}^2 \cdot \bar{U}_{fa}$ a $\bar{U}_{fc} = \bar{a} \cdot \bar{U}_{fa}$ a z rovnic 2.14 dostávám:

$$\bar{U}_b = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = -\bar{U}_{fa} + \bar{U}_{fb} = (-1 + \bar{a}^2) \cdot \bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{+j30^\circ} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.16)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fc} = -\bar{U}_{fa} + \bar{U}_{fc} = (-1 + \bar{a}) \cdot \bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.17)$$

Dle rovnic 2.16 a 2.17 napětí zdravých fází proti zemi vzrostlo na sdruženou hodnotu. Dosazením těchto hodnot do rovnice s poruchovým proudem získám hodnotu zemního poruchového proudu při kovovém (dokonalém) zemním spojení.

$$\bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega k_0 \cdot [(-1 + \bar{a}^2) + (-1 + \bar{a})] \cdot \bar{U}_{fa} = j\omega k_0 \cdot (-2 + \bar{a}^2 + \bar{a}) \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.18)$$

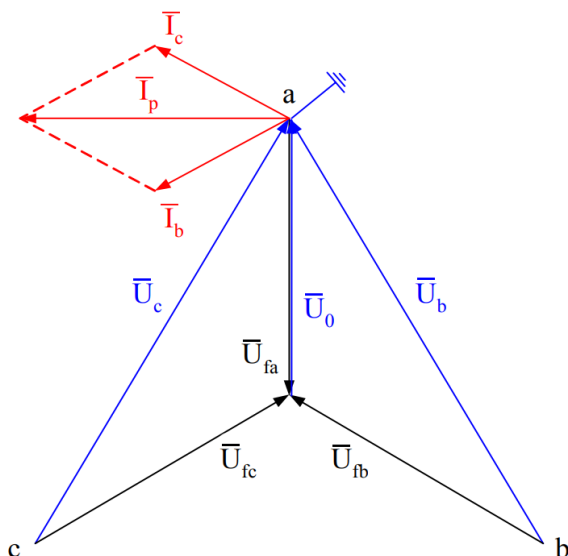
Výsledkem 2.18 je rovnice, která nám udává hodnotu poruchového proudu při kovovém (dokonalém) zemním spojení.

$$\bar{I}_p = -3 \cdot j\omega k_0 \cdot \bar{U}_{fa} = 3 \cdot j\omega k_0 \cdot \bar{U}_0 \quad (2.19)$$

Graficky znázorněné proudové a napěťové poměry jsem uvedl v grafu 2.4. Poruchový proud při dokonalém zemním spojení předbíhá napětí uzlu o $\Pi/2$ a je fázorovým součtem proudů zdravých fází. Poruchový zemní proud téměř nezávisí na vzdálenosti místa poruchy od transformátoru, ale na celkové rozloze sítě. To je důvod, proč se využívá izolovaného uzlu transformátoru v menších sítích, kde kapacitní poruchový zemní proud nedosahuje takové velikosti.

Pro představu jaké velikosti kapacitních proudů jsou v sítích 22 kV:

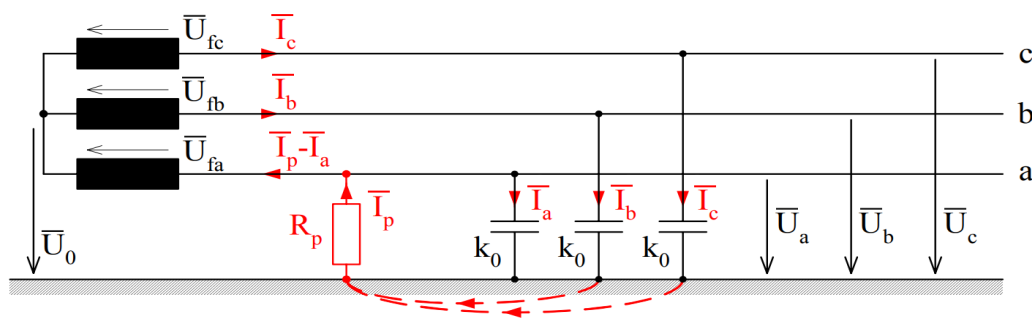
- venkovní vedení - 0,08 A/km,
- kabelového vedení - 3,5 - 4,5 A/km (vyšší měrné kapacity, závislost na průřezu jader, konstrukci kabelu a druhu izolace).



Obrázek 2.4: Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při kovovém zemním spojení.

2.1.3 Poruchový stav - odporové zemní spojení

Kovové zemní spojení se objevuje málokdy, většinou se jedná o ojedinělý případ. Většina zemních spojení má odporový charakter, a to řádově několik set Ω . Odporové zemní spojení je znázorněné na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5: Poruchový stav izolované soustavy - odporové zemní spojení.

Základní napěťové a proudové rovnice zůstávají stejné jako u kovového zemního spojení, či bezporuchového stavu (rovnice 2.1 a 2.2). Napětí postižené fáze proti zemi v tomto případě není nulové, ale platí rovnice:

$$\bar{I}_p = \frac{-\bar{U}_a}{R_p} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (2.20)$$

Aplikuji stejný postup jako u bezporuchového stavu izolované soustavy u rovnic 2.4 a 2.5 a získávám rovnici 2.6:

$$j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) - j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_0 - j\omega(k_{a0}\bar{U}_{fa} + k_{b0}\bar{U}_{fb} + k_{c0}\bar{U}_{fc}) = 0 \quad (2.21)$$

První člen rovnice 2.21 představuje poruchový proud \bar{I}_p . Pokud vyjádřím napětí postižené fáze, to již mám (rovnice 2.1) $\bar{U}_a = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fa}$, tak jsem schopen dopočítat napětí při odporovém zemním spojení.

$$\bar{U}_0 = -\frac{j\omega(k_{a0} + \bar{a}^2 \cdot k_{b0} + \bar{a} \cdot k_{c0}) + R_p^{-1}}{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + R_p^{-1}} \cdot \bar{U}_{fa} \quad (2.22)$$

Rozeznávám dva stavy R_p :

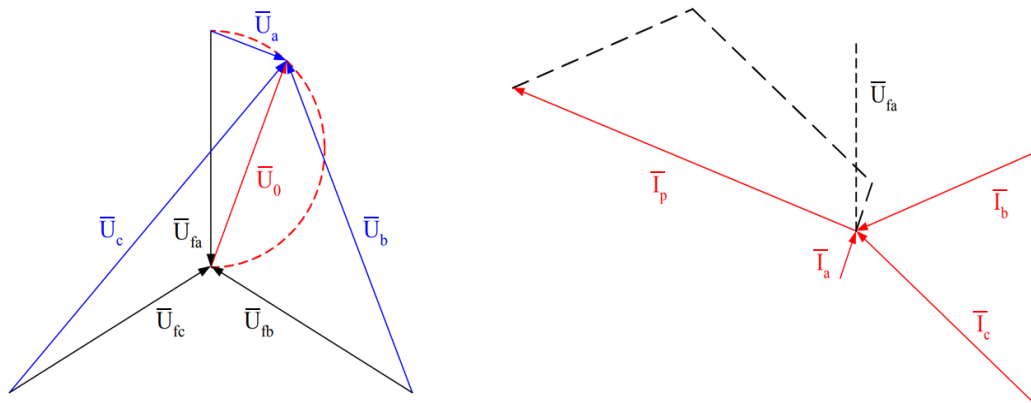
- $R_p=0$... dokonalé zemní spojení: $\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa}$,
- $R_p \rightarrow \infty$... bezporuchový stav: $\bar{U}_0=0$.

Pomůžu si tím, že napětí uzlu vyjádřím jako funkci odporu poruchy R_p . Jelikož hodnotu R_p neznám a může nabývat velkého spektra hodnot $(0, \infty)$, tak napětí \bar{U}_0 vynáším do Gaussovo roviny viz fázorové diagramy napětí a proudu 2.6. Může nastat situace, kdy napětí zdravé fáze nabyde větší než sdružené hodnoty napětí.

$$\bar{U}_0 = f(R_p) \quad (2.23)$$

Poruchový proud odporového zemního získám následujícím způsobem:

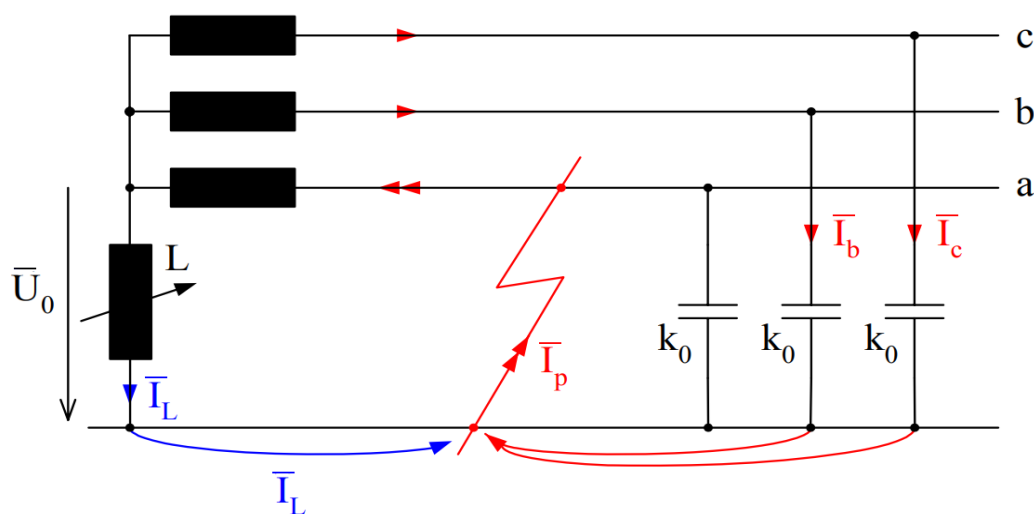
$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) = j\omega k_0(\bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c) = \\ &= j\omega k_0 [3\bar{U}_0 + (\bar{U}_{fa} + \bar{U}_{fb} + \bar{U}_{fc})] = 3j\omega k_0 \bar{U}_0 = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega k_0 + R_p^{-1}} \end{aligned} \quad (2.24)$$



Obrázek 2.6: Fázorové diagramy napětí a proudu při odporovém zemním spojení.

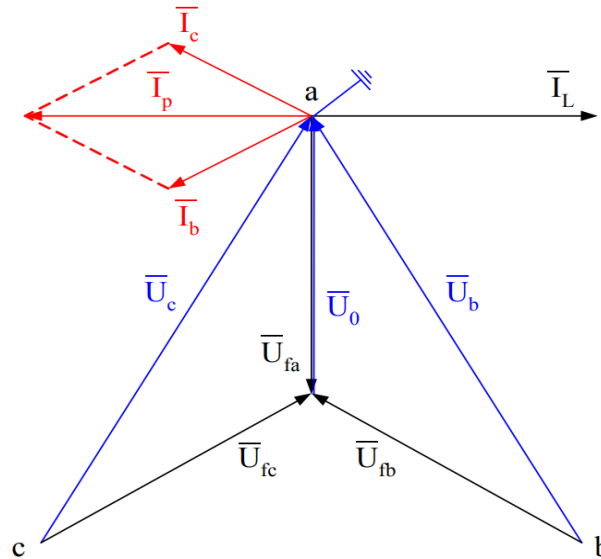
2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku

Nulový bod transformátoru je spojen přes zhášecí tlumivku. Pomocí tlumivky kompenzují kapacitní proud zemního spojení. Po správném naladění tlumivky prochází místem poruchy pouze zbytkový (reziduální) proud, který je převážně činného charakteru a obvykle je velikostí do 10% kapacitního proudu zemního spojení. Kompenzace se doporučuje v sítích, kde proud zemním spojením převyšuje 5 A. Kompenzace je nutná v případech, kdy proud přesáhl 10 A. Venkovní sítě tímto způsobem provozují do 100 A kapacitního proudu zemním spojením. V sítích smíšených (venkovní a kabelové vedení) je hranicí 300 A. V kabelových sítích je mezní hodnotou 450 A. V našich sítích vysokého napětí se nejvíce využívá centralizované kompenzace, kdy je jedna zhášecí tlumivka zapojena mezi nulový uzel transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. V málo častých případech lze využít více tlumivek a provozovat je paralelně, kdy jsou řízeny automatikou, která je ladí do paralelní rezonance s celkovou kapacitou dané sítě. Provoz sítě s uzlem uzemněným přes tlumivku má velký benefit, podobně jako u sítí izolovaných. Síť je možné provozovat se zemním spojením po dobu nutnou k nalezení a odstranění příčiny zemního spojení a to bez nutnosti přerušování dodávky elektrické energie. Nevýhodou je možnost rozšíření poruchy na dvojitě zemní spojení, či mezifázový zkrat, kdy musí být síť okamžitě odpojena. Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku je uvedena na obrázku 2.7. [2]



Obrázek 2.7: Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku.

V bezporuchovém stavu při kapacitně souměrné síti je napětí uzlu $\bar{U}_0=0$, napětí zpravidla bývá $\bar{U}_0 < 0,01\bar{U}_f$ a to díky nesymetriím. Při dokonalém zemním spojení je napětí uzlu $\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa}$. Kompenzační proud tekoucí tlumivkou je o $\pi/2$ zpožděn za napětím \bar{U}_0 . Při správně nastavené indukčnosti L nastává kompenzace poruchových zemních proudů. Dle fázorového diagramu 2.8 je proud jdoucí od tlumivky induktivního charakteru a je v protifázi s kapacitním poruchovým proudem.



Obrázek 2.8: Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při ideální kompenzaci zemního spojení tlumivkou.

Při úplné kompenzaci uvažují tento vztah:

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \quad (2.25)$$

Poruchový proud zemním spojením jsem definoval jako $\bar{I}_p = 3 \cdot j\omega k_0 \cdot \bar{U}_0$ (rov. 2.20), tedy mohu napsat rovnici:

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (2.26)$$

Indukčnost pro kompenzaci zemního spojení získám vyjádřením L:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} \quad (2.27)$$

Zdánlivý výkon tlumivky dostanu následovně:

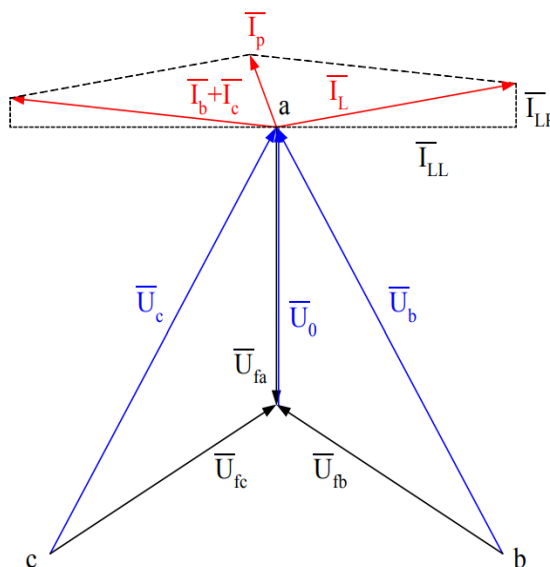
$$S = \bar{U}_0 \cdot \bar{I}_L^* = j \frac{\bar{U}_0 \cdot \bar{U}_0^*}{\omega L} = 3j\omega k_0 \bar{U}_0^2 = 3j\omega k_0 \bar{U}_f^2 = j\omega k_0 \bar{U}_{sdr}^2 \quad (2.28)$$

Poruchový (reziduální) proud vyjádřím takto:

$$\bar{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L}) \right] \cdot \bar{U}_0 \quad (2.29)$$

- $R_L \rightarrow$ odpor tlumivky,
- $G_0 \rightarrow$ svodový odpor jedné fáze.

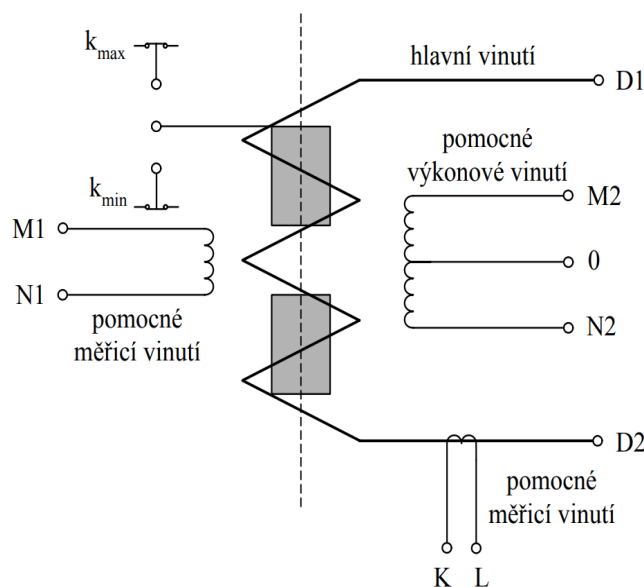
Ideální kompenzace způsobí to, že místem poruchy neteče žádný proud, oblouk je uhašen. Při reálných poměrech teče místem poruchy reziduální proud, který se skládá z nepřesně nastavené indukčnosti a činné složky, která je dána svody vedením a činným odporem tlumivky. Reziduální proud je ovlivněn vyššími harmonickými. V případě, že je reziduální proud pod hranicí 5A, oblouk je uhašen a to vlivem deionizace jeho dráhy. Reziduální proud je znázorněn na fázorovém diagramu 2.9. Pokud máme dobře vyladěnou tlumivku, reziduální zbytkový proud je nižší, než kapacitní proud sítě a dospějí k podmínkám, kdy nastává samozhášení, či zabraňují opětovným zápalům oblouku.



Obrázek 2.9: Fázorový diagram proudových a napěťových poměrů při reálné kompenzaci zemního spojení tlumivkou.

2.2.1 Ladění zhášecí tlumivky

Zhášecí tlumivka se připojuje k uzlu napájecího transformátoru a to v napájecích rozvodnách vysokého napětí. Není-li uzel vn strany vyveden, připojí se tlumivka na uzel uměle vytvořený trojfázovou nulovou tlumivkou nebo k uzlu pomocného nezátíženého transformátoru $Y_N/d1$. Počet tlumivek se odvozuje od počtu napájecích transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a velikosti kapacitního proudu dané sítě. Vhodná velikost indukčnosti tlumivky se stanovuje výpočtem. Při odepnutí, či připnutí části vedení je nutné tlumivku přeladit. Pro korektní nastavení tlumivky, která je připojena k transformátoru 110kV/vn a pracuje pro venkovní, či smíšenou síť s kapacitním proudem větším než 50 A, musí být zajištěna samočinná regulace vyladění doplněná o manuální regulaci proudu tlumivkou. Dále je třeba ukazatele proudového a napěťového nastavení a v neposlední řadě automatiku připínání odporu, která slouží k navýšení činné složky poruchového proudu a k snadnější lokalizaci zemního spojení.[5] Schéma 2.10 ukazuje tlumivku, která využívá automatiky připínání odporníku k výkonovému vinutí. [2]



Obrázek 2.10: Schéma tlumivky s automatikou připínání odporníku k výkonovému vinutí.

Důležitým elementem k ladění tlumivky je znalost rezonanční křivky. Na grafu 2.11 jsem uvedl dvě rezonanční křivky.

- Křivka A odpovídá venkovnímu vedení, kde je jistá kapacitní nesymetrie a nepatrný činný odpor. Křivka má velmi vysoké maximum, které při rezonanci značně namáhá uzel transformátoru vysokým napětím \bar{U}_L . V těchto situacích se záměrně tlumivka rozladí o hodnotu ΔL , jelikož má křivka velkou strmost, tak i relativně malé ΔL dokáže napětí \bar{U}_L razantně snížit. Stále je nutné se držet hodnoty 5 A, pokud ji reziduální proud nepřesáhne, tak tlumivka bude plnit svoji funkci (nezapálí se oblouk, samozhášení).
- Křivka B odpovídá kabelovým sítím, tedy málo kapacitně nesymetrickým. Rezonanční křivka je o poznání plošší (větší symetrie = plošší křivka). To má za příčinu obtížnější detekci maxima pomocí voltmetru. Jak je vidět na grafu 2.11, tak změna o ΔL nebude mít téměř žádný vliv na napětí uzlu transformátoru.

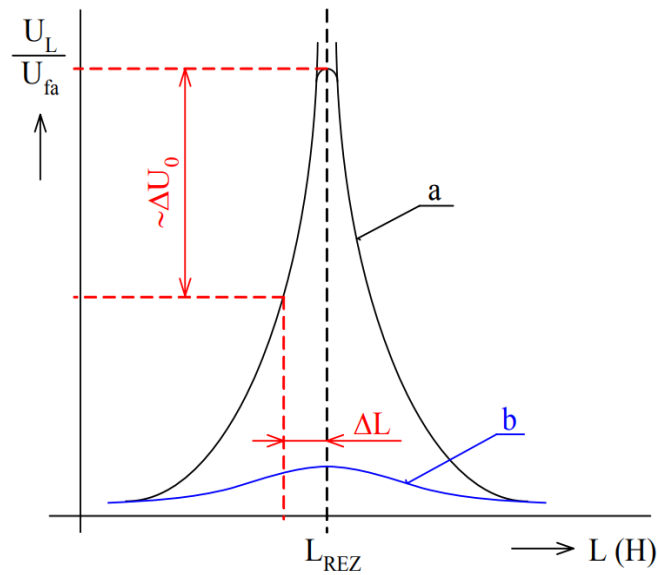
K určení rovnic využijí obrázku 2.12, ze kterého vyplývají tyto rovnice:

$$\bar{U}_L = j\omega L \bar{I}_L \quad (2.30)$$

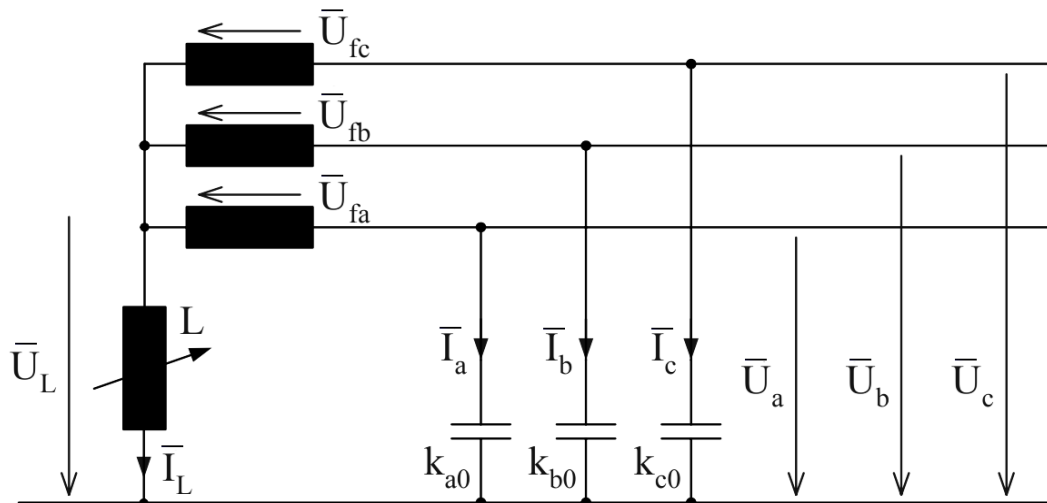
$$\bar{U}_a - \bar{U}_L - \bar{U}_{fa} = 0 \rightarrow \bar{U}_a = \bar{U}_L + \bar{U}_{fa} \quad (2.31)$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_L - \bar{U}_{fb} = 0 \rightarrow \bar{U}_b = \bar{U}_L + \bar{U}_{fb} \quad (2.32)$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_L - \bar{U}_{fc} = 0 \rightarrow \bar{U}_c = \bar{U}_L + \bar{U}_{fc} \quad (2.33)$$



Obrázek 2.11: Rezonanční křivka.



Obrázek 2.12: Připojení zhašecí tlumivky do uzlu trojfázové sítě.

$$-\bar{I}_L = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = j\omega(k_{a0}\bar{U}_a + k_{b0}\bar{U}_b + k_{c0}\bar{U}_c) \quad (2.34)$$

Dosazením do rovnice 2.34 získám:

$$-\bar{I}_L = j\omega [(k_{a0} + k_{b0}\bar{a}^2 + k_{c0}\bar{a})\bar{U}_{fa} + (k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_L] \quad (2.35)$$

Po vyjádření \bar{I}_L z rovnice 2.30 dostávám $\bar{I}_L = \frac{\bar{U}_L}{j\omega L}$ a po dosazení do rovnice 2.35 dosáhnou rovnice:

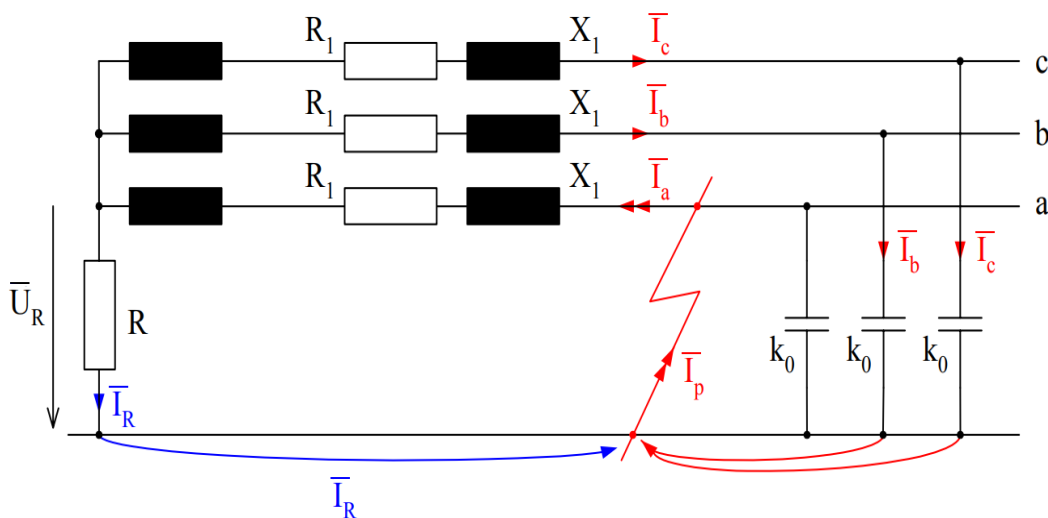
$$-\bar{U}_L = -\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0}\bar{a}^2 + k_{c0}\bar{a})\bar{U}_{fa} - \omega^2 L(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})\bar{U}_L \quad (2.36)$$

Poslední úpravou získám:

$$\bar{U}_L = \frac{-\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0}\bar{a}^2 + k_{c0}\bar{a})}{\omega^2 L(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0})} \bar{U}_{fa} \quad (2.37)$$

2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor

Obtížné naladění tlumivky, zapříčiněné minimální kapacitní nesymetrií, vede k využívání rezistoru (uzlového odporníku) místo tlumivek. Odporově uzemněných sítí se využívá především u kabelových vedení, kde většina poruch nemá přechodný charakter, ale charakter trvalý, tedy nenastává samozhášení poruch (oblouku) jako u venkovního vedení. Porucha u kabelových vedení většinou souvisí s poškozením kabelu a další provoz je nežádoucí, zemní spojení může přejít do zkratu. U venkovních vedení, kde je většina poruch s přechodným charakterem, využívám systému OZ (opětného zapnutí), které snižuje dlouhodobé přerušení dodávek. Tlumivka neomezuje přepětí a izolace zdravých fází je namáhána, tedy zvýšené napětí přináší větší procento vzniku vícenásobných poruch. Transformátor je uzemněn přes činný odpor. Při vzniku izolační poruchy na postižené fázi poklesne napětí, naopak napětí uzlu vzroste téměř na fázovou hodnotu. Místem poruchy protéká proud činným odporem a kapacitní proud celé sítě (znázorněno na obrázku 2.13). Velikost poruchového proudu je dána rozlohou sítě, ovšem



Obrázek 2.13: Síť s uzlem uzemněným přes rezistor.

klesá se zvyšující se vzdáleností poruchy od transformátoru. Správně zvoleným odporem dokážu omezit zkratový proud. Aby nedocházelo k přepětí, je nutné dodržet tuto podmínku: [2]

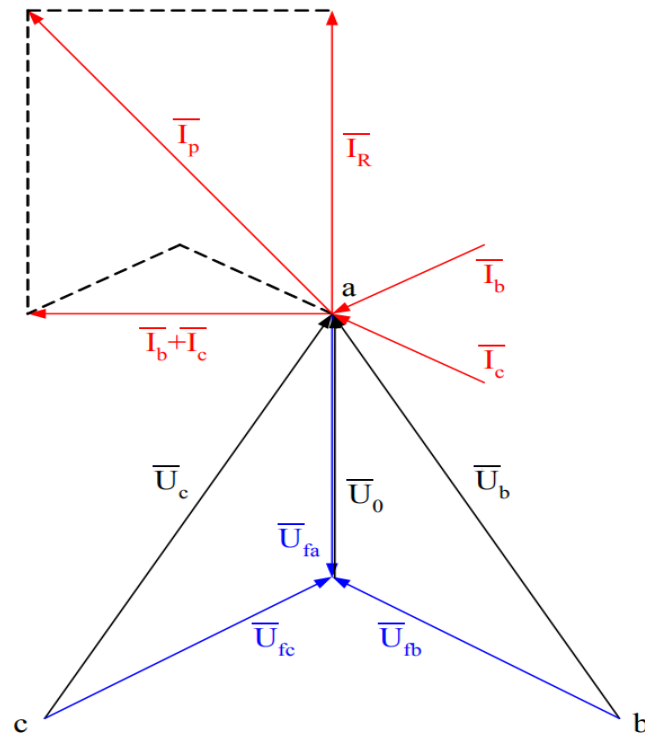
$$\bar{I}_R \geq \bar{I}_{kap} \rightarrow \frac{\bar{U}_f}{R_{PO}} \geq 3\omega k_0 \bar{U}_f \rightarrow R_{PO} \leq \frac{1}{3\omega k_0 C} \quad (2.38)$$

Na fázorovém diagramu 2.14 je zobrazen maximální proud zemní poruchy, který je vektorovým součtem proudu rezistorem a kapacitního proudu sítě. V tomto případě se jedná o poruchu,

kteřá je nedaleko transformátoru. Jsou zde zanedbány podélné impedance vedení a odpor v místě poruchy.

$$\bar{I}_p = -(R_{PO}^{-1} + 3j\omega k_0)\bar{U}_f = \bar{I}_R + \bar{I}_{kap} \quad (2.39)$$

Využití rezistoru je nutné přesáhne-li kapacitní proud sítě 350 A. U sítí, kde tato hodnota není



Obrázek 2.14: Fázorový diagram zemní poruchy nedaleko transformátoru.

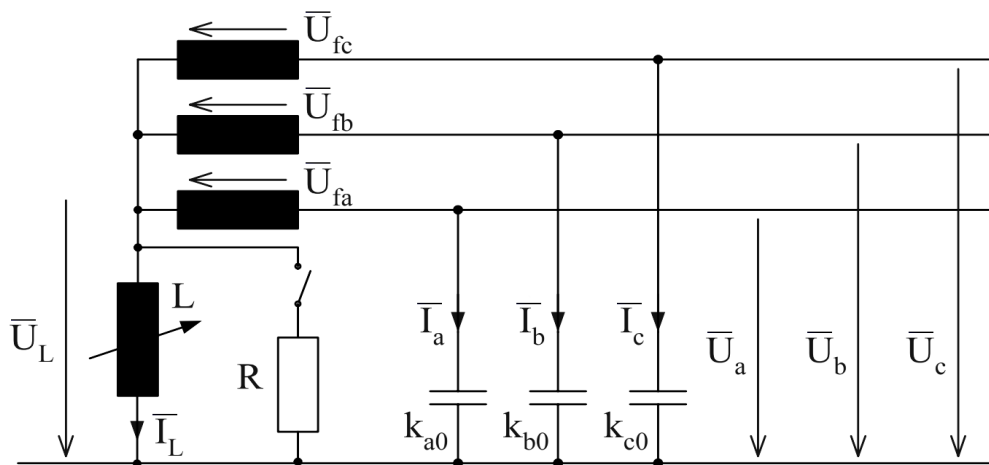
překročena, je využití rezistoru možné. Otázkou je, zda bude provoz výhodnější s rezistorem, nebo bez něj. To závisí na poměru typu poruch, neboli na poměru kabelového vedení k vedení venkovnímu.

2.4 Síť s přechodným uzemněním uzlu

Ze schématu sítě (obrázek 2.15) je patrné, že se jedná o síť, která kompenzuje zemní kapacitní proudy. Pokud tato zemní spojení nemají přechodný charakter, tak připojujeme k tlumivce rezistor (uzlový odporník), který navýší poruchový proud a zemní ochrany mají zlepšené předpoklady k nalezení zemního spojení. Zde také platí, že proud rezistorem má být větší než kapacitní proud sítě ($R \leq \frac{1}{3\omega k_0}$). V některých případech je možné vidět podobné řešení a to zatěžování tlumivky pomocného výkonového vinutí rezistorem (sekundárním odporníkem). V této situaci nebývá činná složka poruchového proudu větší než kapacitní proud sítě. Tento případ je zobrazen na obrázku 2.10 v kapitole 2.2.1.

Připínání rezistorů funguje na bázi automatiky. Rezistor je potřeba sepnout pouze při trvajícím zemním spojení. Po vzniku zemního spojení je nutné počkat, zda oblouk zhasne. Pokud se toto nestane, pomocný měřicí obvod automatiky při zemním spojení indikuje zvýšené napětí na měřicím vinutím a dle nastavené časové prodlevy připne rezistor. Časové zpoždění může být od 0,5 s do 10 s. Další nastavitelný parametr je doba zapnutí rezistoru (1 s - 3 s) a je volena tak, aby byla dostačující pro působení zemních relé, případně překryla přestávku rychlého OZ. Automatika funguje ve dvou režimech. [2]

- Síť je možné určitou dobu provozovat se zemním spojením. V tomto případě je sepnutí rezistoru potřebné na počátku zemního spojení a to z důvodu zabezpečení funkčnosti zemních relé vývodů. Po tomto úkonu je automatika zablokována až do konce zemního spojení. Konec zemního spojení uvažujeme jako pokles napětí na pomocném obvodu měření tlumivky a to po dobu delší 10 s.
- Pro tyto sítě je nežádoucí provoz se zemním spojením (kombinované sítě s převahou kabelového vedení). Pokaždé, když nastane zemní spojení, posílám impuls na sepnutí rezistoru a to i opakovaně, pro případ vzniku následné poruchy. Součástí automatiky je tepelný model, který hlídá teplotní stav rezistorů, aby nedošlo k tepelné degradaci.

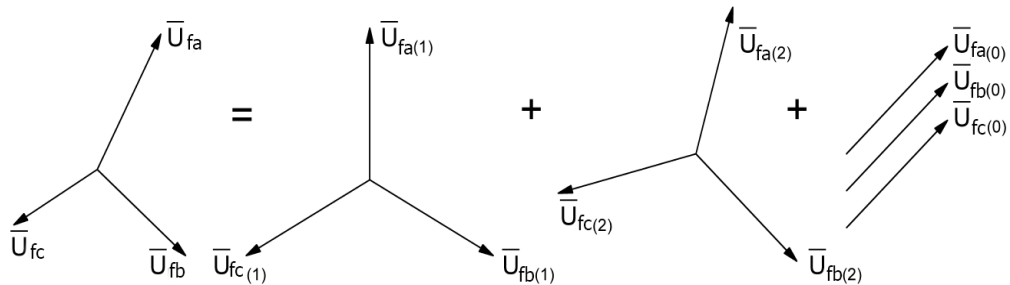


Obrázek 2.15: Síť s přechodným uzemněním uzlu transformátoru.

3 Metoda souměrných složek

V sítích vysokého napětí se využívá k analýze a výpočtům poruch v ustáleném stavu velmi často metody souměrných složek. Staví se na tom, že každá nesymetrická trojfázová soustava lze rozložit na tři souměrné soustavy, viz obrázek 3.1: [1, 2]

- souslednou,
- zpětnou,
- netočivou (nulovou).



Obrázek 3.1: Metoda souměrných složek - rozložení na souslednou, zpětnou, nulovou.

Sousledná složka se sestává ze tří fázorů stejné velikosti posunutých o 120° . Sled fází je totožný jako prvotní soustava. Zpětná soustava je shodná jako sousledná, ale má opačný sled fází. Netočivá soustava obsahuje tři velikostně stejné fázory a stejné fáze. Součet těchto tří složek mi vrací původní soustavu:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{fa} &= \bar{U}_{fa(1)} + \bar{U}_{fa(2)} + \bar{U}_{fa(0)} \\ \bar{U}_{fb} &= \bar{U}_{fb(1)} + \bar{U}_{fb(2)} + \bar{U}_{fb(0)} \\ \bar{U}_{fc} &= \bar{U}_{fc(1)} + \bar{U}_{fc(2)} + \bar{U}_{fc(0)}\end{aligned}\tag{3.1}$$

Ve 2. kapitole se zabývám napěťovými a proudovými poměry ve vztahu s uzemněním uzlu transformátoru. Využiji definovaných fázorových natočení viz rovnice 2.8 a mohu rovnice vyjádřit následovně:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{fa} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_{fb} &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} \\ \bar{U}_{fc} &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Výše zmíněné rovnice (3.1, 3.2) mohu napsat v maticovém tvaru $\bar{U}_f = \bar{F} \cdot \bar{U}_s$:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_{fa} \\ \bar{U}_{fb} \\ \bar{U}_{fc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Vyjádril jsem Fortescue matici \bar{F} , jelikož determinant této matice není roven nule, je možné využít inverze a získat složková napětí, a to dle využití rovnice $\bar{U}_s = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_f$:

$$\begin{pmatrix} \bar{U}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U}_{fa} \\ \bar{U}_{fb} \\ \bar{U}_{fc} \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Vyjádřením matice 3.4 dostávám následující rovnice:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_a + \bar{a}\bar{U}_{fb} + \bar{a}^2\bar{U}_{fc}) \\ \bar{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_{fa} + \bar{a}^2\bar{U}_{fb} + \bar{a}\bar{U}_{fc}) \\ \bar{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{U}_{fa} + \bar{U}_{fb} + \bar{U}_{fc}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Pokud sečtu symetrické napětí a úbytky, získám celkové vnitřní elektromotorické napětí zdroje:

$$\begin{aligned} \bar{E}_{(1)} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ \bar{E}_{(2)} &= \bar{U}_{(2)} + \bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ \bar{E}_{(0)} &= \bar{U}_{(0)} + \bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Zpravidla se bere napětí zdroje jako souměrné, tedy využívám souslednou složku a $\bar{E}_{(2)} = \bar{E}_{(0)} = 0$. Z toho předpokladu vyplývají následující rovnice:

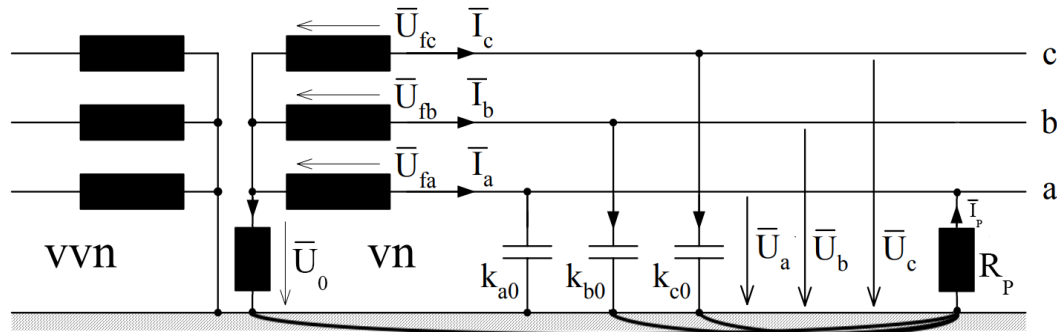
$$\begin{aligned} \bar{U}_{(1)} &= \bar{E} - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} \\ \bar{U}_{(2)} &= -\bar{I}_{(2)} \cdot \bar{Z}_{(2)} \\ \bar{U}_{(0)} &= -\bar{I}_{(0)} \cdot \bar{Z}_{(0)} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tímto způsobem jsem ukázal postup pro získání napětí, a to jak fázových, tak složkových (sousedných, zpětných, netočivých). Stejný postup bych aplikoval pro proudy, tedy paralela k rovnici 3.2 vypadá následovně:

$$\begin{aligned} \bar{I}_a &= \bar{I}_{(1)} + \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} \\ \bar{I}_b &= \bar{a}^2\bar{I}_{(1)} + \bar{a}\bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} \\ \bar{I}_c &= \bar{a}\bar{I}_{(1)} + \bar{a}^2\bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.1 Aplikace metody souměrných složek na síť s obecnou impedancí

Využití metody souměrných složek lze velmi názorně aplikovat na síť s obecnou impedancí \bar{Z}_N , viz obrázek 3.2. Pro aplikaci metody symetrických složek je vhodné využít zjednodušení:



Obrázek 3.2: Síť s poruchou - uzemněná přes obecnou impedanci.

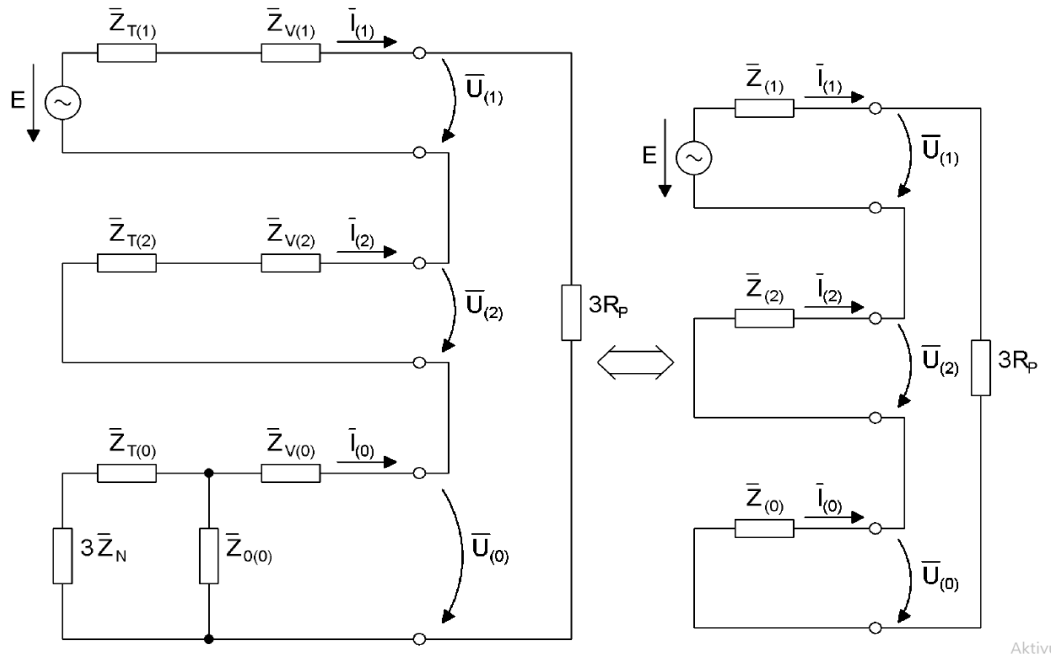
- předpoklad symetrického zdroje \bar{U} ,
- opomenutí mezifázových kapacit,
- rovnost kapacit jednotlivých fází $k_{a0}=k_{b0}=k_{c0}$.

Základní napěťové a proudové poměry při jednofázové zemní poruše jsem definoval v kapitole 2.1.2 a plyne z nich, že poruchový proud začne procházet před odpor poruchy. Impedance Z_N bude mít hodnotu uzlového napětí, tedy $Z_N=U_0$. Pokud poruchový stav nastane na fázi "a", tak napětí na této fázi bude nulové, $U_0=-U_{fa}$ a napětí na zdravých fázích vzroste na sdruženou hodnotu. Schéma 3.3 přispívá k dobré představě principu metody souměrných složek. V situaci, kdy potřebuji určit celkový poruchový proud a napěťové poměry, je vhodné využít zmíněného náhradního schématu zahrnující souslednou, zpětnou a netočivou složku. První dvě impedance zmíněných složek (sousedná a zpětná) sestávají z impedance transformátoru (Z_T) a impedance vedení (Z_V). U složky netočivé je potřebné respektovat trojnásobek obecné impedance v uzlu transformátoru (dáno nesymetrií), dále netočivé složky impedance transformátoru, vedení a příčný prvek impedance (Z_C), který zastupuje celkovou kapacitu soustavy (zanedbávám svod). Tedy velikost složkových proudů získám:

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} + \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_{(a)} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3\bar{R}_{(P)}} \quad (3.9)$$

Z obrázku 3.2 plyne, že poruchový proud \bar{I}_p má stejnou hodnotu jako \bar{I}_A , je pouze s opačným znaménkem:

$$\bar{I}_P = -\bar{I}_a = \frac{-3\bar{U}}{\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)} + 3\bar{R}_P} \quad (3.10)$$



Obrázek 3.3: Náhradní schéma sítě uzemněné přes obecnou impedanci.

K vyjádření složkových napětí využijí rovnice 3.7 a náhradní schéma sítě 3.3:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{(1)} &= \bar{E} - \bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} = (3R_P + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}) \cdot \bar{I}_{(1)} = \frac{3R_P + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f \\
 \bar{U}_{(2)} &= -\bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(2)} = -\bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(1)}}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f \\
 \bar{U}_{(0)} &= -\bar{I}_{(1)} \cdot \bar{Z}_{(0)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

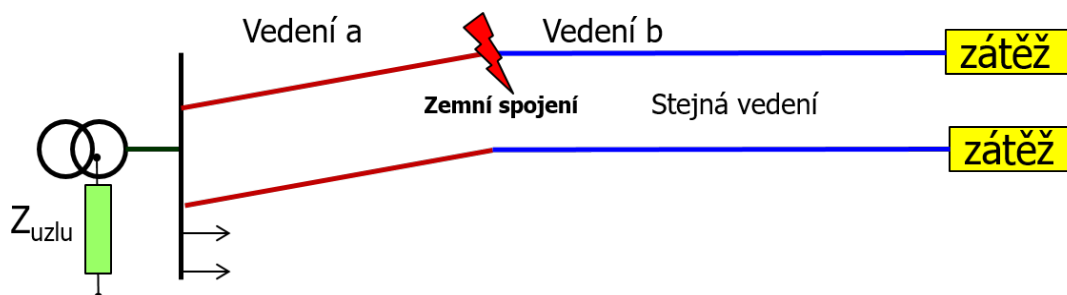
Fázové hodnoty napětí získám dle zmíněné rovnice 3.2:

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_{fa} &= \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \frac{3R_P}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \cdot \bar{U}_f \\
 \bar{U}_{fb} &= \bar{a}^2 \bar{U}_{(1)} + \bar{a} \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \cdot \bar{U}_f \\
 \bar{U}_{fc} &= \bar{a} \bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2 \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3R_P + \bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \cdot \bar{U}_f
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

Z uvedených vztahů vyplývá, že jsou aplikovatelné na veškerý provoz uzlu transformátoru. Specifické uzemnění uzlu ovlivňuje netočivou složku impedance $Z_{(0)}$ a ta má vliv na proudové a napěťové poměry v síti během poruchy.

4 Konkrétní síť

V této kapitole nadefinuji parametry sítě, která mi byla zadána a využiji teoretických kapitol k výpočtu modelu reálné sítě vysokého napětí pomocí metody Fortescue. Síť je zobrazena na obrázku 4.1, jde o dva stejné vývody. Každý vývod je složen ze dvou vedení a na konci zatížen tří fázovou zátěží. Síť je na napěťové hladině 22 kV, nadřazená síť je na hladině 110 kV. Nadřazenou soustavu beru jako ideální, tedy se jedná o nekonečně tvrdý zdroj napětí. Vazby mezi fázemi při výpočtech zanedbávám, prvky beru jako lineární a parametry všech fází jsou shodné, tedy síť je symetrická.



Obrázek 4.1: Konkrétní schéma VN sítě.

4.1 Parametry sítě

Základní hodnoty vedoucí k výpočtům parametrů sítě byly diskutovány s konzultantem práce Ing. Františkem Žákem, Ph.D a jsou zobrazeny níže.

Tabulka 4.1: Parametry distribučního transformátoru.

Jmenovitá výkon transformátoru	S_{NT}	40	MVA
Napětí nakrátko	u_k	10	%
Proud naprázdno	i_0	0,2	%
Ztráty nakrátko	dP_k	100	kW
Ztráty naprázdno	dP_0	15	kW
Převod	p	110/23	-

Tabulka 4.2: Parametry sítě VN.

Jmenovité napětí sítě	U_n	23	kV
Kapacitní proud sítě	I_{k0}	150	A
Svod	I_w	1	A
Činná složka zátěže	P_z	15	kW
Jalová složka zátěže	Q_z	3	kVAr

Parametry vedení první a druhé části vývodu jsem zvolil shodně. Ve výpočtovém programu jsou všechny hodnoty nastavitelné, tedy určení délky vedení, velikosti odporu, indukčnosti a ostatní lze přenastavit.

Tabulka 4.3: Parametry vedení a, b (AlFe 95mm²).

Délka vývodu	l	10	km
Odpor	R_{va}	0,2	Ω/km
Indukčnost	L_{va}	0,0015	H/km
Kapacitní proud vývodu	I_{k01a}	0,08	A/km
Svod	I_w	1	%
Činná složka zátěže	P_z	1000	kW
Jalová složka zátěže	Q_z	400	kVAr

4.2 Výpočet parametrů

V této kapitole vypíši rovnice vedoucí k získání potřebných parametrů, které jsem využíval ve výpočtovém programu.

4.2.1 Distribuční transformátor 110/23 kV

$$Z_T = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} \quad (4.1)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_k}{S_{NT}} \cdot \frac{U_n^2}{S_{NT}} \quad (4.2)$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} \quad (4.3)$$

4.2.2 Síť

$$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

$$k_0 = \frac{I_{k0}}{3\omega U_f} \quad (4.5)$$

$$X_{k0} = \frac{1}{\omega k_0} \quad (4.6)$$

$$R_0 = \frac{X_{k0}}{I_w} \cdot 100 \quad (4.7)$$

4.2.3 Vývod - část vedení a

$$k_{01a} = \frac{I_{C01a}}{3\omega U_f} \quad (4.8)$$

$$X_{k01a} = \frac{1}{\omega k_{01a}} \quad (4.9)$$

$$R_{01a} = \frac{X_{k01a}}{I_w} \cdot 100 \quad (4.10)$$

$$G_{01a} = \frac{1}{R_{01a}} \quad (4.11)$$

$$R_{v01a} = R_{va} \cdot l \quad (4.12)$$

$$X_{v01a} = \omega \cdot L_{va} \quad (4.13)$$

4.3 Aplikace metody Fortescue

Podobně jako ve třetí kapitole (schéma 3.3) převedu definovanou síť na náhradní složkové schéma. Podstatou je určení konkrétních napěťových a proudových poměrů v místě zemní poruchy. Náhradní složkové schéma je zobrazeno na obrázku 4.2. Oproti obecnému schématu se zdá aktuální schéma složitější. Základem je zjednodušení impedance všech tří složek. Konkrétně postupuji od nulové složky přes zpětnou, dále dopočítám souslednou složku a dostávám celkovou impedanci. Dle schématu je patrné, že velikost nulové složky impedance se bude měnit dle zapojení uzlu transformátoru. V následujících podkapitolách popisují konkrétní postupy výpočtu impedance v závislosti na zapojení uzlu transformátoru. [7, 6, 8]

4.3.1 Výpočet impedance

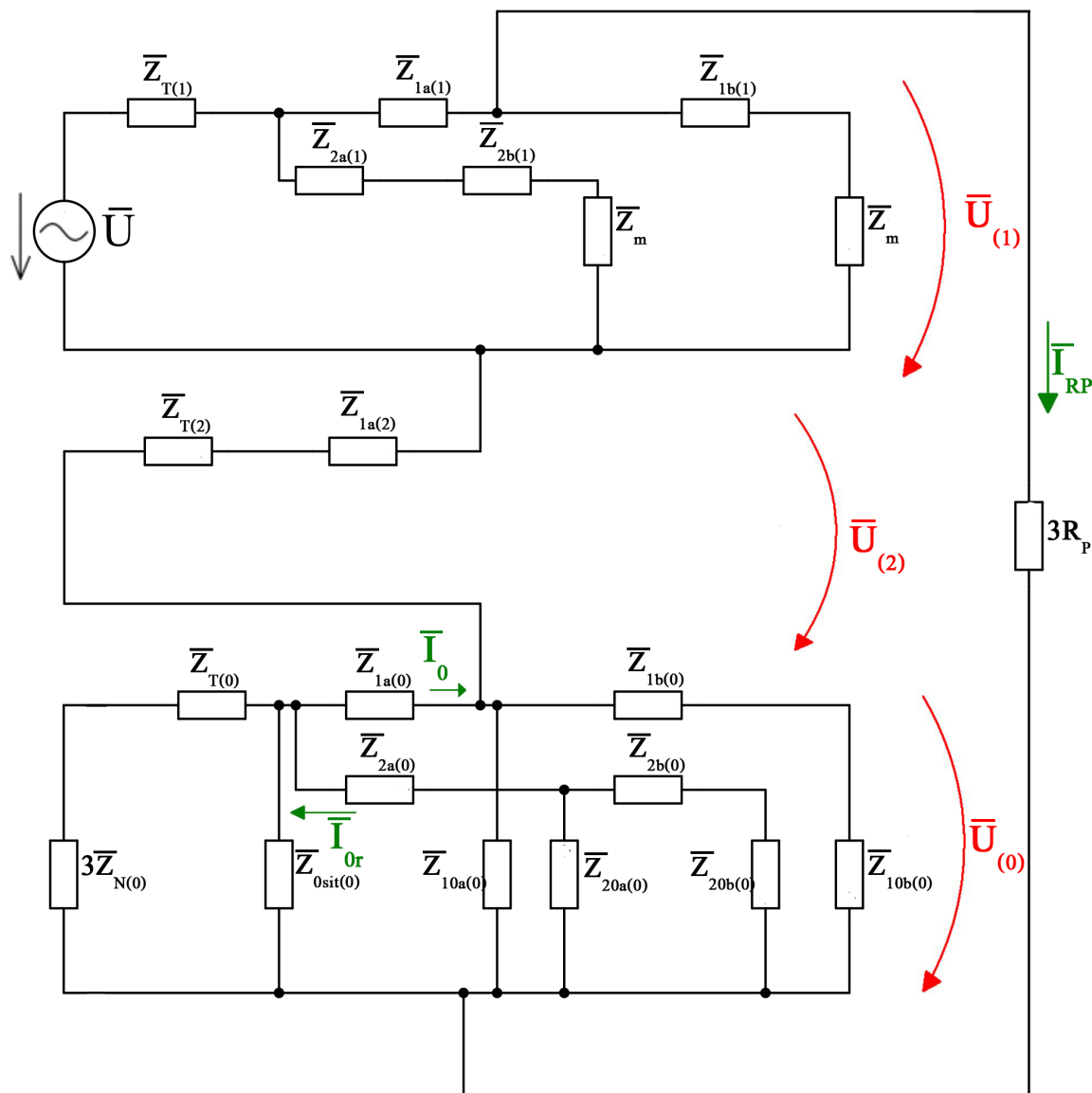
Nulová složka kompenzované soustavy

Prvotně je potřeba určit impedanci \bar{Z}_N , respektive \bar{Z}_{TL} , kterou získám paralelní kombinací indukčnosti a odporem tlumivky. Indukčnost a odpor tlumivky dopočtu z celkové kapacity sítě proti zemi. V mém případě z kapacity sítě a čtyř vedení.

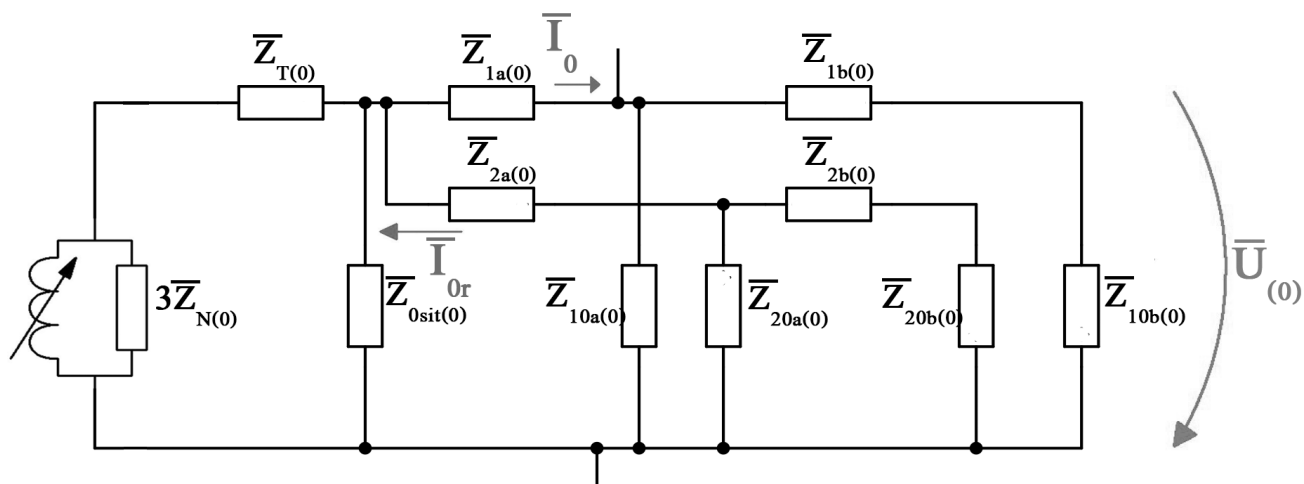
$$k_{0C} = k_0 + 4 \cdot k_{01a} \rightarrow L = (3 \cdot \omega \cdot k_{0C})^{-1} \rightarrow X_L = \omega \cdot L \rightarrow R_L = \frac{X_L}{0,01}$$

$$\bar{Z}_N = \bar{Z}_L = \frac{R_L \cdot X_L}{R_L + X_L}$$

Ke kompenzovaným sítím bývá paralelně připojen pomocný odporník, který je řízen a připínám pomocí stykačů a automatiky k tlumivce a to většinou po překročení minimální nastavené hodnoty netočivé složky napětí. Jeho chvilkové připojení navýší činnou složku poruchového proudu a ochrany snadněji a spolehlivěji reagují. Připnutí odporu obvykle bývá v řádu jednotek sekund.



Obrázek 4.2: Náhradní složkové schéma jednofázové zemní poruchy.



Obrázek 4.3: Náhradní schéma nulové složky v kompenzované síti.

Veškeré nulové složky impedance proti zemi jsou paralelní kombinací. Nulová složka transformátoru je trojnásobkem impedance sousledné složky transformátoru (může být trojnásobkem až pětinasobkem). Důvodem je tří sloupkový transformátor, ve kterém proudy nulové složky mají shodný směr, tím pádem se nemohou uzavřít. Tedy probíhá rozptýlení magnetického toku nádobou transformátoru, přes kterou se proudy uzavírají.

$$\bar{Z}_1 = \frac{(3\bar{Z}_L + 3\bar{Z}_{T(0)}) \cdot \bar{Z}_{0sit(0)}}{3\bar{Z}_L + 3\bar{Z}_{T(0)} + \bar{Z}_{0sit(0)}} \quad (4.14)$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{1b(0)} + \bar{Z}_{10b(0)} \quad (4.15)$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_{2b(0)} + \bar{Z}_{20b(0)} \quad (4.16)$$

$$\bar{Z}_4 = \frac{\bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_{20a(0)}}{\bar{Z}_3 + \bar{Z}_{20a(0)}} + \bar{Z}_{2a(0)} \quad (4.17)$$

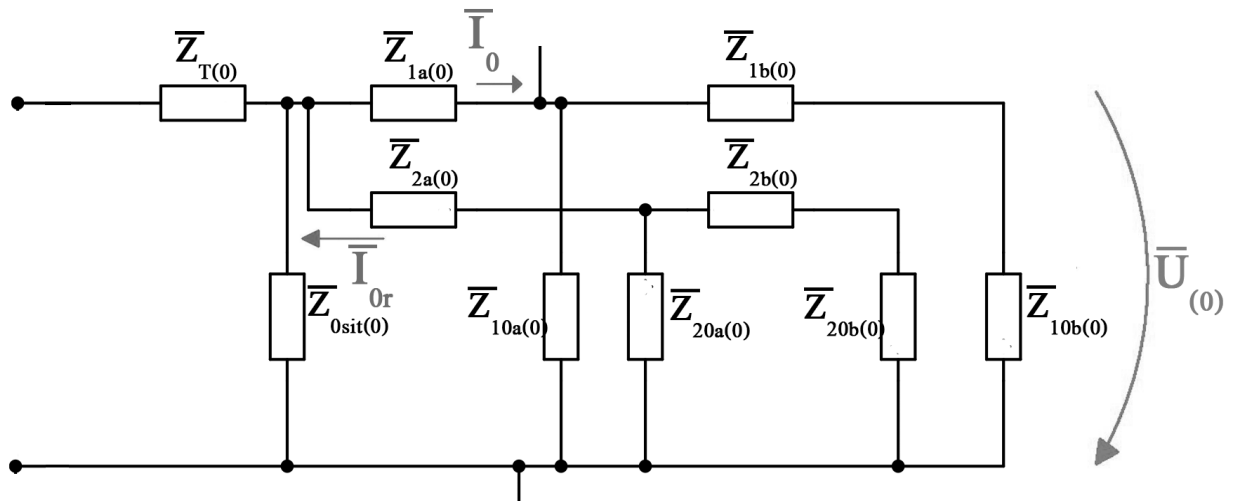
$$\bar{Z}_5 = \frac{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_4} + \bar{Z}_{1a(0)} \quad (4.18)$$

$$\bar{Z}_6 = \frac{\bar{Z}_5 \cdot \bar{Z}_{10a(0)}}{\bar{Z}_5 + \bar{Z}_{10a(0)}} \quad (4.19)$$

$$\bar{Z}_{celk(0)} = \frac{\bar{Z}_6 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_6 + \bar{Z}_2} \quad (4.20)$$

Nulová složka izolované soustavy

Náhradní schéma nulové složky respektující izolovanou síť naleznete na obrázku 4.4, rovnice se nacházejí níže.



Obrázek 4.4: Náhradní schéma nulové složky v izolované síti.

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{1b(0)} + \bar{Z}_{10b(0)} \quad (4.21)$$

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_{2b(0)} + \bar{Z}_{20b(0)} \quad (4.22)$$

$$\bar{Z}_3 = \frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_{20a(0)}}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_{20a(0)}} + \bar{Z}_{2a(0)} \quad (4.23)$$

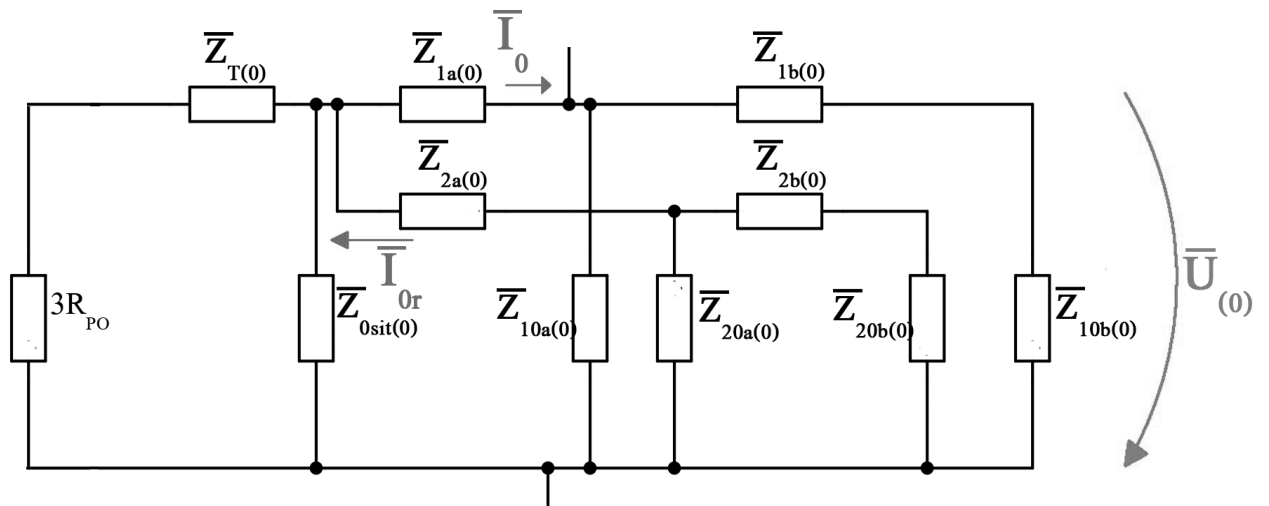
$$\bar{Z}_4 = \frac{\bar{Z}_{0sit(0)} \cdot \bar{Z}_3}{\bar{Z}_{0sit(0)} + \bar{Z}_3} + \bar{Z}_{1a(0)} \quad (4.24)$$

$$\bar{Z}_5 = \frac{\bar{Z}_4 \cdot \bar{Z}_{10a(0)}}{\bar{Z}_4 + \bar{Z}_{10a(0)}} \quad (4.25)$$

$$\bar{Z}_{celk(0)} = \frac{\bar{Z}_5 \cdot \bar{Z}_1}{\bar{Z}_5 + \bar{Z}_1} \quad (4.26)$$

Nulová složka soustavy s odporníkem

Náhradní schéma nulové složky respektující síť s odporníkem naleznete na obrázku 4.5. Je nutné dodržet podmínku ohledně velikosti proudu odporníkem, který má být větší než kapacitní proud sítě, neboli $R_{PO} \leq \frac{1}{3\omega k_0}$. Rovnice se výrazně shodují se sítí kompenzovanou. Namísto Z_L dosadím dopočítané R_{PO} .



Obrázek 4.5: Náhradní schéma nulové složky v síti s odporníkem.

Celková impedance

Zpětnou složku dokáží popsat jednou rovnicí a to sériovou kombinací impedancí transformátoru a postiženého vedení. Zpětná složka neobsahuje žádné impedance proti zemi ani nerespektuje zátěž.

$$\bar{Z}_{celk(2)} = \bar{Z}_{T(2)} + \bar{Z}_{1a(2)} \quad (4.27)$$

V tomto bodě dle schématu 4.2 dopočítám celkovou impedanci obvodu. Jako první sériově sečtu složku zpětnou, nulovou a trojnásobek odporu poruchy. Následujícími výpočty níže získám \bar{Z}_{celk} .

$$\bar{Z}_1 = \bar{Z}_{celk(0)} + \bar{Z}_{celk(2)} + 3R_P \quad (4.28)$$

$$\bar{Z}_2 = \frac{\bar{Z}_1 \cdot (\bar{Z}_{1b(1)} + \bar{Z}_m)}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_{1b(1)} + \bar{Z}_m} \quad (4.29)$$

$$\bar{Z}_3 = \bar{Z}_2 + \bar{Z}_{1a(1)} \quad (4.30)$$

$$\bar{Z}_4 = \bar{Z}_{2a(1)} + \bar{Z}_{2b(1)} + \bar{Z}_m \quad (4.31)$$

$$\bar{Z}_{celk} = \frac{\bar{Z}_3 \cdot \bar{Z}_4}{\bar{Z}_3 + \bar{Z}_4} + \bar{Z}_{T(1)} \quad (4.32)$$

4.3.2 Výpočet větvových proudů

V této podkapitole popisuji postup výpočtu větvových proudů, zaměřuji se na ty nejdůležitější. To znamená na poruchový proud nulové složky v místě poruchy a poruchový proud nulové složky protékající přes zdravý vývod a skrze rozvodnu. Na náhradním složkovém schématu 4.2 jsou tyto proudy zobrazeny zeleně (\bar{I}_0, \bar{I}_{0r}). Celkový proud obvodem jsem spočetl jako

$$\bar{I}_{celk} = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}_{celk}} \quad (4.33)$$

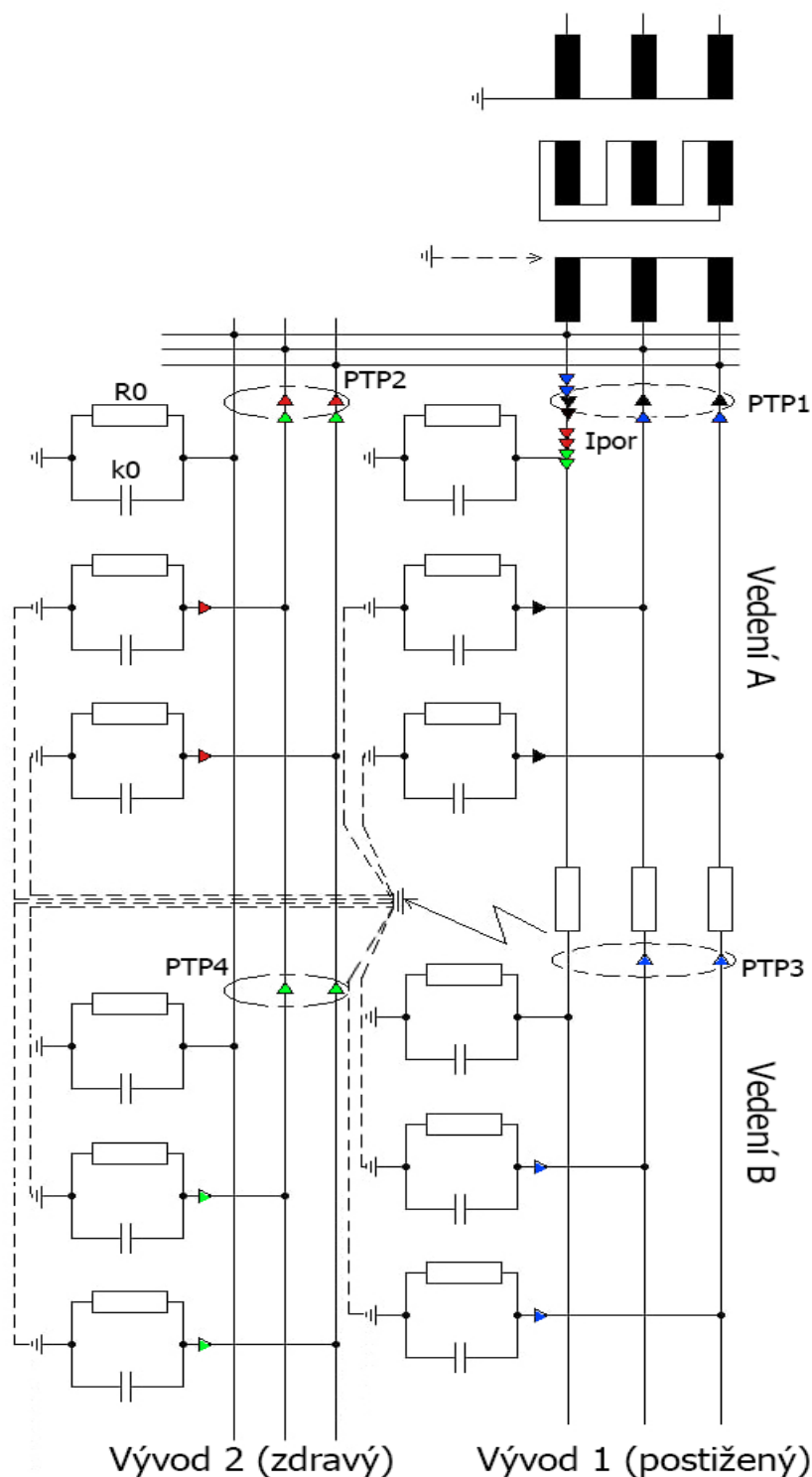
Následně pomocí aplikace proudového děliče jsem vyjádřil zbylé větvové proudy. Všechny postupy jsou viditelné ve výpočtovém programu.

Izolovaná soustava

Na obrázku 4.6 je zobrazena zadaná síť, dle parametrů se jedná o dva shodné vývody a zároveň čtyři shodné vedení. Červené a zeleně jsou vyznačeny složky nulových proudů, které jsou ve zdravém vývodu a procházejí přes rozvodnu do fáze se zemním spojením. Černě a modře jsou označeny proudy postiženého vývodu, které též přispívají. Měřicí transformátor proudu PTP1 modré a černé proudy od sebe odečte a zůstanou proudy červené a zelené, které mají směr k zemnímu spojení. Naopak proudy procházející zdravým vývodem směřují opačně, tedy k rozvodně. Z toho plyne, že v izolované síti vyhodnocujeme součet nulových složek fázových proudů a směr toku těchto proudů. Na tomto základě stavím v následující kapitole, kde popisuji konkrétní metody a následně prezentuji průběhy těchto veličin zadané sítě.

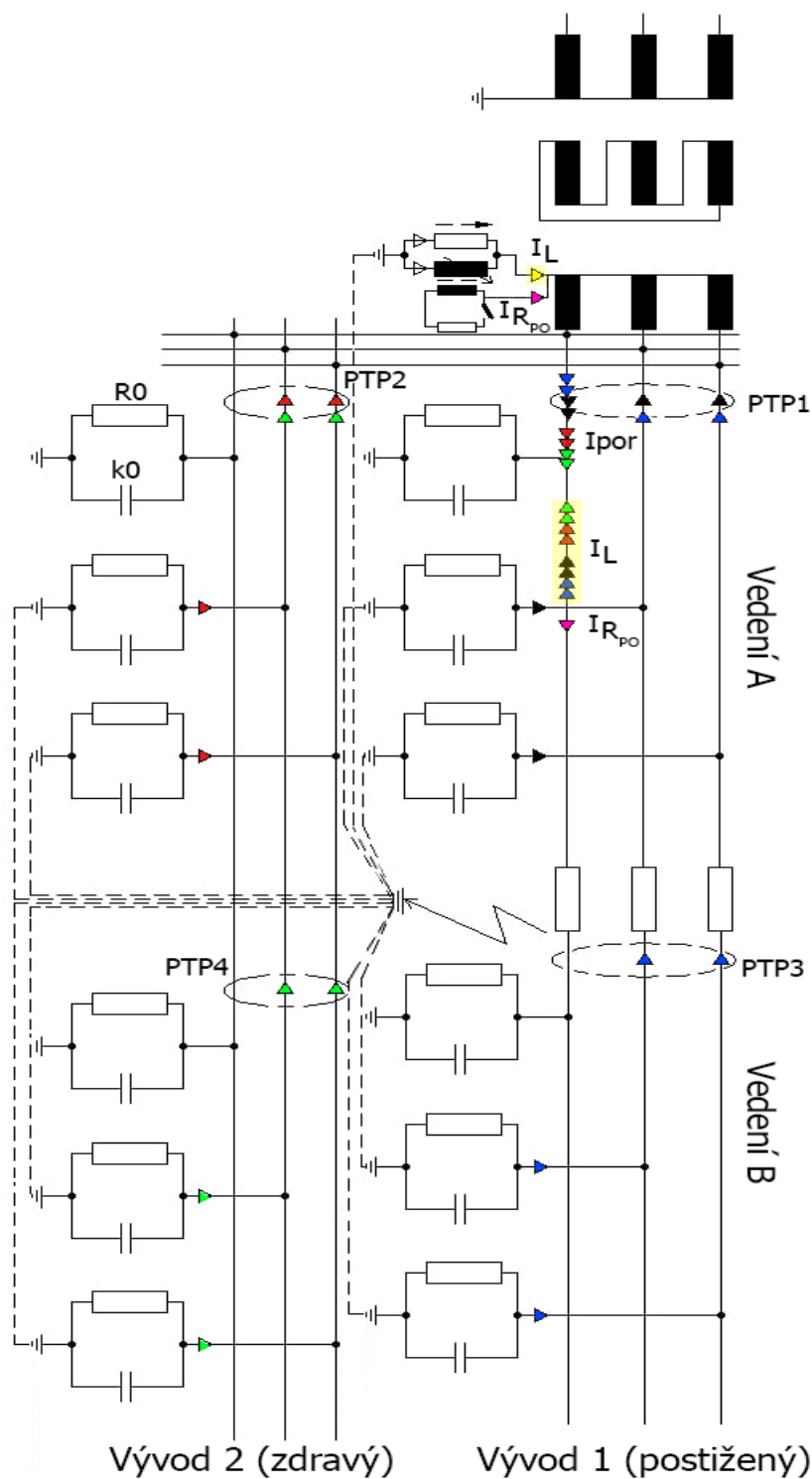
Kompenzovaná soustava

Na obrázku 4.7 se nachází zadaná síť, která je kompenzována přes tlumivku. V tomto případě nemůžu použít směrové kritérium, neboť poruchový kapacitní proud kompenzuji stejně velkým induktivním proudem tlumivky \bar{I}_L , který má opačný směr. Postiženou fází tedy neteče téměř žádný proud, respektive pouze proud, který je obtížně detekovatelný. PTP1 měří modrý



Obrázek 4.6: Zemní spojení v izolované síti - nulová složka proudu.

a černý proud postiženého vývodu zdravých fází, který směřuje k rozvodně, zároveň PTP2 měří proudy červené a zelené, které mají též směr k rozvodně. V tuto chvíli je potřeba připojit odporník, který mi vnutí do obvodu činnou složku proudu \bar{I}_{RPO} . Proud se zvýší pouze v postiženém vývodě. Detekce těchto sítí je založena na velikosti činné složky poruchového proudu.



Obrázek 4.7: Zemní spojení v kompenzované síti - nulová složka proudu.

Pro zadanou síť jsem vybral zhášecí tlumivku od firmy EGE, spol. s r.o. Jelikož jsou tlumivky ve výkonových řadách, je potřeba vypočítat jalový výkon, respektive zdánlivý, který se

vztahuje k velikosti \bar{I}_P , který jsem vypočítal následujícím způsobem.

$$\bar{I}_P = \bar{I}_{kap} = 3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot (4 \cdot k_{01a} + k_0) \cdot \bar{U}_f = 153,2A \quad (4.34)$$

$$Q_L = \bar{U}_f \cdot \bar{I}_P = 153,2 \cdot \frac{23000}{\sqrt{3}} = 2034kVA \quad (4.35)$$

Zvolil jsem tlumivku ASR 2.5 s parametry viz 4.4.

Tabulka 4.4: Parametry tlumivky ASR 2.5.

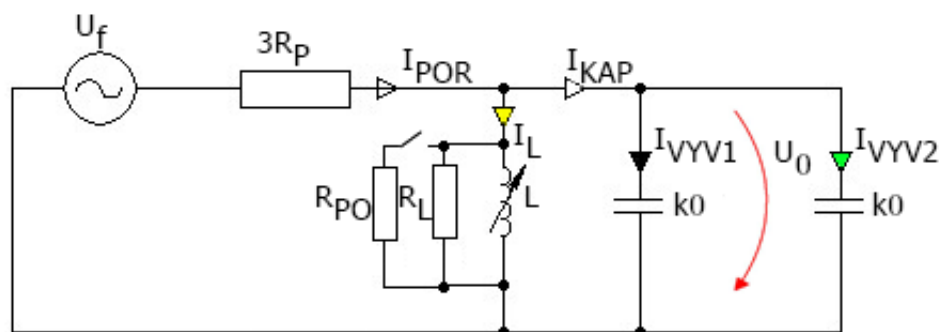
Jmenovité napětí	$\bar{U}_L = 13,3 \text{ kV}$
Jmenovitý výkon	$S_L = 2550 \text{ kVA}$
Jmenovitý proud	$\bar{I}_L = 190 \text{ A}$
Jmenovitý krátkodobý výkon	$S_{Lk} = 3050 \text{ kVA}$
Jmenovitý krátkodobý proud	$\bar{I}_{Lk} = 230 \text{ A}$
Hlavní vinutí	13,3 kV
Měřicí vinutí	100 V
Pomocné výkonové vinutí	500 V
\bar{L}_L	0,220112327 H
X_L	69,1503268 Ω
\bar{R}_L	6915,03268 Ω

Rezonanční křivka soustavy se nachází na grafu 4.8. Postupným laděním tlumivky jsem došel k hodnotě $0,798\bar{I}_L$, tedy jsem v situaci, kdy poruchový kapacitní proud a induktivní proud mají téměř stejnou velikost a opačný směr. Rezonanční křivka je modelována při vysoké hodnotě R_P a to z důvodu bezporuchového stavu. Zároveň jsem tím vytvořil určitou nesymetrii soustavy, to je taktéž nutná podmínka ke zjištění rezonanční křivky. Dle grafu je patrné, že napětí tlumivky je o něco větší než 4% \bar{U}_0 a proud tlumivkou je 153A. V případě přesného vyladění tlumivky by byl proud téměř nulový, respektive by měl minimální hodnotu danou činnými ztrátami v tlumivce a svodem vedení. S přesným vyladěním se v praxi často nesetkáme, jelikož tlumivka jakožto indukčnost tvoří s kapacitami proti zemi paralelní rezonanci (viz schéma 4.9), ze které plyne vysoké rezonanční napětí namáhající tlumivku. Existují zde dvě možnosti, buď podladíme, nebo přeladíme. Prospěšnější je podladěný stav, X_L má větší hodnotu než X_C , jelikož při postupném zkracování (půlení) postiženého vývodu nám kapacita proti zemi klesá, tedy kapacitní reaktance roste, respektive se přibližujeme k vyladěnému stavu. [11, 5]

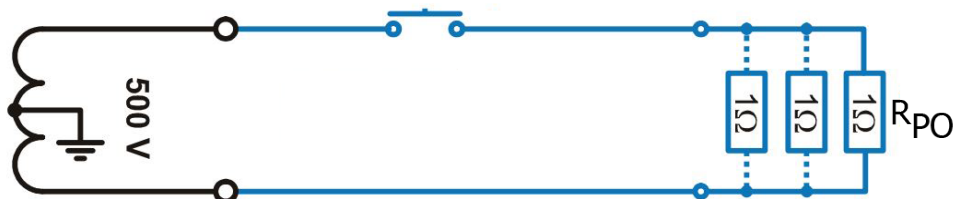
Odporník se zapojuje paralelně k tlumivce, respektive k odporu tlumivky, který je řízen automatikou. Ze zmíněného obrázku vyplývá, že zásluhou paralelních kombinací, po připojení více členů odporníku, získám nízkou hodnotu odporu, tedy síť se chová jako uzemněná přes odporník, popřípadě téměř jako síť přímo uzemněná. Zemním spojením se navýší činný proud. Jak jsem již zmínil, připojení odporníku se pohybuje v řádech sekund. [1]



Obrázek 4.8: Rezonanční křivka sítě.



Obrázek 4.9: Zemní spojení v kompenzované síti - odporník.



Obrázek 4.10: Připínání sekundárních odporníků k tlumivce.

V mém případě budu postupně připínat 1Ω odpory, které jsou na napěťové úrovni 500 V. Ty je nutné přepočítat na primární hladinu napětí, tedy na napětí 13,3 kV, viz rovnice 4.36. Rovnice 4.37 a 4.38 ukazují výpočet celkového odporu proti zemi, v případě připínání jednoho (dvou) 1Ω odporů. Je patrné, že při připínání dalších odporů celková resistance proti zemi klesá, tedy velikost poruchového proudu roste. Vybral jsem sekundární odporník od firmy EGE, spol. s.r.o., konkrétně se jedná o typ SR 500A/0,5kV/KB6s, který je vybaven automatikou, dle charakteru

poruchy přípne takovou velikost odporu, aby byla zajištěna detekce postiženého vývodu. Skládá se z devíti výkonových odporů ($9 \times 1\Omega$). Parametry se nacházejí v tabulce 4.5. [9]

$$R_{PO1} = \left(\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2}\right)^2 \cdot R_{PO2} = \left(\frac{13,3}{0,5}\right)^2 \cdot 1 = 707,33\Omega \quad (4.36)$$

Tabulka 4.5: Parametry sekundárního odporníku SR 500A/0,5kV/KB6s.

Jmenovité napětí	$U_N = 500V$
Jmenovitý proud	$I_N = 500A$
Doba provozu	$T_z = 6s$
Jmenovitý odpor	$R_{PO} = 1 - 9\Omega$

$$R_{O1} = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_{PO1}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{8665,45} + \frac{1}{707,33}\right)^{-1} = 652,24\Omega \quad (4.37)$$

$$R_{O2} = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{2}{R_{PO1}}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{8665,45} + \frac{2}{707,33}\right)^{-1} = 338,88\Omega \quad (4.38)$$

Ve výpočtovém programu využívám obecného vzorce, kam zadám počet připnutých odporů. Počet připnutých odporů zadávám místo proměnné x ve vzorci 4.39.

$$R_{Ox} = \left(\frac{1}{R_L} + \frac{x}{R_{PO1}}\right)^{-1} \quad (4.39)$$

Soustava uzemněná přes uzlový odporník

Pro tuto soustavu jsem vybral uzlový odporník od firmy EGE, spol. s.r.o, NER 300A/23kV/KB6s-DB30A s parametry zobrazenými v tabulce 4.6. Při výběru odporníku bylo potřeba dodržet

Tabulka 4.6: Parametry uzlového odporníku NER 300A/23kV/KB6s-DB30A.

Jmenovité napětí	$\bar{U}_N = 13,3kV$
Jmenovitý proud	$I_N = 300A$
Doba provozu	$T_z = 6s$
Dlouhodobý proud	$\bar{I}_{Nz} = 30A$
Jmenovitý odpor	$R_{PO} = 44,26\Omega \pm 10\%$

podmínku většího proudu uzlovým odporníkem, než je kapacitní proud.

4.3.3 Výpočet napěťových poměrů

Ve všech sítích jsem následně dopočítal napětí jednotlivých složek v místě poruchy a na rozvodně. K výpočtu jsem využil druhý Kirchhoffův zákon a určité větrové proudy a impedance

konkrétních prvků, viz rovnice níže. [12]

$$\bar{U}_{(RP)} = -\bar{I}_{RP} \cdot R_P \quad (4.40)$$

$$\bar{U}_{(2)} = -\bar{I}_{RP} \cdot \bar{Z}_{celk(2)} \quad (4.41)$$

$$\bar{U}_{(0)} = -\bar{I}_{RP} \cdot \bar{Z}_{celk(0)} \quad (4.42)$$

$$\bar{U}_{(1)} = -(\bar{U}_{(RP)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)}) \quad (4.43)$$

Následně jsem z těchto rovnic dopočítal napěťové poměry v místě poruchy, aplikoval jsem pevně definované vztahy z kapitoly 3.5. Průběhy napětí v místě poruchy zobrazuji a popisuji níže. Dále jsem napočítal napěťové poměry na rozvodně. K získání nulové složky napětí v kompenzované soustavě jsem využil poruchového proudu tekoucí přes transformátor a tlumivku.

$$\bar{U}_{(0)vyvod} = -\bar{I}_{(0)TL} \cdot (\bar{Z}_{TL} + 3\bar{Z}_T) \quad (4.44)$$

Souslednou složku napětí jsem spočetl jako fázové napětí soustavy a od něj odečetl úbytek napětí na transformátoru.

$$\bar{U}_{(1)vyvod} = \bar{U}_f - (\bar{I}_{celk} \cdot \bar{Z}_T) \quad (4.45)$$

Napětí ve zpětné složce jsem spočetl jako poruchový proud tekoucí přes transformátor. Tyto postupy výpočtu se odrážejí a respektují náhradní schéma 4.2.

$$\bar{U}_{(2)vyvod} = -\bar{I}_{RP} \cdot \bar{Z}_T \quad (4.46)$$

Dle obecných rovnic 3.5 jsem přepočítal složkové tvary na fázové hodnoty.

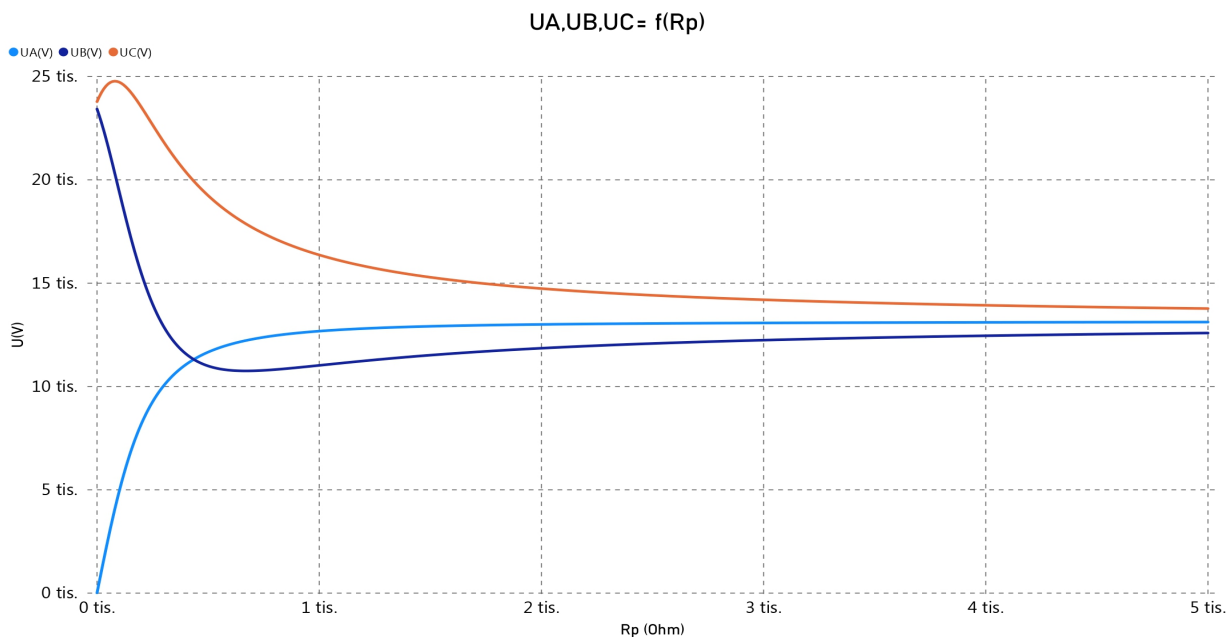
Izolovaná síť

Při jednofázovém zemním spojení se na zdravých fázích projeví přepětí. Toto je zobrazeno na grafu 4.11. V izolované síti toto přepětí není omežováno. Při zemním spojení se na zdravých fázích, dle teoretických předpokladů (viz 2.1.3), objevilo větší než sdružené napětí, tedy průběh koresponduje s obrázkem 2.6. Postižená fáze je zde označena \bar{U}_A .

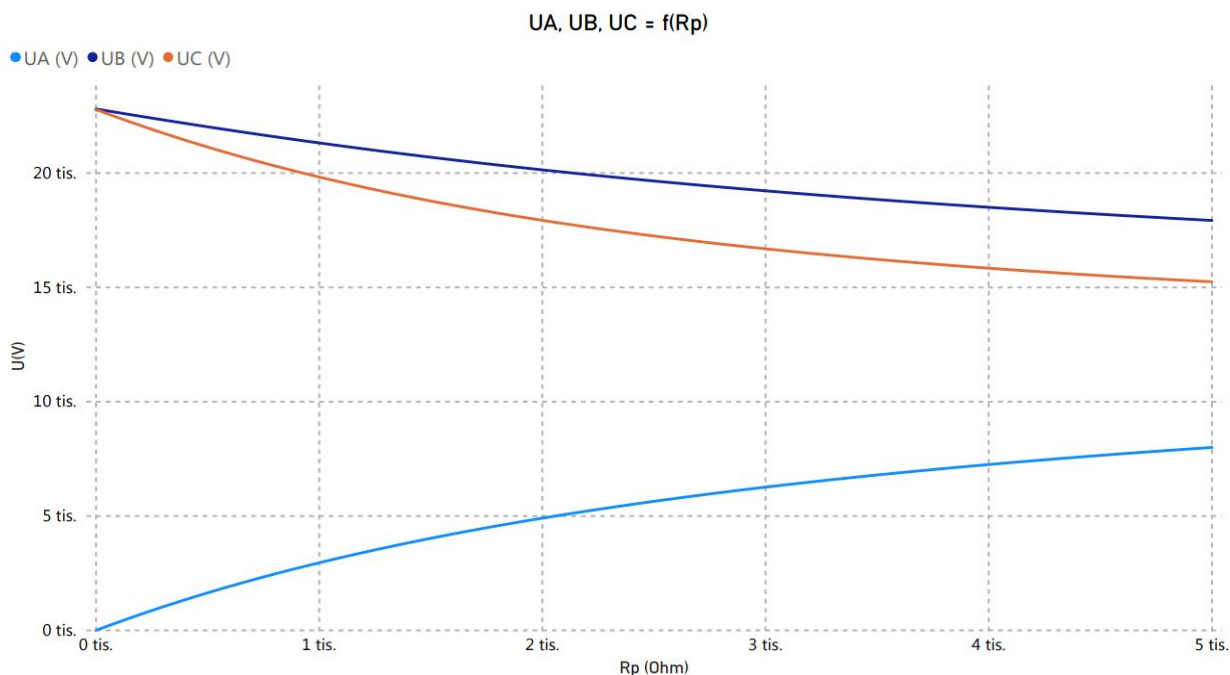
Kompenzovaná síť

Na grafu 4.12 je zobrazen průběh napětí fázových vodičů v kompenzované síti. Postiženou fází je zde \bar{U}_A . Zdravé fáze, respektive jejich napětí, jsou tlumeny průchodem zbytkového poruchového proudu přes přechodový odpor. Takto pozvolné tlumení je způsobeno poměrně malou hodnotou zmíněného proudu a odporovou nesymetrií. Při pohledu na graf je patrné, že i při vyšších hodnotách přechodového odporu je přepětí zdravých fází stále výrazné.

Důvod menšího tlumení \bar{U}_B je dán podladěním tlumivky. Na grafu 4.13 jsem tlumivku přeladil



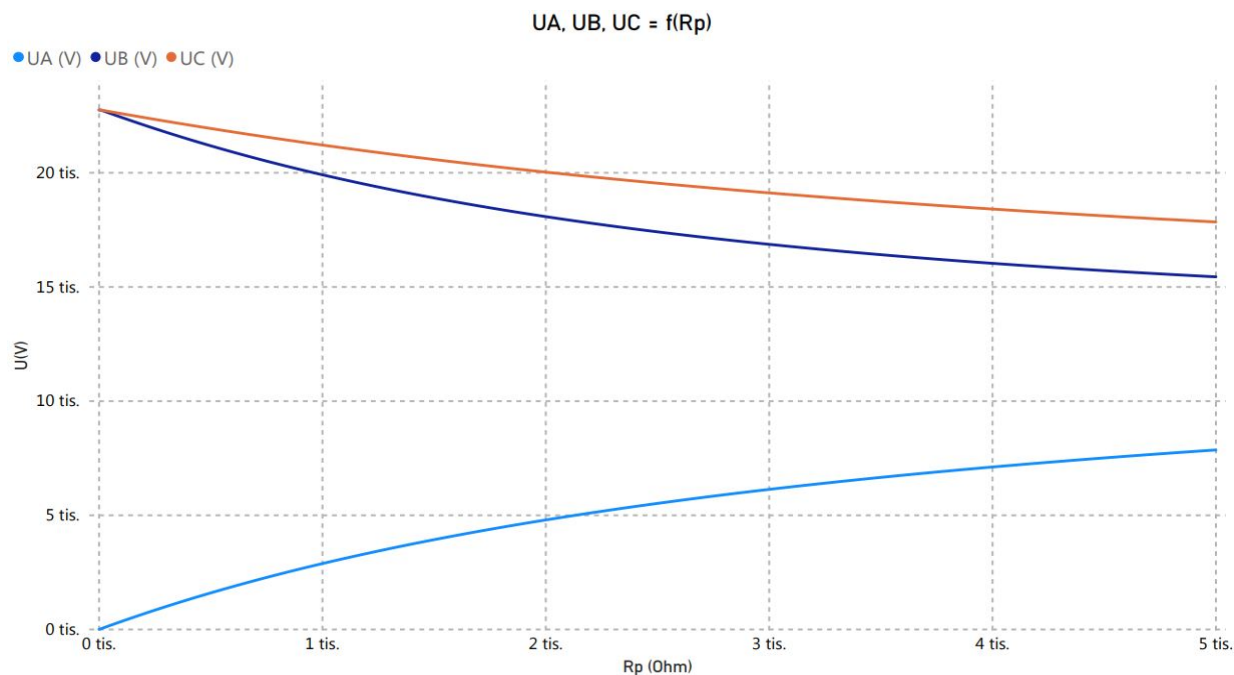
Obrázek 4.11: Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v izolované síti.



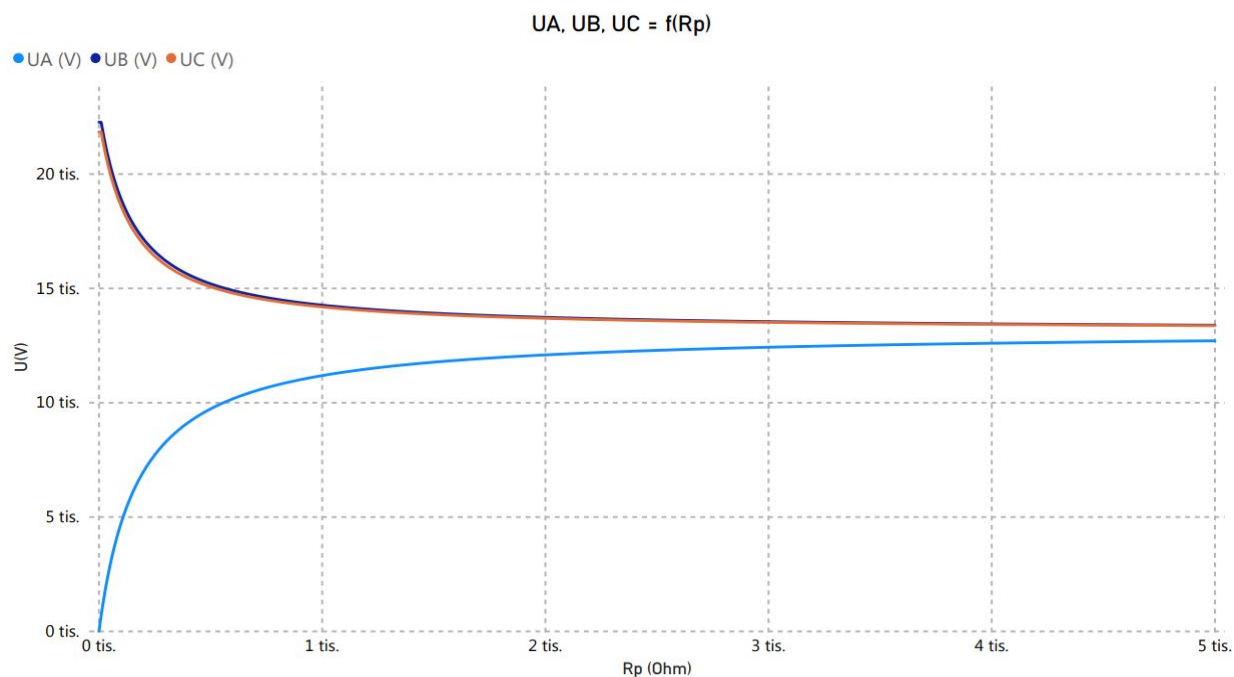
Obrázek 4.12: Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - podladěná tlumivka.

a tlumení zdravých fází je opačné. V případě přesného vyladění tlumivky, by byl kompletně vykompenzován kapacitní proud sítě a zbyl by pouze proud činného charakteru a velikosti napětí zdravých fází by byly shodné.

Pokud připnu sekundární odporník, respektive na grafu 4.14 jsem připnul čtyři 1Ω , tak je parné větší tlumení a rychlejší přibližování k fázové hodnotě napětí. Rychlé tlumení je dáno větší hodnotou poruchového proudu.



Obrázek 4.13: Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - přeladěná tlumivka.

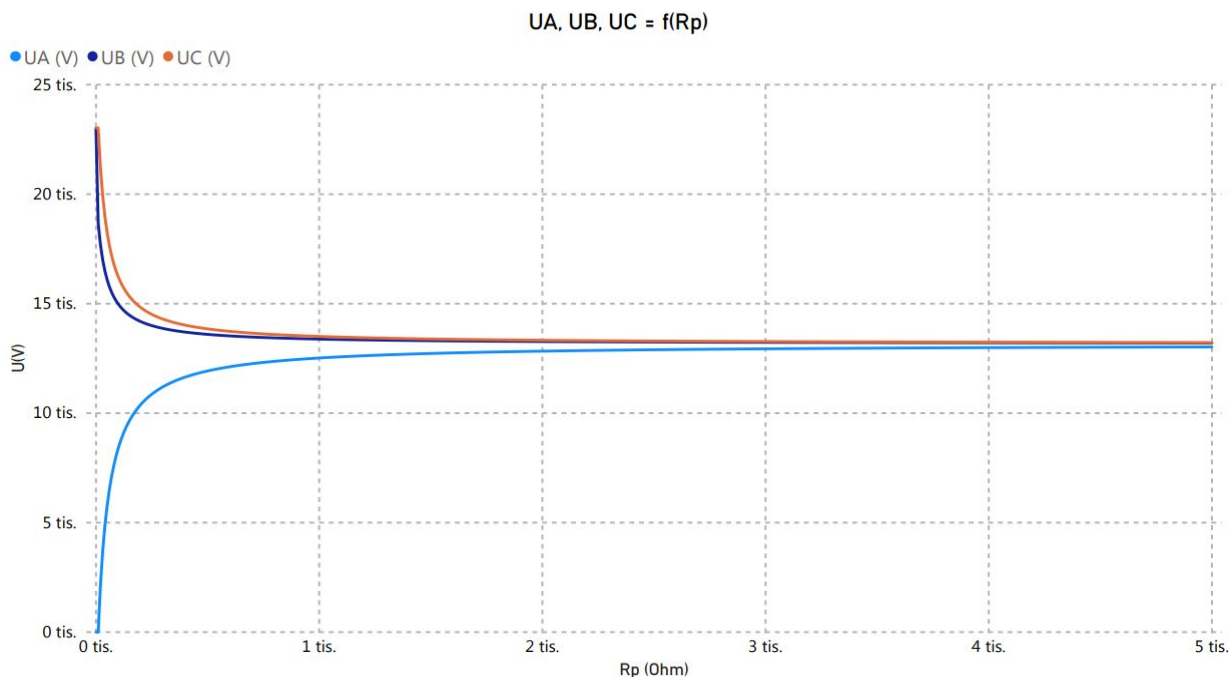


Obrázek 4.14: Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v kompenzované síti - připojení sekundárního odporníku ($4 \times 1 \Omega$).

Velikost poruchového proudu v zadané síti je nízké hodnoty, tedy je přípustné pokračovat v provozování sítě s jednofázovou poruchou. Dle grafů je patrná zřejmá nevýhoda ve vysokých přepětích na zdravých fázích a to primárně při nízkých hodnotách přechodového odporu.

Odporově uzemněná síť

Na grafu 4.15 jsou zobrazena napětí fázových vodičů v místě poruchy v závislosti na odporu poruchy. Postiženou fází je stále \bar{U}_A . Uzlový odporník navýší činnou složku proudu a zároveň tlumí přepětí na zdravých fázích. Zvýšení činné složky poruchového proudu markantně zvyšuje šanci k identifikaci postiženého vývodu. Síť uzemněná přes uzlový odporník se s jednofázovou poruchou neprovozuje z důvodu vysokých hodnot poruchového proudu a možnému přechodu ve vícefázový zkrat.



Obrázek 4.15: Napětí fázových vodičů v závislosti na odporu poruchy v síti uzemněné přes uzlový odporník (300 A).

4.3.4 Výkonové poměry

V následující kapitole popisují možné způsoby detekce. Ke spolehlivější detekci se využívá kromě proudů a napětí také nulových složek výkonů. Tedy ve výpočtovém programu jsem vyjádřil sdružený výkon zdravého a postiženého vývodu, ze kterého je možné čerpat další hodnoty ke spolehlivější detekci. Toto jsem realizoval v poslední kapitole, kde tyto možnosti detekce zobrazuji a hodnotím.

$$S_{(0)vyvPor} = \bar{U}_{(0)vyvod} \cdot \bar{I}_0^* \quad (4.47)$$

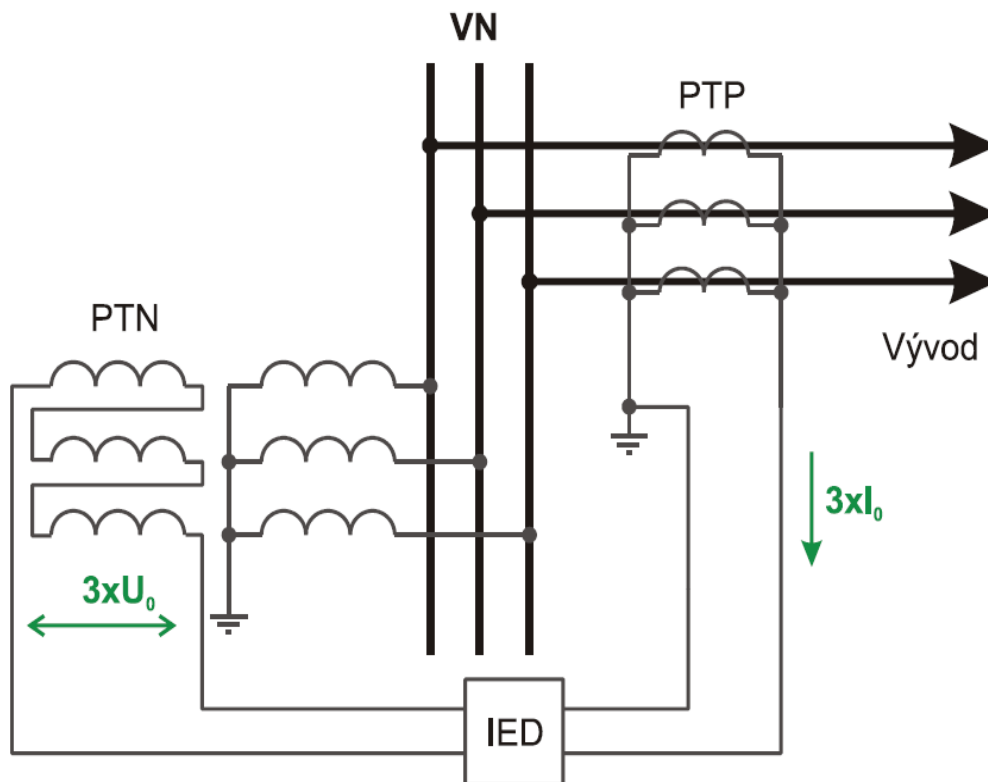
$$S_{(0)vyvZdr} = -\bar{U}_{(0)vyvod} \cdot \bar{I}_{0r}^* \quad (4.48)$$

5 Detekce a lokalizace poruch v sítích vysokého napětí

V této kapitole se zaměřím na způsoby detekce a lokalizace zemního spojení. Detekce zemního spojení v izolovaných soustavách je založena na netočivých složkách napětí a proudů. V napájecích rozvodnách jsou měřeny tyto složky, konkrétně na každém vývodu je měřena netočivá složka proudu a na přípojnicích je měřena netočivá složka napětí. Nejběžnějším způsobem měření netočivé složky proudu je aplikace součtového zapojení tří PTP (přístrojový transformátor proudu), který reálně měří trojnásobek netočivé složky proudu. Netočivá složka napětí je měřena na stejném principu, tedy využívá taktéž tří PTN (přístrojový transformátor napětí). Měření netočivých složek proudu a napětí jsou zobrazeny na obrázku 5.1. V kompenzovaných soustavách je netočivá složka napětí měřena automatikou, a to mezi zemní soustavou a uzlem napájecího transformátoru. Netočivá složka napětí je závislá na přechodovém odporu jednofázové poruchy R_p a na rozloze sítě. Dosáhne-li R_p velikosti, při které se napětí uzlu z téměř nulové velikosti zvýší na mez překračující 33% fázového napětí, je tento stav považován za zemní spojení. K tomu se vztahuje rozloha sítě, která je spjata s R_p , tedy čím rozlehlejší síť, tím vznikne zemní spojení při menší hodnotě R_p . Metoda je vhodná pro sítě malé velikosti, kde poruchový proud dosahuje nízkých hodnot a síť může být provozována se zemním spojením. Další důvod nevhodnosti pro rozsáhlejší sítě je schopnost zemní spojení detekovat, ale ne lokalizovat, a to z důvodu, že hodnota netočivé složky napětí je téměř stejná v celé síti. U rozlehlejších sítí využívané metody jsou rozděleny na aktivní a pasivní, které se dále dělí na stav statický (ustálený stav) a dynamický (přechodný děj).[1]

5.1 Aktivní metody

Aktivní metody využívají pomocný signál se speciální frekvencí (konstantní, či proměnou), který je přidán v případě poruchy a díky němuž je porucha lokalizována. Jelikož tento typ je poměrně technicky náročný, není v našich sítích vysokého napětí příliš rozšířen. Pomocí napěťových transformátorů injektujeme konstantní signál při zemním spojení, který se uzavírá přes místo poruchy. Místo zemního spojení se následně nalezne pomocí stopování. Výhodné je využít generátor HDO k injektování signálu, není nutné zajišťovat nový generátor signálu. V sítích, kde se vyskytují vysoko-impedanční zemní spojení nebo zemní spojení s přerušovaným obloukem, není lokalizace poruchy přesná. Metoda taktéž snižuje svou přesnost s narůstající kapacitou sítě proti zemi. U sítí kompenzovaných se injektuje proudový signál s rezonanční frekvencí, a to z důvodu vzniku častého vysoko-impedančního zemního spojení. Naopak pokud se bude jednat o nízko-impedanční zemní spojení, aplikuji konstantní signál o frekvenci 70 Hz. Signály jsou na každém vývodu změřeny a pokud útlum signálu je větší než 17%, je vývod



Obrázek 5.1: Napájecí rozvodna - měření netočivé složky proudu a napětí.

určen jako poruchový.

5.2 Pasivní metody

Pasivní metody nevyužívají externě generovaný signál. Naopak k určení zemního spojení pracují s napěťovými a proudovými signály, které vytváří samotné zemní spojení. Pasivní metody dělíme na statické, které vyhodnocují zemní spojení po odeznění přechodného děje. Na druhé straně máme dynamické, které naopak vyhodnocují zemní spojení během přechodného děje. V následujících odstavcích zmíním a popíšu oba typy.

5.2.1 Statické metody

V této podkapitole budou první čtyři metody zaměřeny na statické metody vedoucí k detekci a lokalizaci zemního spojení v izolovaných sítích. Následně popíšu metody pro kompenzované sítě a nakonec se budu zabývat metodami v sítích uzemněných přes odporník.

Porovnávání amplitudy netočivé složky proudu

Metoda je založena na kontrole netočivé složky napětí. Pokud dojde k překročení hodnoty, víme, že nastalo zemní spojení a pomocí porovnávání amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů určíme, v jakém vývodu se zemní spojení nachází. Metoda je náročná

vzhledem k přesnosti měření amplitudy netočivé složky proudu, a to primárně v případech, kdy postižený vývod tvoří velkou část celé sítě (kapacita vývodu se blíží celkové kapacitě sítě) a zároveň v případech, kdy se jedná o vysoko-impedanční zemní spojení.

Porovnávání fáze netočivé složky proudu

Metoda je založena na porovnávání fází netočivých složek proudů všech vývodů. Pokud nastane zemní spojení, postižený vývod bude mít opačnou fázi netočivé složky proudu vzhledem ke zdravým fázím. V případě, že síť obsahuje krátká vedení (malá hodnota netočivé složky proudu), může docházet k chybné detekci. Problém také nastává s detekcí při vysoko-impedančních zemních spojení. Zároveň nesprávné vyhodnocení zapříčiňuje proudová nesymetrie. Vzhledem k opačným nesnázím při lokalizaci zemního spojení se tyto dvě metody využívají kombinovaně. U vývodů s nejvyššími hodnotami amplitudy netočivé složky proudu se porovná fáze netočivé složky proudu. Vývod, který má opačnou fázi, je označen jako vývod se zemním spojením. Pokud fáze není v žádném vývodu odlišná, porucha se vyskytuje na rozvodně. Kombinací těchto metod se dostáváme na relativně spolehlivý systém. Stále zde přebývá problém vysoko-impedančních zemních spojení a vedení krátkých délek.

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

Metoda je založena na vyhodnocování kladného, či záporného toku jalového výkonu konkrétního vývodu. Pokud je vývod zdravý, netočivá složka napětí se opožďuje o 90° vůči proudu. Je-li vývod postižený poruchou, tak naopak netočivá složka napětí předbíhá o 90° netočivou složku proudu. Vývod s kladným znaménkem jalového výkonu je zdravý, a naopak pokud je jalový výkon vývodu záporný, jedná se o postižený vývod. Výhodou je nutnost neporovnávat vývody mezi sebou. Problém u krátkých vedení touto metodou není vyřešen, metoda stále pracuje s malými hodnotami proudu.

Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

Metoda je založena na referenčním signálu zdravého vývodu netočivé složky proudu s fázovým pootočením netočivé složky napětí. Při zemním spojení vznikne změna tohoto signálu, zároveň vývod určuje největší změna jalové složky netočivého proudu. Tyto čtyři metody jsou aplikovatelné na sítě izolované, ale ke kompenzovaným sítím se nehodí. Důvodem je kompenzace kapacitního proudu, tedy malé kapacitní proudy, které vedou k nespolehlivému vyhodnocování.

Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

V kompenzovaných soustavách se v reálném prostředí nelze kompletně zbavit poruchového proudu, respektive v soustavě zůstává malá hodnota činného zbytkového proudu. Tohoto reziduálního proudu využijí k lokalizaci poruchy. U postiženého vývodu má činná složka netočivého proudu vyšší hodnotu a opačný směr v porovnání se zdravými vývody. K správné funkci metody

je potřeba vhodně zvolit a nastavit proudové transformátory a to z důvodu malé hodnoty zbytkového proudu (3% - 10% kapacitního proudu sítě). Abych docílil spolehlivé funkce ochrany, připojuji krátkodobě odporník, který zvýší hodnotu činné složky. Tím zvyšují citlivost metody.

Admitanční metoda netočivé složky

Admitanční metoda je založena na stálém měření netočivé složky proudu a napětí (\bar{I}_0 , \bar{U}_0). Při přesáhnutí definované úrovně \bar{U}_0 se realizuje výpočet admitance:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} \quad (5.1)$$

Hodnota \bar{Y}_0 je následně srovnávána s admitanční charakteristikou (obrázek 5.2) nastavenou v ochraně. Pro vyšší spolehlivost se aplikuje vyhodnocení admitančního přírůstku, jinými slovy se jedná o rozdíl netočivých složek proudu a napětí před poruchou (pF) a při poruše (F):

$$\bar{Y}_0 = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0} = \frac{(\bar{I}_{0F} - \bar{I}_{0pF})}{-(\bar{U}_{0F} - \bar{U}_{0pF})} \quad (5.2)$$

Pokud se jedná o zdravý vývod, tak se výsledná admitance rovná celkové admitanci chráněného vývodu se záporným znamínkem:

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{vyv} = -(G_{vyv} + jB_{vyv}) \quad (5.3)$$

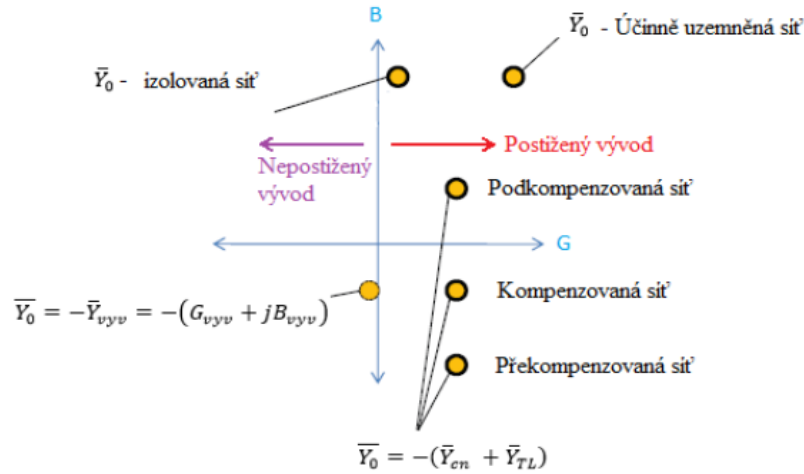
Vzhledem k nízkým hodnotám \bar{I}_0 , \bar{U}_0 a nepřesností měření, může nastat možnost kladné hodnoty konduktance a susceptance (\bar{G}_{vyv} , \bar{B}_{vyv}). Proto je zde důležitá vhodná provozní charakteristika, viz obrázek 5.2. Výsledná admitance při poruše je rovna součtu admitance nepostižených vývodů a admitance zhášecí tlumivky:

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cn} + \bar{Y}_{TL}) \quad (5.4)$$

Admitanční metoda pracuje na stejném principu jako metoda distanční, akorát naopak. Tedy pokud je hodnota vypočtené admitance v admitanční charakteristice, vývod je zdravý. Naopak je-li vně, vývod je postižený poruchou. Pro zvýšení citlivosti metody lze využít násobky vyšších harmonických, především 5. harmonickou, která je v poruchovém stavu velmi výrazná a zároveň není kompenzovaná zhášecí tlumivkou.

Konduktanční metoda

Metoda je založena na podobném principu jako metoda admitanční. Rozdílem je vyhodnocování pouze konduktance z netočivé složky proudu a napětí. Vzorce jsou paralelou admitanční metody, uvažujeme pouze reálnou část admitančního výpočtu. Zároveň mohou aplikovat metodu



Obrázek 5.2: Charakteristika admitanční metody.

s měřením přírůstku. Pro postižený vývod pracují se vztahy:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cn} + G_{TL}) \quad (5.5)$$

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cn} + G_{TL}) \quad (5.6)$$

Pro zdravý vývod vypadá rovnice následovně:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = G_{vyv} \quad (5.7)$$

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = G_{vyv} \quad (5.8)$$

- G_{vyv} - netočivá konduktance chráněného vývodu,
- G_{cn} - netočivá konduktance respektující svod zdravých vývodů,
- G_{TL} - netočivá konduktance, která odpovídá hodnotě zhášecí tlumivky.

V praxi se využívá kombinace přírůstkové metody s automatikou připínání odporníku, který způsobí nárůst hodnoty netočivé konduktance u postiženého vývodu nad definovanou hodnotu minimální netočivé konduktance odporníku (G_{Rp}). Tedy pro postižený vývod platí:

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{TL} + G_{cn} + G_{Rp}) \cong -G_{Rp} \quad (5.9)$$

$$|G_{Rp}| \gg |G_{vyv}| \quad (5.10)$$

Metoda vyšších harmonických

Metodu jsem zlehka zmínil v admitanční metodě. Jelikož jsou spotřebiče nesymetrické, generuje se v síti kapacitní proud vyšších harmonických. Výrazné vyšší harmonické jsou 3., 5., 7.. Kompenzována je zpravidla základní harmonická, tedy hodnota sumy vyšších harmonických může přesáhnout hodnotu vykompenzované základní harmonické. Tohoto nedokompenzování vyšších harmonických využívá popisovaná metoda. Metoda zpracovává signál sumy zvolených vyšších harmonických. Vývod s největší hodnotou signálu je určen jako vývod s poruchou. V určitých aplikacích se pracuje pouze s 5. harmonickou. Zde se sleduje hodnota netočivé složky proudu, ale i fáze 5. harmonické. Na postiženém vývodu je k vidění maximální hodnota netočivé složky proudu 5. harmonické a opačný směr fáze vzhledem k zdravým fázím. Metoda je závislá na přesnosti měření, frekvenční analýze a na hodnotách úrovně vyšších harmonických.

Nadproudové kritérium

Tohoto kritéria se nejvíce využívá v sítích uzemněných přes uzlový odporník. Volený odporník ovlivňuje hodnotu poruchového proudu, tedy je potřeba, aby ochrana vyhodnocovala součtový proud. Pro správnou detekci je potřeba dodržet vztah 5.11

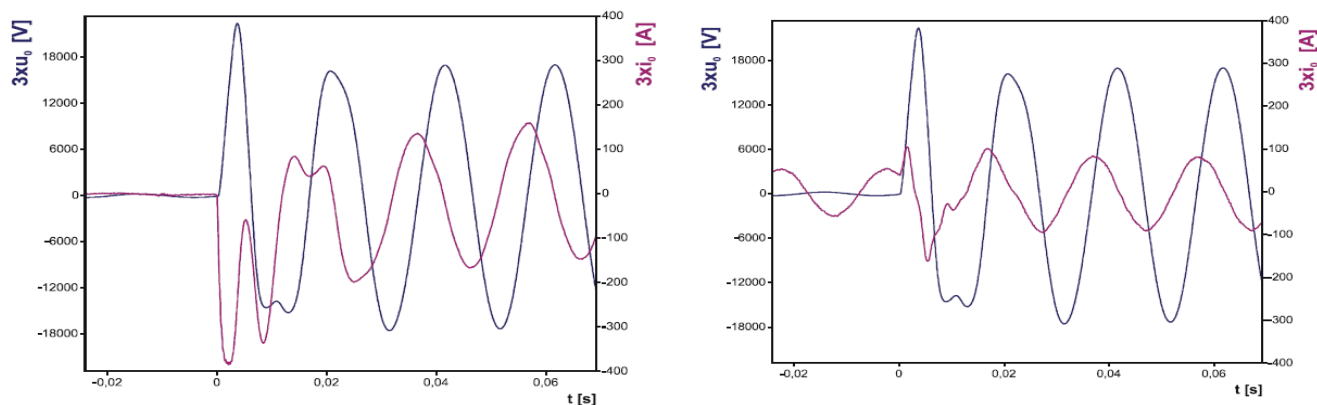
$$I_{nst} < \frac{I_{min}}{k \cdot c} \quad (5.11)$$

- I_{nst} - rozběhový proud ochrany,
- I_{min} - minimální proud při poruše,
- k - koeficient citlivosti ochrany,
- p - převod proudového transformátoru.

U rozlehlých sítích, které jsou primárně kabelového charakteru, máme velké kapacitní proudy, které neumožní správné nastavení ochrany, tedy tato metoda není vhodná. Využívá se následně směrové nadproudové ochrany, či zemní Wattové. Ty jsou již popsány v 5.2.1.

5.2.2 Dynamické metody

Citlivost statických metod záleží na přesnosti měření a následném korektním vyhodnocení. Díky zhašecí tlumivce mohou nastat stavy, kdy bude postižený vývod vyladěn tak, že hodnota netočivé složky proudu ve zdravých vývodech bude vyšší než u postiženého vývodu. To je dáno nízkými hodnotami netočivých složek proudu, kde vyhodnocení není zcela spolehlivé. Toto jsou důvody využívání dynamických metod. Lokalizace a vyhodnocování probíhá při samém vzniku zemního spojení během přechodného jevu. Hodnoty proudů a napětí jsou během zemního spojení výraznější, tedy metody mají větší citlivost a snadněji postižený vývod určí. Nevýhodou zpravidla zůstává jeden pokus k lokalizaci poruchy.



Obrázek 5.3: Průběh netočivé složky I a U při ZS na postiženém a zdravém vývodu.

Metoda první půl-periody

Se vznikem zemního spojení započíná přechodný jev. Dochází k vybíjení kapacity postižené fáze a nabíjení vývodů nepostižených. To vede ke krátkému vybíjecímu proudu trvající několik desítek milisekund. Metoda první půl-periody porovnává a sleduje oscilografické průběhy netočivé složky proudu a napětí (obr.5.3) právě v první půl-periodě přechodného jevu zemního spojení. V případě zdravého vývodu, či vývodu s poruchou nacházející se před místem měření (ve směru od napáječe), jsou netočivé složky napětí a proudu ve fázi. Naopak protifáze značí vývod postižený nebo vývod s poruchou za místem měření. Metoda je vhodná u sítí kompenzovaných neúčinně uzemněných, kde spolehlivě reaguje i na obloukové zemní spojení. Nevýhoda spočívá v krátkosti intervalu, tedy v malém prostoru k vyhodnocení. Problém s vysoko-impedančními poruchami přetrvává i u metody první půl-periody, neboť tyto poruchy potlačují a zmírňují velikost přechodných jevů.

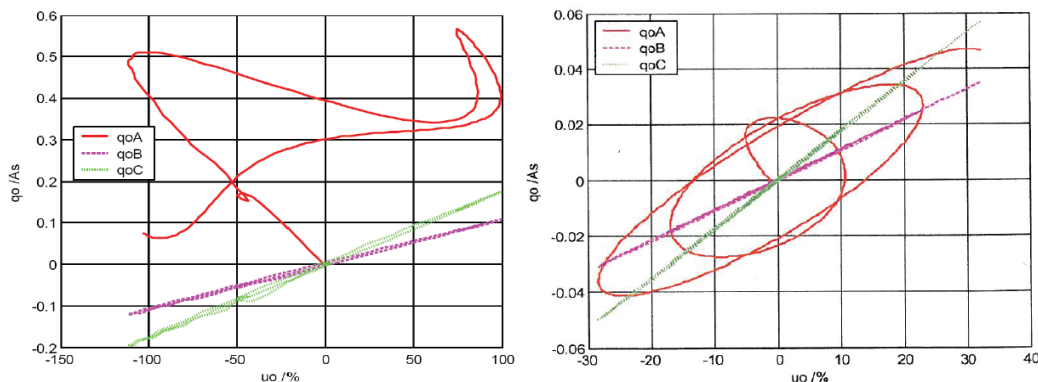
Metoda q_0 - diagramu

Metoda je založena na vyhodnocování grafické závislosti netočivých složek proudu a napětí. Konkrétně netočivá složka proudu představuje náboj q_0 . V případě zdravého vývodu popíše vybíjecí proces rovnicí:

$$u_0(t) = u_0(t) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau = u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (5.12)$$

- t_0 - čas vzniku zemního spojení,
- C_{eq} - ekvivalentní kapacita zdravých vývodů mezi vodičem a zemí,
- i_0 - okamžitá hodnota netočivé složky proudu procházející zdravými vývody.

Za předpokladu nulové hodnoty netočivé složky napětí při vzniku zemního spojení je rovnice 5.12 ovlivněna pouze ekvivalentní kapacitou C_{eq} , která je v krátkém časovém intervalu kon-



Obrázek 5.4: Qu-diagram tří vývodů, postižený vývod qoA.

stantní. Z tohoto vyplývá následující vztah:

$$u_0(t_0) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}} \quad (5.13)$$

Konstantní hodnota C_{eq} je gradientem přímky v qu-diagramu. V případě postiženého vývodu vztah 5.13 nebude platný. Vybíjecí proud postiženého vývodu má opačný směr, tedy qu-diagram bude začínat s opačným gradientem. U sítí kompenzovaných bude závislost nelineární, důvodem je zhášecí tlumivka (obr.5.4). Metoda může být zdokonalena o filtr, který odstraní spektrum netočivé složky napětí a proudu v bezporuchovém stavu. Důvodem je zlepšení citlivosti, neboť samostatná nesymetrie sítě, či nelinearita zátěže může vést ke zkreslení diagramu. Metoda se nazývá qu2 a po odfiltrování bezporuchových netočivých složek napětí a proudu reaguje pouze na průběhy netočivých složek napětí a proudu dané nesymetrií poruchy.

Vyhodnocení částečných výbojů pro detekci poruchy

Metoda soustředí se na indikaci poruchových vývodů převážně izolovaných vysokonapěťových vodičů a to z důvodu dobrých izolačních vlastností, které snižují spolehlivou detekci zemního spojení u ostatních metod. Metoda využívá impulzní složky signálu částečných výbojů vznikající na povrchu postiženého vodiče. Správným měřením a vyhodnocením lze rozeznat typ poruchy. Metoda vyžaduje přesnou měřicí techniku.

5.3 Indikace a detekce poruchy

Základní způsob detekce poruchy je postupné odpínání vývodů, dokud poruchu neodpojím. Tato metoda je účinná, ale vyžaduje poměrně dost manipulace a může dojít k dočasné ztrátě napájení určitého úseku. K nalezení zemního spojení se využívá statických metod. Důvod je zřejmý, cyklus měření a vyhodnocování lze opakovat do doby jistého určení postiženého vývodu. Digitální ochrany lze nastavit prakticky jakékoli charakteristiky a tím docílit vysoké citlivosti.

Aktuálně se velmi často aplikují automatiky, které umí detekovat vývod, kompenzovat reziduální proud a posléze určit místo poruchy.

5.3.1 RCC (Residual Current Compensation) - Swedish Neutral

Automatika, která funguje na principu admitanční metody. Porovnává předporuchové a poruchové admitance vývodů. Pokud se tyto dvě hodnoty liší, je vývod označen jako postižený. Následně je zhasací tlumivka laděna automatikou a kompenzuje poruchový proud. Tento systém je schopen lokalizace poruchy, avšak podmínkou je propojení a zkruhování postiženého a zdravého vývodu, kde přerozdělením netočivé složky proudu a admitancemi vypočte místo poruchy. Tohoto principu se využívá velmi zřídka, neboť zkruhovat síť dálkově je velmi obtížné. Využijí jiné metody, které jsou snadněji aplikovatelné. Základem je identifikovat vývod, metody jsou zmíněny výše. Následné operace jsou cíleny na konkrétní vývod.

5.3.2 Odpínání úseků postiženého vývodu

Jedná se o základní, ale velmi účinnou metodu, která je velmi často využívána k odpínání postiženého úseku. Principem je postupné odepínání úseků a odboček, až dojde k odpojení poruchy, respektive úseku s poruchou. Následně je vyslána na postižený úsek četa, která poruchu dohledá a obnoví provozní stav. Metoda je velmi dispečersky náročná a může dojít k přerušení dodávky elektrické energie. To jsou důvody, proč je snaha metodu nahradit.

5.3.3 Spojování postiženého vývodu do kruhu

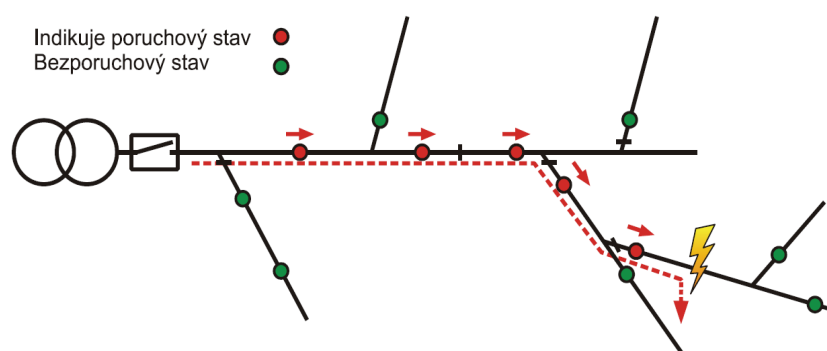
Tato metoda je součástí RCC. Jednou z nevýhod je nerealizovatelnost zkruhování postiženého a zdravého vývodu s rozvodnou. Další překážka spočívá v členitosti a nehomogenitě vedení, neboli rozdílných parametrech vedení, které zabraňují přesné lokalizaci poruchy. Tyto aspekty vedly k počátku využívání indikátorů poruch.

5.3.4 Indikátory poruch

Indikátory můžeme umístit kamkoliv na vedení bez ztráty elektrické energie. Většinou do míst, kde bývá vysoký výskyt poruch. Indikátory pracují s dynamickými a statickými metodami, aby docílily vysoké citlivosti. Nejobvyklejším řešením jsou indikátory monitorující magnetické a elektrické pole, které zároveň porovnávají změnu netočivých složek napětí a proudu a následně vyhodnocují, zda je vedení s poruchou, či nikoliv. Způsob měření indikátory rozděluje na dvě skupiny. První typ indikátorů měří celkové magnetické a elektrické pole všech tří vodičů, naopak druhý snímá magnetické a elektrické pole každé fáze zvlášť. Indikátor měřící celkové magnetické a elektrické pole je konstrukčně jednodušší, cenově výhodnější, rozměrem menší. Naopak nevýhoda spočívá v menší citlivosti. Indikátory mohou být vybaveny různým typem signalizace. Například dálková signalizace, která dispečerovi zobrazí postiženou část vedení a četa

je vyslána na konkrétní místo. Signalizace nemusí být vždy dálková, tedy v případě optické signalizace musí četa stopovat indikátory až k místu poruchy. Tento odstavec byl zaměřen na indikátory venkovního vedení, ale indikátory se využívají i u kabelových vedení.

U kabelových vedení, díky vyšším poruchovým proudům, není problém s citlivostí. Využívají se víceúčelové monitory uvnitř distribučních stanic, kde měří oteplení transformátorů, napěťové a proudové poměry na straně nízkého napětí. Dále se používá měřící průvlekový transformátor proudu na kabelovém vedení primární strany distribučního transformátoru. Vyhodnocení probíhá pomocí metody vyšších harmonických, kde sledují netočivou složku proudu. Na obrázku jsou znázorněny indikátory venkovního vedení, které vedou k místu poruchy.



Obrázek 5.5: Lokalizace poruchy na venkovním vedení pomocí indikátorů.

6 Aplikace metod využívaných k detekci poruch

V předchozí kapitole jsem sepsal přehled využívaných možností k detekci zemní poruchy. V této kapitole vyberu určité metody a aplikuji je na zadanou síť. Výběr metod byl diskutován a volen s konzultantem práce Ing. Františkem Žákem, Ph.D. V této kapitole se také věnuji výběru a nastavení popudových hodnot ochran, které byly taktéž komunikovány s konzultantem práce. Grafy jsou vytvořeny v nástroji Power BI Desktop. Výpočtový program provádí analýzu metod od nulové hodnoty odporu poruchy až po hodnotu 5000Ω a je vypracován v softwaru MS Excel.

6.1 Nastavení ochran

Zemní ochrany pracují většinou s hodnotami nulových složek proudu a napětí. Nastavují se na rozběhové (popudové) hodnoty těchto veličin. V případě překročení nastavených hodnot, ochrana hlásí zemní spojení. Po zjištění zemního spojení ochrana signalizuje poruchu, nebo k tomu vedení odpojí. Toto se odvíjí od typu a provozu sítě. Dle technických listů se minimální (popudové) hodnoty pohybují od 10% nulové složky napětí $\bar{U}_{(0)}$ a od 1% nulové složky proudu $\bar{I}_{(0)}$.

Velikost součtového měřicího transformátoru se určuje dle předpokládaného maximálního proudu. Ku příkladu v zadané síti (izolované) se blíží k maximální hodnotě 160A, tedy využiji transformátor s převodem 200/5A a třídou přesnosti 0,5. Na třídu přesnosti je potřeba nezapomínat, neboť pokud sčítám vektorově proudy, celková odchylka může být větší než zmíněných 0,5 %. To je důvodem proč není vhodné nastavovat ochrany na minimální hodnoty. To by mohlo vést k falešné detekci zemního spojení, jelikož by se zde načítala nepřesnost měření a nesymetrie. [1, 12]

6.2 Izolovaná soustava

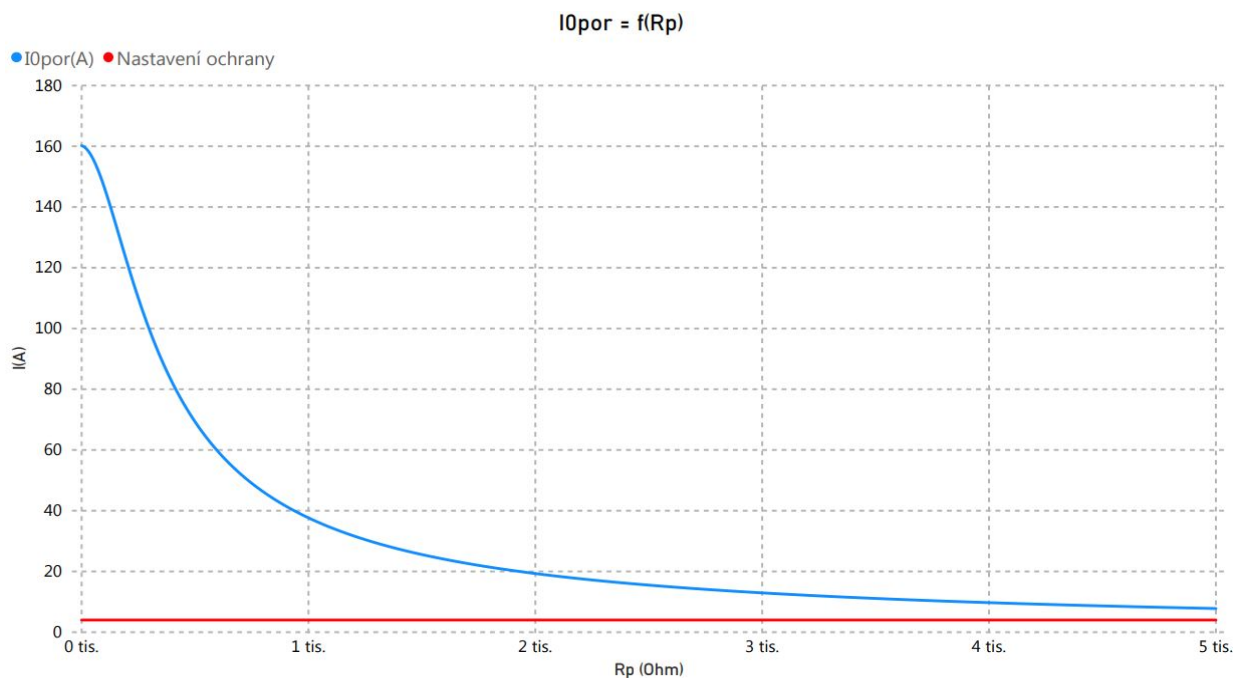
V izolované soustavě, při kovovém zemním spojení, protéká vedením téměř 160 A. Jak jsem zmínil v odstavci výše, volím součtový transformátor pro měření poruchového proudu s převodem 200/5A. Na ochraně nastavím následující hodnoty.

Tabulka 6.1: Izolovaná síť - nastavení ochran.

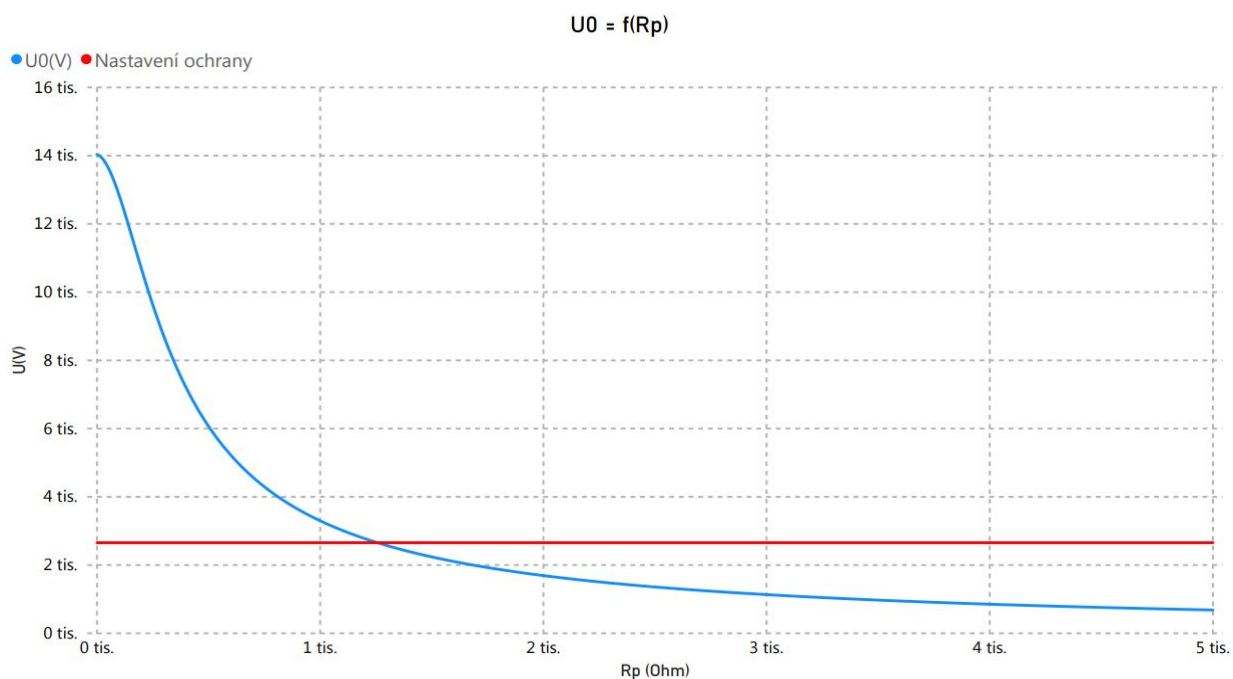
2% z 200A	$\bar{I}_{(0)} = 4\text{A}$
20% z 13 279V (\bar{U}_f)	$\bar{U}_{(0)} = 2\ 655,8\text{V}$

Dle grafu 6.1 je patrné, že vliv odporu poruchy na schopnost správné detekce je v dané

síti zanedbatelný. Dokonce ani v maximální hodnotě R_P nepřesáhne poruchový proud nastavenou hodnotu měřicího transformátoru. Na grafu 6.2 je situace odlišná. Napěťový člen ochrany přestává detekovat zemní spojení již při hodnotě přibližně 1200Ω . Řešením situace je snížení popudové hodnoty například na 15%, popřípadě na hodnotu blíží se k 10% \bar{U}_f . Při takto nízkých hodnotách \bar{U}_f hrozí problém falešné detekce, viz druhý odstavec 6.1.



Obrázek 6.1: Izolovaná soustava - nulová složka poruchového proudu v závislosti na odporu poruchy.



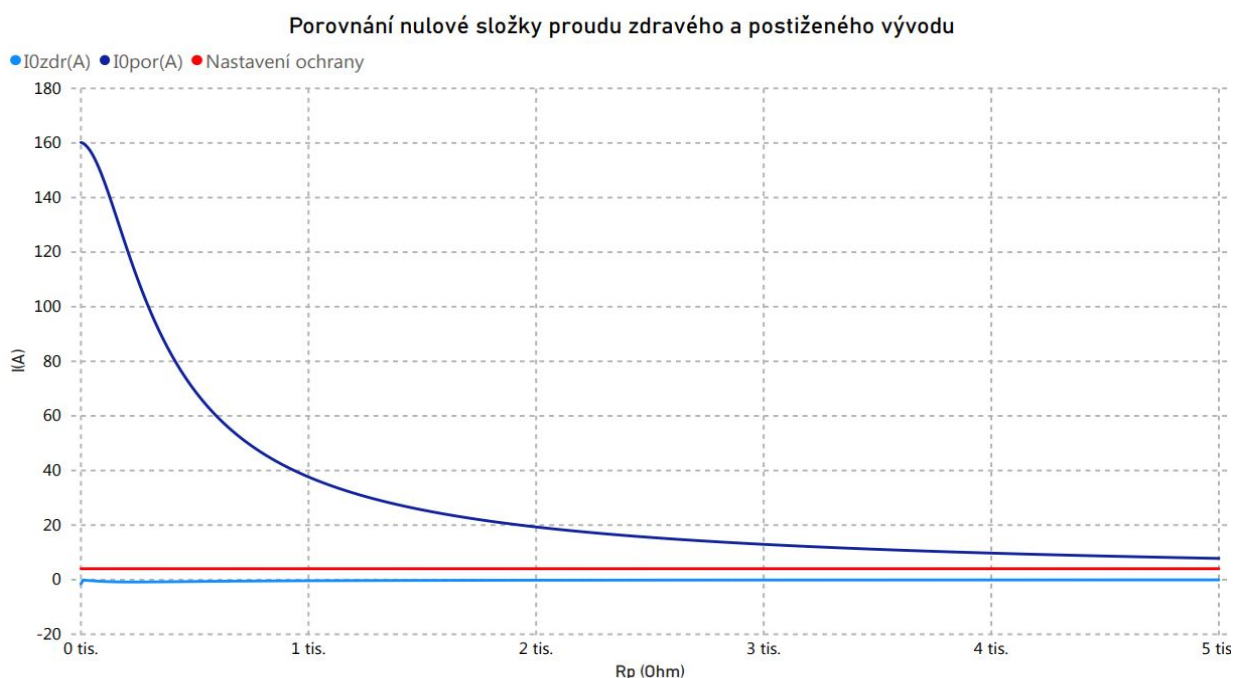
Obrázek 6.2: Izolovaná soustava - nulová složka napětí v závislosti na odporu poruchy.

V následující části zobrazuji dvě vybrané metody, které se využívají v sítích izolovaných a

zobrazují rozdíl mezi zdravým a postiženým vývodem.

6.2.1 Porovnání nulové složky proudu

Na grafu 6.3 je patrné, že nastavení ochrany nereaguje na zdravý vývod, naopak na postižený vývod reaguje v celém rozsahu odporu poruchy. Hodnoty nulové složky proudu zdravého jsou téměř nulové, respektive mi vycházejí malé záporné hodnoty (desetiny A) blížíící se se zvětšujícím odporem poruchy k nule. Přibližování se k nulové hodnotě se zvětšující se hodnotou odporu poruchy sledují i na postiženém vývodu, ale zde mám kladný proud. Dle grafu je patrné, že tato metoda je aplikovatelná pro tuto síť, a to i při vysoké hodnotě odporu poruchy.



Obrázek 6.3: Izolovaná soustava - porovnání nulové složky proudu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy .

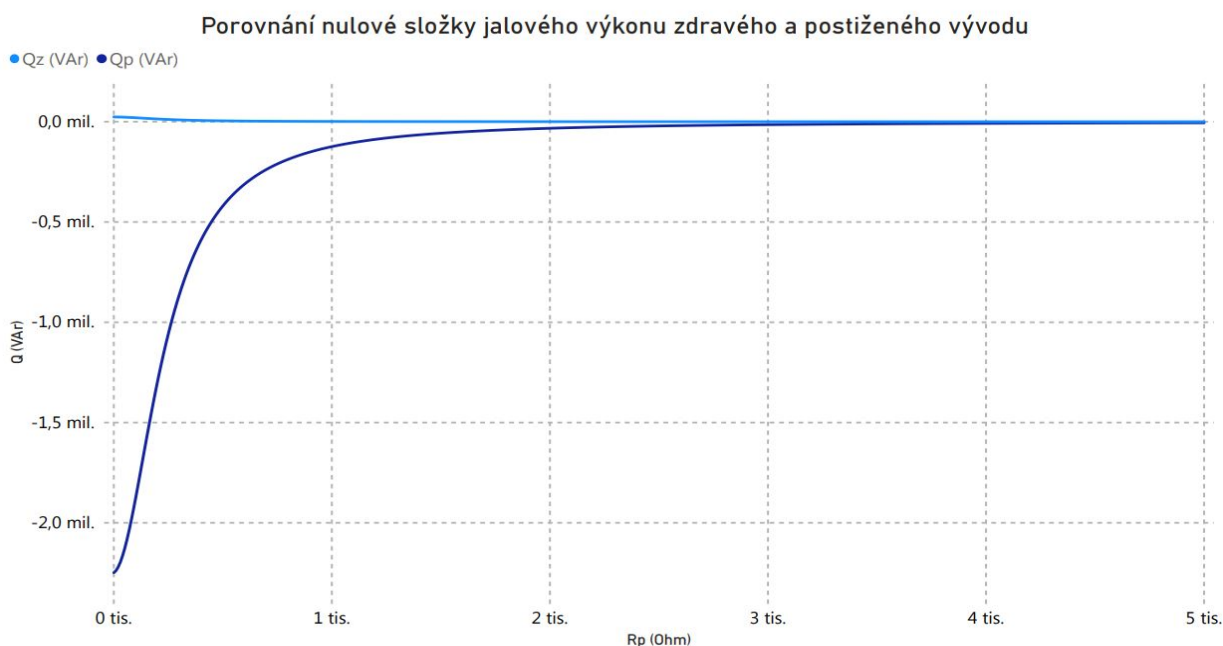
6.2.2 Určení toku nulové složky jalového výkonu

Tento způsob detekce je založen na vyhodnocování kladného, či záporného jalového toku, respektive porovnává vývody. Na grafu 6.4 zobrazují zadanou síť, kde je zřetelně patrná záporná hodnota jalového výkonu. V tabulce 6.2 příkládám pro lepší představu hodnoty při odporech poruchy zvyšující se o 1000Ω .

Je patrné, že se zvyšujícím se odporem poruchy se hodnoty přibližují k nule. Samotné porovnání vývodů zde není nutné. Postačí zjištění, že jalový výkon je záporný, což nám indikuje zemní spojení a zároveň určuje vývod. V zadané síti se při odporu poruchy okolo 5000Ω dostávám na hodnotu v řádech tisíců VAR, která je spolehlivě detekovatelná.

Tabulka 6.2: Hodnoty nulové složky jalového výkonu u zdravého a postiženého vývodu v závislosti na R_P .

R_P (Ω)	Q_{zdr} (VAr)	Q_{por} (VAr)
0	23740	-2248845
1000	1310	-124114
2000	344	-32642
3000	154	-14667
4000	87	-8244
5000	56	-5314

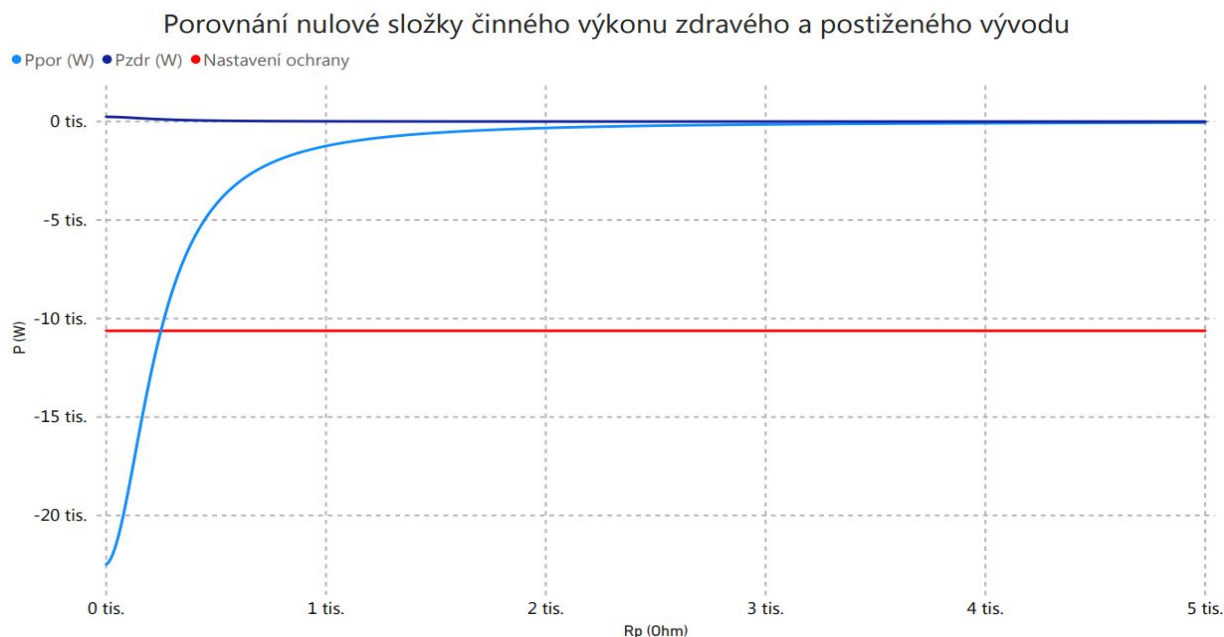
**Obrázek 6.4:** Izolovaná soustava - porovnání nulové složky jalového výkonu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

Jelikož je práce zaměřena na porovnávání metod a určení vhodnosti způsobů chránění, tak volím metodu, která se používá u kompenzovaných sítí (porovnání nulové složky činného výkonu zdravého a postiženého vývodu). Na grafu 6.5 je patrné, že ochrana reaguje do hodnoty odporu poruchy pouze 250Ω . Hodnoty se s přibývajícím odporem poruchy přibližují nule a rozestat zdravý vývod od postiženého je neproveditelné. To jsou důvody, proč se tato metoda nevyužívá v izolované síti.

6.3 Kompenzovaná soustava

K měření poruchového proudu v kompenzované síti jsem vybral součtový transformátor s převodem 50/1A. Nastavení ochran je zobrazeno v tabulce 6.3.

Na grafu 6.6 je znázorněna schopnost zemní ochrany detekovat zemní spojení při odporu poruchy 2200Ω . Existuje možnost snížit popudovou hodnotu, v mém případě snížení na 3% znamená



Obrázek 6.5: Izolovaná soustava - porovnání nulové složky činného výkonu zdravého a postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

Tabulka 6.3: Kompenzovaná síť - nastavení ochran.

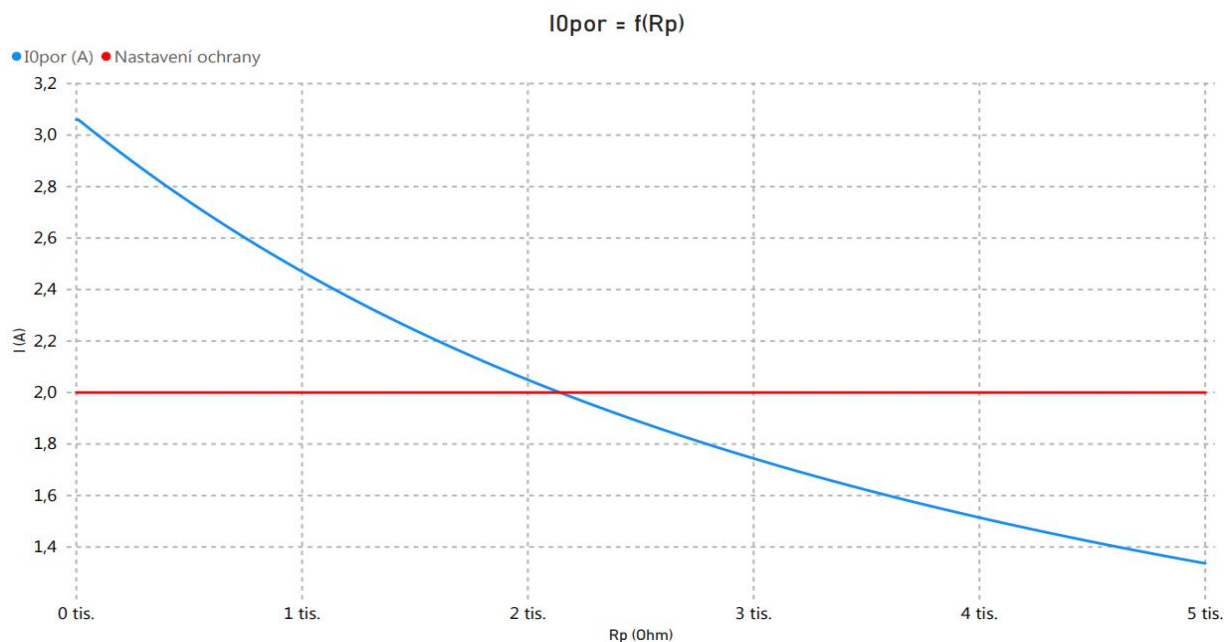
4% z 50A	$\bar{I}_{(0)} = 2\text{A}$
20% z 13 279V (\bar{U}_f)	$\bar{U}_{(0)} = 2\ 655,8\text{V}$

detekce do odporu poruchy 3300Ω . Zde může nastat již zmíněný problém chybného detekování. Situace u napěťového členu je odlišná, zobrazeno na grafu 6.7. V celém rozsahu odporu poruchy ($0-5000\Omega$) je popudová hodnota pod charakteristikou, tedy detekce zemního spojení je zajištěna.

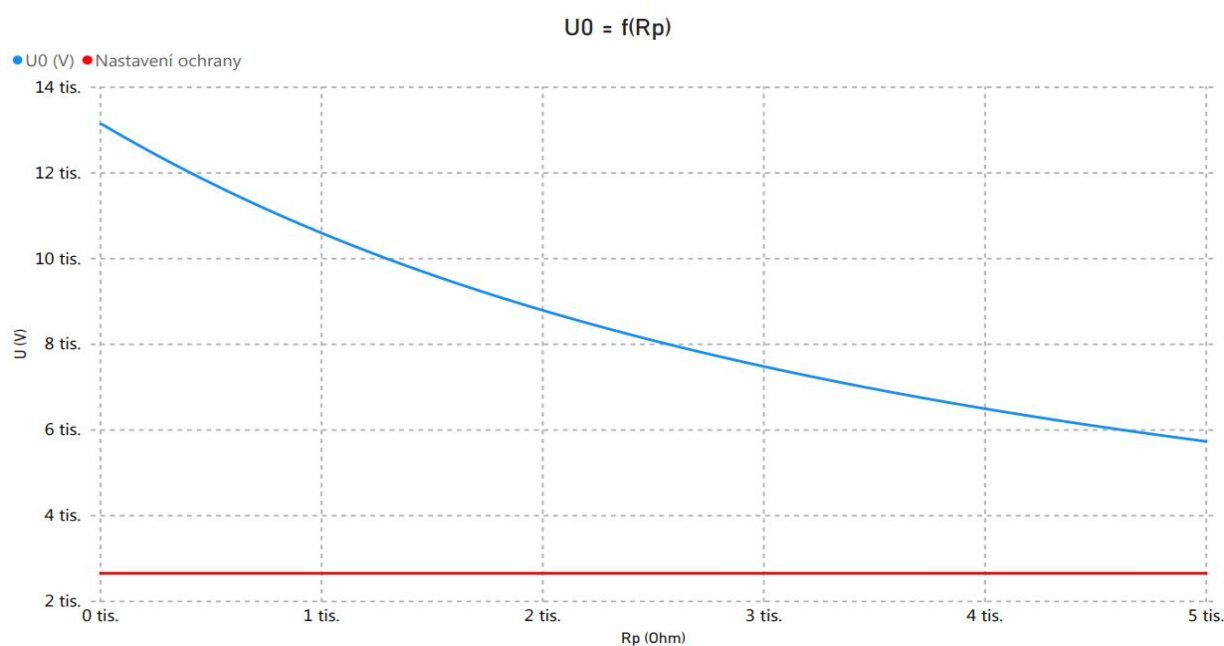
6.3.1 Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Graf 6.8 porovnává zdravý a postižený vývod. Jedná se o základní metodu sloužící k identifikaci zemního spojení. Z grafu je zřejmé, že zemní ochrana nereaguje na zdravý vývod, reakce na postižený vývod je popsána v odstavci výše, tedy při odporu poruchy 2200Ω . V případě snížení hranice ochrany na zmíněné 3% ze součtového transformátoru, by nastala situace protnutí průběh nulové složky proudu zdravého vývodu. Tedy při téměř kovovém zemním spojení by byl detekován i zdravý vývod. V této metodě využívám absolutní hodnoty k zobrazení nulové složky, reálně má proud opačný směr. To je zřetelné v metodě porovnávání netočivé složky činného výkonu.

K navýšení činné složky proudu postiženého vývodu se využívá sekundárního odporníku. Tuto problematiku jsem již popsal v kapitole 4.3.2 a k zobrazení využiji metody porovnání nulové složky proudu a metody porovnání netočivé složky činného výkonu.



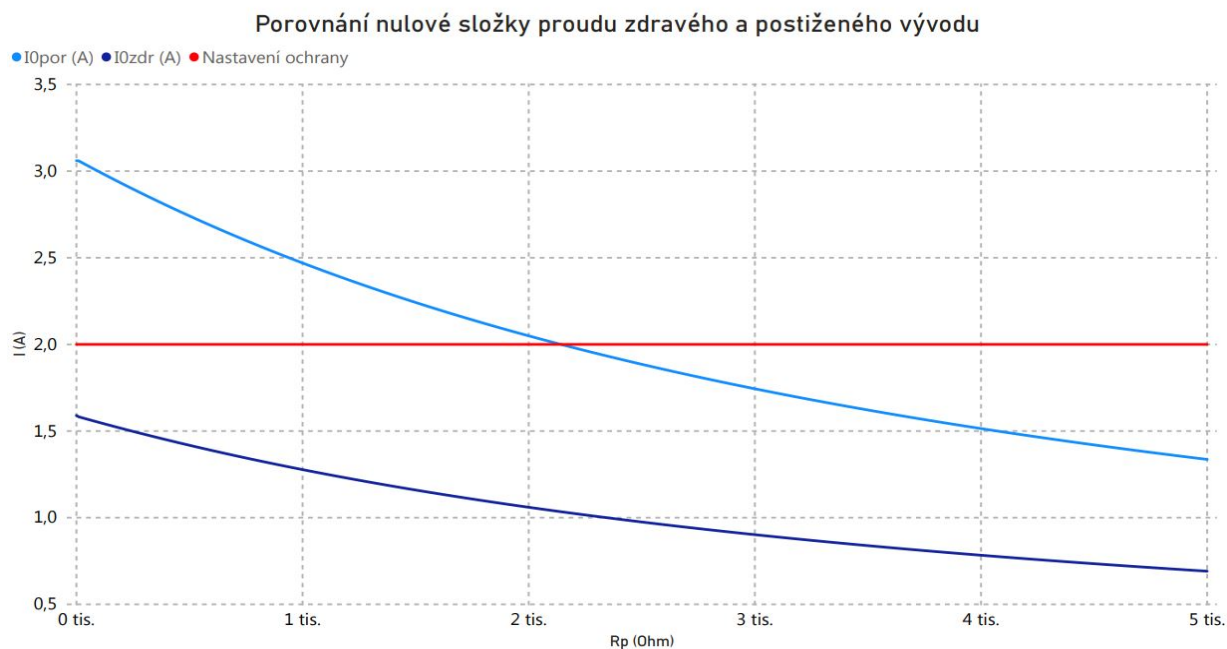
Obrázek 6.6: Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.



Obrázek 6.7: Kompenzovaná soustava - nulová složka napětí postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

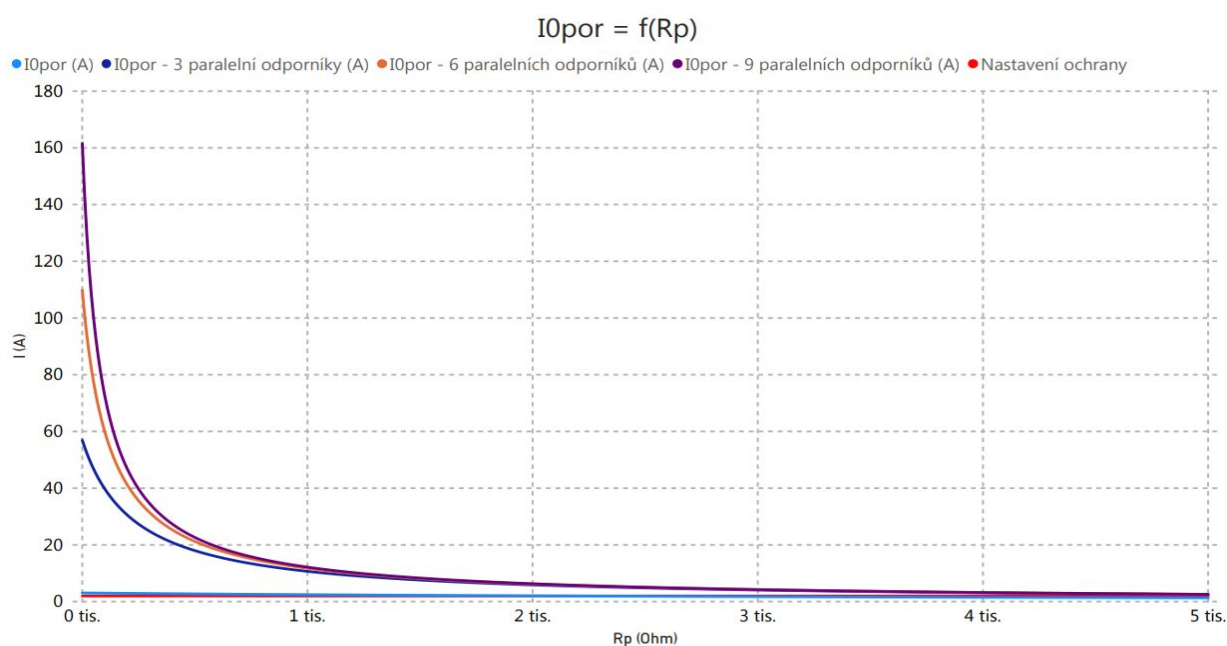
6.3.2 Porovnání nulové složky proudu

V následujících odstavcích a grafech zmiňuji například slovní spojení 3 paralelní odporníky, to znamená tři 1Ω odpory zapojeny paralelně k tlumivce. Na grafech 6.9 a 6.10 je znázorněn průběh nulové složky poruchového proudu po připnutí sekundárního odporníku. V tomto případě je postižený vývod identifikován po celém rozsahu odporu poruchy, respektive popudový



Obrázek 6.8: Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého a zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

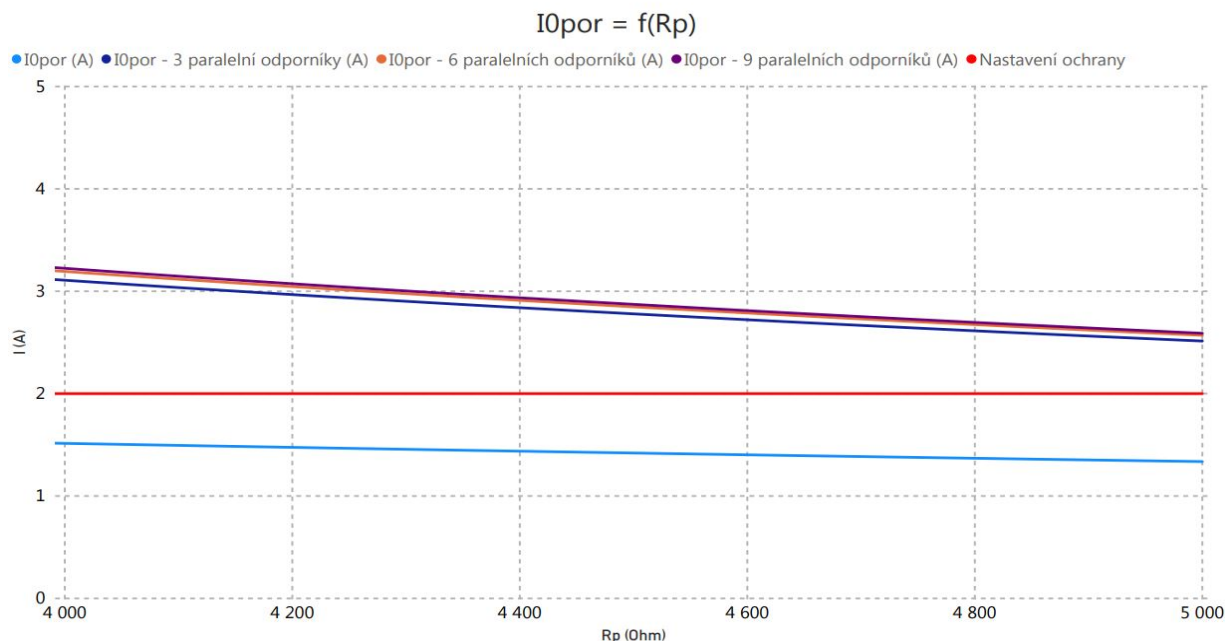
člen nepřekročí hodnotu poruchového proudu.



Obrázek 6.9: Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na odporu poruchy.

6.3.3 Metoda porovnávání netočivé složky činného výkonu

Z tabulky 6.4 lze číst, že postižený vývod nabývá pouze záporných hodnot činného výkonu. Naopak se to má s vývodem zdravým, kde po připnutí odporníku nulová složka činného výkonu



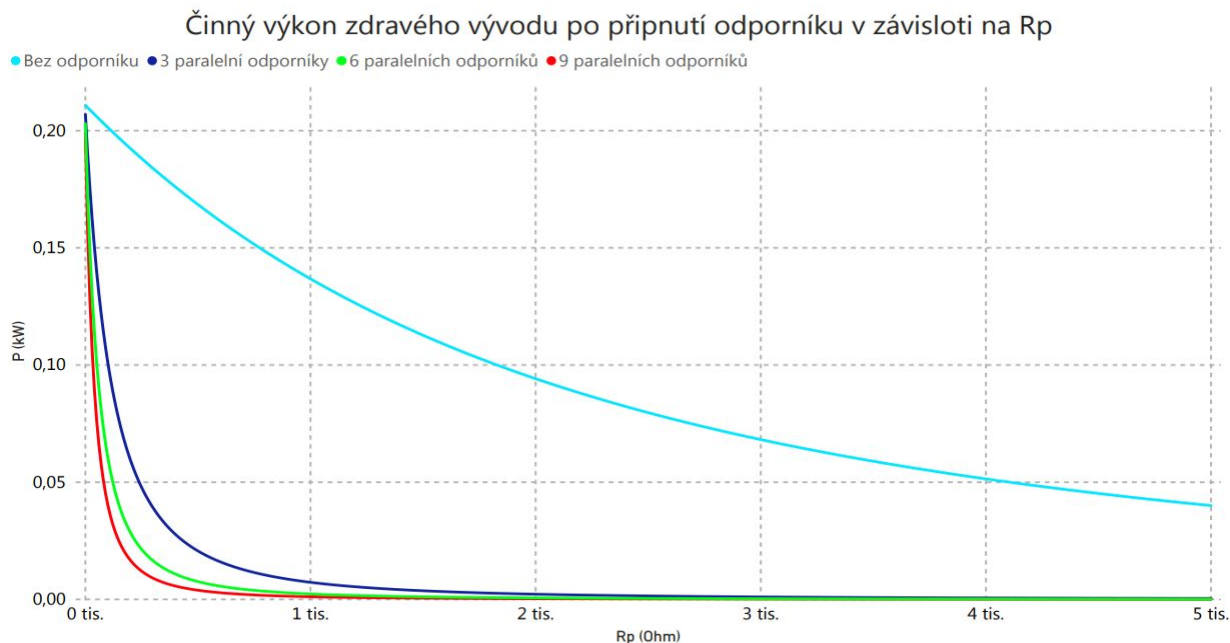
Obrázek 6.10: Kompenzovaná soustava - nulová složka proudu postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na odporu poruchy v rozmezí 4000 - 5000Ω.

Tabulka 6.4: Hodnoty nulové složky činného výkonu u zdravého a postiženého vývodu po připnutí sekundárního odporníku v závislosti na R_P .

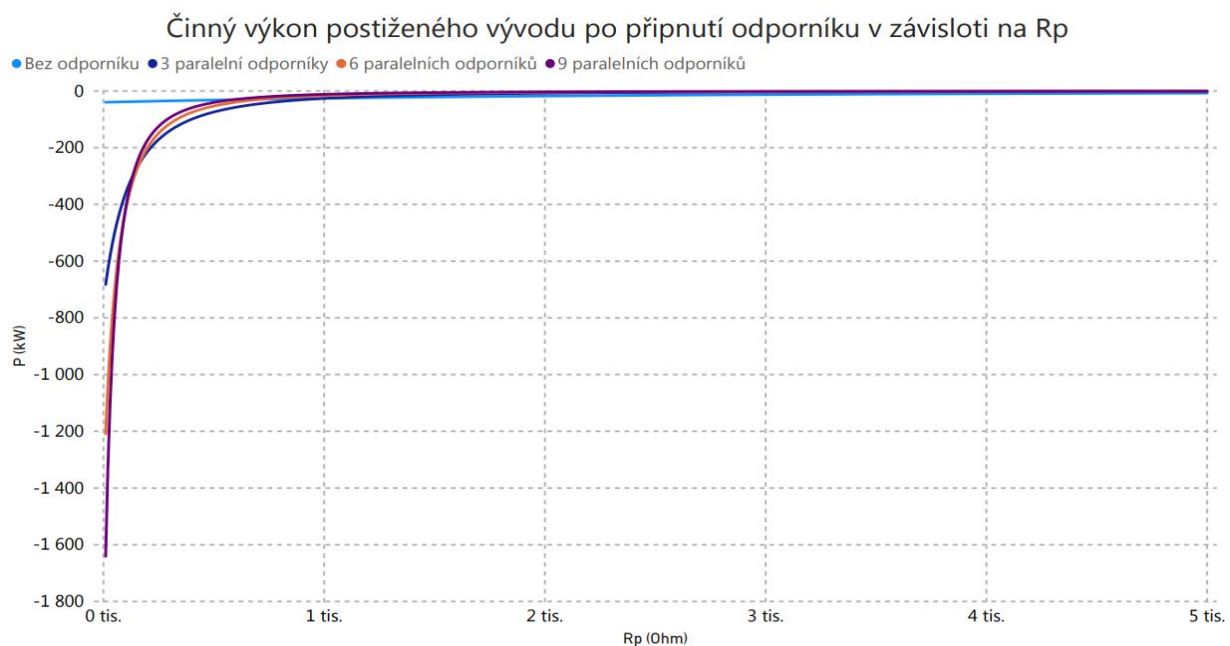
R_P (Ω)	3 paralelní odporníky - P_{zdr} (kW)	3 paralelní odporníky - P_{por} (kW)
0	0,207	-682,5
1000	0,007	-26,131
2000	0,002	-7,954
3000	0,001	-3,729
4000	0,001	-2,212
5000	0,000	-1,447

klesá k minimálním, téměř nulovým hodnotám. Grafy 6.11 a 6.12 zobrazují průběh nulových složek činných výkonů. U zdravého vývodu je patrný rozdíl po připnutí odporníku. Průběh nulové složky činného výkonu rázně klesá v porovnání s tlumivkou bez připnutí odporníku. Na grafu s postiženým vývodem pozorují strmý nárůst v oblasti nízkých hodnot odporu poruchy. Křivky se zdánlivě přibližují k nulové hodnotě, ovšem drží si zápornou hodnotu v řádu jednotek kW.

Jako v předchozí kapitole i zde volím metodu, která se využívá standardně v síti s izolovaným uzlem. Konkrétně se jedná o metodu určení toku nulové složky jalového výkonu. Graf 6.13 ukazuje, že detekce probíhá do hodnoty odporu poruchy 200Ω. Tento graf je platný, když k tlumivce není připnut sekundární odporník. V případě připnutí sekundárního odporníku, by se nulová složka jalového výkonu postiženého vývodu snižovala a přibližovala k nulové složce jalového výkonu zdravého vývodu. V tu chvíli by zemní spojení nebylo detekováno. To jsou důvody, proč se tato metoda nevyužívá v kompenzované síti.



Obrázek 6.11: Kompenzovaná soustava - nulová složka činného výkonu zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

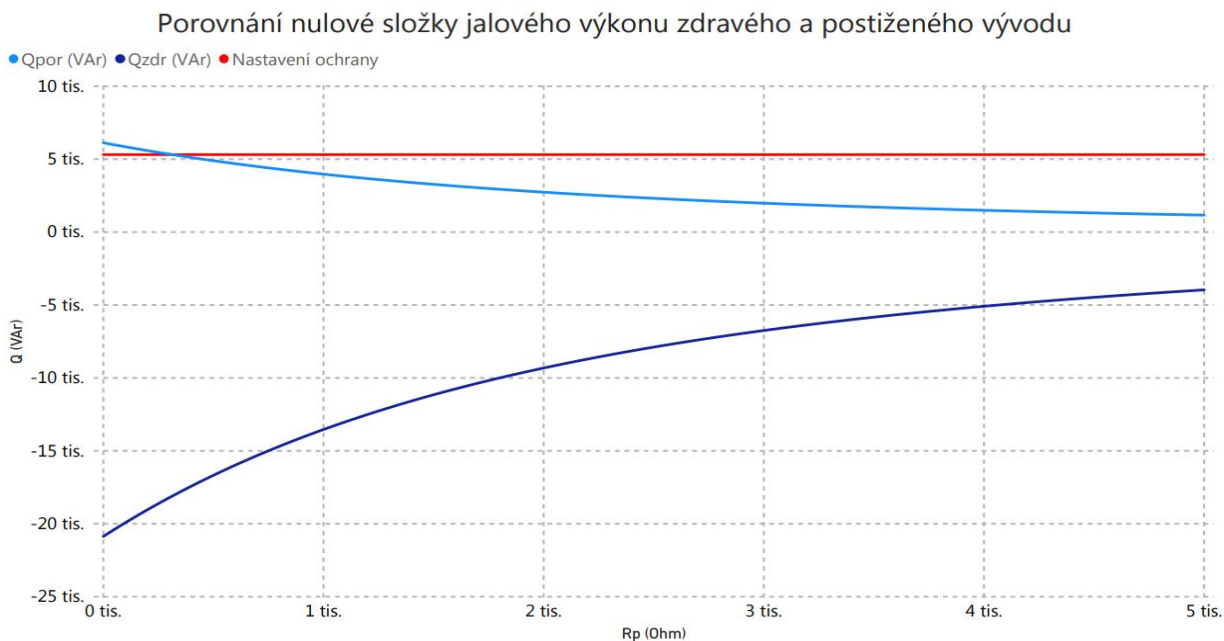


Obrázek 6.12: Kompenzovaná soustava - nulová složka činného výkonu postiženého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

6.4 Odporově uzemněná soustava

V síti během kovového zemního spojení teče místem poruchy proud 253A. Proto jsem k měření vybral součtový transformátor 300/5A. Nastavené hodnoty ochrany jsou zobrazeny v tabulce 6.5.

V odporově uzemněných sítích, popřípadě sítích přímo uzemněných, se nejvíce využívá nad-

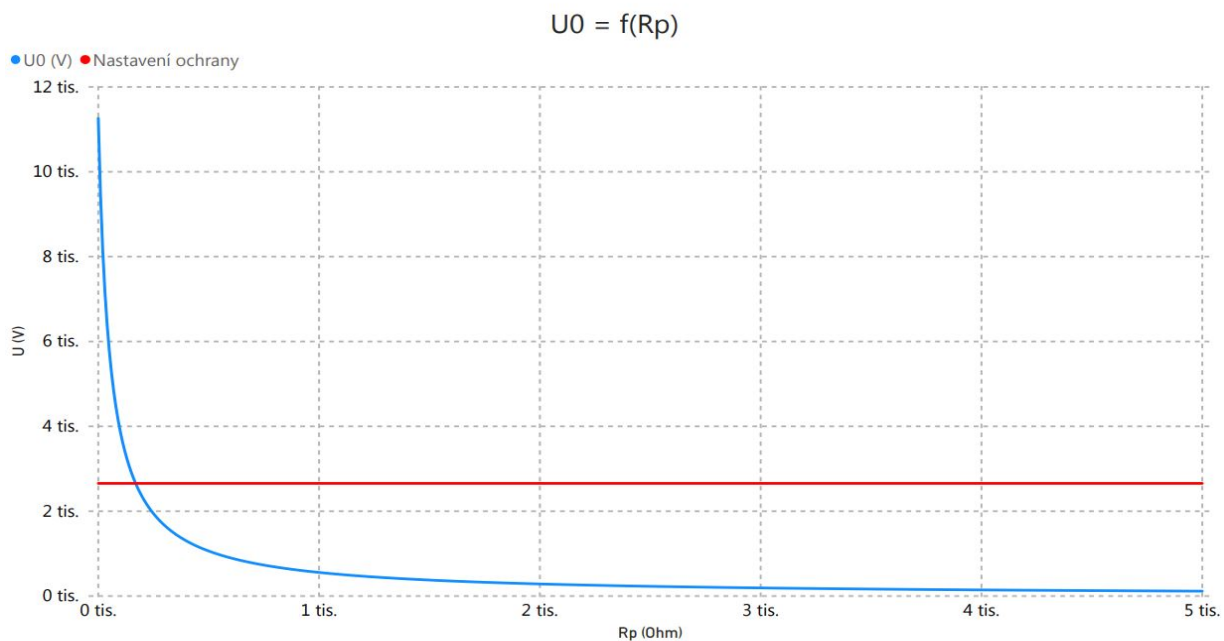


Obrázek 6.13: Kompenzovaná soustava - nulová složka jalového výkonu postiženého a zdravého vývodu v závislosti na odporu poruchy.

Tabulka 6.5: Odporově uzemněná síť - nastavení ochran.

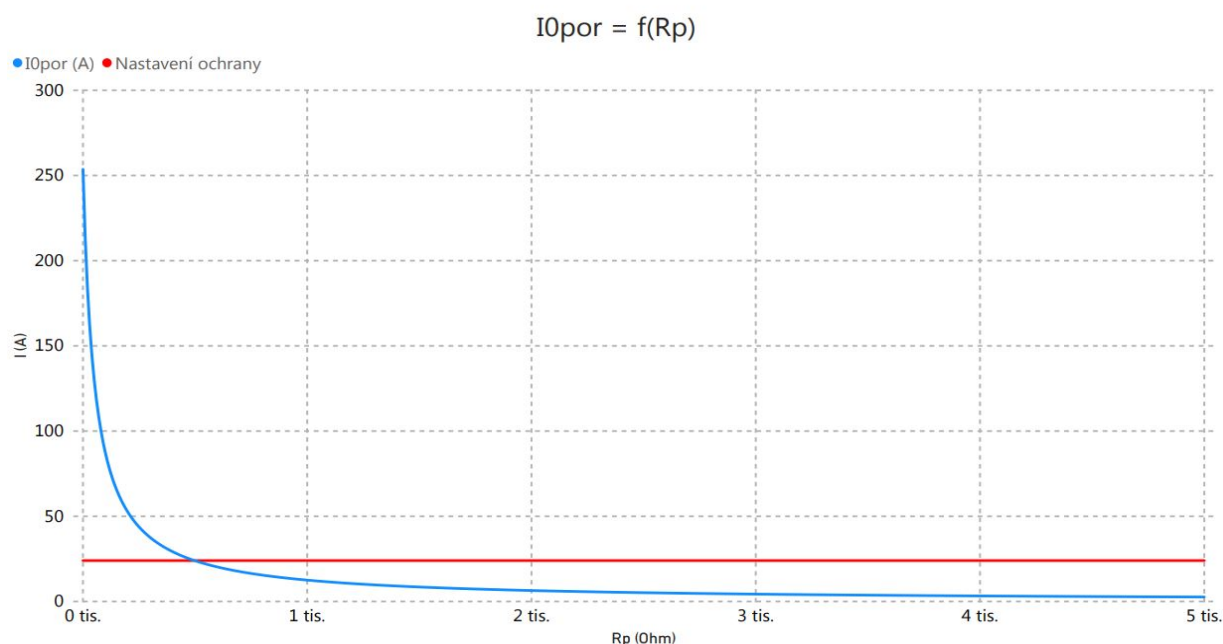
8% z 300A	$I_{(0)} = 24A$
20% z 13 279V (\bar{U}_f)	$\bar{U}_{(0)} = 2\ 655,8V$

proudové kritérium. Aplikace nulové složky napětí reaguje pouze do hodnoty 200Ω viz graf 6.14. To je dokonce méně, než v izolované soustavě. Graf 6.15 popisuje průběh nulové složky



Obrázek 6.14: Odporová soustava - nulová složka napětí v závislosti na odporu poruchy.

poruchového proudu v závislosti na odporu poruchy. Ochrana reaguje také v nízké hodnotě, kolem 500Ω . V odporově uzemněné síti venkovního vedení je nastavení popudového členu 8% již poměrně nízké, proto snížení není řešením a pro tuto síť není uzlový odporník vhodný.



Obrázek 6.15: Odporová soustava - nulová složka proudu v závislosti na odporu poruchy.

6.4.1 Porovnání činné složky netočivého proudu ve zdravém a postiženém vývodu

Hodnoty nulové složky proudu zdravého vývodu jsou v závislosti na odporu poruchy velmi nízké, tedy nemá smysl vykreslovat graf. V tabulce 6.6 je zobrazeno šest hodnot v rozmezí 0 - 5000Ω . Je zřejmé, že hodnota nulové složky proudu poruchového vývodu strmě klesá a přibližuje se k nulové hodnotě se zvyšujícím se odporem poruchy. Zároveň hodnota nulové složky proudu ve zdravém vývodě je po celou dobu téměř nulová.

Tabulka 6.6: Hodnoty nulové složky činného proudu zdravého a postiženého vývodu v odporově uzemněné síti.

R_P (Ω)	\bar{I}_{0zdr} (A)	\bar{I}_{0por} (A)
0	0,157	253,640
1000	0,003	12,524
2000	0,002	6,416
3000	0,001	4,327
4000	0,000	3,240
5000	0,000	2,611

6.5 Vyhodnocení a návrh řešení provozu zadané sítě

Zadaná síť venkovního vedení má kapacitní proud téměř 160A, tedy provoz s izolovaným uzlem není dle normy ČSN 33 3070 možný. Kompenzace je nutná již od 10A.

Provoz sítě přes uzlový odporník přináší výhodu výrazného tlumení přepětí. Bohužel detekce postiženého vývodu je realizována pouze do velikosti odporu poruchy 500Ω . Nicméně odporník je spíše využíván v sítích kabelových, kde většina poruch nemá přechodný charakter a aplikace opětovného zapínání nemá smysl, neboť bych kabelové vedení zbytečně a nadměrně tepelně namáhal.

Nejoptimálnějším řešením zadané sítě se jeví skrze tlumivku a sekundární odporník. Zemní spojení je detekovatelné v celém rozsahu odporu poruchy ($0 - 5000\Omega$). Při využití automatiky připínání sekundárního odporníku jsem schopen detekovat postižený vývod také v celém rozsahu. Velikost poruchového proudu dosahuje 3A, tedy provoz je možný s jednofázovým zemním spojením. Na druhé straně by provoz neměl být trvalý, neboť i při vysokých hodnotách přechodového odporu (jednotky $k\Omega$) jsou zdravé vodiče namáhány vysokým přepětím, které radikálně neklesá ani s přibývajícím odporem poruchy (viz graf 4.12). Pro zadanou síť doporučuji tento typ uzemnění.

Kromě ověřených metod jsem na různé typy uzemnění aplikoval metody, které se dle teoretických předpokladů využívají pro jiné typy uzemnění. V izolované soustavě jsem zvolil metodu, která je doporučována v kompenzované soustavě. Konkrétně jsem porovnával nulové složky činného výkonu zdravého a postiženého vývodu. Výsledek nebyl uspokojivý. Zemní spojení s touto metodou bylo detekováno pouze do hodnoty odporu poruchy 250Ω . U kompenzované soustavy jsem volil metodu vhodnou pro izolovanou soustavu (metoda určení toku nulové složky jalového výkonu). Výsledek byl velice podobný. Zemní spojení bylo identifikováno do odporu poruchy 200Ω . Z těchto výpočtů a grafů plyne to, že se teoretické předpoklady potvrdily. Tedy metody vhodné k izolované síti jsou založeny na vyhodnocování součtu nulových složek fázových proudů a směr toku těchto proudů, popřípadě sledování toku netočivé složky jalového výkonu. Metody vhodné ke kompenzované síti jsou založeny na sledování velikosti činné složky poruchového nulového proudu, popřípadě na nulovou složku činného výkonu.

7 Závěr

Diplomovou práci jsem rozdělil a zpracoval celkem v šesti kapitolách. Prvotně se zabývám distribuční soustavou České republiky, kterou jsem začlenil do celého kontextu elektrizační soustavy. Distribuční soustava je v České republice provozována ve třech variantách (s izolovaným uzlem, s uzlem nepřímo uzemněným přes zhášecí tlumivku a s uzlem nepřímo uzemněným přes uzlový odporník). Z toho vyplývají možné poruchové stavy v těchto sítích.

Poruchovým stavem může být zemní spojení, nebo zemní zkrat. Zemní spojení nastává v síti izolované a kompenzované tlumivkou. Zemní zkrat se objevuje v síti uzemněné přes odporník. Největším rozdílem je velikost poruchového proudu, kdy zemní spojení nedosahuje takových velikostí poruchového proudu jako zemní zkrat. Tuto problematiku jsem shrnul ve druhé kapitole, kde jsem nadefinoval napěťové a proudové poměry. V této kapitole jsem větší pozornost věnoval síti kompenzované, kde jsem zmínil různé typy a použití tlumivek a jejich ladění.

K vytvoření výpočtového programu jsem využil metodu souměrných složek, kterou v práci detailně popisuji. Metoda je založena na poznatku, že každá nesymetrická trojfázová soustava lze rozložit na tři souměrné soustavy (sousednou, zpětnou, nulovou, respektive netočivou). Vychází z toho, že specifické uzemnění uzlu ovlivňuje netočivou složku impedance $Z_{(0)}$, která má vliv na proudové a napěťové poměry v síti během poruchy.

Následně přecházím k zadané soustavě, kde definuji parametry. Zaměřuji se na výpočet základních prvků sítě. Využívám náhradních schémat, ze kterých dopočítávám impedance, proudy, napěťové a výkonové poměry. Tato část práce prolíná teoretické znalosti, které jsem nasadil na zadanou síť. Zároveň tato část práce popisuje úkony, které jsem prováděl při vytváření výpočtového programu.

Jelikož je práce zaměřena na detekci a chránění sítí vysokého napětí, sepsal jsem aktuálně využívané metody. Po diskuzi s konzultantem práce jsem se více zaměřil na metody využívané primárně v České republice, tedy na pasivní statické metody. V izolované síti vyhodnocuji součet nulových složek fázových proudů a směr toku těchto proudů. K zvýšení citlivosti si pomáhám jalovým výkonem, kde sleduji tok netočivé složky jalového výkonu. Tato metoda se v zadané síti ukázala jako velmi účinná. V kompenzovaných sítích je detekce založena na sledování velikosti činné složky poruchového proudu. Citlivost lze zvýšit připojením sekundárního odporníku. Toto je v práci zobrazeno a potvrzeno. Síť uzemněná přes uzlový odporník využívá základní nadproudové kritérium. Poruchový stav byl obtížně detekovatelný při vyšší hodnotě odporu poruchy. Tento problém by bylo možné eliminovat, kdybych zvolil vysokohodnotový odporník, který by nepropustil tak velký poruchový proud. Průběh proudu v závislosti na odporu poruchy by nebyl tak strmý.

Pomocí výpočtového programu, nastavení popudových členů ochran a nadefinovaných metod jsem každou síť zhodnotil. Rozloha a vysoký kapacitní proud sítě je překážkou pro provoz s uzlem izolovaným a uzlem uzemněným přes uzlový odporník. V izolované soustavě norma

ČSN 33 3070 nedovoluje provoz sítě s kapacitním proudem 160A. Provoz sítě přes odporník možný je, ale samotná detekce pracuje do nízké hodnoty odporu poruchy (500Ω). Z výsledků práce je patrné, že provozování zadané sítě se zhášecí tlumivkou a sekundárním odporníkem je nejvhodnějším řešením a tento provoz doporučuji.

Z výsledků porovnávání zmíněných metod vyplývá, že ovlivňujícím faktorem detekce je nízká přesnost proudových transformátorů, která je markantní v malých sítích, kde netočivá složka proudu nenabývá vysokých hodnot. Většina metod také nepříznivě reaguje na zvyšující se odpor poruchy.

Pomocí výpočtů jsem potvrdil teoretické předpoklady. V izolované síti je vhodné využívat metody založené na vyhodnocování součtu nulových složek proudů a směru toku těchto proudů. Zároveň je výhodné využívat netočivé složky jalového výkonu. Teoretické předpoklady byly potvrzeny i v síti kompenzované, kde jsem ukázal výhodnost sledování velikosti činné složky nulového proudu a nulové složky činných výkonů.

8 Literatura

- [1] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin, TOPOLÁNEK, David, a kol. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01- 04935-8.
- [2] *Zemní spojení v trojfázových soustavách* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>.
- [3] MERTLOVÁ, Jiřina a NOHÁČOVÁ, Lucie. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [4] TESAŘOVÁ, Miloslava a ŠTROBLOVÁ, Milada. *Průmyslová elektroenergetika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-703-3.
- [5] *EGE, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2020-02-03]. Dostupné z <https://www.ege.cz/cz/produkty-a-sluzby/elektrotechnika---kompenzace-zemniho-spojzeni/zhaseci-tlumivky>.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla, TAJTL, Tomáš. *Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie*. 1.vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 190 s. ISBN 80-7043-307-8.
- [7] ŽÁK, František. *Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN*. Disertační práce. Plzeň: Západočeská univerzita, 2014.
- [8] ŽÁK, František. *Konzultace*. 2020.
- [9] SRBENÝ, Jan. *Podklady k odporníkům vyrábějící společnost EGE, spol. s r.o.*. 2020.
- [10] NORMA ČSN 33 3070. *Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1981.
- [11] KOUBA, Daniel. *Analýza bezpečného provozu kompenzované sítě VN velkého rozsahu..* Západočeská univerzita. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013.
- [12] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Podklady a poznámky k předmětu Průmyslová elektrotechnika*. 2020.

Přílohy

Parametry

Transformátor (110/22kV)									
Sn	40,00	MVA							
uk	10,00	%							
i0	0,20	%							
dPk	100,00	kW							
dPO	15,00	kW							
p	110/23	-							
Zt22	1,21000000	Ω			Gfe22	3,09917E-05	S		
Rt22	0,03025	Ω	R2	0,015125	Ω	Rfe22	32266,66667	Ω	
Xt22	1,209621816	Ω	X2	0,604810908	Ω	Yg22	0,000165289	S	
Zt22com	0,03025+1,2096218158995i	Ω			Xh22	6 159,24	Ω		
Lt22	0,003850346	H	L2	0,001925173	H	Lh22	19,61	H	
Zk110	30,25	Ω			Gfe110	1,23967E-06	S		
Rk110	0,75625	Ω	R1	0,378125	Ω	Rfe110	806666,6667	Ω	
Xk110	30,2405454	Ω	X1	15,1202727	Ω	Yg110	6,61157E-06	S	
Zk110com	0,75625+30,2405453974875i	Ω			Xh110	153980,9126	Ω		
Lk110	0,096258646	H	L1	0,048129323	H	Lh110	490,1364678	H	
SÍŤ VN									
Un	23000	V							
Ic0	150	A							
Iw	1	A							
Pzs	15	kW							
Qzs	3	kVAr							
Uf	13,27905619	kV							
C0	1,19854E-05	F							
XCO	265,5811238	Ω		-265,581123827228i					
RO	26558,11238	Ω		26558,1123827228					

Obrázek 8.1: Ukázka výpočtového programu - parametry sítě.

Vývod1a (AlFe 95mm ²)			Vývod1b (AlFe 95mm ²)		
Iva	10	km	Ivb	10	km
Rva	0,2	Ω /km	Rvb	0,2	Ω /km
Lva	0,0015	H/km	Lvb	0,0015	H/km
Ic01a	0,08	A/km	Ic01b	0,08	A
Iw(2%)	1	%	Iw(2%)	1	%
Pzv	1000	kW	Pzv	1000	kW
Qzv	400	kVAr	Qzv	400	kVAr
Cv01a	6,39222E-08	F	Cv01b	6,3922E-08	F
Xcv01a	49796,46072	Ω	Xcv01b	49796,4607	Ω
RO1a	4979646,072	Ω	RO1b	4979646,07	Ω
G01a	2,00817E-07	S	G01b	2,0082E-07	S
RvaL	2	Ω	RvbL	2	Ω
XvaL	4,71238898	Ω	XvbL	4,71238898	Ω
Cv01aL	6,39222E-09	F/km	Cv01bL	6,3922E-09	F/km
G01aL	2,00817E-08	S/km	G01bL	2,0082E-08	S/km
Zátěž					
Ikap	153,2				
Tlumivka					
IL	153,2413125	A	0,798	ladění	Připínání odporu
Ltl	0,275829983	F			500 V
Rtl	86,65454486	Ω	86,65454485887921		1 Ohm
Rtl	8665,454486	Ω	8665,45448588792		705,3333333 Ohm
RtlPO	228,9005806	Ω	228,900580559374		12,285616

Obrázek 8.2: Ukázka výpočtového programu - parametry sítě.

Izolovaná síť

	Rp		10 Ω
	Uf	13279,0561913614	V
Základní impedance			
impedance trať	Zt	0,03025+1,2096218158995i	Ω
Vedení 1. část	Za	2+4,71238898038469i	Ω
Vedení 2. část	Zb	2+4,71238898038469i	Ω
impedance zátěže	Zm	456,034482758621+182,413793103448i	Ω
impedance sítě vůči zemi	Z0sit	2,65554568370391-265,554568370391i	2,65554
impedance 1. části vedení vůči zemi	Z0a	497,914815694483-49791,4815694483i	497,91
impedance 2. části vedení vůči zemi	Z0b	497,914815694483-49791,4815694483i	497,91
Nulová složka			
Z1b+Z10b	Z1	499,914815694483-49786,7691804679i	Ω
Z2b+Z20b	Z2	499,914815694483-49786,7691804679i	Ω
Z20a Z2	Z3	249,457455623953-24894,5626422484i	Ω
Z3+Z2a	Z4	251,457455623953-24889,850253268i	Ω
Z4 Z0sit	Z5	2,62779742535424-262,751225369047i	Ω
Z5+Z1a	Z6	4,62779742535424-258,038836388662i	Ω
Z6 Z1	Z7	4,59348704943093-256,708429933709i	Ω
Z7 Z10a	Zc(0)	4,55958464207852-255,39179582331i	Ω
Zpětná složka			
	Zc(2)	2,03025+5,92201079628419i	Ω
Celková impedance			
Z(2)+Z(0)+3Rp	Z1	16,5898346420785-249,469785027026i	Ω
Z1 Zb+Zm	Z2	142,668974525335-215,469098150581i	Ω
Z2+Za	Z3	144,668974525335-210,756709170196i	Ω
Za+Zb+Zm	Z4	460,034482758621+191,838571064217i	Ω
Z3 Z4	Z5	180,32350915469-108,798583005153i	Ω
Z5+Zt	Zcelkova	180,35375915469-107,588961189254i	Ω

Obrázek 8.3: Ukázka výpočtového programu - izolovaná síť.

Proudy v nulové složce						Izolovaná síť	
proud přes Z10a	Iz10a	0,0664325404654825+0,825954592057725i	A				
	Iz7	14,1477230180109+160,078861539276i	A				
proud přes Z1b a Z10b	Iz1	0,0664727622233159+0,826029697288406i	A				
proud přes Z1a	Iz6	14,0812502557876+159,252831841988i	A				
proud přes Z0sit	Iz0sit	13,9324298295394+157,57168643727i	A	4,64414327186899+52,5238954265661i			
proud přes Z2a	Iz4	0,148820426248233+1,68114540471845i	A				
proud přes Z20a	Iz20a	0,0743894275745551+0,840534626327081i	A				
proud přes Z2b a Z20b	Iz2	0,0744309986736778+0,840610778391369i	A				
kontrola součtu	Irp	14,2141555584764+160,904816131335i	A				
Napětí							
3Rp*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U3rp	-47,3805184808741-536,349386568097i	V	538,438	-1,658906512	-95,0483	
Zc(2)*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U(2)	308,007256019088-136,951128405716i	V	337,082	-0,418384315	-23,9717	
Zc(0)*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U(0)	-13719,5268508756+965,506527608583i	V	13753,5	3,071333866	175,974	
součet U3rp+U(2)+U(0) vynásoben -1 -> viz obr pod dopočítání napětí	U(1)	13458,9001133374-292,20601263477i	V	13462,1	-0,021707577	-1,24375	
	UA	47,380518480888+536,349386568097i	V	538,438	1,482686142	84,9517	
	UB	-20737,4352093578-10208,9221987562i	V	23114,1	-2,684128545	-153,789	
	UC	-20468,5258617499+12569,0923950138i	V	24019,6	2,590892292	148,447	
	UD	14,0812502557876+159,252831841988i	A	159,874	1,482604962	84,947	v místě poruchy
	U0vvyvod	-13960,2931137534+1093,79385822009i	V	14003,1	3,06340204	175,52	
	U2vvyvod	194,203997670115-22,061123346095i	V	195,453	-0,11311279	-6,48089	
	U1vvyvod	13391,6826050691-199,998877243591i	V	13393,2	-0,014933449	-0,85562	
	S0vvyvodPorucha	-22388,6116059867+2238618,19675527i	VA	P	-22388,61161	Q	-1,58079707870256
	S0vvyvodBezPoruchy	238,750253283085-23632,0614849172i	VA	P	238,7502533	Q	1,560693859386
	UAr	-374,406511014186+871,733857630404i	V	-374,407	1,976469251	113,243	
	UBr	-20599,1377999554+12634,1755984241i	V	-20599,1	2,591425542	148,478	
	UCr	-20907,3350302906-10224,5278813942i	V	-20907,3	-2,686751241	-153,94	
	UDr	-0,148820426248233-1,68114540471845i	A	-0,14882	-1,659089408	-95,0588	na rozvodně

Obrázek 8.4: Ukázka výpočtového programu - izolovaná síť.

Kompenzovaná síť

	R_p	10Ω	10	
	U_f	13279,05619 V	13279,0561913614	
	Celková impedance			Kompenzace
impedance trafo	Zt	0,03025+1,2096218158995i	Ω	
vedení 1. část	Za	2+4,71238898038469i	Ω	
vedení 2. část	Zb	2+4,71238898038469i	Ω	
impedance zátěže	Zm	456,034482758621+182,413793103448i	Ω	
Z(2)+Z(0)+3Rp	Z1	720,441639993101-10,944990074261i	Ω	
Z11(Zb+Zm)	Z2	291,696424162817+66,5341328704745i	Ω	
Z2+Za	Z3	293,696424162817+71,2465218508592i	Ω	
Z31Z5	Z4	180,411738472638+55,26444491598i	Ω	
Za+Zb+Zm	Z5	460,034482758621+191,838571064217i	Ω	
celková impedance	Zcelkova	180,4413888472638+56,4740667318795i	Ω	
celková impedance zpětné složky	Zpětná složka			
	Zc(2)	2,03025+5,92201079628419i	Ω	
	Nulová složka			
impedance tlumivky	Ztl	86,0778665405715+227,3772674767i	28,6926221801905+75,7924224922335i	0,86692455516941+86,6692455516941i
koefficient 3 k násobení trafo a sítě	3*	3		
nulová impedance trafo (trojnásobek sousledné)	Z3(1)	0,09075+3,6288654476985i		0,09075+3,6288654476985i
impedance sítě vůči zemi	Z0it	2,6554568370391-265,554568370391i	2,6554568370391-265,554568370391i	
impedance 1. části vedení vůči zemi	Z0a	497,914815694483-49791,4815694483i	497,914815694483-49791,4815694483i	
impedance 2. části vedení vůči zemi	Z0b	497,914815694483-49791,4815694483i	497,914815694483-49791,4815694483i	
meziúpony	Z1	86,1686165405715+231,006132924399i	Ω	
meziúpony	Z2	686,816647907528+16,4304188591413i	Ω	
meziúpony	Z3	499,914815694483-49786,7691804679i	Ω	
meziúpony	Z4	499,914815694483-49786,7691804679i	Ω	
meziúpony	Z5	249,457455623953-24894,5636422484i	Ω	
meziúpony	Z6	251,457455623953-24889,890233266i	Ω	
meziúpony	Z7	687,008767085519+2,53068149490478i	Ω	
meziúpony	Z8	689,008767085519+2,18170748347992i	Ω	
meziúpony	Z9	688,841946836856-7,34906156934775i	Ω	
celková impedance nulové složky	Zc(0)	688,41388993101-16,867008037103i	Ω	
operátor natočení v Gaus rovině	a	-0,5+0,866025403784439i		
operátor natočení v Gaus rovině	a2	-0,500000000000001-0,866025403784439i	Velikost	Uhel
Celkový proud ze zdrojem	Ic	201,07896799567-62,9329523193927i	A	210,6972 -0,30332 -17,3788835 210,697194708042

Obrázek 8.5: Ukázka výpočtového programu - kompenzovaná síť.

Proudy v sousledné sí				
Iv2	Iv2	73,4294609062397-31,145336221209i	A	79,76163 -0,40115 -22,88498121
Iv1	Iv1	127,64950708943-31,7876160981836i	A	131,5479 -0,24406 -13,98352631
Iv1b	Iv1b	73,0265918382308-31,835774156673i	A	79,34488 -0,40765 -23,35659912
Irp	Irp	84,6229152511998-0,251841941510793i	A	84,6235 -0,00461 -0,264163457

$I_c = U_f / Z_{celk}$
 $I_{v2} = I_c * (Z_3 / Z_3 + Z_5)$
 $I_{v1} = I_c * (Z_5 / Z_3 + Z_5)$
 $I_{rp} = I_{v1} * (Z_b + Z_m / Z_1 + Z_b + Z_m)$
 $I_{v1b} = I_{v1} * (Z_1 / Z_1 + Z_b + Z_m)$

Proudy v nulové sí				
IzP	IzP	84,5933475348751-1,00674145546859i	A	84,60283 -0,01844 -1,056496543
proud přes Zab a Z10b	Iz3	0,0295677163245724+0,754899513957848i	A	0,755478 1,531649 87,7569997
proud přes Z1a	Iz8	84,5638136385456-1,7615710497307i	A	84,59224 -0,03227 -1,849129215
Iz10a	Iz10a	0,029538963295083+0,754829594262113i	A	0,755407 1,53169 87,75935534

Obrázek 8.6: Ukázka výpočtového programu - kompenzovaná síť.

Odporově uzemněná síť

	Rp		10 Ω	
	Uf	13279,0561913614	V	
Základní impedance				
impedance traťa	Zt	0,03025+1,2096218158995i	Ω	
vedení 1. část	Za	2+4,71238898038469i	Ω	
vedení 2. část	Zb	2+4,71238898038469i	Ω	
impedance zátěže	Zm	456,0344827598621+182,413793103448i	Ω	
impedance síť vůči zemi	Zosit	2,65554568370391-265,554568370391i	Ω	
impedance 1. části vedení vůči zemi	Z0a	497,914815694483-49791,4815694483i	Ω	
impedance 2. části vedení vůči zemi	Z0b	497,914815694483-49791,4815694483i	Ω	
3* uzlovy odpornik	R	44,2635206378713	44,2635206378713	
koefficient 3 k násobení traťa a síť	3*	3		
nulová impedance traťa (trojnásobek sousledné)	3Zt(1)	0,09075+3,6288654476985i	Ω	
Nulová složka impedance				
R+3Zt(1)	Z1	44,3542706378713+3,6288654476985i	Ω	
Z1 Zosit	Z2	44,2477034077616-3,81264537662089i	Ω	
Z1b+Z10b	Z3	499,914815694483-49796,7691804679i	Ω	
Z2b+Z20b	Z4	499,914815694483-49796,7691804679i	Ω	
Z4 Z20a	Z5	249,457455623953-24894,5625422484i	Ω	
Z5+Z2a	Z6	251,457455623953-24898,850253268i	Ω	
Z2 Z6	Z7	44,2332244232942-3,89053835241894i	Ω	
Z7+Za	Z8	46,2332244232942+0,82185062796575i	Ω	
Z8 Z10a	Z9	46,2342815382395+0,778921680410605i	Ω	
Z9 Z3	Zc(0)	46,2352572593276+0,735988213365988i	Ω	
Zpětná složka impedance				
	Zc(2)	2,03025+5,92201079628419i	Ω	
Celková impedance				
Z(2)+Z(0)+3Rp	Z1	58,2655072593276+6,65799900965018i	Ω	
Z1 Zb+Zm	Z2	52,0829265242206+7,47578512954472i	Ω	
Z2+Za	Z3	54,0829265242206+12,1881741099294i	Ω	
Za+Zb+Zm	Z4	460,0344827598621-191,838571054217i	Ω	
Z3 Z4	Z5	48,5381830836177-11,8243111297738i	Ω	
Z5+Zt	Zcelkova	48,5684330836177-13,0339329456733i	Ω	



Obrázek 8.7: Ukázka výpočtového programu - odporově uzemněná síť.

Proudy v nulové složce					
IzP	IzP	208,489788076223-45,9728873566125i	A		
proud přes Z1b a Z10b	Iz3	0,0413778197214469+0,193916971480804i	A		
proud přes Z1a	Iz8	208,448422127484-46,1667877560655i	A		
Iz10a	Iz10a	0,0413659487394184+0,193900399452893i	A		
Iz2	Iz2	208,33013620984-46,5288224091749i	A		
proud přes vedení 2	Iz6	0,118285917643754+0,3620346531094i	A		
proud přes Z2b a Z20b	Iz4	0,0591494666354943+0,181024639842918i	A		
proud přes Z20a	Iz20a	0,0591364510082597+0,181010013266482i	A		
proud přes odpor a traťa	Iz1	197,246832163297-90,4627150885788i	A		
proud přes Zosit	Izosit	11,0832040465438+33,9338926794038i	A		
součet všech proudů přes nulovou sloučku = Irp	Irp	208,531165895945-45,7789703851319i	A		
Napětí					
3Rp*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U3rp	-2085,31165895945+457,789703851319i	V	2134,969819	2,92549 -167,6182
Zc(2)*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U(2)	-694,473956423768-1141,9810611731i	V	1336,5683	-2,11717 -121,305
Zc(0)*Irp v záporné hodnotě (opačný směr)	U(0)	-9675,18488441003-1963,12599260483i	V	9872,338437	2,941407 168,5302
součet U3rp+U(2)+U(0) vynásoben -1 -> viz obr pod dopočítání napětí Uab	U(1)	12454,9704997932-1278,93463528305i	V	12520,46181	-0,10233 -5,86285
	UA	2085,3116589594-457,78970385132i	V	2134,969819	-0,2161 -12,3818
	UB	-15674,038430413-8214,16910390349i	V	17695,98979	-2,65888 -152,343
	UC	-15436,827881765+14561,3367855692i	V	21220,9374	2,385371 136,6717
	U0	208,448422127484-46,1667877560655i	A	213,4996885	-0,21796 -12,4882
	U0vvyvod	-9040,73217827367+2853,08246450484i	V	9480,238281	2,835903 162,4853
	U2vvyvod	-61,683309055625-250,859033708543i	V	258,3313481	-1,8119 -103,814
	U1vvyvod	13188,5504144116-306,43339491812i	V	13192,10989	-0,02323 -1,33102
	Uab				
	U0vvyvodPorucha	-2016244,01002767-177338,974291835i	VA	-2016244,01	3,053863 174,9735
	U0vvyvodBezPoruch	36,4765815489943-3610,537815443356i	VA	36,47658155	-1,56069 -89,4212
	U0	0,118285917643754+0,3620346531094i		0,118285918	1,255005 12,90647

Obrázek 8.8: Ukázka výpočtového programu - odporově uzemněná síť.