

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Moderní principy ochran zemních spojení
v kompenzovaných sítích**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KŘEMEN**
Osobní číslo: **E16B0026P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Moderní principy ochran zemních spojení v kompenzovaných sítích**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce se zabývá přehledem moderních principů vyhodnocení a ochran zemních spojení v kompenzovaných sítích.

1. Popište stručně princip kompenzovaných sítí s Petersenovou tlumivkou a problematiku vyhodnocení zemního spojení.
2. Popište metodu ochrany kompenzované sítě firmy ABB.
3. Popište metodu ochrany kompenzované sítě firmy Siemens.
4. Porovnejte řešení ochran kompenzovaných sítí firem ABB a Siemens.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks (firemní literatura ABB.)
2. IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines.
3. Single Phase to Ground Fault Detection and Location in Compensated Network (Matthieu Loos dizertační práce).


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jakub Talla, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na popis funkce směrových ochran používaných pro detekci a lokalizaci zemního spojení v kompenzovaných sítích. Jsou zde popsány základní vlastnosti kompenzované soustavy a její chování při zemním spojení. Jsou představeny principy základních metod pro určení postižené odbočky sítě se zemním spojením a jejich vlastnosti. U každé metody jsou uvedeny výsledky ochran při zemním spojení na chráněné odbočce a mimo ni, tyto výsledky jsou také ukázány v grafech. Dále je uvedena použitelnost metod při různých druzích zemního spojení a možnosti zlepšení jejich citlivosti. V programu PLECS byla provedena simulace kompenzované sítě se zemním spojením, v práci jsou předvedeny průběhy veličin využívaných ochranami.

Klíčová slova

Kompenzovaná síť, Petersenova tlumivka, ochrany při zemním spojení, odporník, zemní spojení, admitanční metoda, kompenzace, kapacitní proud, vyšší harmonické, kumulativní fázorové sčítání

Abstract

The bachelor thesis is focused on the function of directional protection used for detection and localization of ground fault in compensated networks. There are described the basic properties of compensated network and its behavior in earth fault. Principles of basic methods for determining the affected network branch with earth fault and their properties are introduced. For each method, the results of earth fault protection at and outside the protected feeder are shown, and these results are also shown in the graphs. Furthermore, the applicability of methods for various types of earth faults and the possibility of improving their sensitivity are presented. In the PLECS program, a compensated network with a ground fault was simulated, and the courses of quantities used by protection are presented.

Key words

Compensated network, Petersen coil, earth fault protection, resistor, earth fault, admittance method, compensation, capacitive current, higher harmonic, cumulative phasor summing

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Jan Křemen

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakubovi Tallovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také děkuji své rodině za podporu a trpělivost během doby mého studia.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	11
1 ZPŮSOBY PROVOZOVÁNÍ UZLŮ SÍTĚ	12
1.1 SOUSTAVA S ÚČINNĚ UZEMNĚNÝM UZLEM	12
1.2 SOUSTAVA S IZOLOVANÝM UZLEM	13
1.3 SOUSTAVA S NEÚČINNĚ UZEMNĚNÝM UZLEM.....	14
1.3.1 <i>Soustava neúčinně uzemněná přes uzlový odporník</i>	15
1.3.2 <i>Soustava neúčinně uzemněná přes Petersenovu tlumivku</i>	16
1.4 SIMULACE ZEMNÍHO SPOJENÍ V KOMPENZOVANÉ SÍTI S ODPORNÍKEM.....	24
<i>Vliv odporu zemního spojení na velikost U_0</i>	24
<i>Průběhy proudů jednotlivých vývodů a fázových napětí sítě</i>	26
2 OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍCH	28
2.1 ÚVOD	28
2.2 WATTMETRICKÁ METODA.....	29
2.3 ADMITANČNÍ METODA	31
2.4 ADMITANČNÍ METODA S VYUŽITÍM VYŠŠÍCH HARMONICKÝCH.....	35
2.4.1 <i>Praktické příklady admitanční metody</i>	37
2.5 KONDUKTANČNÍ METODA.....	39
3 MODERNÍ METODY OCHRANY KOMPENZOVANÉ SÍTĚ	40
3.1 KUMULATIVNÍ FÁZOROVÉ SČÍTÁNÍ	40
3.2 FÁZOROVÝ DIAGRAM CPS	42
<i>Fáze č. 1</i>	43
<i>Fáze č. 2</i>	43
<i>Fáze č. 3 a 4</i>	43
3.3 STABILIZOVANÁ ADMITANCE	44
3.4 VÝSLEDKY METOD PŘI RŮZNÝCH DRUZÍCH PORUCH.....	46
3.4.1 <i>Přerušované zemní spojení</i>	46
3.4.2 <i>Přerušované zemní spojení s tlumenými transienty</i>	48
3.4.3 <i>Dočasné zemní spojení</i>	50
ZÁVĚR	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	54
PŘÍLOHY	1

Úvod

Distribuční sítě vysokého napětí jsou provozovány jako izolované nebo nepřímo uzemněné, tedy uzemněné přes odporník nebo Petersenovu tlumivku. Pokud dojde v těchto soustavách ke spojení jedné fáze se zemí, tato porucha se nazývá zemní spojení. Při zemním spojení teče místem poruchy proud kapacitního charakteru způsobený vybíjením kapacit sítě. Sítím uzemněným přes tlumivku se také říká kompenzované, protože jejich nejzásadnější vlastností je kompenzace tohoto kapacitního proudu. Tlumivkou teče proud induktivního charakteru, který se v místě zemního spojení vektorově sčítá s kapacitním a tím dojde ke snížení poruchového proudu na jednotky procent původního kapacitního proudu. Vedení s kompenzovaným proudem není nutné okamžitě vypínat, lze ho po omezenou dobu provozovat i se zemním spojením a tento provoz využít k vyhledání poruchy. Vzhledem k nízké hodnotě poruchového proudu je v kompenzovaných sítích mnohem těžší zjistit přítomnost jednofázové poruchy, než u sítí přímo uzemněných. Pro detekci a lokalizaci zemního spojení se používají směrové ochrany. Ty podávají informaci o vzniku zemního spojení a následně vypočítají, na kterém vývodu sítě se nachází. Na každém vývodu sítě je umístěna jedna zemní ochrana, která vyhodnocuje, zda se zemní spojení nachází na jejím vývodu, nebo ne. Vylučovací metodou lze jednoznačně určit, na kterém vývodu k zemnímu spojení došlo.

Ochrany využívají různé metody, pro kompenzované sítě jsou nejčastěji založené na měření netočivých složek napětí a proudu. Netočivá složka napětí na tlumivce se využívá k detekci zemního spojení. V této bakalářské práci popisují základní používané metody, jejich funkčnost a spolehlivost, zejména při různých druzích zemních spojení. Například u vysoko-odporových nebo přerušovaných zemních spojení může u některých metod dojít k problému s jejich vyhodnocením. V třetí části práce je popsána metoda založená na fázorovém sčítání admitancí po určitou dobu. Tato metoda má nejlepší výsledky lokalizace zemního spojení pro všechny druhy zemních spojení.

Seznam symbolů a zkratk

I''_{k0}	Zkratový proud	(A)
U_n	Sdružené jmenovité napětí	(V)
Z_k	Zkratová impedance	(Ω)
I_C	Kapacitní proud	(A)
X_C	Kapacitní reaktance	(Ω)
C	Svodová kapacita vedení	(F)
C_k	Svodová kapacita vedení	(F/km)
U_f	Fázové napětí	(V)
l	délka vedení	(km)
K	Stupeň kompenzace	(-)
B	Susceptance	(S)
Y	Admitance	(S)
G	Konduktance	(S)
P_R	Činný jmenovitý výkon	(W)
S_R	Zdánlivý jmenovitý výkon	(VA)
U_0	Netočivá složka napětí	(V)
I_0	Netočivá složka proudu	(A)
Y_0	Netočivá složka admitance	(S)
Y_0^n	Netočivá složka admitance pro n-té harmonické	(S)
f_n	Základní frekvence 50 Hz	(Hz)
n	Řád harmonické	(-)
CPS	Cumulative Phasor Summing	

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Účinně uzemněná soustava	12
Obr. 1.2: Izolovaná soustava	13
Obr. 1.3: Neúčinně uzemněná soustava přes uzlový odporník	16
Obr. 1.4: Neúčinně uzemněná soustava přes Petersenovu tlumivku	16
Obr. 1.5: Neúčinně uzemněná soustava přes Petersenovu tlumivku při kovovém zemním spojení	17
Obr. 1.6: Schéma Petersenovy tlumivky	21
Obr. 1.7: Rezonanční křivka	23
Obr. 1.7: Časové průběhy při zemním spojení 10Ω	24
Obr. 1.8: Časové průběhy při zemním spojení 1000Ω	25
Obr. 1.9: Časové průběhy při zemním spojení 9000Ω	25
Obr. 1.10: Časové průběhy proudů první fáze vývodů sítě	26
Obr. 1.11: Časové průběhy netočivých složek proudů vývodů sítě	27
Obr. 1.12: Časové průběhy fázových napětí sítě	27
Obr. 2.1: Charakteristika wattmetrické metody	30
Obr. 2.2: Umístění admitancí zdravého a postiženého vývodu	33
Obr. 2.3: Příklady charakteristik admitanční metody	34
Obr. 2.4: Upravená admitanční charakteristika – čtvercová	34
Obr.2.5: Funkční charakteristiky pro a) princip admitance s využitím vyšších harmonických a b) princip admitance s využitím sumy vyšších harmonických i admitance základní harmonické	36
Obr. 2.6: Porovnání výsledků admitanční metody se základní a vyšší harmonickou	38
Obr. 2.7: Funkční charakteristika konduktanční metody	39
Obr. 3.1: Fázorové diagramy zobrazující výpočet součtové admitance	40
Obr. 3.2: Fázorový diagram CPS	42
Obr. 3.3: Odhad reálné složky stabilizovaného proudu při různých zemních spojeních	44
Obr. 3.4: Průběhy přerušovaného zemního spojení na zdravé a postižené odbočce	46
Obr. 3.5: Časové průběhy přerušovaného zemního spojení s tlumenými transienty na zdravé a postižené odbočce	48
Obr. 3.6: Časové průběhy 3 typů dočasných poruch na odbočce se zemním spojením	50

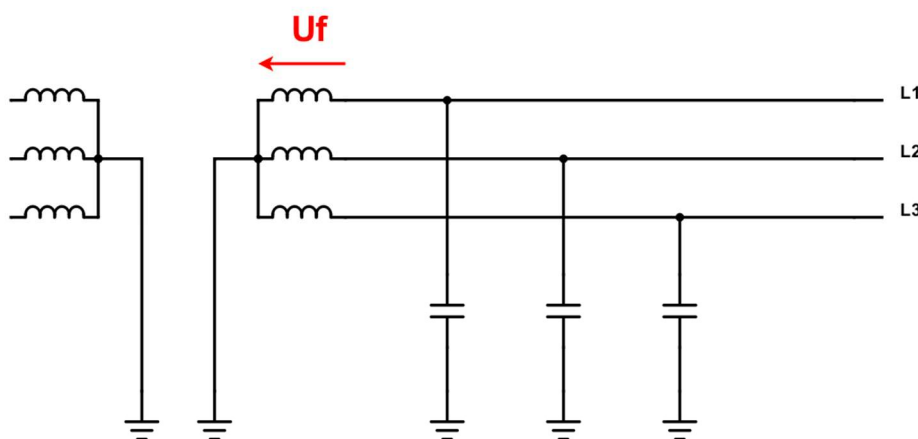
1 Způsoby provozování uzlů sítě

Volba způsobu propojení nulového bodu napájecího transformátoru se zemnicí soustavou nám určuje základní možnosti a vlastnosti provozu soustavy. Je ovlivněna bezpečnost, způsoby chránění osob i majetku, dimenzování. Při bezporuchovém stavu se způsob uzemnění na provoz sítě nijak neprojeví, rozdíl nastává při poruše.

1.1 Soustava s účinně uzemněným uzlem

Uzly transformátoru jsou spojeny se zemí přímo. V České republice se tento typ sítě používá pro rozvod nízkého napětí (400 V), velmi vysokého napětí (110 a 220 kV) a zvlášť vysokého napětí (400 kV). Poruchový stav, kdy dojde se spojení jedné fáze se zemí, nazýváme v této síti jednofázový zkrat. Jedná se o havarijní změnu v soustavě. Místem poruchy protékají zkratové proudy, které několikanásobně převyšují běžné hodnoty provozních proudů, musí tedy v síti okamžitě dojít k odpojení zkratovaných částí od zdroje. U vysokých hladin napětí se pro vypínání používají vypínače, u nízkého napětí jističe nebo pojistky. Zkratový proud je omezen velikostí impedance smyčky a velikostí napětí zdroje. Velikost zkratového proudu je také ovlivněn vzdáleností místa poruchy od rozvodny. S větší vzdáleností poruchy od zdroje roste také zkratová impedance, takže se zmenšuje zkratový proud. [2, 3, 8]

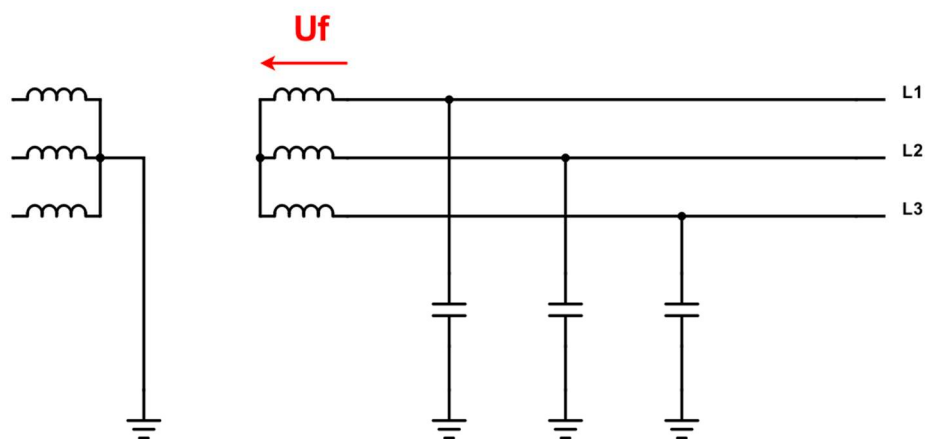
$$I''_{k0} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \tag{1.1}$$



Obr. 1.1: Účinně uzemněná soustava

1.2 Soustava s izolovaným uzlem

Nulový bod transformátoru není spojen se zemí, resp. je spojen přes nekonečně velkou impedanci. Spojení jedné fáze se zemí nazýváme v izolované soustavě zemním spojením. U nás se tato soustava používá nejčastěji pro sítě nízkého napětí u malých průmyslových sítí, kde je hodnota kapacitního proudu menší než 20 A. Tento celkový kapacitní proud je úměrný velikosti sítě, je dán fázorovým součtem kapacitních proudů všech nepostižených fází. Tyto proudy se uzavírají přes místo zemního spojení. Dojde-li k překročení hodnoty 20 A, musí se dle normy kapacitní proud kompenzovat, přičemž je doporučeno kompenzaci provádět už od hodnoty 10 A. Tato norma platí pro zemní spojení i v kompenzovaných sítích. Zhášení vysokého kapacitního proudu je obtížné a provázené rizikem opětovného zapalování. Přechodné děje tím způsobené vyvolávají v síti velká přepětí. Bezpečnostní riziko přináší také krokové napětí, které vzniká průchodem proudů zemí. Při jednofázové zemní poruše lze však síť s nízkou hodnotou kapacitního proudu dočasně provozovat. [1, 2, 3]



Obr. 1.2: Izolovaná soustava

1.3 Soustava s neúčinně uzemněným uzlem

Síť je uzemněna přes nenulovou impedanci. Tento způsob se v České republice používá u distribučních sítí vysokého napětí (10, 22 a 35 kV) a pro průmyslové, elektrárenské a důlní provozy s napěťovými hladinami většinou 6 kV nebo 10 kV. Tato soustava může být použita i u sítí s větší rozlohou a není tolik omezena velikostí kapacitního proudu, jako soustava izolovaná. Spojení jedné fáze se zemí se zde, stejně jako u izolovaných sítí, nazývá zemní spojení. [1]

Druhy zemního spojení dle velikosti odporu [4]:

- Kovové a obloukové – odpor poruchy se blíží k nule, v praxi jednotky Ω
- Odporové – odpor poruchy je v řádu jednotek až stovek Ω

Dále se dělí dle doby trvání na:

- Mžikové – do 0,5 s
- Krátkodobé – do 5 min
- Trvalé – od 5 min až do odstranění poruchy
- Přerušované – opakující se mžikové nebo krátkodobé zemní spojení, dochází k opakovanému zapalování a zhasínání oblouku, v kompenzovaných sítích se jedná o nejčastější zemní spojení

U venkovních vedení nastávají často krátkodobá zemní spojení, například při pádu větve na vedení. V kompenzovaných sítích je nejčastější přerušované zemní spojení. V okamžiku, kdy dojde k zemnímu spojení, vzniká tzv. transient, tedy přechodový děj. V důsledku spojení jedné fáze se zemí dochází k vybíjení kapacit sítě. [4]

Při zemním spojení je proud tekoucí přes kapacitu jedné fáze proti zemi:

$$\bar{I}_{C1} = \frac{\bar{U}_n}{-jX_C} = j\omega C \cdot \bar{U}_n = j\omega C \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_f = j\omega C_K \cdot \sum l \cdot U_f \quad [8] \quad (1.2)$$

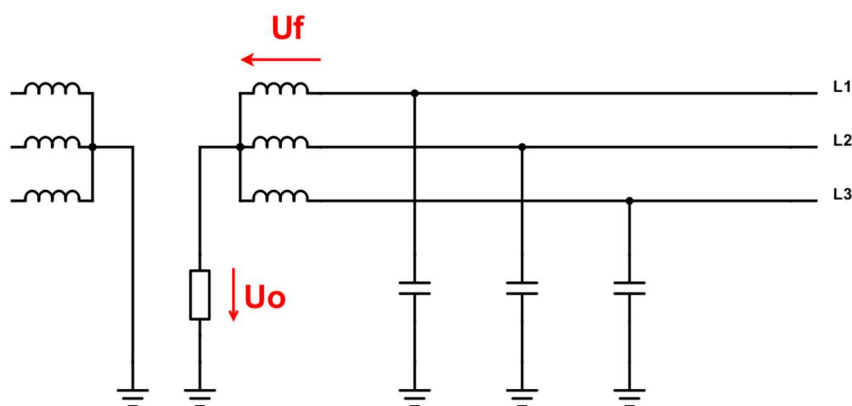
Celkový kapacitní proud:

$$\bar{I}_C = \sqrt{3} \cdot \bar{I}_{C1} = \sqrt{3} \cdot j\omega C \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_f = j\omega C_K \cdot \sum l \cdot 3 \cdot \bar{U}_f \quad [8] \quad (1.3)$$

Poruchový proud se uzavírá přes všechny svodové kapacity sítě, tedy i kapacity ostatních vývodů. Není tedy závislý na místě vzniku poruchy, ale závisí na rozloze celé sítě. Mezi nulovým bodem je při kovovém zemním spojení fázové napětí $U_0 = -U_f$. Mezi dvěma neporušenými fázemi a zemí je napětí sdružené.

1.3.1 Soustava neúčinně uzemněná přes uzlový odporník

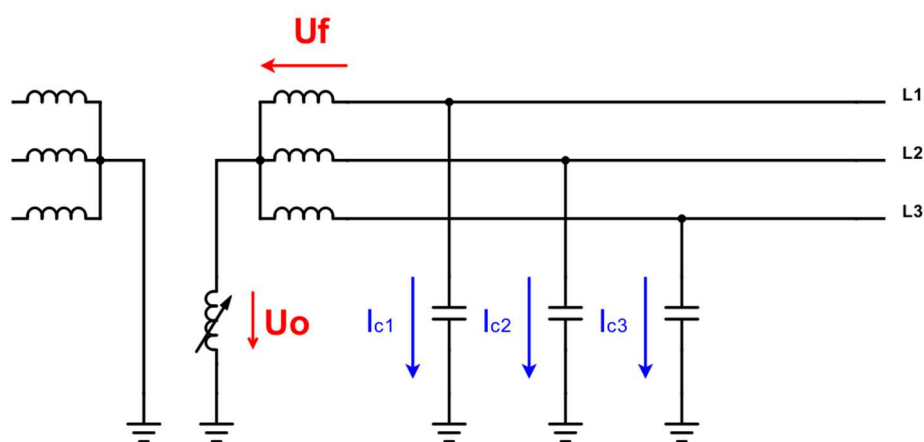
Uzemněné sítě přes odporník se nejčastěji používají u velkých kabelových vedení, které mají oproti venkovnímu vedení několikanásobnou kapacitou proti zemi. Ze vztahu pro celkový kapacitní proud při jednofázovém zemním spojení (1.3) vyplývá, že díky velké kapacitě tečou při poruše i velké kapacitní proudy. Kompenzace těchto proudů by byla možná pouze zhášecími tlumivkami s vysokým kompenzačním výkonem, použití uzlového odporníku je však prakticky i ekonomicky výhodnější. Uzemňuje se přes činný odporník s malou hodnotou odporu (řádově desítky Ω). Jedná se o velmi jednoduchý systém, založen pouze na snížení hodnoty protékajícího proudu odporem. Poruchový proud je tímto uzlovým odporem omezen přibližně na úroveň jmenovitého proudu vedení. Identifikace poruchy je provedena pomocí nadproudových ochran. Při poruše je nutno provést okamžité vypnutí, místem zemní poruchy protéká poruchový proud relativně vysoké hodnoty. Dle počtu stupňů selektivních ochran je vypnutí provedeno v čase od 0,4 s do 1,6 s. Delší trvání poruchy bez vypnutí může v okolí místa poruchy způsobit zvýšení dotykového napětí. Odporník omezuje také vznikající přepětí v síti. Hlavním parametrem odporníku je velikost jeho jmenovitého proudu. Pro správnou funkčnost odporníku by měla být splněna podmínka: $I_R > I_C$, poruchový proud by měl být z větší části tvořen proudem odporníku. Při návrhu sítě se tedy jmenovitý proud odporníkem volí vyšší, než celkový kapacitní proud sítě. Je nutné počítat s vhodnou rezervou, hodnota proudu je závislá na místě zemního spojení. Čím dál je odporník od místa poruchy, tím je proud tekoucí odporníkem menší, neboť parametry vedení se mění v závislosti na jeho délce. Musíme počítat s tím, že porucha může nastat i v nejvzdálenějším místě sítě od odporníku, hodnota jeho jmenovitého proudu přitom musí být dostatečná pro správnou funkci zemních ochran. [2, 3, 4, 5]



Obr. 1.3: Neúčinně uzemněná soustava přes uzlový odporník

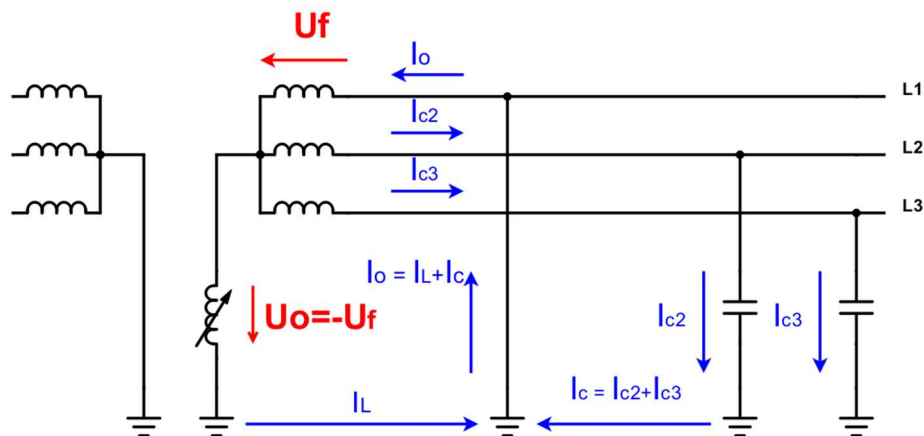
1.3.2 Soustava neúčinně uzemněná přes Petersenovu tlumivku

Kompenzované sítě mají nulový bod spojený se zemí přes laditelnou zhášecí tlumivku, dle svého vynálezce se nazývá Petersenova tlumivka. Většinou je použita pouze jedna laditelná tlumivka připojená v rozvodně, jedná se pak o tzv. centralizovanou kompenzaci. Výjimečně se provozuje více tlumivek spojených paralelně, například při propojení dvou oblastí sítě. Lze provozovat také tzv. distribuovanou kompenzaci sítě, kdy je na každé odbočce soustavy použita jedna pevně nastavená tlumivka, která provádí kompenzaci přímo na dané odbočce. [2, 6]



Obr. 1.4: Neúčinně uzemněná soustava přes Petersenovu tlumivku

Petersenova tlumivka slouží ke kompenzaci kapacitních proudů při zemním spojení v kompenzované síti. Při jednofázovém zemním spojení se v ní indukují proudy inductivního charakteru. Místem zemního spojení naopak teče proud kapacitního charakteru, který je opačně orientovaný, než proud cívky (fázově posunut o π). V místě zemního spojení se tyto proudy vektorově sčítají. Základním principem tlumivky je vytvoření kompenzačního proudu, který působí proti proudu poruchovému. Ideálně by tyto proudy měly být stejně velké a navzájem se zcela vyrušit neboli vykompenzovat. [2, 3, 4]



Obr. 1.5: Neúčinně uzemněná soustava přes Petersenovu tlumivku při kovovém zemním spojení

Ve skutečnosti není možné tlumivku ideálně naladit tak, aby proud úplně zanikl, protože každá tlumivka má parazitní odpor. Navíc by při ideálním vykompenzování proudu nebylo možné lokalizovat místo poruchy. Tlumivka se tedy ladí tak, aby kapacitní proud úplně nezankl, ale snížil se na minimum své původní hodnoty. Místem zemního spojení pak prochází zbytkový proud, který má hodnotu 3% - 10% kapacitního proudu. Má převážně činný charakter, ale obsahuje i zbytkový kapacitní nebo induktivní proud, dle stupně kompenzace sítě K . Často také obsahuje proudy vyšších harmonických, které tlumivka nedokáže kompenzovat [2].

Termín stupeň kompenzace K slouží k ukázání, jak velká část celkové kapacitní susceptance sítě $B_{sítě}$ je při poruše vykompenzována induktivní susceptancí tlumivky B_{TL} .

$$K = \frac{B_{TL}}{B_{sítě}} \quad (1.4)$$

$$B_{TL} = K \cdot B_{sítě} \quad (1.5)$$

Pokud je $K = 1$, induktivní susceptance cívky je rovna kapacitní susceptanci soustavy a síť je tedy plně kompenzovaná. Toto v praxi nikdy nemůže nastat, protože tlumivka je schopna (nedokonale) kompenzovat pouze kapacitní složky při základní frekvenci 50 Hz, nekompensuje však harmonické složky, které jsou přítomny v poruchovém proudu.

Pokud je $K < 1$, induktivní susceptance je menší, než kapacitní a síť je tedy tzv. podkompenzovaná. Tlumivkou teče menší induktivní proud, než je kapacitní proud sítě, výsledný zbytkový proud je tedy po vektorovém součtu kapacitní.

Pokud je $K > 1$, síť je tzv. překompenzovaná, induktivní susceptance je větší než kapacitní. Induktivní proud tlumivkou větší, než poruchový kapacitní proud, výsledný vektorový součet proudů je tedy induktivního charakteru.

V praxi se ve většině zemí provozuje soustava mírně překompenzovaná. Důvodem je to, že při odpojení částí soustavy může v podkompenzovaných sítích dojít k rezonancím. Ty způsobují přepětí, což může vést k poruše izolace. Také zesilují harmonické složky v síti, což způsobuje změny napětí a může vést až k přehřátí některých zařízení soustavy. Navzdory těmto důvodům jsou například ve Finsku soustavy provozovány jako mírně podkompenzované. [6]

Díky redukci poruchového proudu dochází, zejména u venkovních vedení, k samozhášení zemních spojení. Přibližně 70% poruch takto samovolně zaniká. Největší výhodou kompenzovaných sítí je, že pokud dojde k vodivému spojení jedné fáze se zemí, není nutné okamžitě síť vypínat, kompenzace umožňuje dočasně pokračovat v provozu sítě i během trvání této poruchy. Musí být splněny podmínky pro nebezpečné napětí stanovené legislativou a předpisy. Tuto dobu lze využít pro nalezení poruchy, doba odpojení je pak minimální a dochází ke snížení ztrát způsobených například přerušením výroby. Výrobní závody se mohou na odpojení připravit, například bezpečným způsobem odpojit napájené stroje a tím předejít jejich vypnutí během provozu. Doba provozu při zemním spojení by měla být co nejkratší (maximálně 2 hodiny), aby se nezatěžovala tlumivka. [1, 7]

Další výhody kompenzace kapacitních proudů:

- Minimalizace krokového a dotykového napětí
- Velikost napětí postižené fáze se po odstranění poruchy sama vrátí na původní hodnotu
- Menší přepětí při zhášení zemního spojení než u sítí izolovaných

Sítě v České republice jsou v současnosti většinou provozovány jako smíšené, tedy obsahují minimálně 10% venkovního vedení a 2% kabelového vedení. Kombinace venkovního a kabelového vedení zvyšuje hodnotu kapacitních proudů, v některých případech mohou tyto proudy dosáhnout hodnoty až 350 A, což způsobuje problémy s laděním tlumivky. Smíšenou síť lze tedy bezpečně provozovat jako kompenzovanou maximálně do 300 A. Pokud se jedná o venkovní síť, lze ji provozovat s kapacitním proudem až 100 A, v případě kabelových sítí do 450 A. [1]

1.3.2.1 Druhy kompenzace:

Kapitola byla čerpána ze zdroje [6].

Centrální kompenzace:

Cívka se nachází v rozvodně a je většinou vybavena automatickým laděním a paralelním rezistorem. Pro její admitanci platí:

$$Y_{TLCK} = G_{TLCK} - j \cdot B_{TLCK} \quad (1.10)$$

B_{TLCK} je induktivní susceptance tlumivky. G_{TLCK} je celková konduktance cívky a paralelního odporu. Je rovna součtu konduktancí reprezentujících paralelní odpor G_R a odporové ztráty cívky G_{TL} .

$$G_{TLCK} = G_R + G_{TL} \quad (1.11)$$

Konduktanci paralelního odporu G_R při jmenovitém napětí lze určit z jmenovitého výkonu P_R :

$$G_R = \frac{P_R[W]}{U_n^2[V]} \quad (1.12)$$

Známe-li proud paralelním odporem I_R při jmenovitém napětí, konduktanci lze určit také:

$$G_R = \frac{I_R[A]}{U_f[V]} \quad (1.13)$$

Konduktance reprezentující odporové ztráty tlumivky při jmenovitém napětí může být vypočítána:

$$G_{TL} = R_{KL} \cdot \frac{S_R[VA]}{U_f^2[V]} \quad (1.14)$$

Kde R_{KL} je v řádu několika procent, U_f je fázové napětí soustavy a S_R je jmenovitý výkon tlumivky.

Induktivní susceptance tlumivky B_{TL} závisí na její indukčnosti a je laděna tak, aby na základní frekvenci 50 Hz kompenzovala kapacitní susceptanci sítě. Tím omezuje poruchový proud téměř k nule a způsobuje samo-zhášení oblouku.

Nevýhodou centrální kompenzace je, že při použití na dlouhých kabelových vedeních může vznikat nebezpečně vysoký poruchový proud. Lze to vyřešit použitím distribuované kompenzace.

Distribuovaná kompenzace:

U distribuované kompenzace se používá jedna nebo více tlumivek s pevnou hodnotou indukčnosti. Připojují se přímo ke každé odbočce sítě. Principem metody tedy je, že induktivní susceptance tlumivek kompenzuje kapacitní susceptanci jednotlivých vývodů sítě. Pokud je vedení odpojeno, je s ním odpojena i tlumivka, takže se udržuje konstantní stupeň kompenzace sítě. Kompenzace je tedy prováděna lokálně na každém vývodu, což snižuje toky poruchových proudů sítí. To je výhodné zejména u dlouhých venkovských kabelových vedení, kde se vyskytují velké činné poruchové proudy.

Admittance kompenzačních tlumivek lze zapsat:

$$\begin{aligned}\bar{Y}_{TLDK} &= (G_{TLDK1} + G_{TLDK2} + \dots + G_{TLDKn}) - j \cdot (B_{TLDK1} + B_{TLDK2} + \dots + B_{TLDKn}) = \\ &= G_{TLDK} - j \cdot B_{TLDK}\end{aligned}\quad (1.15)$$

Kde G_{TLDKx} je konduktance distribuční tlumivky x , B_{TLDKx} je induktivní susceptance tlumivky x , G_{TLDK} je celková konduktance všech tlumivek umístěných na odbočce a B_{TLDK} je celková induktivní susceptance tlumivek na odbočce.

V praxi je konduktance tlumivek velmi malá a jejich admittance tedy lze zapsat:

$$\bar{Y}_{TLDKx} \approx -j \cdot B_{TLDKx} \quad (1.16)$$

Susceptanci tlumivky při jmenovitém napětí lze určit z jmenovitého výkonu S_R :

$$B_{TLDKx} = \frac{S_R[V\cdot A]}{U_f^2[V]} \quad (1.17)$$

Známe-li jmenovitý proud tlumivkou při jmenovitém napětí, susceptanci lze vypočítat také takto:

$$B_{TLDKx} = \frac{I_{RDKx}[A]}{U_f[V]} \quad (1.18)$$

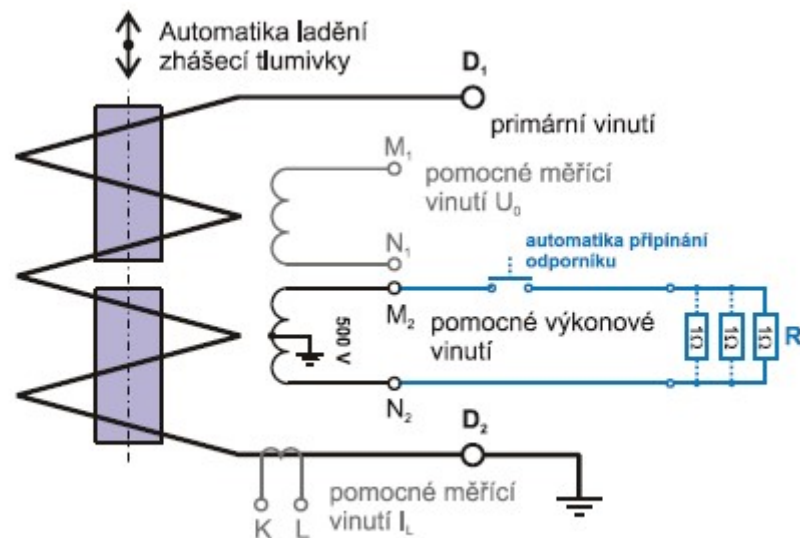
Jmenovitý proud protékající tlumivkami a jejich umístění by měl být pečlivě volen tak, aby se předešlo situaci, kdy dojde z důvodu změny konfigurace sítě k překompenzování odbočky. Poruchový proud by potom byl induktivního charakteru. Ochrany by nemusely takový proud brát v úvahu.

Distribuovaná kompenzace byla v menším měřítku používána ve Finsku. Je použitelná pro dlouhá venkovská vedení, kde investice do centrální kompenzace převažuje investici do tlumivek na jednotlivých odbočkách. U těchto vedení dochází v posledních letech k modernizaci, venkovní vedení je rušeno a místo něj se pokládá nové kabelové vedení. Probíhají tedy výzkumy o možném využití distribuované kompenzace v těchto rozvodech.

Hybridní kompenzace:

Hlavní kompenzace je zde prováděna pomocí centrální tlumivky v rozvodně, další tlumivky jsou však přidány ještě na některé odbočky vedení. Tímto způsobem lze dosáhnout optimální kompenzace sítě.

1.3.2.2 Petersenova tlumivka

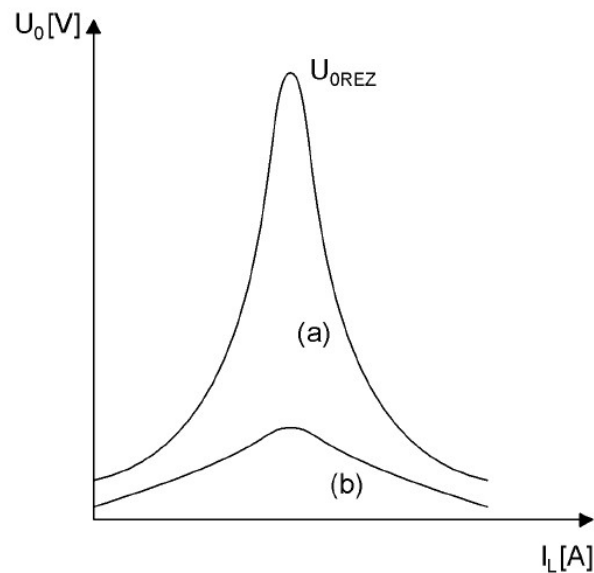


Obr. 1.6: Schéma Petersenovy tlumivky [1]

Na obr. 1.6 vidíme zjednodušené schéma Petersenovy tlumivky, která obsahuje:

- Primární vinutí D_1 , D_2 – automaticky nastavováno na požadovanou hodnotu indukčnosti do požadovaného stavu rezonance
- Pomocné měřicí vinutí M_1 , N_1 – slouží k měření netočivé složky uzlového napětí U_0
- Pomocné měřicí vinutí K , L – slouží k připojení měřícího transformátoru pro měření kompenzačního proudu
- Pomocné výkonové vinutí M_2 , N_2 – k tomuto vinutí se přes automatiku připojuje odpor, nebo soustava odporů. Hodnotu odporu soustavy volí provozovatel, většinou je volena hodnota 1Ω . Využívá se také pro připojení proudové injektáže. [1, 2]

Cívka je umístěna na feromagnetickém jádře s plynule nastavitelnou vzduchovou mezerou. Změnou indukčnosti cívky se tlumivka neustále přizpůsobuje parametrům sítě. Regulace se provádí pomocí rezonanční křivky zobrazené na obr. 1.7. Je to závislost napětí U_0 na kompenzačním proudu tlumivkou I_L . Rezonanční křivka se vyhodnocuje při bezporuchovém stavu, tlumivka se přeladuje a odečítají se hodnoty U_0 a I_L . Při naladění na maximální hodnotu $U_{0\text{REZ}}$ je minimální poruchový proud a maximální netočivá složka napětí U_0 . Jak jsem již popsal dříve, tento stav není pro provoz ideální, neboť by nebylo možné zemní spojení detekovat. Změny v soustavě, například připínání a odpínání vývodů, mění hodnoty kapacit proti zemi. To způsobuje posunutí rezonanční křivky, laděním tlumivky se tedy neustále snažíme dostat na požadovanou hodnotu v rezonanční křivce. [1, 2]



Obr. 1.7: Rezonanční křivka [2]

1.3.2.3 Soustava neúčinně uzemněná přes zhášecí tlumivku s dodatečným připínáním odporníku

Místem zemního spojení protéká při kompenzaci pouze zbytkový proud velmi malých hodnot, pro ochrany je velmi těžké takový proud změřit. Obtížně se tedy určuje, na kterém vývodu došlo k poruše. U většiny kompenzovaných sítí se tedy používá odporník, který se připojuje paralelně k Petersenově tlumivce. Připnutí odporníku navyšuje činnou složku poruchového proudu, kterou mohou ochrany využít k detekci poruchy. Některé ochrany možnost připínání odporníku vyžadují. Navýšení činné složky se při kovovém zemním spojení zásadně projeví pouze na postižené vývodu, na vývodech bez poruchového proudu nemá žádný efekt. Připínání odporníku je řízeno automatikou, její funkce spočívá v měření napětí a proudů transformátory, následném vyhodnocení těchto hodnot a rozhodnutí o připojení odporníku. [4]

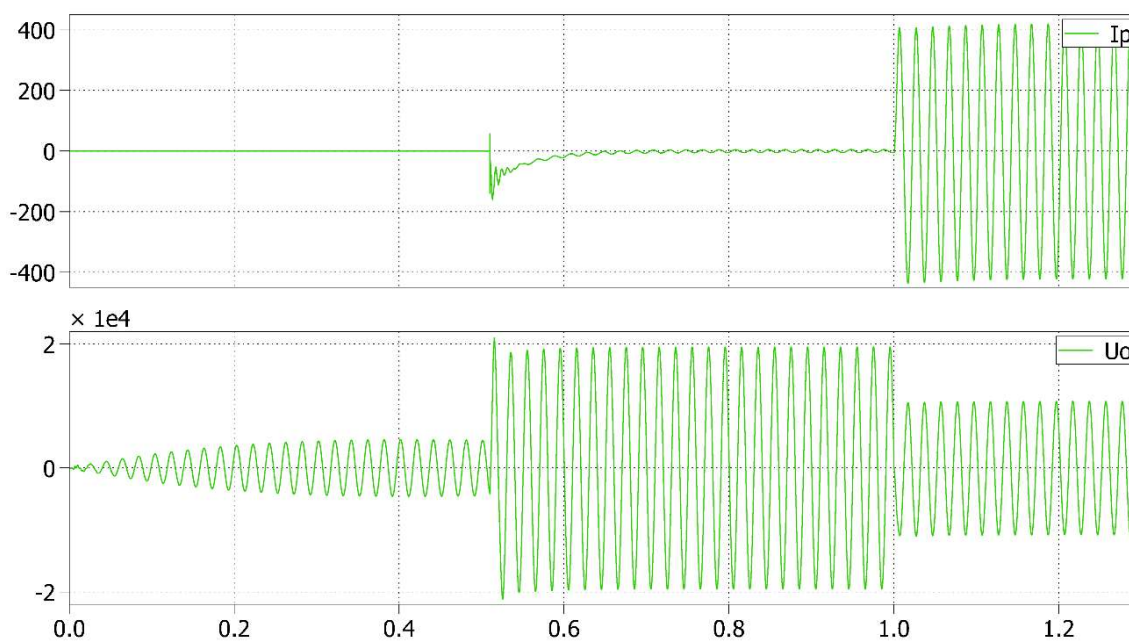
Paralelní odpor je připínán automaticky různými způsoby:

- Odpor je při normálním provozu neustále připojen. Při zemním spojení je na okamžik odpojen a opět připojen. Díky snížení proudu dojde k samovolnému zhasnutí oblouku.
- Odpor je během normálního provozu odpojen, při poruše je připojen do té doby, než zafungují ochrany. Může se využít také například pro vypínání trvalých poruch, kdy nedochází k samovolnému uhašení oblouku.
- Odpor je neustále připojen, jeho úkolem je omezovat napětí na tlumivce U_0 . Využívá se u venkovních sítí, kde není provedeno transponování vodičů, hodnoty U_0 jsou zde i bez zemního spojení velmi vysoké. Naopak v čistě kabelových sítích může být přirozená hodnota U_0 bez poruchy tak malá, že paralelně připojený odpor k tlumivce by její napětí snížil ještě víc a tím prakticky eliminoval její funkci kompenzace. [6]

1.4 Simulace zemního spojení v kompenzované síti s odporníkem

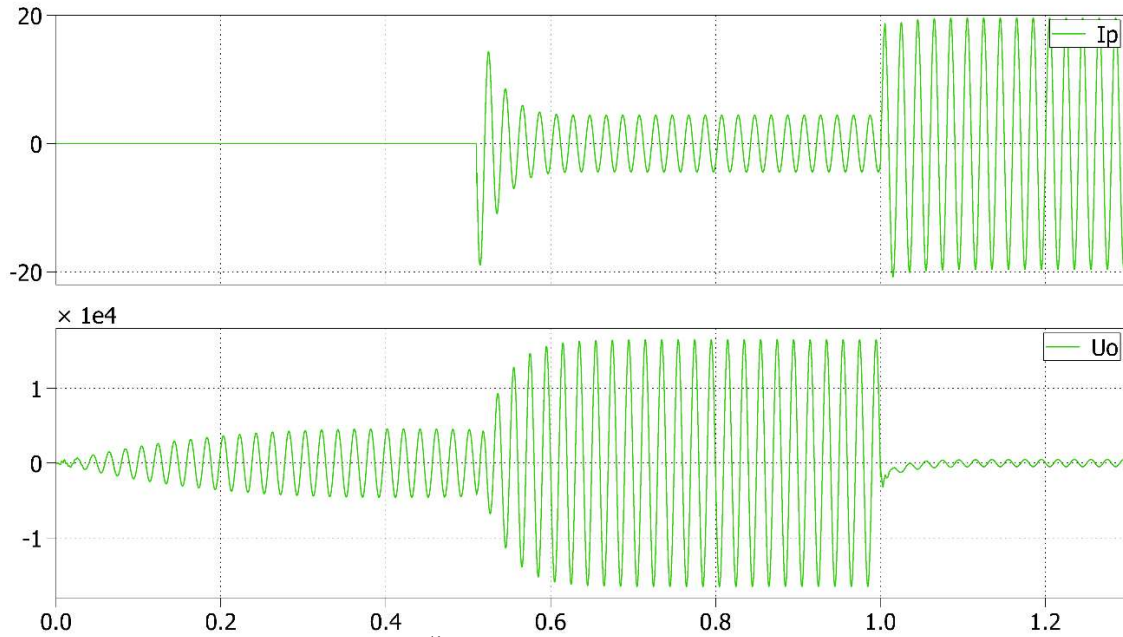
Vliv odporu zemního spojení na velikost U_0

Detekce zemního spojení ochranami je zpravidla prováděna měřením netočivé složky napětí na tlumivce U_0 . Základním kritériem je porovnání této hodnoty s fázovým napětím soustavy U_f . Pokud platí $U_0 \geq 30\% U_f$, ochrany tento stav vyhodnotí jako zemní spojení. Zde máme simulaci sítě s $U_{fm} = 18 \text{ kV}$. Z toho vyplývá, že pokud je hodnota napětí na tlumivce U_0 větší nebo rovna $5,4 \text{ kV}$, ochrany vyhodnotí zemní spojení. Pokud U_0 klesne pod $5,4 \text{ kV}$, systém už zemní spojení nedetekuje. Hodnota U_0 je závislá na odporu zemního spojení.



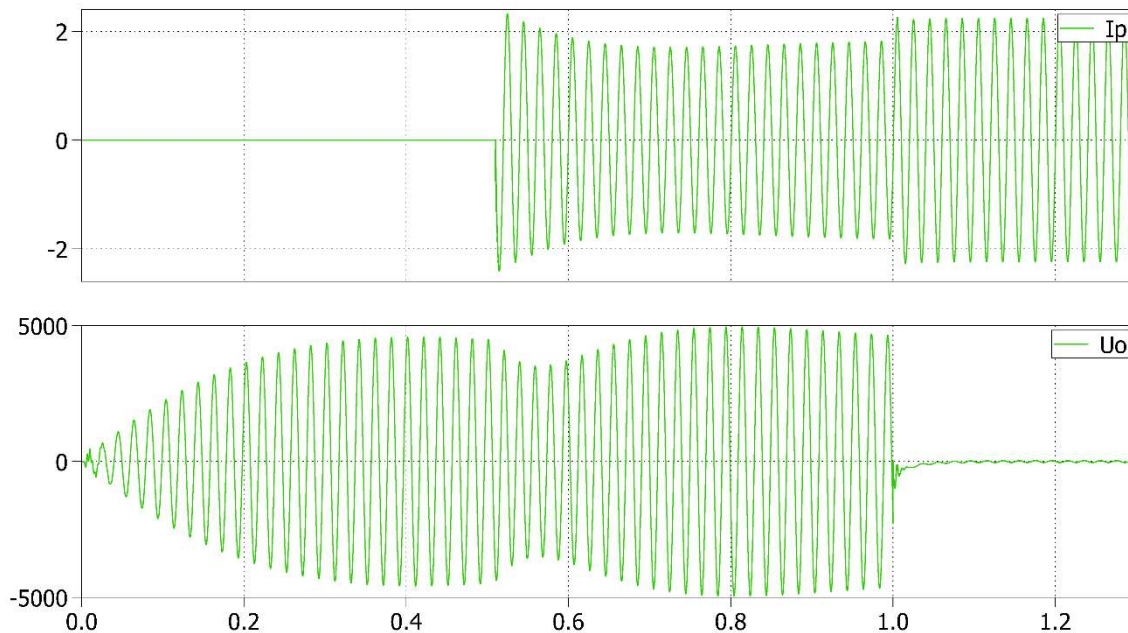
Obr. 1.7: Časové průběhy při zemním spojení 10Ω

Na obr. 1.7 vidíme průběhy poruchového proudu I_p a netočivé složky napětí U_0 při kovovém zemním spojení. V čase $t=0,5 \text{ s}$ dojde k zemnímu spojení a v čase $t=1 \text{ s}$ je připojen paralelní odporník. Můžeme vidět, že při zemním spojení dojde u poruchového proudu k přechodovému ději, jeho průběh se poté ustálí na hodnotě jednotek ampér. Napětí na tlumivce při zemním spojení vyskočí nad maximální hodnotu fázového napětí 18 kV , což je způsobeno rezonancí sítě. Při této hodnotě napětí zemní ochrany jednoznačně detekují zemní spojení. Po připojení odporníku se zvýší hodnota poruchového proudu na 400 A , napětí na tlumivce naopak poklesne přibližně na polovinu.



Obr. 1.8: Časové průběhy při zemním spojení 1000Ω

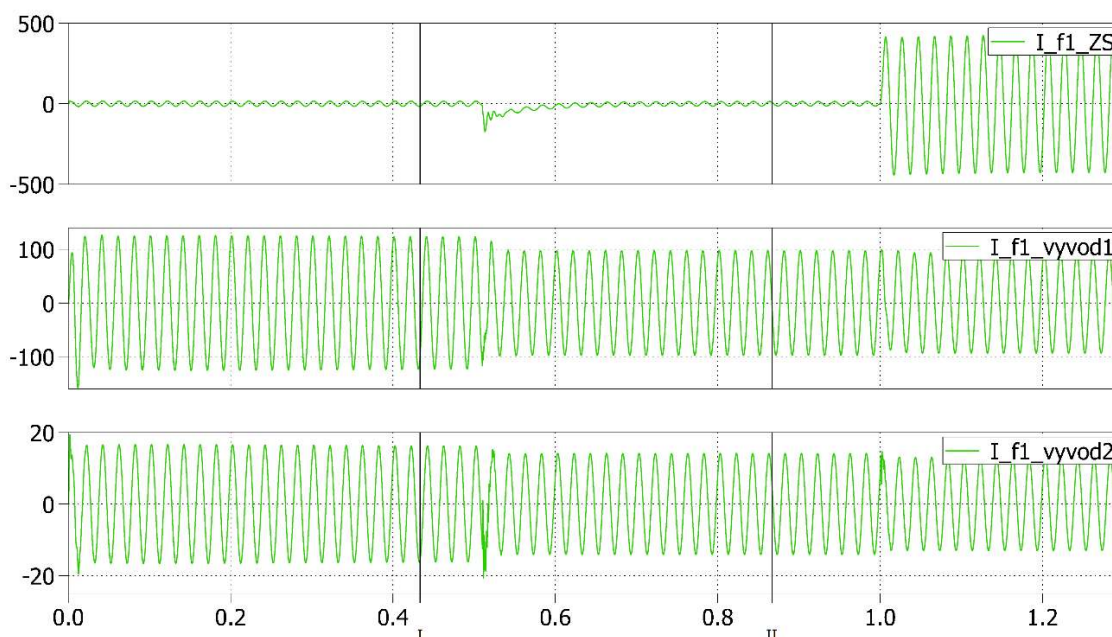
Zde vidíme stejné průběhy při odporovém zemním spojení o hodnotě 1000Ω . U poruchového proudu již nemá odporník takový vliv na růst proudu jako u kovového zemního spojení. Hodnota U_0 je při zemním spojení přibližně 16 kV, ochrany tedy vyhodnotí zemní spojení. Připojením odporníku se sníží hodnota U_0 na velmi malou hodnotu.



Obr. 1.9: Časové průběhy při zemním spojení 9000Ω

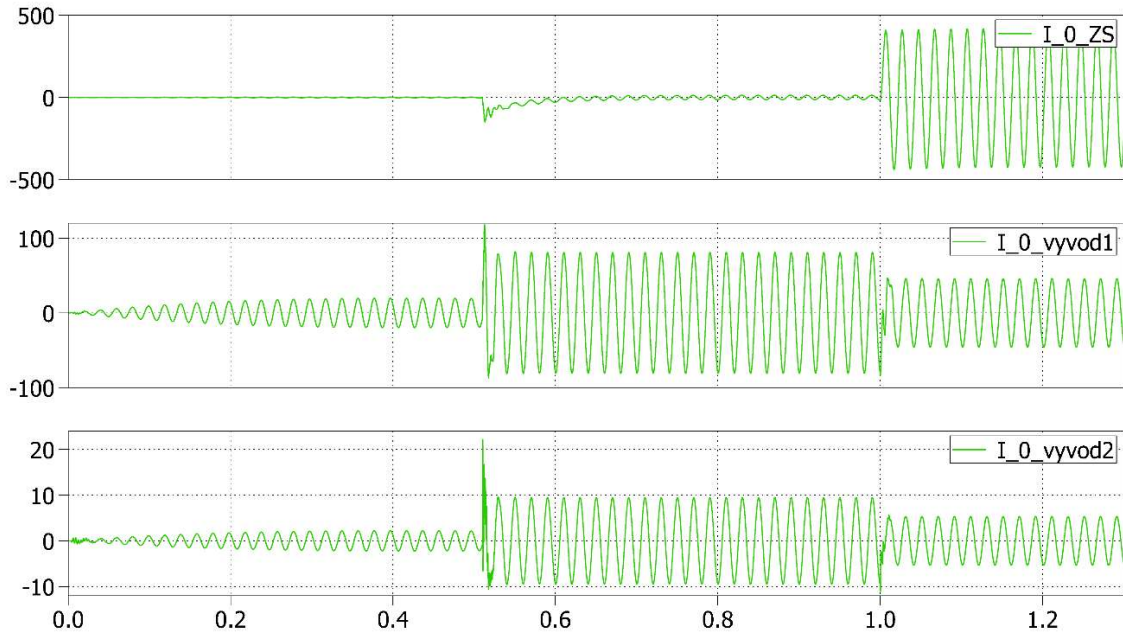
Tento obrázek ukazuje průběhy při vysoko-ohmickém zemním spojení 9000Ω . Při této hodnotě odporu je poruchový proud velmi malý, zde 1,7 A v ustálené hodnotě, a napětí na tlumivce U_0 vzroste pouze na 5 kV. Napětí nepřesáhlo popudovou hodnotu 5,4 kV, ochrany tedy vůbec nedetekují zemní spojení. Připojení odporníku má velmi malý vliv na velikost poruchového proudu, vzrostl pouze na 2,2 A.

Průběhy proudů jednotlivých vývodů a fázových napětí sítě



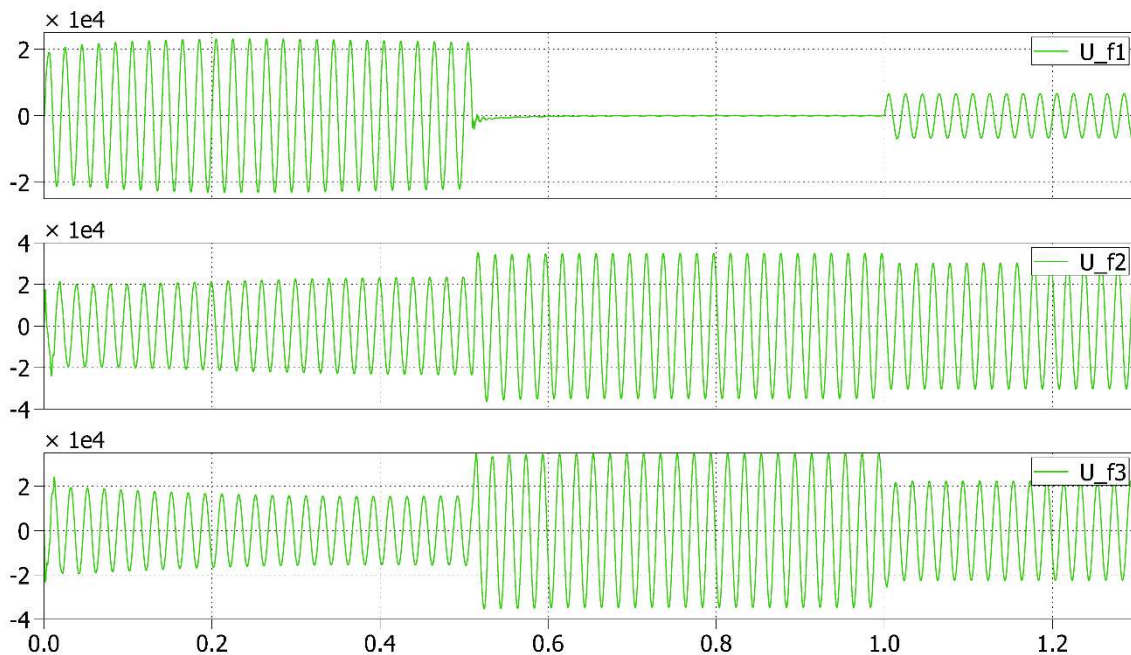
Obr. 1.10: Časové průběhy proudů první fáze vývodů sítě

Na obr. 1.10 vidíme časové průběhy proudů prvních fází jednotlivých vývodů simulované sítě. První průběh ukazuje proud vývodem, na kterém došlo v čase $t=0,5$ s k zemnímu spojení. Vidíme, že došlo k přechodovému ději (transientu). Po připojení odporníku v čase $t=1$ s vzrostl proud na obrovskou hodnotu oproti původnímu proudu vývodu, což nám jednoznačně potvrzuje výskyt zemního spojení. U ostatních vývodů došlo při zemním spojení k malému poklesu hodnoty proudu. Připojení odporníku nemá na ostatní vývody téměř žádný vliv.



Obr. 1.11: Časové průběhy netočivých složek proudů vývodů sítě

Obr. 1.11 ukazuje průběhy netočivých složek proudů při zemním spojení v čase $t=0,5$ s a po připojení odporu v čase $t=1$ s. První průběh je proud vývodu, na kterém k zemnímu spojení došlo, vidíme opět transient a velký nárůst proudu po připojení odporu. U nepostižených vývodů dochází také k přechodovým dějům z důvodu nabíjení a vybíjení kapacit sítě. Je patrné, že proud postiženého vývodu má vždy v době transientu opačnou polaritu proudu.



Obr. 1.12: Časové průběhy fázových napětí sítě

Na obr. 1.12 vidíme časové průběhy fázových napětí simulované sítě. Před zemním spojením mají všechna napětí fázovou hodnotu. Při zemním spojení je napětí první fáze, na které došlo k zemnímu spojení, nulové, protože je vodivě spojeno se zemí. Naopak druhá a třetí fáze mají nyní oproti zemi sdruženou hodnotu napětí.

2 Ochrany při zemních spojeních

2.1 Úvod

Společnost je čím dál více závislá na nepřetržité dodávce elektřiny, požadavky na kvalitu a spolehlivost dodávek neustále rostou. Z tohoto důvodu se v praxi stále více používají kompenzované sítě. Hlavním faktorem, umožňujícím lepší kvalitu napájení, je samo-zhášení obloukových poruch a možnost dočasného provozu při zemním spojení, jak bylo popsáno v 1.3.2. Kompenzace tedy přináší mnoho provozních výhod, ochrana sítě proti zemnímu spojení je však komplikovanější. Nejdůležitějším úkolem v praxi je zemní spojení detekovat, určit místo jeho vzniku a problém vyřešit. Samotné ochrany mají za úkol detekci zemního spojení a určení vývodu sítě, na kterém k němu došlo. Vzhledem k počtu různých druhů poruch a použitelnosti různých metod se jedná o složitý úkol. Pokud bychom poruchu neřešili, mohlo by dojít k jejímu zhoršení, například k narušení dalších fází.

Na základě zkušeností a hloubkové analýzy poruch bylo zjištěno, že zemní poruchy v kompenzovaných sítích jsou většinou přerušovaného charakteru. To znamená, že porucha sama zhasne, ale znovu se zapálí díky snížené dielektrické odolnosti poškozené izolace. Tyto poruchy jsou typicky nízko-ohmické, poruchové proudy jsou relativně velké a ochrany by je měly spolehlivě detekovat. Zvláště ve smíšených sítích s kabely a venkovním vedením se však můžeme setkat také s poruchami vysoko-ohmickými, kde proudy dosahují jen velmi malých hodnot. Ochrany musí být tedy dostatečně citlivé, aby i na tyto proudy dokázaly reagovat. Pro efektivní splnění všech požadavků na citlivost, spolehlivost a bezpečnost je vhodné použít více ochranných funkcí najednou. [7]

Detekce zemního spojení je prováděna měřením netočivé složky napětí na tlumivce U_0 , jak bylo popsáno v 1.4. Hodnota U_0 je v podstatě stejná v celé síti, lze jí tedy využít pouze pro detekci zemního spojení. Nelze však její pomocí určit postižený vývod.

Pro určení postiženého vývodu je na začátku každého vývodu v rozvodně umístěna zemní ochrana. Každá z těchto ochran dokáže vyhodnotit, zda se zemní spojení nachází na daném vývodu, nebo mimo něj. Tímto způsobem lze jednoznačně určit postižený vývod. Ochrany měří netočivé složky napětí U_0 a proudu I_0 , pro jejich správnou funkci je nutné měřit s velkou přesností v amplitudě i ve fázi. Naměřené hodnoty jsou zpracovány dle použité metody. Napětí se měří pomocí měřících transformátorů, standartně se používají transformátory se sekundárním napětím 100 V.

Pro měření proudu se nejčastěji používají součtové transformátory, které jsou umístěny na každém vývodu sítě. Měří protékající proudy všemi fázemi a jejich fázorovým součtem získají netočivý proud I_0 . Je důležité poznamenat, že I_0 naměříme vždy i bez zemního spojení, protože síť má vždy určitou nesymetrii.

Metody detekce vývodu lze rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní metody injektují do sítě generované signály specifické frekvence, které se uzavírají přes místo zemního spojení. Vyhodnocením odezvy tohoto signálu se určuje, zda se jedná o postižený vývod nebo ne. Nevýhodou těchto metod je, že jsou velmi závislé na odporu zemního spojení a na kapacitě vedení. Pokud je zemní spojení vysoko-ohmické, nebo je vysoká kapacita vedení, přesnost metod velmi klesá. Další nevýhodou aktivních metod je, že potřebují externí zařízení pro injektování signálů a výpočet výsledků je složitý.

Pasivní metody využívají pouze napěťové a proudové poměry v síti a signály generované samotným zemním spojením. Nepotřebují žádné uměle generované signály. Dělí se dále na:

- Statické – využívají naměřené nebo vypočítané hodnoty po odeznění přechodového děje po zemním spojení.
- Dynamické – využívají přechodové jevy vznikající okamžitě po vzniku zemního spojení. Mají větší citlivost než statické, jejich nevýhodou je však to, že pokud nerozeznají zemní spojení okamžitě správně, po skončení přechodových jevů už nemají šanci poruchu rozpoznat. [2, 4, 5]

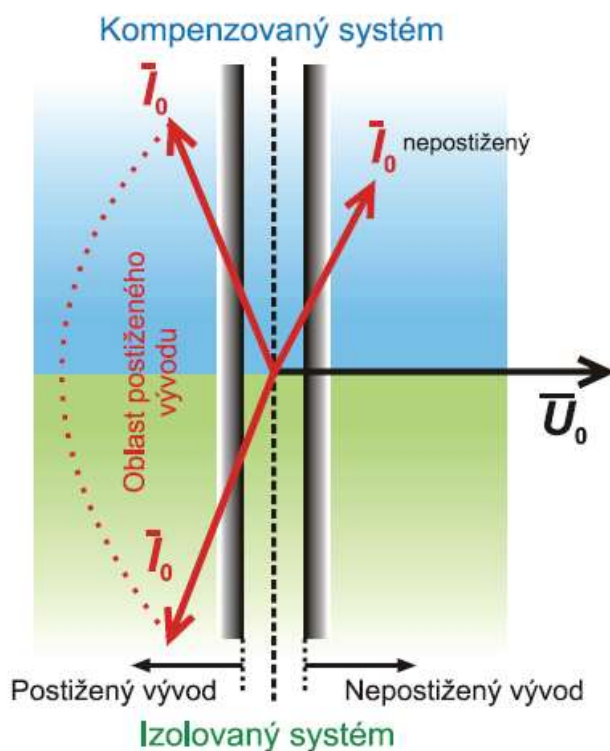
2.2 Wattmetrická metoda

Jedná se o jednu ze základních metod používaných pro lokalizaci zemního spojení v kompenzovaných sítích. Využívá toho, že poruchový proud nikdy není zcela vykompenzován, ale zemním spojením teče zbytkový proud převážně činného charakteru.

Při této metodě se provádí měření činné složky netočivého proudu na každé odbočce, případně činného výkonu netočivé složky. Na odbočce se zemním spojením je činná složka proudu, resp. činná složka výkonu vyšší a má opačný směr, než u ostatních vývodů sítě.

Na správnost vyhodnocení poruchy má u této metody zásadní vliv velikost poruchového proudu a správnost měření měřících transformátorů proudu, které činnou složku netočivého proudu měří. Velmi malý poruchový proud může způsobit chybné vyhodnocení přítomnosti zemního spojení na vývodu, i pokud jsou měřící transformátory použity správně. Proto se u této metody využívá připínání paralelního odporníku k Petersenově tlumivce, která činnou složku poruchového proudu krátkodobě zvýší. Metoda není vhodná pro detekci vysoko-ohmických poruch, kdy připnutí odporníku nezpůsobuje navýšení činného proudu, ale naopak snížení napětí U_0 na tlumivce. Hodnota U_0 pak může klesnout až pod hranici, kdy systém přestane detekovat zemní spojení.

Charakteristika ukazující funkčnost wattmetrické metody je zobrazena na obr. 2.1. Platí pro kompenzovanou i izolovanou síť, izolovaná síť však využívá 3. a 4. kvadrant, zatímco výsledné fázory kompenzované sítě jsou v 1. a 2. kvadrantu. U kompenzované sítě je při zemním spojení na daném vývodu fázor netočivé složky proudu v 2. kvadrantu. U nepostiženého vývodu se nachází v 1. kvadrantu. Možné chyby měření transformátoru reprezentuje oblast nepůsobení, která se nachází uprostřed charakteristiky. [1, 2, 4]



Obr. 2.1: Charakteristika wattmetrické metody [1]

2.3 Admitanční metoda

Tato kapitola 2.3 byla čerpána ze zdrojů [1, 4, 6].

Admitanční metoda detekce zemního spojení byla vyvinuta v Polsku na počátku 80. let. Dříve byly ochrany založeny na měření zbytkového proudu nebo zbytkového výkonu (Wattmetrická metoda). Admitanční metoda měří netočivé složky napětí U_0 a proudu I_0 . Oproti těmto starším principům má nesporné výhody, dnes se jedná o standartní princip ochrany proti zemnímu spojení.

Základní vztahy pro admitanci:

$$\bar{Y} = G + j \cdot B \quad (2.1)$$

Veličina G se nazývá konduktance, je to reálná složka vodivosti. Imaginární složkou je susceptance B . Admitance je převrácenou hodnotou impedance, proto má znaménka imaginární složky obráceně. Kapacitní susceptance má znaménko kladné, induktivní susceptance je záporná. Vodivost vodiče je tedy z důvodu jeho kapacity proti zemi zapsaná takto:

$$\bar{Y} = G + j \cdot B \quad (2.2)$$

Naopak pro admitanci kompenzační tlumivky platí:

$$\bar{Y} = G - j \cdot B \quad (2.3)$$

Admitance jedné fáze je rovna:

$$\bar{Y}_0 = G_0 + j \cdot B_0 = G_0 + j \cdot (\omega \cdot C_0) \quad (2.4)$$

C_0 je kapacita jedné fáze proti zemi. Konduktance G_0 reprezentuje svodový proud přes dielektrické materiály (izolátory, vzduch). Jelikož se používají kvalitní izolátory, v praxi dosahuje velmi malých hodnot, většinou je 10 – 100 násobně menší, než susceptance.

Základním principem admitanční metody je výpočet netočivé složky admitance z naměřených hodnot napětí \bar{U}_0 a proudu \bar{I}_0 při základní frekvenci 50 Hz:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0} = -(G + j \cdot B) \quad (2.5)$$

Alternativně lze pro výpočet admitance využít změny zbytkových veličin v důsledku poruchy:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_{0_fault} - \bar{I}_{0_prefault}}{-(\bar{U}_{0_fault} - \bar{U}_{0_prefault})} \quad (2.6)$$

Index „fault“ označuje hodnotu během poruchy, „prefault“ označuje hodnoty v čase před poruchou. Jedná se o tzv. přírůstkovou metodu. Výhodou této metody výpočtu je to, že za určitých podmínek teoreticky eliminuje efekt síťové asymetrie. Má tedy vyšší přesnost.

Admitanční ochrany používají, stejně jako jiné druhy ochrany, hodnotu netočivé složky napětí na tlumivce U_0 jako hlavní kritérium detekce zemního spojení. Pokud hodnota napětí U_0 překročí nastavenou mez, je vyhodnocena přítomnost zemního spojení. Mez musí být nastavena tak, aby v bezporuchovém stavu nemohlo dojít k jejímu překročení.

Výsledky vzorce (2.5) platí v symetrické síti, u nesymetrických sítí je doporučeno použít vzorec (2.6).

V případě zemního spojení mimo chráněnou fázi měří admitanční metoda celkovou admitanci chráněného vývodu. Výsledná admitance má záporné znaménko. Pokud jsou použity kompenzační tlumivky dle distribuované kompenzace, jejich admitance je zahrnuta do součtu. V praxi se může stát, že konduktance vedení je tak malá, že není možné jí přesně změřit. V důsledku nepřesnosti měření U_0 a I_0 by se tak mohlo stát, že by malá hodnota konduktance byla špatně vyhodnocena jako kladná. Cívky na každém vývodu sítě mohou způsobit lehké překompenzování vývodu, což může mít za následek naměření kladné hodnoty susceptance. V případě centrální kompenzace je výsledkem pouze admitance chráněné fáze se záporným znaménkem. Zde je také možno naměřit kladnou hodnotu konduktance z důvodu nepřesnosti měření malých hodnot.

Konduktance a susceptance jsou vždy záporné:

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{v'v}) = -(|G_{v'v}| + j \cdot |B_{v'v}|) \quad (2.7)$$

Při zemním spojení na chráněné fázi měříme celkovou admitanci okolní sítě \bar{Y}_{cN} (nepostížených vývodů) včetně admitancí kompenzačních tlumivek mimo chráněnou fázi, v rozvodnách nebo na odbočkách \bar{Y}_{TL} . V důsledku ztrát na síti je konduktance vždy kladná. Znaménko susceptance je závislé na stupni kompenzace systému K a při použití distribuovaných tlumivek i na jejich susceptancích.

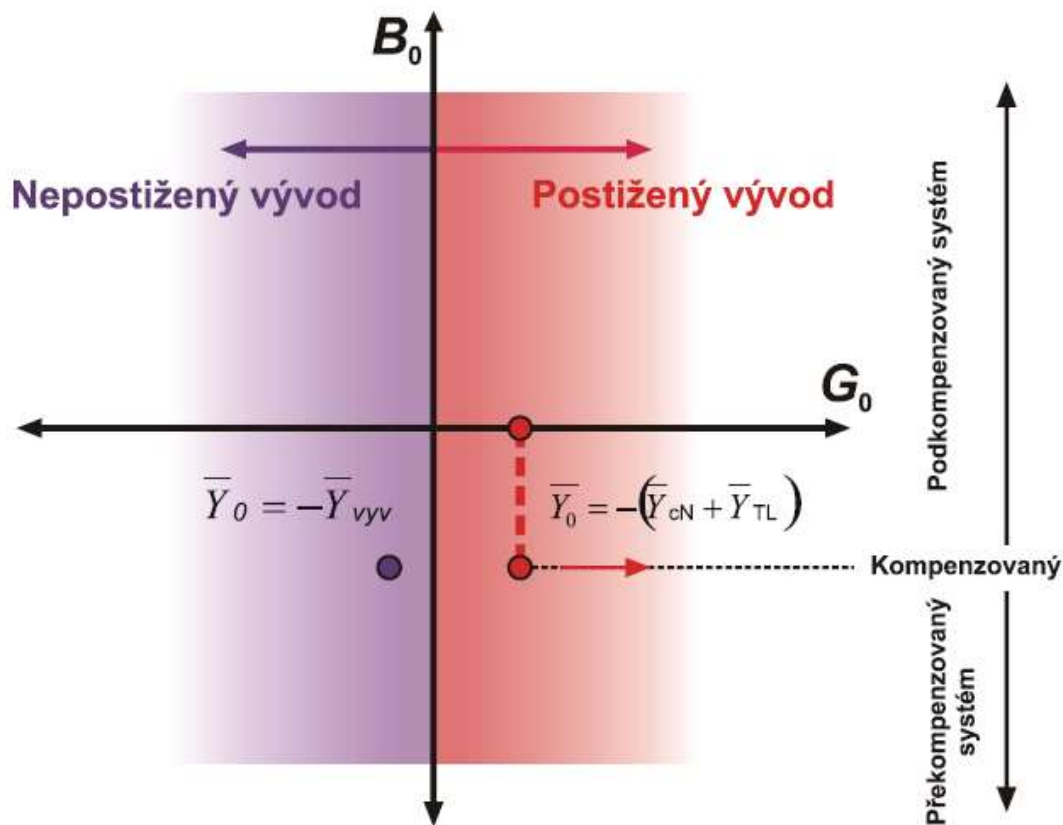
$$\bar{Y}_0 = \bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL} = |G_{cN} + G_{TL}| + j \cdot |B_{cN} - B_{TL}| \quad (2.8)$$

Za předpokladu, že platí: $B_{TL} = K \cdot B_{s\dot{t}\ddot{t}}$ (2.9)

$$B_{cN} = B_{s\dot{t}\ddot{t}} - B_{v'v} \quad (2.10)$$

Můžeme rovnici upravit:

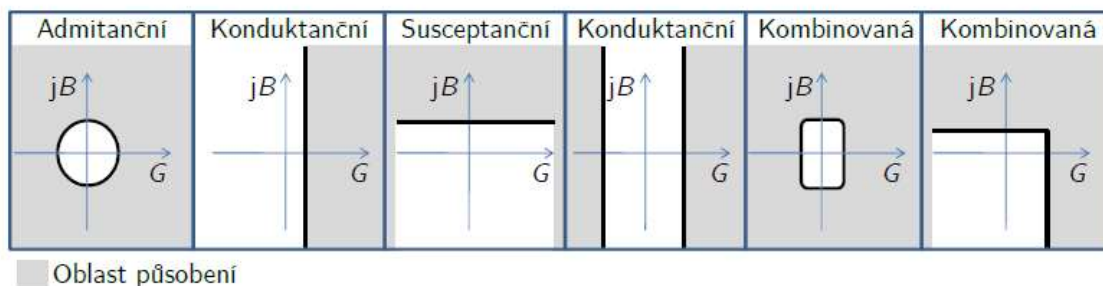
$$\bar{Y}_0 = |G_{cN} + G_{TL}| + j \cdot |B_{s\dot{t}\ddot{t}} \cdot (1 - K) - B_{v'v}| \quad (2.11)$$



Obr. 2.2: Umístění admitancí zdravého a postiženého vývodu [1]

V rovnicích nehraje žádnou roli hodnota odporu zemního spojení, admitanční metoda je tedy teoreticky na odporu zemního spojení nezávislá. Vyžaduje tedy jen jednoduché principy pro nastavení a vyhodnocení zemního spojení. Při využití automatiky připínání paralelního odporníku dokáže detekovat zemní spojení o odporu až 7,5 kΩ. Admitanční metoda připínání odporníku striktně nevyžaduje, je schopna detekce zemních spojení i bez něj. Bez připojení odporníku dokáže detekovat zemní spojení dokonce rychleji. Naopak připnutí odporníku může způsobit pokles netočivého napětí U_0 pod hranici, kdy je rozpoznáno zemní spojení a ochrana tedy přestane fungovat.

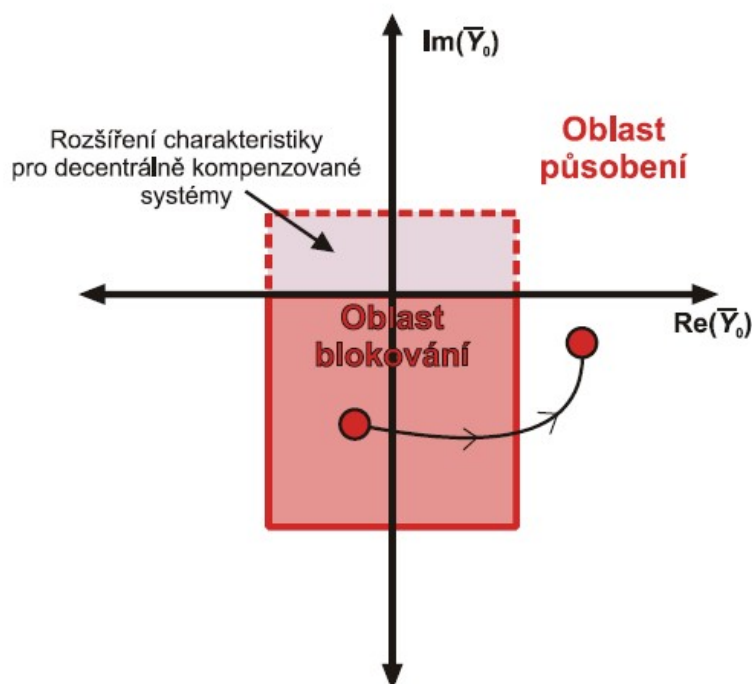
Funkčnost admitanční ochrany vychází z rozlišování mezi výsledky rovnic (2.7) a (2.8). Ochrana pracuje, když je měřena admitance (2.8) a naopak nepracuje, když je měřena admitance dle rovnice (2.7). Takového provozního stavu je dosaženo pomocí admitanční charakteristiky, která může být kruhová, nebo složená z jedné nebo více hraničních linií.



Obr. 2.3: Příklady charakteristik admitanční metody [4]

Ochrana začne pracovat, pokud se výsledná admitance nachází mimo hranice, na obrázku v šedivé oblasti. První charakteristika pracuje s obecnou admitancí a je vhodná pro síť nepřímou uzemněnou přes odporník. Konduktanční a susceptanční charakteristiky pracují s konkrétními složkami admitance. Kombinované charakteristiky se používají u sítí kompenzovaných.

Tyto klasické admitanční charakteristiky neposkytují optimální citlivost a nemají univerzální použití. Pro zlepšení byla představena nová admitanční charakteristika, založená na výsledcích stejných rovnic (2.7) a (2.8). Charakteristika má tvar čtverce a vychází od nuly, aby s dostatečnou rezervou pokryla naměřenou admitanci při zemním spojení mimo chráněnou fázi dle rovnice (2.7). Ochrana začne pracovat, pokud se vypočtená admitance přesune mimo charakteristiku (mimo čtverec).



Obr. 2.4: Upravená admitanční charakteristika – čtvercová [1]

Čtvercová admitanční charakteristika funguje správně i při odpojené kompenzační tlumivce, nebo pokud se síť stane neuzemněnou. Rozlišení, zda je porucha na dané odbočce nebo mimo ní, je v těchto případech jednoduché, protože susceptance mají jasně daná znaménka.

2.4 Admitanční metoda s využitím vyšších harmonických

Tato kapitola 2.4 byla čerpána ze zdrojů [1, 6].

Citlivost admitanční metody lze zvýšit využitím vyšších harmonických. Petersenova tlumivka kompenzuje kapacitní proud pouze základní frekvence, tedy 50 Hz. Složky vyšších frekvencí, které jsou přítomné v poruchovém proudu však kompenzovány nejsou. My můžeme tyto složky využít pro zvýšení citlivosti admitanční metody.

Pro harmonické složky n -tého řádu s frekvencí $f = n \cdot f_n$, kde f_n je základní frekvence 50 Hz, platí tento předpis pro admitanci s kapacitní susceptancí:

$$\bar{Y}_0^n = G_0 + j \cdot B_{0_50Hz} \cdot n \quad (2.12)$$

Naopak admitanci s induktivní susceptancí pro harmonické n -tého řádu lze zapsat:

$$\bar{Y}_0^n = G_0 - j \cdot \frac{B_{0_50Hz}}{n} \quad (2.13)$$

Z toho plyne, že kapacitní susceptance vedení s řádem harmonické n -násobně roste, naopak induktivní susceptance tlumivky s řádem harmonické n -násobně klesá. V praxi je nejvíce zastoupenou harmonickou složkou ve zbytkovém napětí a proudu během zemního spojení 5. harmonická, pro kterou platí $n = 5$. Výrazně zastoupené jsou také 3. a 7. harmonická.

Rovnice (2.7) a (2.8) lze tedy pro vyšší harmonické přepsat:

Pokud je zemní spojení mimo danou fázi:

$$\bar{Y}_0^n = -\left([G_{v'v}] + j \cdot [B_{v'v_50Hz} \cdot n]\right) \quad (2.14)$$

Pokud je zemní spojení na dané fázi:

$$\bar{Y}_0^n = \left([G_{cN} + G_{TL}] + j \cdot \left[B_{cN_50Hz} \cdot n - \frac{B_{TL_50Hz}}{n}\right]\right) \quad (2.15)$$

Naměřená admitance pro 5. harmonickou je vždy dominantně kapacitní nehledě na skutečnou míru kompenzace systému. To znamená, že pro 5. harmonickou by elektronický systém viděl síť jako silně podkompenzovanou, i kdyby byla ve skutečnosti překompenzovaná.

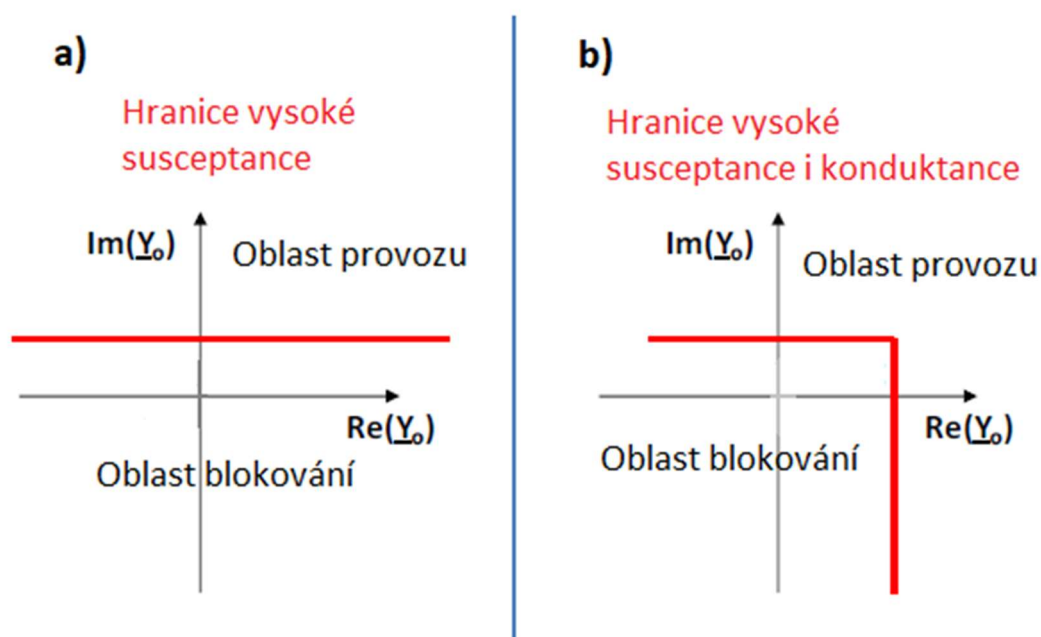
Velkou předností admitanční metody s využitím harmonických je, že výsledné admitance pro harmonické n -tého řádu lze vypočítat pomocí rovnic (2.14) a (2.15) z hodnot sítě při základní frekvenci. Není potřeba znát přesné hodnoty amplitudy harmonických přítomných v síti. Je však nutné, aby systém dokázal měřit hodnoty I_0 a U_0 pro n -tou harmonickou.

Princip admitance s využitím vyšších harmonických může být použit nezávisle na admitanci při základní frekvenci. Další možností je využít obě admitance dle rovnice:

$$\bar{Y}_0 = \bar{Y}_0^1 + \sum \bar{Y}_0^n \quad (2.16)$$

\bar{Y}_0^1 je admitance při základní frekvenci, $\sum \bar{Y}_0^n$ je suma harmonických admitancí vycházející z harmonické n -tého řádu, jejíž hodnoty amplitudy I_0 a U_0 lze změřit.

Admitance při vyšších harmonických zlepšuje citlivost ochran za přítomnosti vyšších harmonických v síti, admitance základní harmonické naopak zajišťuje skvělou citlivost a funkčnost v případě, že vyšší harmonické přítomny nejsou.



Obr.2.5: Funkční charakteristiky pro a) princip admitance s využitím vyšších harmonických a b) princip admitance s využitím sumy vyšších harmonických i admitance základní harmonické (přeloženo z [6])

Použití sumy admitancí s vyššími harmonickými vyžaduje, aby charakteristika měla hranici pro susceptanci i konduktanci, jak je naznačeno v obr. 2.5.

2.4.1 Praktické příklady admitanční metody

Tato kapitola 2.4.1 byla čerpána ze zdroje [6].

Zde bude uveden praktický výpočet zemního spojení admitanční metodou s využitím základní harmonické a s vyššími harmonickými. Výsledky budou ukázány v grafech.

Je uvažována distribuční soustava s jmenovitým napětím $U_n = 20$ kV. Paralelní odporník je při bezporuchovém stavu odpojen, připojen je až při zemním spojení.

Hodnoty uvažované soustavy:

Maximální poruchový proud chráněné fáze: 10 A

Poruchový proud produkovaný zbytkem soustavy: 90 A

Jmenovitý proud paralelního odporníku: 5 A

Ztráty soustavy: 2%

Stupeň kompenzace: 1.05 (mírně překompenzovaná)

Harmonické složky přítomné v U_0 a I_0 : 5. harmonická (250 Hz)

Přepočet hodnot na admittance:

$$\bar{Y}_{v\underline{v}_{50\text{Hz}}} = 2\% \cdot \frac{10 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} + j \cdot \frac{10 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} = 0,02 + j \cdot 0,87 \text{ mS}$$

$$\bar{Y}_{cN_{50\text{Hz}}} = 2\% \cdot \frac{90 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} + j \cdot \frac{90 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} = 0,16 + j \cdot 7,8 \text{ mS}$$

$$\bar{Y}_{TL_{50\text{Hz}}} = \frac{5 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} - j \cdot \frac{1,05 \cdot 100 \text{ A}}{\frac{20 \text{ kV}}{\sqrt{3}}} = 0,433 - j \cdot 9,09 \text{ mS}$$

Teoretický předpoklad naměřených admítancí pro základní harmonickou:

Zemní spojení mimo chráněnou fázi:

$$Y_0^1 = -(G_{v\underline{v}} + j \cdot B_{v\underline{v}_{50\text{Hz}}}) = -0,02 - j \cdot 0,87 \text{ mS}$$

Zemní spojení na chráněné fázi před připojením odporníku:

$$Y_0^1 = (G_{cN} + G_{TL}) + j \cdot (B_{cN_{50\text{Hz}}} + B_{TL_{50\text{Hz}}}) = 0,16 - j \cdot 1,29 \text{ mS}$$

Zemní spojení na chráněné fázi po připojení odporníku:

$$Y_0^1 = (G_{cN} + G_{TL}) + j \cdot (B_{cN_{50\text{Hz}}} + B_{TL_{50\text{Hz}}}) = 0,59 - j \cdot 1,29 \text{ mS}$$

Teoretický předpoklad naměřených admitancí pro vyšší harmonické:

Zemní spojení mimo chráněnou fázi:

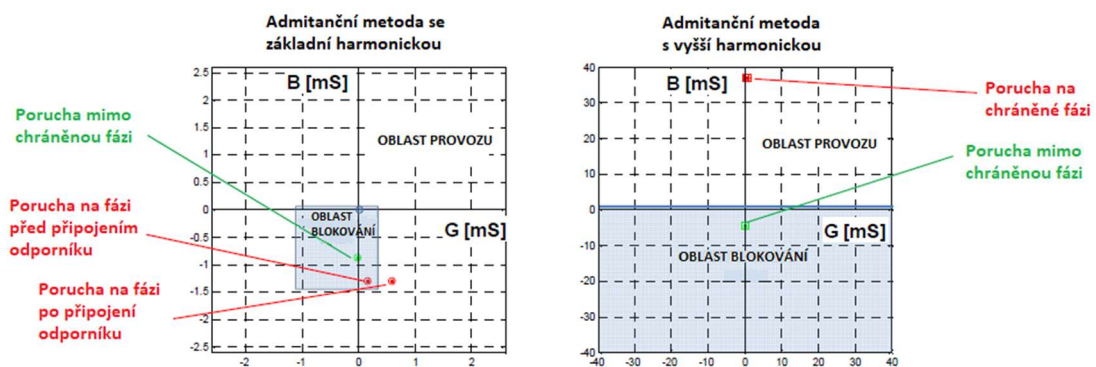
$$Y_0^{n=5} = -(G_{v\underline{y}v} + j \cdot B_{v\underline{y}v_{50Hz}} \cdot 5) = -0,02 - j \cdot 4,35 \text{ mS}$$

Zemní spojení na chráněné fázi před připojením odporníku:

$$Y_0^{n=5} = (G_{cN} + G_{TL}) + j \cdot \left(B_{cN_{50Hz}} \cdot 5 + \frac{B_{TL_{50Hz}}}{5} \right) = 0,16 + j \cdot 37,18 \text{ mS}$$

Zemní spojení na chráněné fázi po připojení odporníku:

$$Y_0^{n=5} = (G_{cN} + G_{TL}) + j \cdot \left(B_{cN_{50Hz}} \cdot 5 + \frac{B_{TL_{50Hz}}}{5} \right) = 0,59 + j \cdot 37,18 \text{ mS}$$



Obr. 2.6: Porovnání výsledků admitanční metody se základní a vyšší harmonickou (přeloženo z [6])

Na obrázku vidíme, že při využití pouze základní harmonické ochrana správně vyhodnotila, že je porucha mimo vývod, pro který jsme výpočet provedli. Pokud však nastalo zemní spojení na dané odbočce, správně to vyhodnotila až po připojení odporníku. Při využití vyšší harmonické je výsledná susceptance stejná s odporníkem i bez něj, konduktance se mění pouze málo a na výsledek dle charakteristiky nemá vliv. Ochrana správně vyhodnotila zemní spojení na chráněném vývodu i mimo něj.

2.5 Konduktanční metoda

Tato kapitola 2.5 byla čerpána ze zdrojů [1, 4, 6].

Konduktanční metoda je založena na podobném principu jako předchozí metoda, tedy na výpočtu netočivé admitance. Zde se však vyhodnocuje pouze její reálná část, konduktance, po vzniku zemního spojení se totiž právě tato složka mění nejvíce. Pro nepostiženou odbočku platí:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = (G_{v\acute{y}v}) \quad (2.17)$$

$G_{v\acute{y}v}$ je netočivá konduktance odbočky, na které ochrana provádí měření.

Pro odbočku sítě se zemním spojením platí:

$$G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (2.18)$$

G_{cN} je netočivá konduktance zbytku sítě, G_{TL} je netočivá konduktance Petersenovy tlumivky.

Výsledek této metody neovlivňuje hodnota odporu zemního spojení ani rozladění sítě. Připínání odporníku metoda nevyžaduje, ale s jeho využitím dosahuje velmi dobrých výsledků. Při nastavování ochran lze využít hodnotu konduktance odporníku pro nastavování popudových hodnot konduktance. Při zemním spojení vzroste celková konduktance minimálně na hodnotu konduktance odporníku.

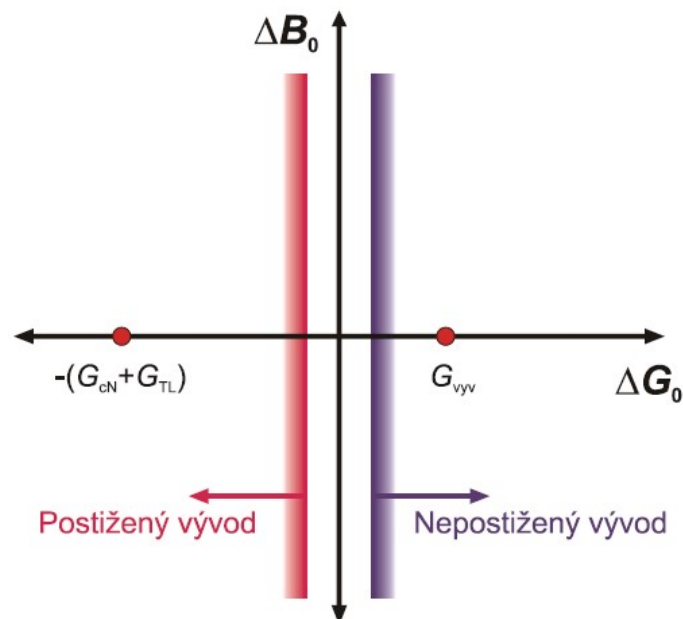
Zvýšení citlivosti metody lze provést také výpočtem pomocí přírůstků konduktance, tedy pomocí změn U_0 a I_0 před a po vzniku zemního spojení. Výhodou je, že výsledek neovlivňuje chyba měření měřících transformátorů a nesymetrie sítě.

Pro nepostižený vývod platí:

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = (G_{v\acute{y}v}) \quad (2.19)$$

Pro vývod se zemním spojením platí:

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (2.20)$$



Obr. 2.7: Funkční charakteristika konduktanční metody [1]

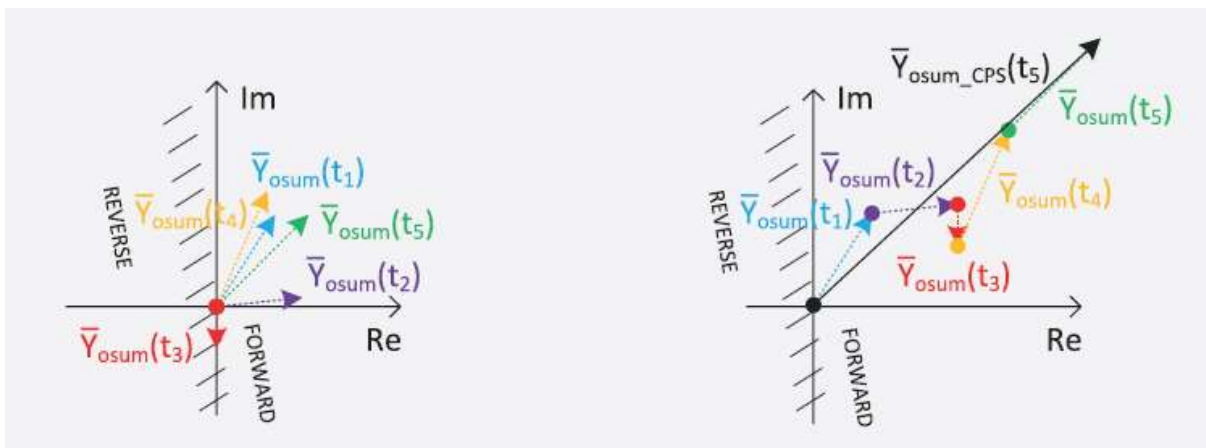
3 Moderní metody ochrany kompenzované sítě

Tato kapitola 3 byla čerpána ze zdroje [7].

3.1 Kumulativní fázorové sčítání

Nejmodernější metodou používanou pro určení směru poruchy je tzv. Cumulative Phasor Summing (Kumulativní Fázorové Sčítání), dále jen („CPS“). Tato metoda dokáže pomocí jedné funkce detekovat všechny druhy zemních poruch. Má jednoznačné výsledky, i pokud se jedná o dočasné nebo velmi zkreslené signály, obsahující vysokofrekvenční složky. Lze takto detekovat i transienty a zemní poruchy s proudovými špičkami velmi krátkého trvání.

Podstatou systému je to, že diskrétní fázory napětí a proudů jsou nahrazeny naakumulovanými hodnotami admitancí během poruchy. Po určitých časových úsecích (od t_{start} do t_{end}) měří několik fázových hodnot admitancí, které následně vloží do jednoho fázorového diagramu a vektorově je sečte. Výsledkem je fázor celkové součtové admitance $\bar{Y}_{0\text{sum_CPS}}$, jak vidíme na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Fázorové diagramy zobrazující výpočet součtové admitance [7]

Pro součtovou admitanci v algoritmu CPS platí tato rovnice:

$$\bar{Y}_{0sum_CPS} = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Re[\bar{Y}_{0sum}(i)] + j \cdot \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Im[\bar{Y}_{0sum}(i)] \quad (3.1)$$

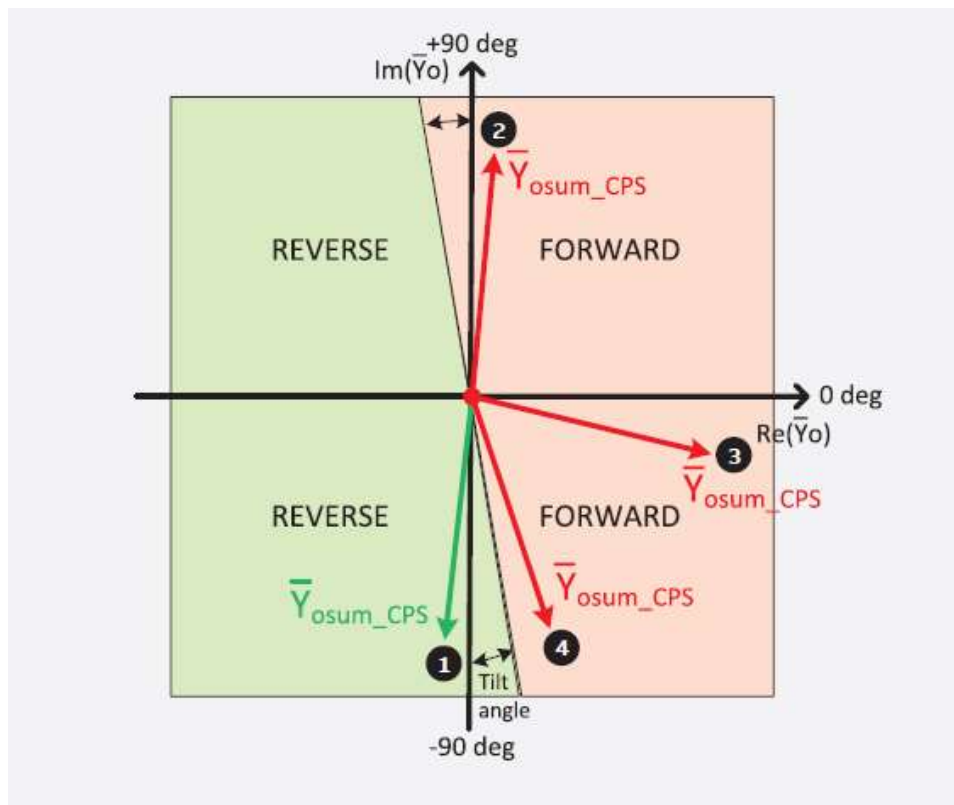
Základním kritériem pro zjištění zemního spojení v síti je, pokud je hodnota netočivé složky napětí na tlumivce U_0 větší nebo rovna 30% fázového napětí soustavy U_f . Pokud je zjištěn tento stav sítě, probíhá měření CPS. Na základě tohoto kritéria se tedy určuje začátek i konec časových úseků měření (t_{start} a t_{end}).

Aby bylo možné udržet CPS aktivované po celou dobu během opakující se poruchy, akumulace fázorů pokračuje po určité době i po prvním transientu. Jedná se o uživatelsky nastavitelné spoždění, které by mělo přesahovat maximální předpokládaný časový interval mezi transienty. Proces akumulace by měl být prováděn v dostatečně častých intervalech, aby byly co nejdříve zachyceny všechny fázory reprezentující zažehnutí transientu a porucha tedy byla okamžitě lokalizována. Doporučuje se provedení každých 2,5 ms (400 Hz).

Výsledný součtový fázor \bar{Y}_{0sum_CPS} , odpovídající rovnici (3.1), nám dává informaci o směru, ve kterém došlo k zemnímu spojení od místa měření. Součtový fázor vždy směřuje k největšímu toku energie, což odpovídá místu poruchy. V případě, že poruchové signály obsahují harmonické složky, směr poruchy je ještě jasnější, protože fázory zdravých fází ukazují přesně na opačnou stranu, než u fází s poruchou. Toto platí i u neuzemněné sítě, nehledě na aktuální stupeň kompenzace sítě. Díky tomu lze selektovat pouze fázory s poruchou.

Výhodou CPS algoritmu je, že vždy produkuje stabilně ukazující fázor, i když jednotlivé dílčí fázory mohou s časem značně měnit svou amplitudu i fázový posuv. Způsobují to nestabilní poruchy, jako například přerušované zemní spojení. To samé platí i pro harmonické složky, které mohou mít také časově závislý charakter.

3.2 Fázorový diagram CPS



Obr. 3.2: Fázorový diagram CPS [7]

Fázorový diagram popisuje určení směru poruchy pomocí CPS. Vidíme, že rozlišujeme dva směry fázoru, FORWARD (dopředu) a REVERSE (dozadu). Zjednodušeně řečeno, pokud výsledný součtový fázor admitance směřuje dozadu (REVERSE), k zemnímu spojení došlo mimo chráněnou fázi. Směřuje-li dopředu (FORWARD), zemní spojení se nachází na chráněné fázi. Diagram má univerzální použití, platí pro kompenzované i izolované soustavy, i pokud je kompenzační tlumivka dočasně odpojena.

Rozlišení směru poruchy je posunuto od imaginární osy o úhel, v obrázku označený jako „Tilt angle“. Tento úhel symbolizuje chyby měření proudových a napěťových transformátorů. Čím větší chyby jsou, tím větší by měl být úhel náklonu od imaginární osy. Zde je uvažován úhel 5°.

Fázor č. 1

Ukazuje směr celkové součtové admitance v případě zemního spojení mimo chráněnou fázi (za předpokladu, že admitance chráněné fáze je dominantně kapacitního charakteru). Tento výsledek platí pro všechny typy poruchy: nízko-ohmické, vysoko-ohmické, permanentní i přerušované. Pokud by byly v admitanci přítomny harmonické složky, vyrovnaly by fázor se zápornou osou $\text{Im}(\bar{Y}_0)$.

Fázor č. 2

Znázorňuje směr součtové admitance při zemním spojení na chráněné fázi, pokud se jedná o neuzemněnou síť. Výsledek platí i pro kompenzované sítě, v součtu však musí být přítomny i harmonické složky, což se děje typicky při nízko-ohmických nebo přerušovaných poruchách. V tomto případě platí výsledek bez ohledu na stupeň kompenzace. Harmonické složky by způsobily posunutí fázoru ke kladné ose $\text{Im}(\bar{Y}_0)$.

Fázory č. 3 a 4

Fázory 3 a 4 ukazují směr součtové admitance v případě vysoko-ohmického zemního spojení na chráněné fázi bez přítomnosti harmonických složek. Platí pro kompenzovanou síť. Jelikož v síti nejsou přítomny žádné harmonické složky, úhel akumulovaného fázoru je určen stupněm kompenzace v síti. Čím lépe je síť kompenzovaná, tím více se fázor blíží k ose $\text{Im}(\bar{Y}_0)$. S vysokou mírou překompenzace by se fázor posunul na zápornou osu $\text{Im}(\bar{Y}_0)$.

CPS algoritmus poskytuje průběžné hodnocení směru poruchy. I v průběhu trvalého zemního spojení může být znovu vyvolán výpočet pomocí externího signálu. V průběhu hodnocení dochází k cyklickému resetování a opětovnému počítání CPS. Pokud je směr poruchy na základě tohoto cyklického počítání opačný, než výsledný směr funkce, počítání směru se opakuje. Takto je systém chráněn proti chybě nastávající v okamžiku, kdy dojde během poruchy ke změně směru.

3.3 Stabilizovaná admittance

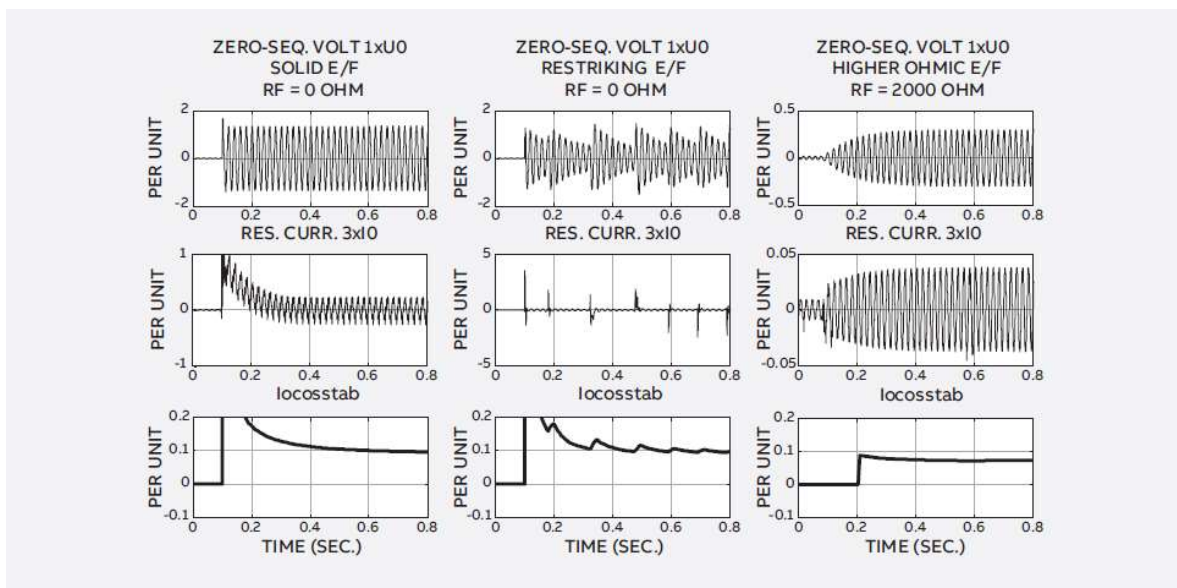
Další možností detekce zemního spojení je využití tzv. stabilizované neutrální admittance:

$$\bar{Y}_{0stab}^1 = \frac{\bar{I}_{0CP}^1}{-\bar{U}_{0CPS}^1} = Re[\bar{Y}_{0stab}^1] + j \cdot Im[\bar{Y}_{0stab}^1] = G_{0stab} + j \cdot B_{0sta} \quad (3.2)$$

Admittance je vypočítána z hodnot zbytkového napětí a proudu při základní frekvenci 50 Hz. Výsledek konverguje k hodnotě, která odpovídá neakumulované hodnotě admittance v ustáleném stavu. Znásobením této admittance s hodnotou jmenovitého fázového napětí sítě dostaneme odpovídající „stabilizovaný proud“:

$$\bar{I}_{0sta}^1 = (G_{0stab} + j \cdot B_{0stab}) \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3}} = I_{0Cosstab}^1 + j \cdot I_{0Sinstab}^1 \quad (3.3)$$

Výsledkem je hodnota proudu v ustáleném stavu, která nezávisí na typu poruchy ani velikosti jejího odporu. Výsledek je tedy stejný pro kovová zemní spojení, přerušovaná i vysoko-ohmická. Demonstrací je obr. 3.3, na kterém vidíme grafy tří různých případů zemního spojení. První zleva je trvalé nízko-ohmické zemní spojení, druhý sloupec grafů zobrazuje přerušované nízko-ohmické zemní spojení a poslední grafy ukazují průběhy při trvalém vysoko-ohmickém zemním spojení.



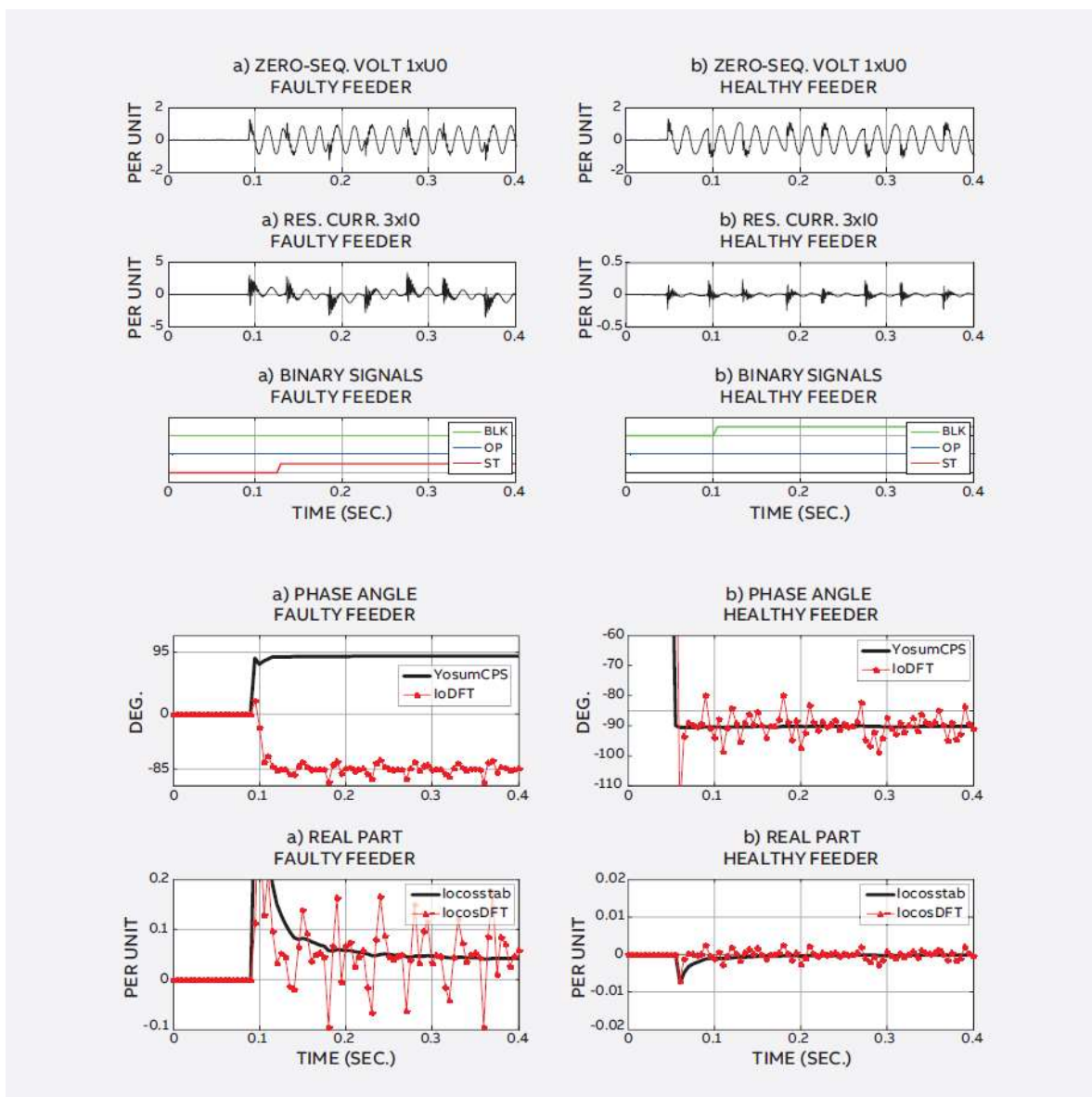
Obr. 3.3: Odhad reálné složky stabilizovaného proudu při různých zemních spojeních [7]

Poslední graf u každého druhu poruchy je nejdůležitější, zobrazuje průběh $I_{0\text{Cosstab}}$ v čase. $I_{0\text{Cosstab}}$ je reálná (odporová) složka stabilizované proudy vypočítané dle rovnice (3.3) a lze jí použít pro určení místa zemního spojení. Vidíme, že tento graf má pro všechny zobrazené druhy poruch podobný průběh. Pokud je porucha na chráněném přívodu, složka $I_{0\text{Cosstab}}$ je kladná a její velikost odpovídá velikosti paralelního odporu tlumivky, který je dán ztrátami na vedení. Pokud je porucha mimo daný přívod, hodnota $I_{0\text{Cosstab}}$ je záporná a její velikost je rovna odporovým ztrátám odbočky, na které měření provádíme. I v tomto případě může však vlivem nepřesností měření napětí a proudy vyjít hodnota kladná, což by mělo být bráno v potaz u nastavování mezí proudových ochran.

3.4 Výsledky metod při různých druzích poruch

3.4.1 Přerušované zemní spojení

Jedná se o nejběžnější typ zemního spojení v kompenzovaných sítích. Většinou je nízko-ohmické. Je tvořeno posloupností samo-zhášecích poruch, časový interval mezi jednotlivými zapáleními je v řádu desítek až stovek milisekund. Tyto poruchy vytváří v síti průběhy nesinusových napětí a proudů s různou amplitudou, na což nejsou běžné metody založené na základní frekvenci schopny správně reagovat.



Obr. 3.4: Průběhy přerušovaného zemního spojení na zdravé a postižené odbočce

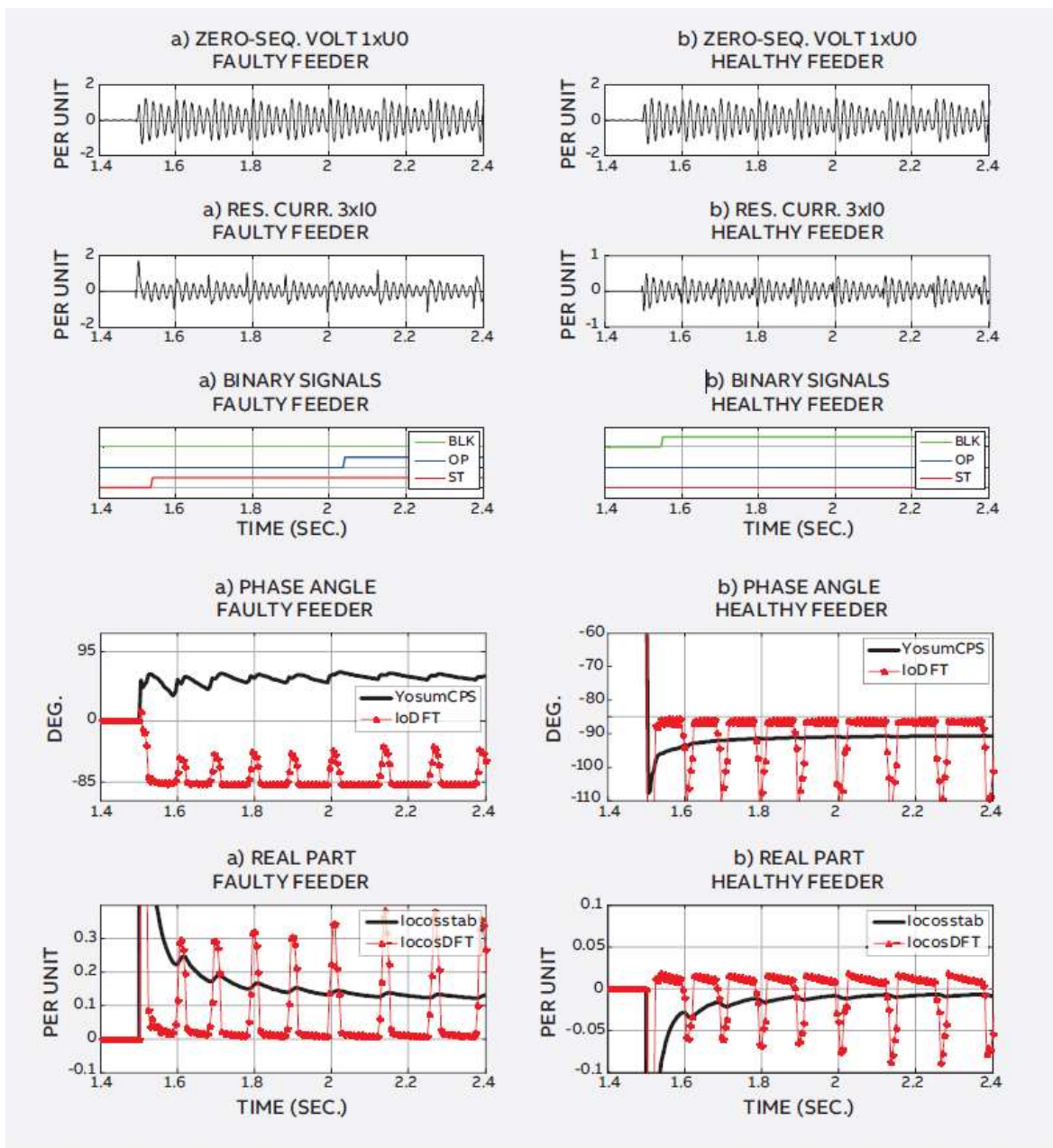
[7]

Na obr. 3.4 vidíme časové průběhy při tomto zemním spojení. Levý sloupec grafů platí pro napáječ s poruchou, pravý sloupec pro nepostižený napáječ. První průběh zobrazuje fázové napětí, druhý zbytkový proud, třetí používané binární signály. Signál BLK indikuje, že nastalo zemní spojení mimo chráněnou fázi. Naopak signál ST indikuje zemní spojení na chráněné fázi.

Čtvrtý průběh ukazuje fázový úhel admitance $\bar{Y}_{0\text{sum_CPS}}$ vytvořené pomocí CPS a úhel $I_{0\text{DFT}}$, zobrazující výsledek, který by poskytla klasická směrová ochrana založená na diskrétní Fourierově transformaci při 50 Hz. Všechny veličiny jsou zobrazeny v závislosti na čase. Poslední graf zobrazuje výsledný časový průběh $I_{0\text{Cosstab}}$ a opět pro porovnání $I_{0\text{cosDFT}}$ získaný diskrétní Fourierovou transformací při 50 Hz.

Zažehnutí zemního spojení je zde zobrazeno přibližně každých 50 ms. Každý transient obsahuje vysokofrekvenční složky a má oscilační charakter. Tyto vlastnosti způsobují velké problémy pro klasické ochrany, zde však vidíme, že výsledky $\bar{Y}_{0\text{sum_CPS}}$ a $I_{0\text{Cosstab}}$ nejsou negativně ovlivněny. Průběh $I_{0\text{Cosstab}}$ je na fázi s poruchou kladný a má podobný průběh, jak bylo naznačeno v obr. 3.3. Naopak na zdravé fázi je záporný. Úhel $\bar{Y}_{0\text{sum_CPS}}$ je na špatné fázi přibližně $+90^\circ$, což odpovídá úhlu pro postižený vývod a sedí s popisem fázoru č. 2 v 3.2. Jelikož v součtu jsou přítomny harmonické složky, fázor se posunul na kladnou osu $\text{Im}(\bar{Y}_0)$. Úhel $\bar{Y}_{0\text{sum_CPS}}$ na zdravé fázi je -90° , což opět odpovídá předpokladům dle obr. 3.2. Harmonické složky způsobily umístění fázoru na osu $-\text{Im}(\bar{Y}_0)$. Fázory zdravé a postižené fáze jsou tedy přesně o 180° posunuty, což odpovídá předpokladu. Úhel $I_{0\text{cosDFT}}$ na špatné fázi osciluje kolem hranic charakteristiky, to přináší riziko špatného vyhodnocení směru poruchy.

3.4.2 Přerušované zemní spojení s tlumenými transienty



Obr. 3.5: Časové průběhy přerušovaného zemního spojení s tlumenými transienty na zdravé a postižené odbočce [7]

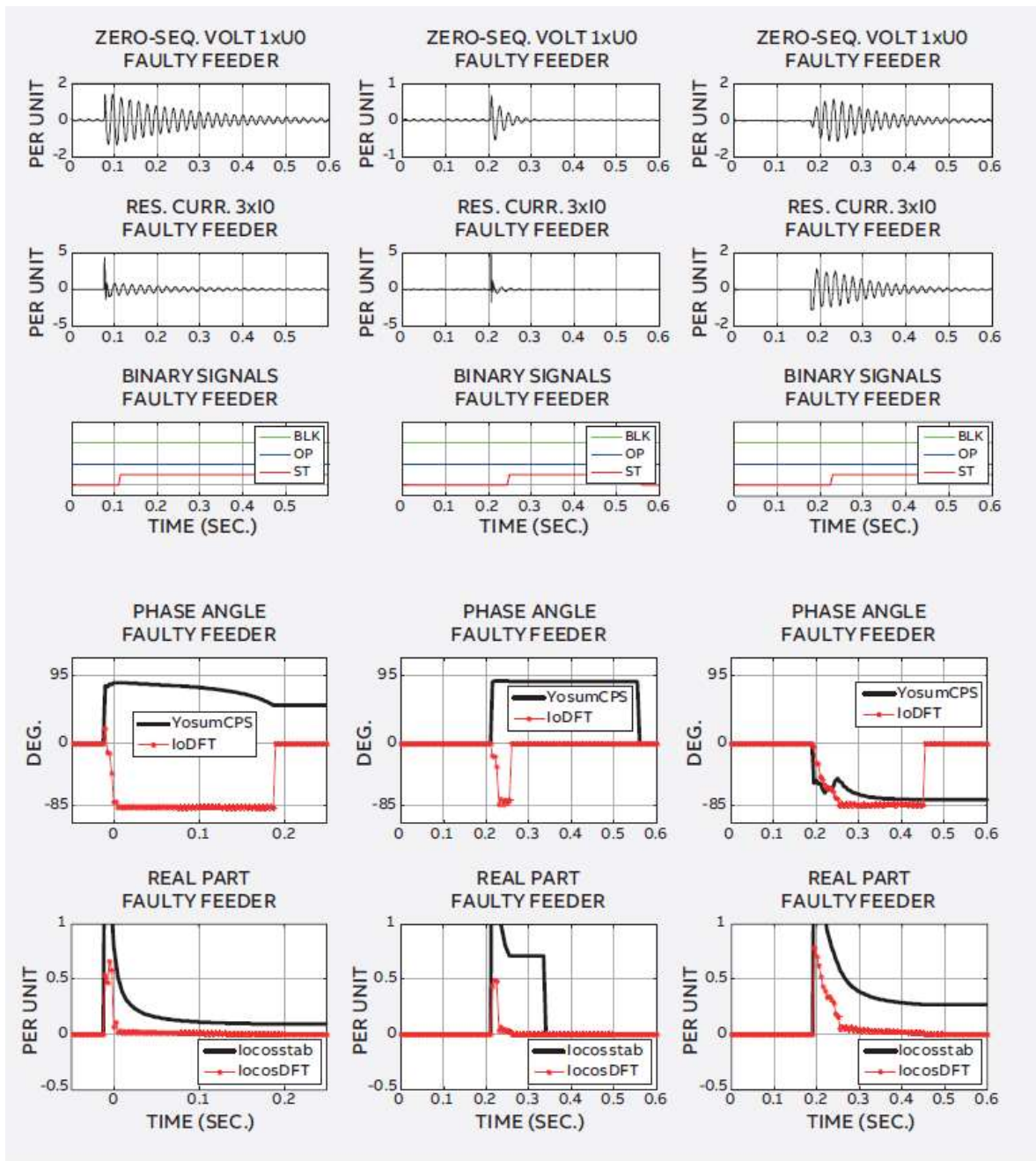
Zde vidíme stejné průběhy jako na obr. 3.4, v tomto případě se však jedná o zemní spojení, které nastalo 30,1 km od rozvodny na konci dlouhého kabelového vedení. Poruchové transienty jsou z důvodu velké vzdálenosti poruchy tlumené, mají nízkou amplitudu a frekvenci, což může způsobit špatné vyhodnocení klasických metod založených pouze na vyhodnocení přechodových dějů. Vidíme, že průběhy I_{0DFT} a $I_{0cosDFT}$ jsou velmi

nestabilní. Fázory \bar{Y}_{0sum_CPS} však vyšly opět správně, na fázi s poruchou kmitá okolo hodnoty $+45^\circ$, což odpovídá poruše na chráněné fázi. Snížení úhlu fázoru na $+45^\circ$ je způsobeno zmíněnou nízkou frekvencí transientů. U zdravé fáze vychází úhel \bar{Y}_{0su_CPS} přibližně $+95^\circ$, tato hodnota tedy také odpovídá hodnotě na zdravé fázi dle fázorového diagramu v obr. 3.2.

Průběh $I_{0cosstab}$ je na fázi s poruchou kladný a má opět velmi podobný průběh jako v obr. 3.3. Na zdravé fázi je naopak záporný se stejným tvarem průběhu. Obrázek tedy demonstruje, že velká vzdálenost zemního spojení od rozvodny nemá žádný vliv na výsledky metody součtové admitance, ani na výpočet stabilizovaného proudu. Oba průběhy jsou stabilní.

3.4.3 Dočasné zemní spojení

Toto zemní spojení se projevuje pouze jedním nebo několika transienty, poté dojde k samovolnému odstranění poruchy. V tomto případě tedy není nutné ani žádoucí obvod vypínat.



Obr. 3.6: Časové průběhy 3 typů dočasných poruch na odbočce se zemním spojením

[7]

Obr. 3.6 nám ukazuje průběhy na fázi s poruchou při třech různých dočasných poruchách. První dva případy poruchy obsahují počáteční složky transientu se složkami vyšších harmonických. Třetí sloupec grafů ukazuje průběhy poruchy obsahující pouze složky základních frekvencí. Pro detekci této poruchy je nutné použít vhodnou metodu, která není založená na vyhodnocení transientů. V uvedených grafech vidíme, že metoda součtové admitance vždy odhalila místo zemního spojení správně, u prvních dvou poruch se při začátku transientu úhel admitance rovná přibližně $+90^\circ$, což odpovídá fázoru č. 2 dle popisu v 3.2. U třetí poruchy je z důvodu nepřítomnosti vyšších harmonických úhel admitance -80° , což odpovídá fázoru č. 4. Poslední průběh v každém sloupci opět demonstruje funkčnost výpočtu stabilizovaného proudu, všechny průběhy mají očekávaný tvar průběhu při zemním spojení a jsou kladné. Můžeme tedy z nich správně vyhodnotit, že zemní spojení se nachází na měřené fázi.

Jelikož dočasné zemní spojení v kompenzovaných sítích není třeba okamžitě vypínat, detekce těchto poruch slouží pro účely preventivní údržby a například pro signalizaci selhání izolace nebo postupného vývoje selhání v budoucnu. Tím je dána možnost pracovníkům obsluhy sítí, aby lokalizovali závadu dříve, než se rozvine v závažnější trvalou poruchu, která může způsobit přerušení dodávky elektřiny zákazníkům.

Závěr

V bakalářské práci jsem měl za úkol popsat problematiku vyhodnocení zemních spojení v kompenzovaných sítích. Poruchový proud zemním spojením je kapacitního charakteru a v sítích uzemněných přes Petersenovu tlumivku je kompenzován jejím induktivním proudem. Výsledný poruchový proud je tedy velmi malý, což způsobuje problémy s vyhodnocením zemního spojení. Je těžké zemní spojení detekovat i lokalizovat. Proto používáme směrové ochrany, které jsou založeny na měření netočivých složek napětí a proudu vedení. Pomocí naměřených hodnot dokáží zjistit přítomnost zemního spojení a určit, na kterém vývodu soustavy se nachází. Výhodou kompenzované sítě je, že není nutné zemní spojení okamžitě vypínat. Díky malému poruchovému proudu je možné síť po omezenou dobu provozovat, což poskytuje velkou spolehlivost dodávky elektrické energie. Navíc velká část poruch sama zaniká a není tak nutné je řešit, k vypnutí sítě tedy nedojde.

V kapitole 1 bakalářské práce jsem popsal druhy uzemnění soustav, jejich základní vlastnosti a použití v praxi. Rozvedl jsem funkci kompenzované sítě a princip kompenzace. Popsal jsem druhy kompenzace, Petersenovu tlumivku lze umístit do rozvodny jako jedinou pro celou soustavu, nebo můžeme dát jednu tlumivku na každý vývod sítě. U nás se většinou používá první případ. Dále jsem provedl simulaci sítě vysokého napětí, kde na jedné z odboček dojde k zemnímu spojení a následně se připojí paralelní odporník. Demonstroval jsem vliv velikosti odporu zemního spojení na velikost U_0 , tedy nepřímo na funkčnost ochran. Zjistil jsem, že pro můj model nedojde od velikosti odporu 9000Ω k detekci zemního spojení, protože není splněna základní podmínka ochran o velikosti netočivé složky napětí U_0 .

V další kapitole jsem popsal základní metody ochran. Nejstarší metodou je wattmetrická, která měří složku netočivého proudu vývodem. Tato metoda nemá ideální výsledky při vyšším odporu zemního spojení. Admitanční metoda využívá výpočtu netočivé složky admitance z naměřených hodnot a dosahuje dobrých výsledků. Její citlivost lze zvýšit využitím vyšších harmonických složek, které jsou většinou přítomny v poruchových signálech. Petersenova tlumivka totiž kompenzuje pouze proudy o základní frekvenci. Je uveden také praktický výpočet sítě metodou základní harmonické i s využitím vyšších harmonických. Podle základní harmonické vyšel výsledek správně až po připnutí odporníku.

V poslední kapitole 3 je popsána nejmodernější metoda založena na akumulaci hodnot admitancí. Z několika hodnot je poté vytvořen součtový fázor, který určuje, zda se porucha nachází na chráněném vývodu nebo mimo něj. Tato metoda má správné výsledky při jakémkoli druhu zemního spojení, není ovlivněna velikostí odporu, ani charakteristikou poruchy. V práci jsem popsal grafický způsob vyhodnocení směru poruchy a následně i přesné výsledky při různých druzích zemního spojení. Dalším moderním způsobem vyhodnocení je využití reálné složky tzv. stabilizovaného proudu. Výsledkem je hodnota v ustáleném stavu, nezávisí tedy na typu poruchy. Výsledky jsou rovněž demonstrovány v průbězích pro různé případy poruchy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] VOZKA, Aleš. *Zemní ochrany v distribuční síti* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/14929>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] JÍLEK, David. *Způsoby provozování uzlů elektrických sítí* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/7446>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] OSTRUŠKA, Jan. *Ochrany při zemních spojeních* [online]. Brno, 2015 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=100308. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [5] ŽÁK, František. *Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a chránění sítí VN* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2019-06-10]. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] WAHLROOS, Ari a Janne ALTONEN. COMPENSATED NETWORKS AND ADMITTANCE BASED EARTH-FAULT PROTECTION [online]. Finland, 2011 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/509d776e7bdcc425c1257847004468f4/Compensated%20networks%20and%20admittance%20based%20earth%20fault%20protection_techpub_757370_ENa.pdf. Publikace. Kaunas University of Technology and Aalto University.
- [7] WAHLROOS, Ari a Janne ALTONEN. Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks [online]. Finsko, 2017 [cit. 2019-06-10]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/0c81c5d6647d4bcea2ece4bdf5f01f6c/Application%20of%20novel%20multi-frequency%20neutral%20admittance%20method%20into%20earth-fault%20protection%20in%20compensated%20MV-networks%20_758718_LR_ENa.pdf.
- [8] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Zemní spojení*. Plzeň, 2019. Přednáška z předmětu EE2. Západočeská univerzita v Plzni.

Přílohy

Příloha A – model kompenzované sítě se 3 odbočkami v programu PLECS

