

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Lokalizace zemního spojení v distribuční síti

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Martin BULÍN
Osobní číslo:	E19N0030P
Studijní program:	N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor:	Elektroenergetika
Téma práce:	Lokalizace zemního spojení v distribuční síti
Zadávací katedra:	Katedra elektroenergetiky

Zásady pro vypracování

Práce se zabývá lokalizací zemního spojení v rezonančně uzemněné distribuční síti pomocí měření lokálních napětí a proudů na vývodech v rozvodně. Zkoumaná metoda je založena na odhadu indukčnosti poškozeného vývodu do místa zemního spojení.

1. Popište úvod do problematiky rezonančně uzemněných sítí.
2. Popište a proveďte simulaci metody identifikace vývodu se zemním spojením.
3. Popište a proveďte simulaci algoritmu vyhodnocujícího vzdálenost poruchy od rozvodny.
4. Závěrem zhodnoťte dosažené výsledky.

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

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jakub Talla, Ph.D.**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



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

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na lokalizaci zemního spojení v distribuční síti. Práce se zabývá jak lokalizací postiženého vývodu rozvodny vysokého napětí různými metodami, ale i samotnou lokalizaci poruchy za použití dvou různých metod.

Klíčová slova

Zemní spojení, jednofázová porucha, distribuční síť, izolovaná síť, kompenzovaná síť, zhášecí tlumivka, lokalizace poruchy, rezonance, injektáž, šíření vln, elektromagnetická vlna

Abstract

The submitted master thesis is focused on the localization of the ground connection in the distribution network. It focuses on the localization of the affected high voltage substation outlet by various methods, but also on the localization of the fault itself using two different methods.

Key words

Earth fault, single-phase fault, distribution network, isolated network, compensated network, choke, fault location, resonance, grouting, wave propagation, electromagnetic wave

Prohlášení

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

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



.....
podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Bc. Martin Bulín

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jakobovi Tallovi, Ph.D. za cenné rady během řešení práce a poskytnutí osobních souborů.

Obsah

ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 DISTRIBUČNÍ SÍŤ ELEKTRICKÉ ENERGIE	11
1.1 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA V ČR.....	11
1.2 TYPY DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ VN	11
1.2.1 Síť izolované.....	12
1.2.2 Síť kompenzované s kompenzační tlumivkou	12
1.2.3 Síť kompenzované s odporníkem.....	13
2 ZEMNÍ SPOJENÍ V DISTRIBUČNÍ SÍTI	14
2.1 DRUHY ZEMNÍCH SPOJENÍ	14
2.2 ZEMNÍ SPOJENÍ V IZOLOVANÉ SÍTI.....	15
2.3 ZEMNÍ SPOJENÍ V KOMPENZOVANÉ SÍTI.....	19
2.3.1 Zhášecí tlumivka.....	21
2.3.1 Systém Swedish Neutral.....	23
2.3.1 Systém s automatikou přizemnění postižené fáze „shuntování“	24
3 IDENTIFIKACE POSTIŽENÉHO VÝVODU ZEMNÍM SPOJENÍM	25
3.1 MODEL DISTRIBUČNÍ SÍŤE 22 kV SE TŘEMI VÝVODY.....	26
3.2 VÝPOČET VELIKOSTI INDUKČNOSTI ZHÁŠECÍ TLUMIVKY.....	27
3.3 ZEMNÍ SPOJENÍ V MODELU	28
3.4 METODA MĚŘENÍ NAPĚTÍ	30
3.5 METODA MĚŘENÍ PROUDŮ	31
3.6 METODA PŘIPOJENÍ ODPORNÍKU	32
3.7 PRINCIP SMĚRU TRANSIENTU PO VZNIKU ZS	35
4 LOKALIZACE PORUCHY V DISTRIBUČNÍ SÍTI.....	39
4.1 LOKALIZACE ZEMNÍHO SPOJENÍ POMOCÍ INJEKTÁŽE PROUDU.....	39
4.1.1 Ruční výpočet vzdálenosti	40
4.1.2 Výpočet vzdálenosti pomocí algoritmu v programu Matlab	43
4.2 METODA ZALOŽENÁ NA ODRAZECH VLN NA VEDENÍ.....	47
5 ZÁVĚR A SHRNUÍ VÝSLEDKŮ	53
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	55
SEZNAM OBRÁZKŮ	56
SEZNAM TABULEK	57

PŘÍLOHY	58
PŘÍLOHA A – SKRIPT K SIMULAČNÍMU MODELU V PLECSU.....	58
PŘÍLOHA B – SKRIPT PRO RUČNÍ VÝPOČET VZDÁLENOSTI V MATLABU.....	59
PŘÍLOHA C – SKRIPT PRO INJEKTÁŽ A VÝPOČET VZDÁLENOSTI V MATLABU	60
PŘÍLOHA D – SKRIPT VÝPOČET VZDÁLENOSTI POMOCÍ NÁVRATU VLNY V MATLABU	61
PŘÍLOHA E – SIMULAČNÍ MODEL SE 3 VÝVODY.....	63
PŘÍLOHA F – MODEL ŠÍŘENÍ VLN	64

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na identifikaci a následnou lokalizaci zemního spojení v distribuční síti.

Text je rozdělen do tří částí. První se zabývá jednotlivými typy distribučních sítí, druhá se týká lokalizace postiženého vývodu z rozvodny vysokého napětí. Třetí část popisuje lokalizaci zemního spojení ne vedení vysokého napětí.

V první části je stručně popsána problematika týkající se jednotlivých typů distribučních sítí využívaných v České republice. Dále v této části je stručně popsána problematika týkající se jednofázových poruch, tedy zemních spojení, v izolovaných a kompenzovaných distribučních sítích. Druhá část se zabývá simulací různých metod detekce postiženého vývodu z rozvodny vysokého napětí. Simulační model je tvořen v softwaru PLECS. Ve třetí části se práce zabývá samotnou lokalizací poruchy pomocí znalosti velikosti provozní indukčnosti postižené části vedení vysokého napětí.

Seznam symbolů a zkratek

Ω	Úhlová rychlost	(rad/s)
C	Kapacita	(F)
I	Elektrický proud	(A)
I_c	Elektrický proud kapacitního charakteru	(A)
L	Indukčnost	(H)
L_p	Provozní indukčnost	(H)
MTN	Měřicí transformátor napětí	
MTP	Měřicí transformátor proudu	
PTN	Přístrojový transformátor napětí	
PTP	Přístrojový transformátor proudu	
R	Elektrický odpor	(Ω)
R_p	Provozní elektrický odpor	(Ω)
$R_{PORUCHY}$	Elektrický odpor v místě poruchy	(Ω)
U	Elektrické napětí	(V)
U_f	Fázové elektrické napětí	(V)
U_{nf}	Jmenovité fázové elektrické napětí	(V)
vn	Vysoké napětí	
vvn	Velmi vysoké napětí	
ZS	Zemní spojení	

1 Distribuční síť elektrické energie

1.1 Distribuční soustava v ČR

Distribuční síť elektrické energie je určena k přenášení elektrické energie ke koncovým odběratelům. V České republice se skládá ze sítí velmi vysokého napětí, zkratkou vvn, konkrétně napěťovou hladinou 110 kV, dále sítěmi vysokého napětí, zkratkou vn, kde napěťové hladiny jsou 35 kV, 22 kV, 10 kV a 6 kV. Nakonec zejména do domácností jsou zavedeny sítě nízkého napětí 0,4 kV. Napěťové hladiny jsou uváděny sdruženými hodnotami. Distribuční soustava na rozdíl od přenosové soustavy slouží k přenášení výkonů na kratší vzdálenosti. Na rozdíl od přenosové soustavy, kde je pouze jediný provozovatel a to ČEPS a.s., distribuční soustavu provozují v České republice momentálně 3 firmy, největší pokrytí má firma ČEZ distribuce a.s., dále na území Jihočeského a Jihomoravského kraje je provozovatel DS firma E.ON distribuce a. s. a poslední firma která provozuje DS na území hlavního města Prahy je PREdistribuce a. s..

1.2 Typy distribučních sítí vn

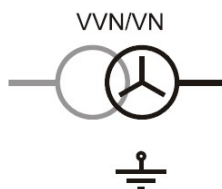
Provoz distribučních sítí na území České republiky na hladině vysokého napětí, tedy 35 kV, 22 kV, 10 kV a 6 kV musí být v souladu s platnými technickými normami ČSN 33 2000 4-41, 33 2000-4-442, 33 3201, 33 3070 a dalšími. Jelikož je většina distribučních sítí napájena transformátorem 110 kV/vn, kde u sekundárního vinutí je vyveden uzel. Podle toho se distribuční sítě dělí na:

- Sítě izolované
- Sítě kompenzované
 - Klasická laditelná zhášecí tlumivka s možným připínáním pomocného odporu, který slouží k navýšení činné složky poruchového proudu.
 - Systém Swedish Neutral.
 - Zhášecí tlumivka vybavena automatikou pro přizemnění postižené fáze – „shuntování“
 - Sítě odporníkové

Výběr libovolného výše uvedeného typu distribuční sítě je možné provést po zohlednění důležitých faktorů. Mezi nejdůležitější faktory patří celkový kapacitní proud distribuční soustavy, úroveň poruchového proudu, ustálená poruchová napětí, přepětí při vzniku zemního spojení a způsob likvidace poruchy. [1]

1.2.1 Síť izolovaná

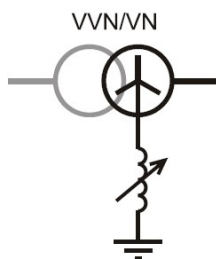
V případě, že jde o síť izolovanou, kapacitní proudy se obvykle pohybují pod 10 A. Uzel napájecího transformátoru je proti zemi izolován. Tento typ sítě se nejčastěji provozuje u malých průmyslových sítí. [2]



Obr. 1.1 Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u izolované sítě IT

1.2.2 Síť kompenzovaná s kompenzační tlumivkou

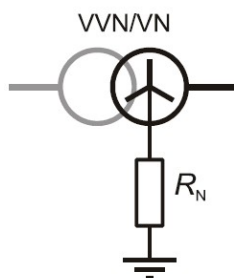
Na rozdíl od výše zmíněných sítí izolovaných se mezi uzel napájecího transformátoru a zem připojí laditelná tlumivka tzv. Petersonova tlumivka. Pokud kapacitní proud přesáhne hodnotu 15 A musí se tyto proudy kompenzovat. Pokud je kompenzována síť dobře dojde tak k samo zhašení zemního spojení a tím se počet poruch snižuje. [1]



Obr. 1.2 Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u kompenzované sítě IT

1.2.3 Síť kompenzované s odporníkem

U odporníkových sítí se jedná o to, že mezi uzel napájecího transformátoru a zem se připojí odporník, který nekompensuje kapacitní proudy, ale pouze omezuje velikost poruchových proudů na vhodnou velikost. [2]



Obr. 1.3: Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u odporníkové sítě ITr

Jakmile dojde v síti, kde je uzel transformátoru spojený přes odporník se zemí, k vodivému spojení poškozené fáze se zemí, nemůže na rozdíl od sítí kompenzovaných přes zhášecí tlumivku být dále provozován poškozený úsek vedení. Poškozený úsek se vypíná pomocí ochran za 0,5 – 0,8 s. Místem poruchy totiž teče poměrně velký poruchový proud, který se skládá z kapacitní složky proudu a zároveň z činné složky proudu, která je omezena velikostí elektrického odporu připojeného odporníku a impedancí zkratové smyčky mezi místem poruchy a distribučním transformátorem.

Tato varianta se většinou provozuje v sítích kabelových, kde ani poměrně velký poruchový proud nezpůsobí, z důvodu kvalitního uzemnění distribučních navzájem propojených rozveden, nebezpečné navýšení dotykového a krokového napětí.

2 Zemní spojení v distribuční síti

U distribučních sítí se na rozdíl od přenosových sítí jednofázové poruše neříká jednofázový zkrat, ale nýbrž zemní spojení. K zemnímu spojení dochází tedy buď v izolované soustavě, anebo v soustavě nepřímo uzemněné. Jakmile dojde k více fázové poruše, poté už porucha se nazývá dvoufázový zkrat, respektive třífázový zkrat.

Poruchový kapacitní proud není závislý na poloze, kde došlo k poruše, ale je závislý na celkové rozloze distribuční sítě napájené distribučním transformátorem. Tudíž jde o svodové kapacity postiženého vývodu, ale i nepostižených vývodů napájených stejným transformátorem. [4]

2.1 Druhy zemních spojení

1) Podle velikosti odporu v místě zemního spojení

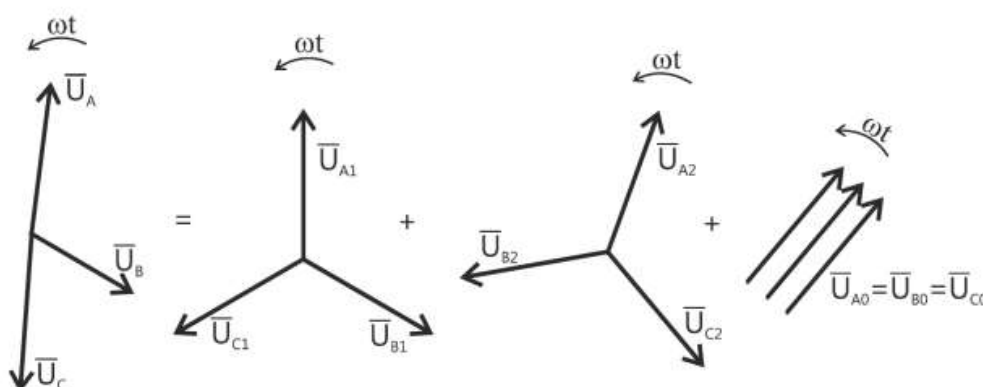
- a) kovová zemní spojení – odpor poruchy $R_p \rightarrow 0 \Omega$
- b) oblouková zemní spojení – odpor poruchy R_p je proměnný nelineární odpor
- c) odporová zemní spojení – odpor poruchy $R_p > 0$, stovky Ω železo-betonové stožáry, až jednotky $M\Omega$ dřevěné stožáry)

2) Podle doby trvání zemního spojení

- a) trvalá nebo nepřerušovaná – trvá od 5 minut až po několik hodin
- b) krátkodobá – trvá do 5 minut
- c) mžiková – trvá do 0,5 sekundy
- d) přerušovaná – mžiková či krátkodobá, oblouk se zapaluje a zhasíná opakovaně

[5]

Co se týče poruch u sítí vn, nejčastěji vznikají jednofázové poruchy, které stejně jako dvoufázové poruchy jsou nesouměrného charakteru. Jelikož jde o nesouměrný charakter, všechny fáze se nepodílí stejnou mírou na velikosti poruchového proudu. A to je důvodem, proč dochází k rozkladu proudů a napětí na jednoduché souměrné složky, které pomocí principu superpozice se zpětně poskládají do nesouměrného stavu. Dojde tedy k rozkladu nesymetrické tří fázové sítě na fázory sousledné (1), zpětné (2) a netočivé soustavy (0) viz Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Rozklad nesouměrné 3f soustavy na souměrné složky [1]

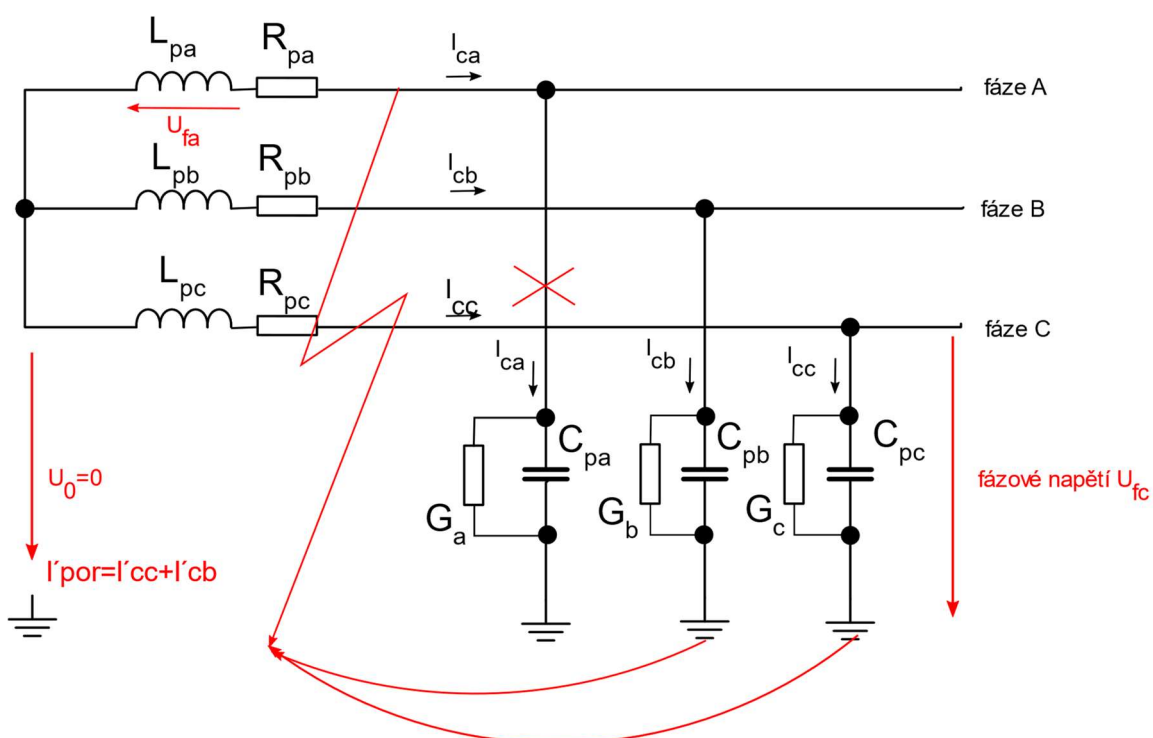
2.2 Zemní spojení v izolované síti

V případě soustav s izolovaným uzlem transformátoru není urgentní při porušení izolace na jedné fázi soustavu a tím k vodivému spojení této jedné fáze se zemí odpojit od napájení a soustava za splnění určitých podmínek může být nadále nějakou dobu provozována.

Velikost sdružených napětí se v této síti nemění, ale dochází k deformaci hvězdy fázových napětí, jelikož mezi zdravými fázemi a zemí již není napětí fázové nýbrž sdružené. Jelikož došlo k zvýšení tohoto napětí, toto napětí vyvolává větší toky kapacitních proudů přes kapacity zdravých fází vůči zemi.

Výsledný kapacitní proud teče zpět místem poruchy do transformátoru. Jeho velikost je dána vektorovým součtem kapacitních proudů jednotlivých zdravých fází. Průchod kapacitního proudu místem poruchy může způsobit požár a tím pádem značné škody

na lesních a zemědělských porostech a s ohledem zvýšeného dotykového a krokového napětí může v případě přítomnosti osob nebo zvířat dojít k úrazu elektrickým proudem. [1]



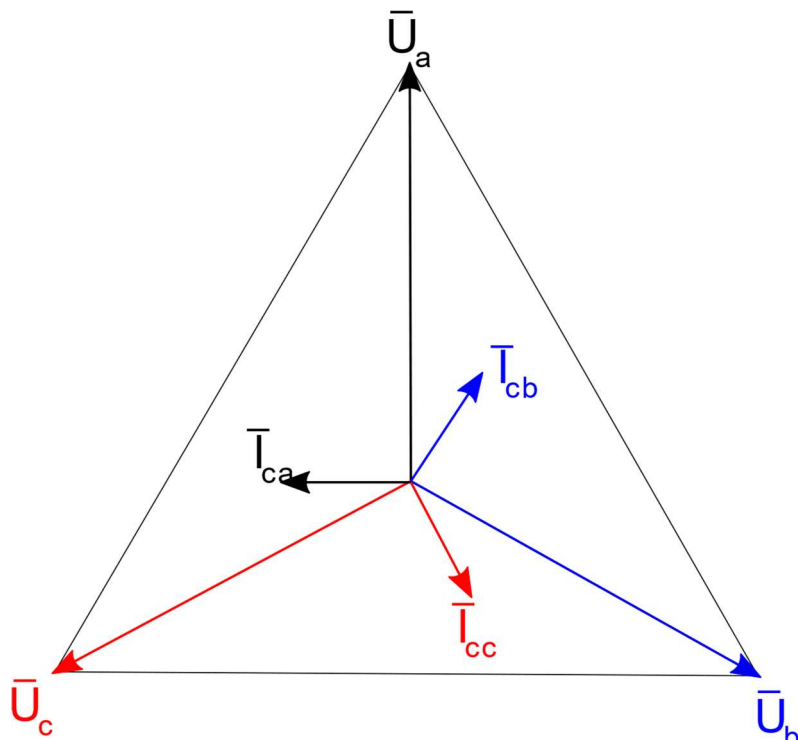
Obr. 2.2 Zjednodušené schéma izolované soustavy s jedním vývodem

Pokud jde o symetrickou síť, tudíž velikosti fázových napětí se u všech tří fází rovnají a fázorový posuv se rovná 120° . Jelikož je síť izolovaná vůči zemi, poté napětí jednotlivých fází vůči zemi mají fázové velikosti.

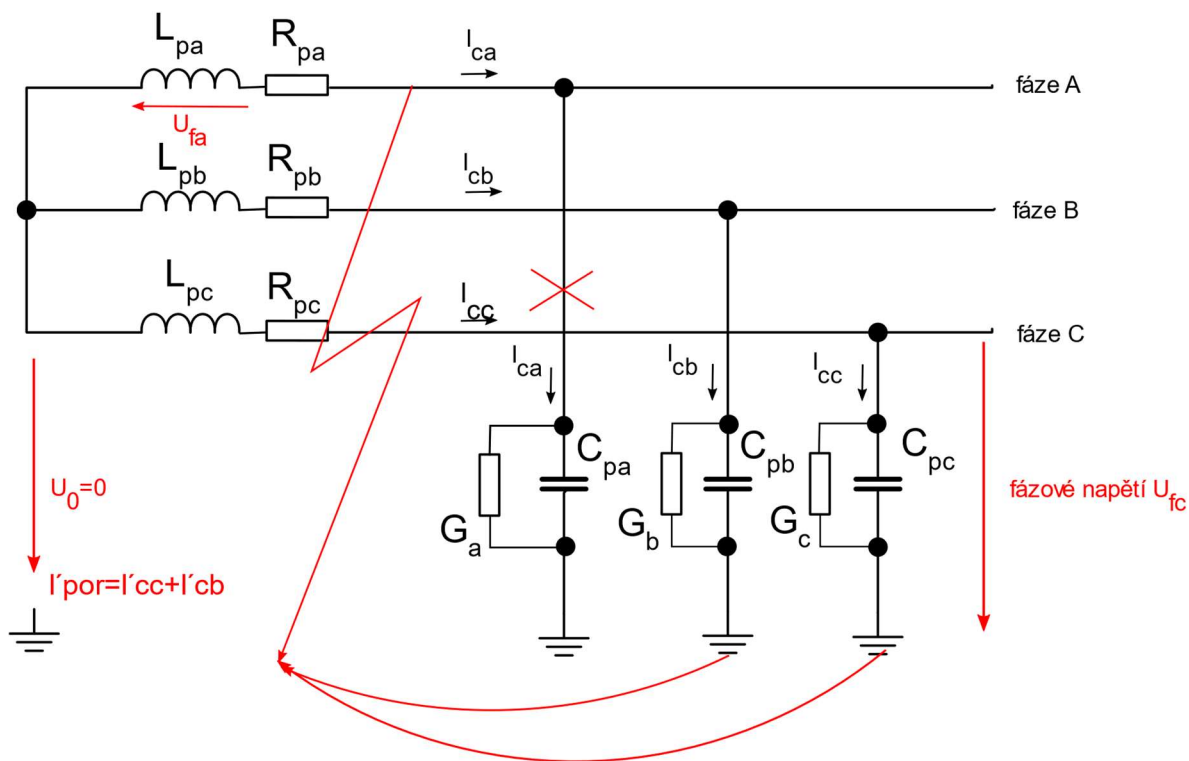
$$I_{ca} = I_{cb} = I_{cc} \quad (2.1)$$

$$I_{ca} + a^2 \cdot I_{cb} + a \cdot I_{cc} = 0 \quad (2.2)$$

Poté se rovnají i kapacitní proudy jednotlivých fází. Pokud tyto proudy sečteme vektorově výsledek je roven nule.



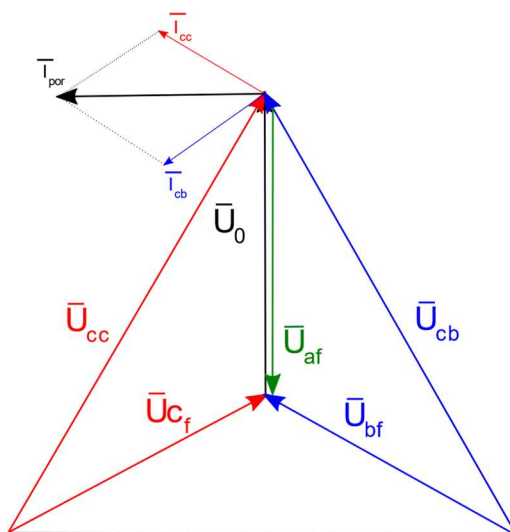
Obr. 2.3 Fázorový diagram napětí a proudu v symetrické síti



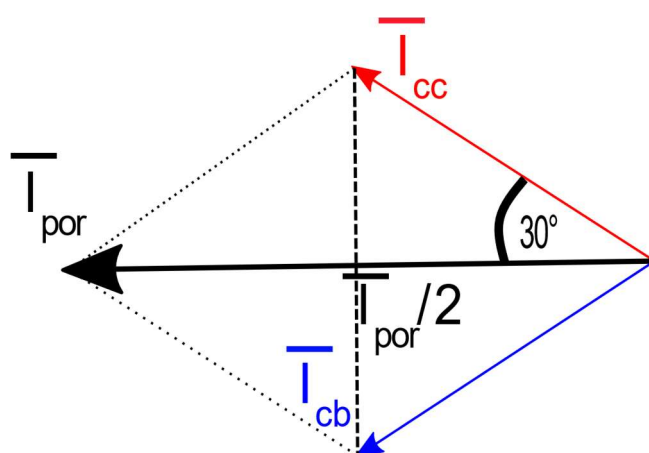
Obr. 2.4 Schéma izolované soustavy s jednofázovou poruchou na fázi A

V Obr. 2.4 je patrná jednofázová porucha na fázi A a jsou patrné toky kapacitních proudů ze zdravých fází. Výsledná velikost poruchového proudu je součet kapacitního proudu ve fázi B a ve fázi C.

Výsledný kapacitní proud fází B a fází C je zvýšen z důvodu zvýšení napětí na sdruženou hodnotu. Pro zjednodušení výpočtu poruchového proudu jsem jako příčný parametr sítě uvažoval pouze kapacitu vůči zemi. [5]



Obr. 2.5 Fázorový diagram napětí a proudů v symetrické síti při ZS na fázi A



Obr. 2.6 Fázor poruchového proudu v symetrické síti

$$I_{cc} = I_{cb} = \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \omega \cdot C \quad (2.3)$$

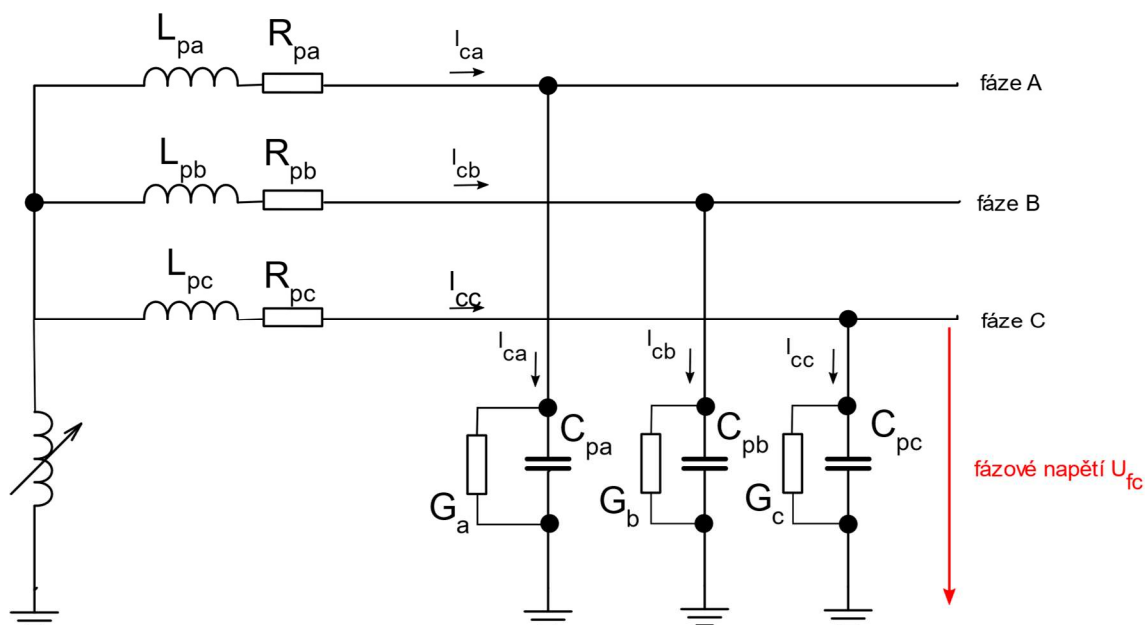
$$\frac{I_{por}}{2} = I_{cc} \cdot \sin 30^\circ = I_{cc} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.4)$$

$$I_{por} = I_{cc} \cdot \sqrt{3} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot U_f \cdot \omega \cdot C = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C \quad (2.5)$$

2.3 Zemní spojení v kompenzované síti

Jelikož poptávka po kvalitní a spolehlivé dodávky elektrické energie neustále narůstá, z důvodu důležitosti nepřetržité dodávky elektřiny. Je tudíž ve světě u sítí vysokého napětí stále více rozšířenější rezonanční uzemnění při zapojení nulového bodu distribučního transformátoru. Hlavním faktorem, usnadňující zlepšení kvality elektrické energie tohoto provedení sítí, je samozhášivá povaha oblouků vzniklých při poruše.

Jak je již výše uvedeno, u sítí, které mezi uzel transformátoru a zem mají připojenou zhášecí tlumivku, dochází ke kompenzaci poruchového proudu na zbytkový poruchový proud. Kompenzované sítě jsou typem vn sítí, které jsou v České republice nejrozšířenější. Obrovskou výhodou je možnost soustavu provozovat s poruchou, aniž by došlo k omezení dodávky elektrické energie ke konečnému odběrateli. [1]

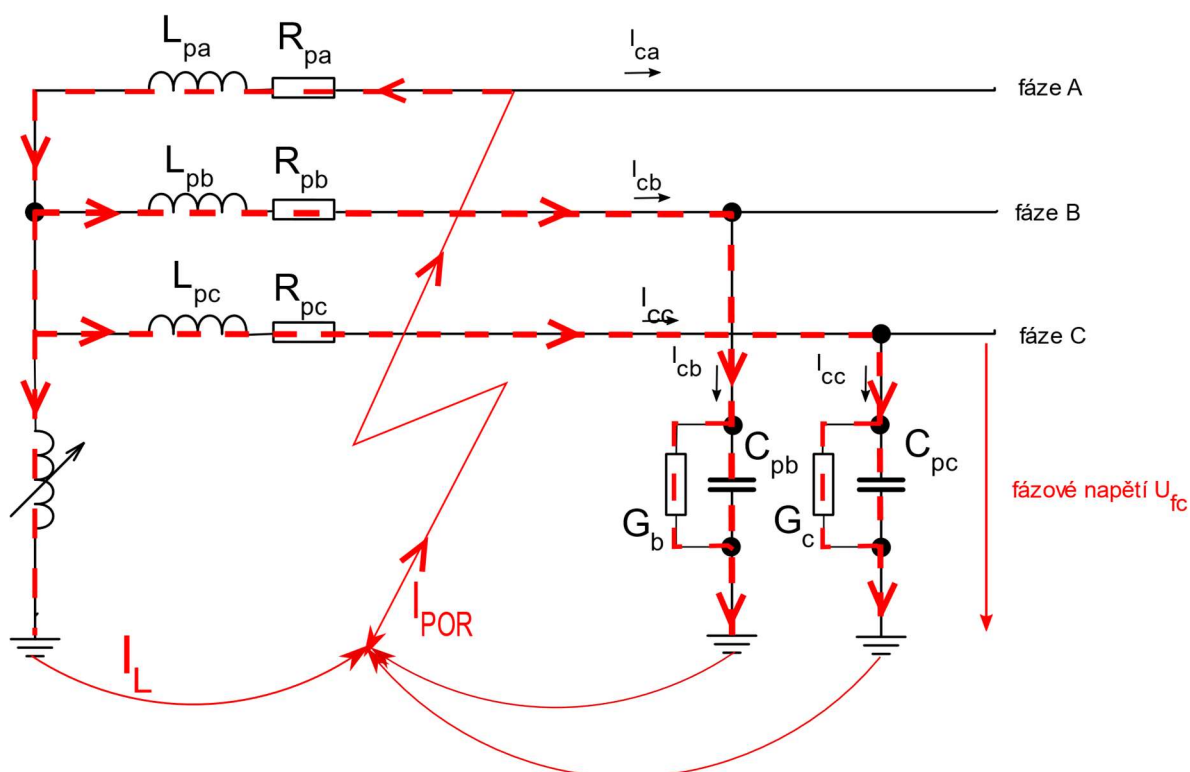


Obr. 2.7 Kompenzovaná soustava

Proud úplně nezaniká z toho důvodu, že každá tlumivka má parazitní odpor, a ne pouze indukčnost. Další důvod je ten, že pokud by proud byl nulový nebylo by potom možné lokalizovat zemní spojení. Proto tlumivka není naladěna tak aby byl kapacitní proud úplně vykompenzován, ale aby procházel místem poruchy zbytkový kapacitní proud o velikosti zhruba 3-10 % původního poruchového proudu a je převážně činného charakteru.

Zhášecí tlumivka se tedy obvykle ladí k hodnotě blízké rezonanci, z důvodu kompenzování 1. harmonické. Vyšší harmonické tedy mohou dosahovat vyšších hodnot, než je velikost zbytkového poruchového kapacitního proudu. Z důvodu vyšších podílů 3., 5. a 7. harmonické místem poruchy, především v hustých distribučních sítích, i po vykompenzování teče relativně velký proud. [1]

Tímto způsobem lze provozovat distribuční síť s kapacitním proudem do 100 A v případě venkovního vedení a do 450 A pokud se jedná o kabelové síť. [1]



Obr. 2.8 Kompenzovaná síť s poruchou na fázi A

Na Obr. 2.8 je znázorněno zemní spojení na fázi A a následně jsou v něm vyznačeny toky proudů jednotlivými fázemi a zemí. [5]

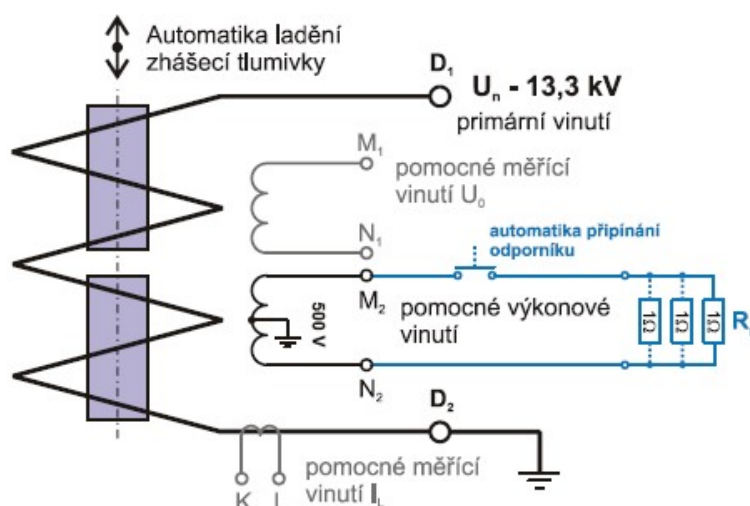
$$I_L = I_{POR} = \frac{U_f}{\omega \cdot L} = 3 \cdot \omega \cdot C \cdot U_f \quad (2.6)$$

Z rovnice 2.6 lze vyjádřit velikost indukčnosti, která se bude nastavovat na zhášecí tlumivce, tak aby došlo k rezonanci, a tudíž k vykompenzování kapacitního poruchového proudu. [5]

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} \quad (2.7)$$

2.3.1 Zhášecí tlumivka

Jak již bylo napsáno výše, zhášecí tlumivka se připojuje mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavu umístěnou v rozvodně vysokého napětí. V případě, že by uzel transformátoru nebyl vyveden, zhášecí tlumivka se připojuje buď k uměle vytvořenému uzlu třífázové nulové tlumivky anebo k uzlu nezatíženého pomocného transformátoru v zapojení YNd1, které jsou v rozvodně vysokého napětí připojeny k přípojnicím hlavní napájecí rozvodny, a to se samostatnou výstrojí tak jako odběrová odbočka. [1]

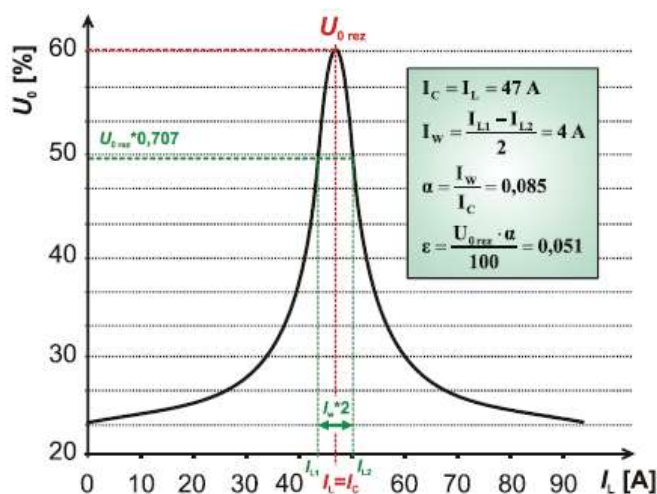


Obr. 2.9 Principiální schéma zhášecí tlumivky [1]

Na Obr. 2.9 je vyobrazena zjednodušeně zhášecí tlumivka, která je sestavena z primárního vinutí, následně se dvěma měřícími vinutími a jednoho výkonového vinutí. Primární vinutí, u kterého je nominální hodnota napětí 13,3 kV, je pomocí automatiky laděno do požadovaného stavu kompenzace. První měřící vinutí mezi svorkami K a L slouží k připojení PTP určeného k měření kompenzačního proudu. Druhé měřící vinutí, konkrétně svorky M₁N₁ se využívá k měření netočivé složky napětí U₀.

Důležitým prostředkem pro správnou kompenzaci poruchových proudů je znalost rezonanční křivky distribuční soustavy. Příklad rezonanční křivky je zobrazen na obrázku 2.10. Rezonanční křivka ukazuje závislost uzlového napětí U₀ na velikosti kompenzačního proudu I_L. Rezonanční křivka je zjišťována pomocí postupného ladění tlumivky připojené do soustavy bez zemního spojení při průběžném měření hodnot I_L a U₀. [1]

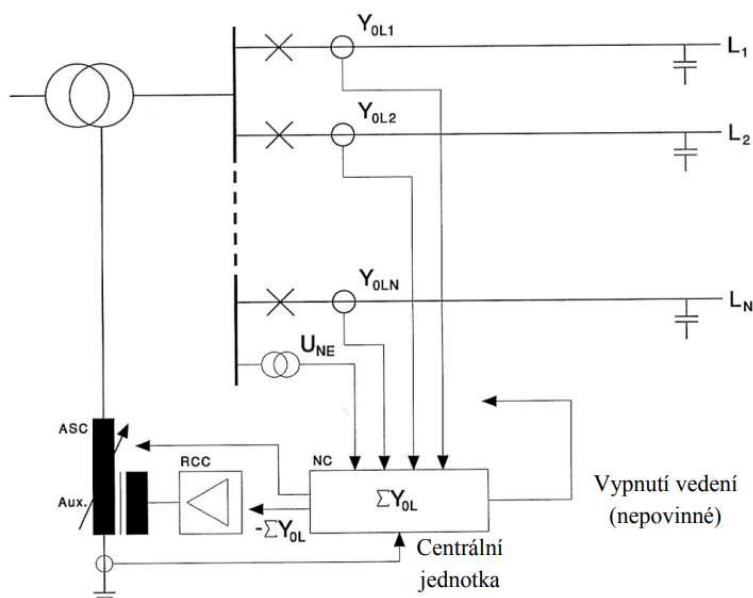
K ladění velikosti indukčnosti zhášecí tlumivky dochází v distribučních sítích ČR většinou automaticky. Hlavní prioritou ladění je nastavit indukčnost na takovou hodnotu, aby kapacitní poruchový proud I_{POR} byl co nejmenší. Jakmile se tohoto bodu dosáhne, jedná se tedy o rezonanční bod distribuční soustavy, protože napětí na tlumivce je maximální. Ladění je prováděno automaticky při změně konfigurace sítě, tzn. Připnutí či odepnutí jednotlivých vývodů rozvodny. Aby se ale zamezilo spínání ladění při přechodových dějích v soustavě je nastaven určitý časový interval, kdy automatika na změnu konfigurace nezareaguje. [1]



Obr. 2.10 Příklad rezonanční křivky zhášecí tlumivky [1]

2.3.1 Systém Swedish Neutral

Systém vyvinutý firmou Swedish Neutral, byl poprvé uveden do provozu v roce 1992. Systém, který nese jméno RCC slouží ke kompenzaci zbytkových proudů. Nejedná se pouze o zhášecí tlumivku zapojenou mezi uzlem transformátoru a zemí, ale nýbrž o celý systém, jehož je tato tlumivka součástí. Zařízení, které nastavuje tlumivku rychle do paralelní rezonance se označuje GFN (v českém překladu kompenzace zemní poruchy). K zařízení GFN se mohou připojit moduly RCC, EFL (zemní lokalizace poruchy) a další. Systém Swedish Neutral je společně s modulem GFN používán jako rychlá ochrana sloužící k detekci zemního spojení, následně lokalizaci poruchy a kompenzaci zbytkového poruchového proudu. [6]

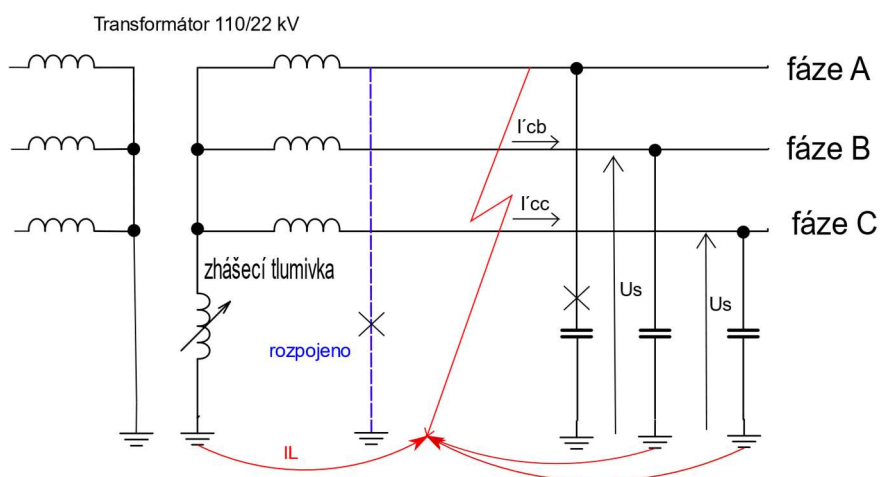


Obr. 2.11 Zjednodušené schéma Swedish Neutral [1]

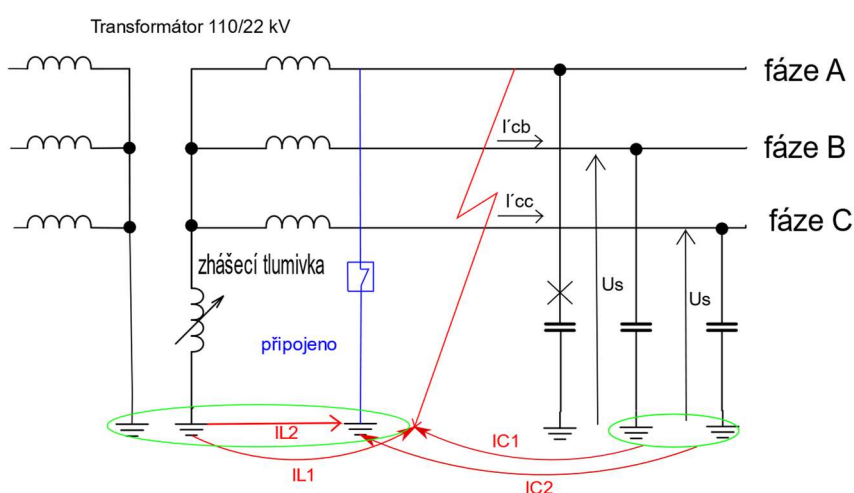
Pozitivem tohoto systému je bezpochyby rychlé ladění, a to v řádech sekund. Dále dochází ke kompenzaci nejen kapacitního proudu, ale i činného proudu. Stejně jako zhášecí tlumivka ladí na maximum napětí U_0 . [2]

2.3.1 Systém s automatikou přizemnění postížené fáze „shuntování“

Tento systém je na rozdíl od výše uvedeného typu Swedish Neutral docela jednoduchá a spolehlivá metoda při vzniku trvalého zemního spojení. Při trvalém zemním spojení dojde po krátké době k přizemnění postížené fáze přes odporník s malou hodnotou elektrického odporu, který je umístěn v napájecí rozvodně. Pomocí „shuntu“ tedy vznikne paralelní cesta, která principem proudového děliče rozdělí proud v poměru velikostí impedancí. Impedance v rozvodně je totiž mnohem menší nežli v místě poruchy, proto dojde k přenesení většiny poruchového proudu do rozvodny. Na rozdíl od Swedish Neutral tento systém není schopen kompenzovat zbytkový proud. [2]



Obr. 2.12 Distribuční síť bez připojeného shuntu



Obr. 2.13 Distribuční síť s připojeným shuntem v transformovně 110/22 kV

3 Identifikace postiženého vývodu zemním spojením

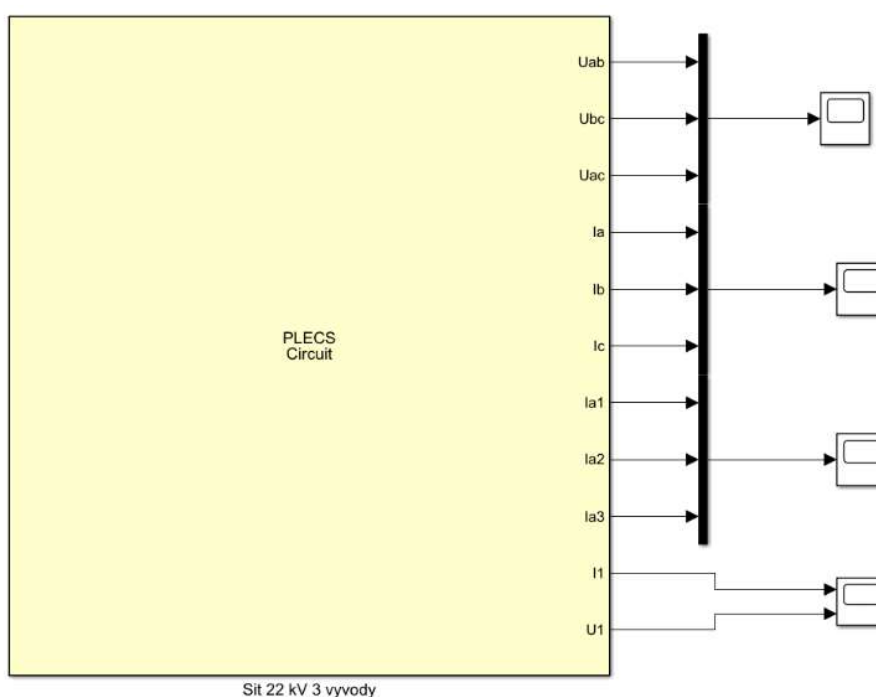
Navzdory tomu, že kompenzace přináší provozní výhody zemní ochrana sítě se stane komplikovanější nežli u sítí izolovaných. Na základě zkušeností a analýzy záznamů poruch je charakter zemní poruchy v kompenzovaných sítích přerušovaný, tzn. oblouk velmi rychle zhasne, ale z důvodu snížené dielektrické odolnosti poškozené izolace dojde k opětovnému zapálení oblouku. Tyto poruchy mají obvykle malý elektrický odpor v místě poruchy, jedná se tedy o kovové zemní spojení, a musí tedy být spolehlivě detekovány zemní ochranou. Jelikož, ale může dojít k vysoko ohmickým zemním spojení, např. na dřevěném stožáru linky vysokého napětí, musí být ochrana dostatečně citlivá, aby došlo k detekování i tohoto charakteru zemní poruchy.

Identifikace poškozeného vedení se provádí buď pomocí statických metod nebo metod dynamických. U metod statických je výhodou, že je možné analyzovat je opačně. Naproti tomu při použití metody dynamické je potřeba poruchu bezpečně identifikovat okamžitě v době jejího vzniku. Výhodou metod statických je tedy možnost opakování identifikace vývodu nezávisle na čase vzniku zemní poruchy. [1]

Ve své práci jsem se zaměřil jak na metodu statické, tak i na jednu metodu dynamickou. Mezi mnou zpracované metody statické jsou metoda filtru napětí, u které je principem měření fázových napětí a následným filtrováním nulové složky těchto napětí, dále je to metoda filtru proudu, kdy se měří nulová složka proudu protékající jednotlivými vývody. Další metodu, kterou jsem popsal je založená na připojení odporníku k pomocnému výkonovému vinutí zhášecí tlumivky na krátkou dobu, tím dojde k narušení kompenzace kapacitních proudů. Jako dynamickou metodu lze považovat metoda první půl vlny, která sleduje první půlvlnu po vzniku poruchy průběhu nulových složek proudu jednotlivých vývodů.

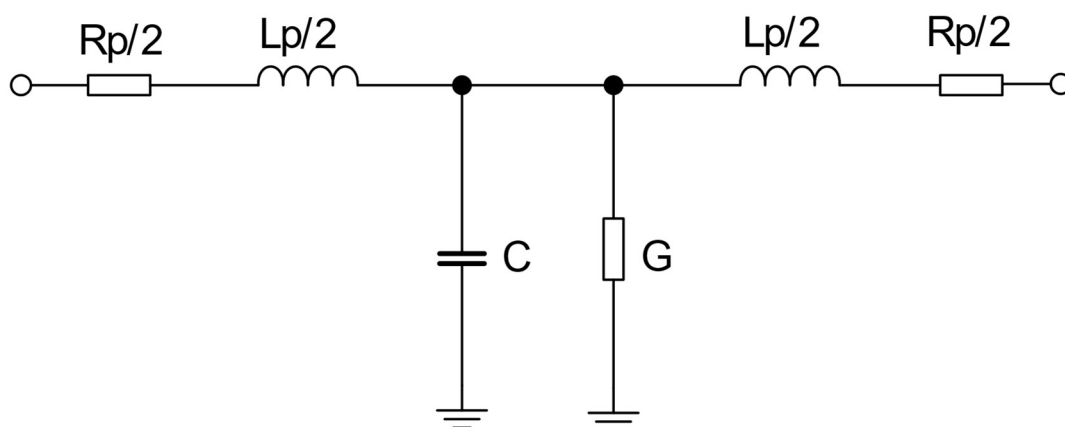
3.1 Model distribuční sítě 22 kV se třemi vývody

Model jsem osobně vytvořil pomocí programu Matlab Simulink, který byl doplněn softwarem Plecs. Rozvodnu 22 kV jsem nahradil pomocí tří jednofázových zdrojů, jejichž průběhy jsou fázově posunuty o 120° , aby odpovídaly co nejvíce realitě. Samotnou zhášecí tlumivku jsem vytvořil pomocí obyčejné cívky z knihovny Plecs a odporník jsem, který v realitě je připojován k pomocnému vinutí, umístil paralelně k samotné cívce. Vývody z rozvodny jsou o různé délce. Vývod číslo 1 má délku 30 km, vývod 2 má vzdálenost 40 km a vývod číslo 3 je dlouhý 50 km.



Obr. 3.1 Zjednodušené schéma v programu Matlab Simulink

Vývody se skládají ze dvou T článků viz. Obr. 3.2, které v simulačním modelu jsou třífázové, aby bylo možné provést v polovině vedení simulaci poruchy. Distribuční transformátor jsem pro naše účely nahradil třemi jednofázovými zdroji střídavého napětí, jejichž maximální hodnota činí 17,96 kV, tudíž maximální hodnotu fázové hodnoty napětí pro systém 22 kV. Zátěž jsem na konci vedení provedl odporovou zapojenou do hvězdy.



Obr. 3.2 Část vedení jedné fáze v modelu

Simulační model je samozřejmě osazen měřícími přístroji, které měří jak fázové hodnoty tak i sdružené hodnoty elektrických veličin. Každý vývod je na začátku osazen součtovým transformátorem proudu. Dále paralelně ke zhasací tlumivce je umístěn voltmetr, který měří fázovou hodnotu napětí U_0 .

3.2 Výpočet velikosti indukčnosti zhasací tlumivky

Principem nastavení velikosti indukčnosti je rezonance. Velikost poruchového proudu je na rozdíl od zkratu, kdy záleží na místě poruchy, tedy vzdálenosti od rozvodny k místě poruchy, je závislá na velikosti a rozmanitosti celé sítě, která je danou rozvodnou, kde se kompenzační tlumivka nachází, napájena. Tudíž do výpočtu poruchového proudu jsou uvedeny kapacity všech vývodů o plné délce.

Celková vzdálenost:

$$l = 30 + 40 + 50 = 120 \text{ (km)} \quad (3.1)$$

Poruchový proud:

$$I_p = \sqrt{3} \cdot \omega \cdot U_s \cdot C_k \cdot l = \sqrt{3} \cdot 314 \cdot 22 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 120 = 14,35 \text{ (A)} \quad (3.2)$$

Tlumivka musí tedy být o výkonu alespoň:

$$S_L = U_f \cdot I_p = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \cdot I_p = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \cdot 14,35 = 182,27 \text{ (kVA)} \quad (3.3)$$

Nastavení hodnoty samotné tlumivky:

$$I_L = I_p$$

$$\frac{U_f}{X_L} = 3 \cdot I_p$$

(3.4)

$$\frac{U_f}{\omega \cdot L} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C$$

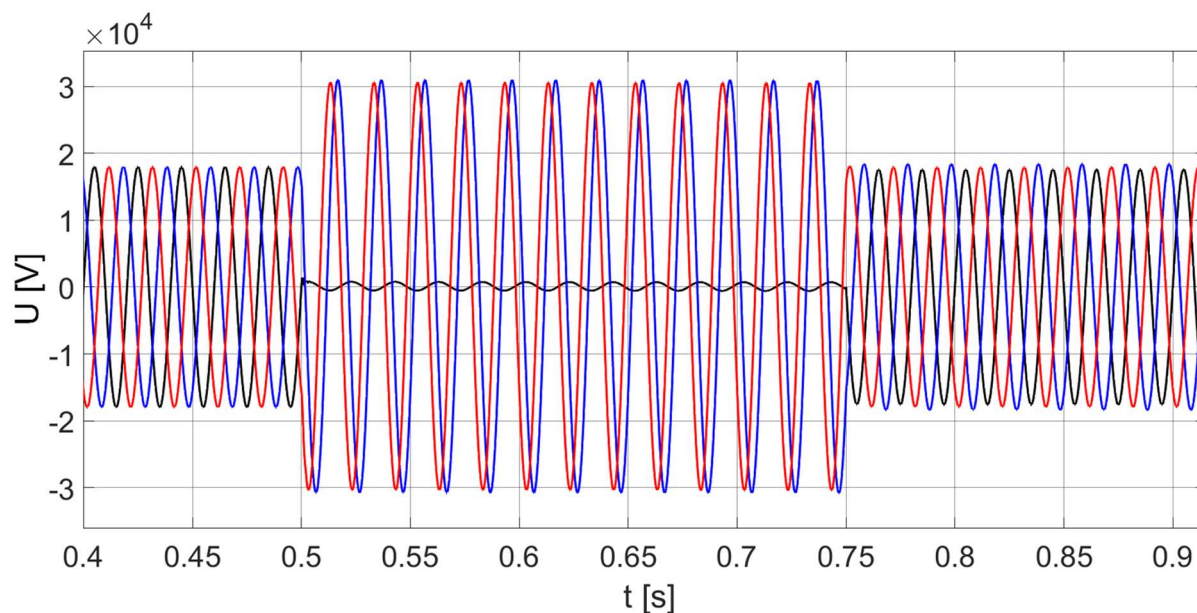
$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot 314^2 \cdot 10 \cdot 10^{-9} \cdot 120} = 2,82 \text{ (H)}$$

Cívka musí být o výkonu alespoň 182,27 kVA.

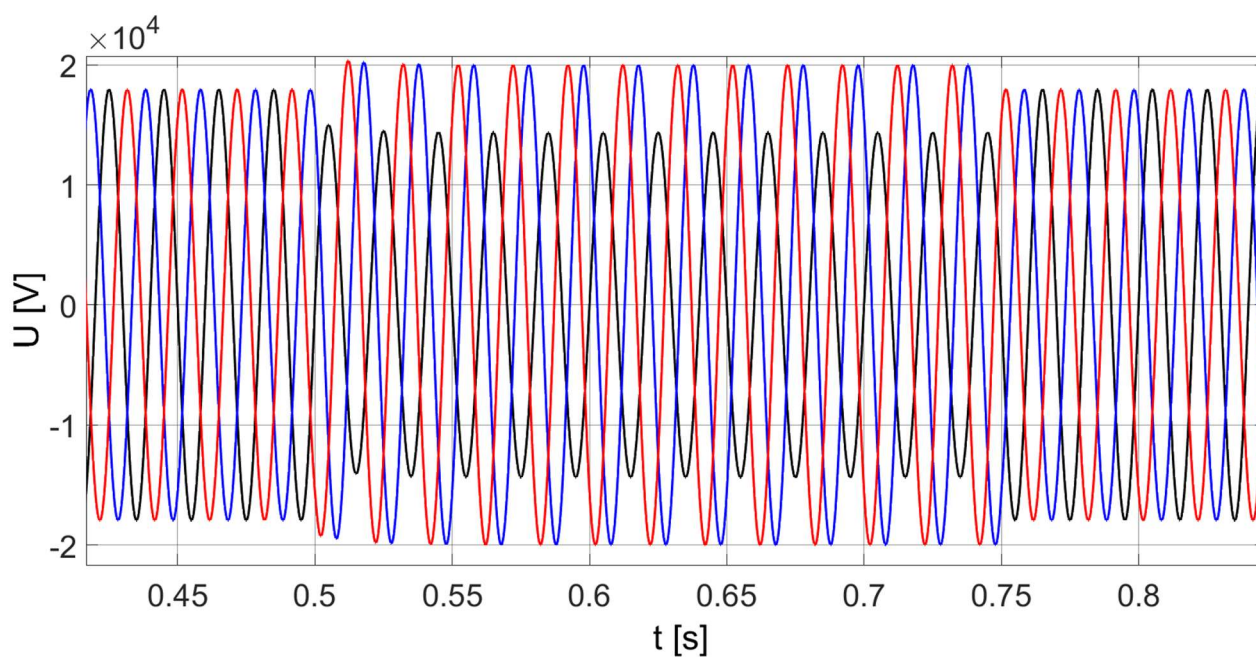
3.3 Zemní spojení v modelu

V následující podkapitole chci poukázat průběhy napětí a proudů při kovovém ZS, při ohmickém ZS a při přerušovaném ZS. Obecně pokud dojde k dokonalému zemnímu spojení $R_{\text{PORUCHY}}=0$ fázové napětí postižené fáze klesne k nule a fázové napětí dvou nepostižených fází se změní na hodnoty sdružené. V reálu je to však tak, že nikdy není porucha bez odporu, tudíž napětí poškozené fáze vůči zemi není nulové. Toto tvrzení je potvrzeno na Obr. 3.3 kde ZS nastává v čase 0,5 s a je ukončeno v 0,75 s, odpor poruchy byl 1 mΩ. Na Obr. 3.4 je znázorněn průběh napětí při odporovém ZS, kdy odpor poruchy je 1 kΩ. Na tomto průběhu je vidět, že maximální hodnota fázových napětí zdravých fází nepatrně vzrostla na cca 20 kV, na rozdíl od kovového ZS, kdy tato hodnota lehce přesahovala hladinu 30 kV. U tohoto typu ZS je

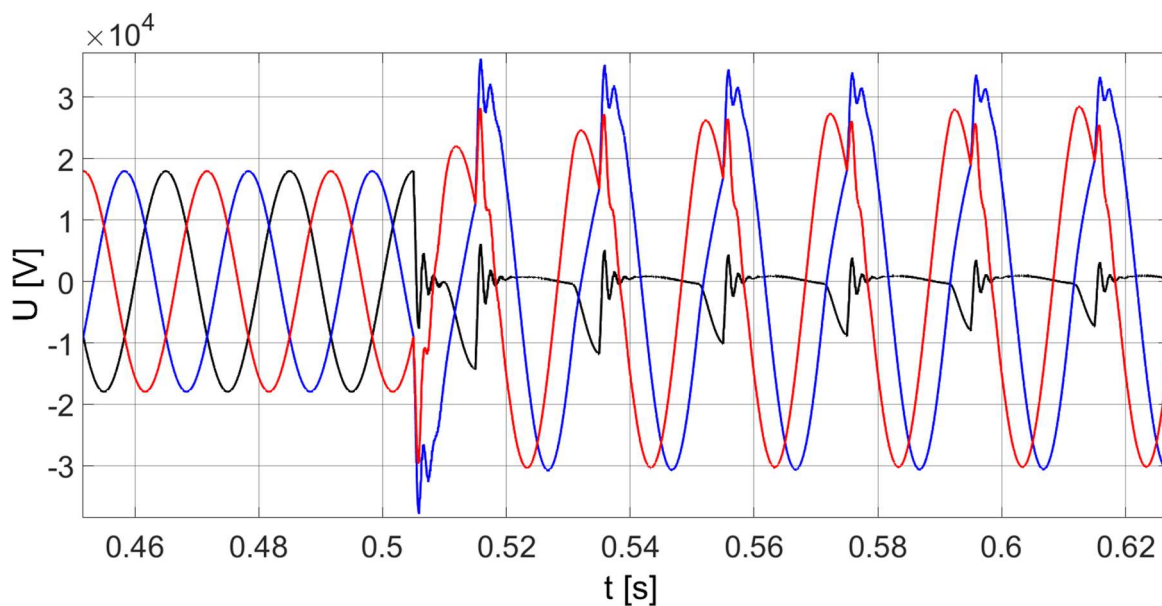
na Obr. 3.4 názorně vidět, že maximální hodnota fázového napětí porušené fáze dosahuje cca 15 kV, zhruba 85 % U_{nf} . Důvodem tohoto výsledku je úbytek napětí na oporu poruchy.



Obr. 3.3 ZS kovové průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$



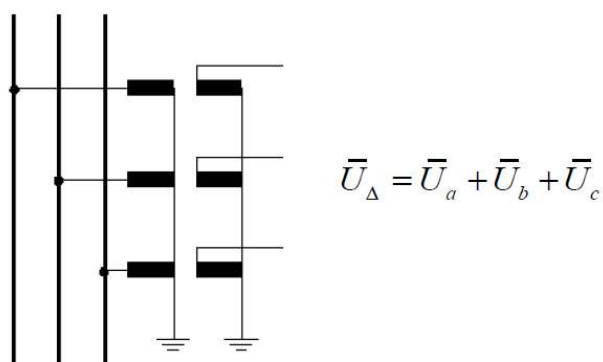
Obr. 3.4 ZS odporové průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ k}\Omega$



Obr. 3.5 ZS přerušované průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$

3.4 Metoda měření napětí

Tato metoda je založena na tom, že dochází k měření fázových napětí jednotlivých vývodů a pokud se tyto napětí sečtou poté dosáhneme netočivé složky napětí. Pokud se tyto napětí odečtou poté se dostaneme k hodnotě sdružené.



Obr. 3.6 Filtr napětí pro indikaci postiženého vývodu ZS [7]

Pro filtr napětí platí tedy rovnice:

$$\bar{U}_\Delta = \bar{U}_a + \bar{U}_b + \bar{U}_c \quad (3.5)$$

$$\bar{U}_\Delta = (\bar{U}_{a1} + \bar{U}_{a2} + \bar{U}_{a0}) + (\bar{a}^2\bar{U}_{b1} + \bar{a}\bar{U}_{b2} + \bar{U}_{b0}) + (\bar{a}\bar{U}_{c1} + \bar{a}^2\bar{U}_{c2} + \bar{U}_{c0})$$

$$\bar{U}_\Delta = (\bar{U}_{a1} + \bar{a}^2\bar{U}_{b1} + \bar{a}\bar{U}_{c1}) + (\bar{U}_{a2} + \bar{a}\bar{U}_{b2} + \bar{a}^2\bar{U}_{c2}) + (\bar{U}_{a0} + \bar{U}_{b0} + \bar{U}_{c0})$$

$$\bar{U}_\Delta = 0 + 0 + 3\bar{U}_0 = 3\bar{U}_0$$

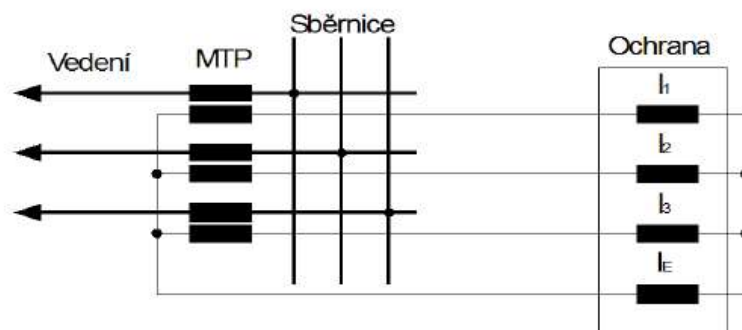
Pokud na vývodu dojde k zemnímu spojení n a fázi A platí:

$$\bar{U}_\Delta = \bar{U}_{ab} + \bar{U}_{ac} \quad (3.6)$$

$$|\bar{U}_\Delta| = |\bar{U}_{ab} + \bar{U}_{ac}| = \bar{U}_{ab} \cdot \cos 30^\circ + \bar{U}_{ac} \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot U_S \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 \cdot U_f$$

3.5 Metoda měření proudů

Jedná-li se o venkovní vedení připojí se paralelně k vývodu ke každé fázi vinutí přístrojového transformátoru proudu do součtového zapojení všech MTP. U kabelových vedení se používají tzv. průvlakové součtové MTP.



Obr. 3.7 Zapojení filtru proudu u venkovních vedení [7]

Pro filtr proudu je rovnice obdobná jako pro filtr napětí:

$$\bar{I}_{\Delta} = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (3.3)$$

$$\bar{I}_{\Delta} = (\bar{I}_{a1} + \bar{I}_{a2} + \bar{I}_{a0}) + (\bar{a}^2 \bar{I}_{b1} + \bar{a} \bar{I}_{b2} + \bar{I}_{b0}) + (\bar{a} \bar{I}_{c1} + \bar{a}^2 \bar{I}_{c2} + \bar{I}_{c0})$$

$$\bar{I}_{\Delta} = (\bar{I}_{a1} + \bar{a}^2 \bar{I}_{b1} + \bar{a} \bar{I}_{c1}) + (\bar{I}_{a2} + \bar{a} \bar{I}_{b2} + \bar{a}^2 \bar{I}_{c2}) + (\bar{I}_{a0} + \bar{I}_{b0} + \bar{I}_{c0})$$

$$\bar{I}_{\Delta} = 0 + 0 + 3\bar{I}_0 = 3\bar{I}_0$$

Pro vývod s poruchou na fázi A platí:

$$\bar{I} = \bar{I}_{cb} + \bar{I}_{cc} - \bar{I}_{cpor} \quad (3.4)$$

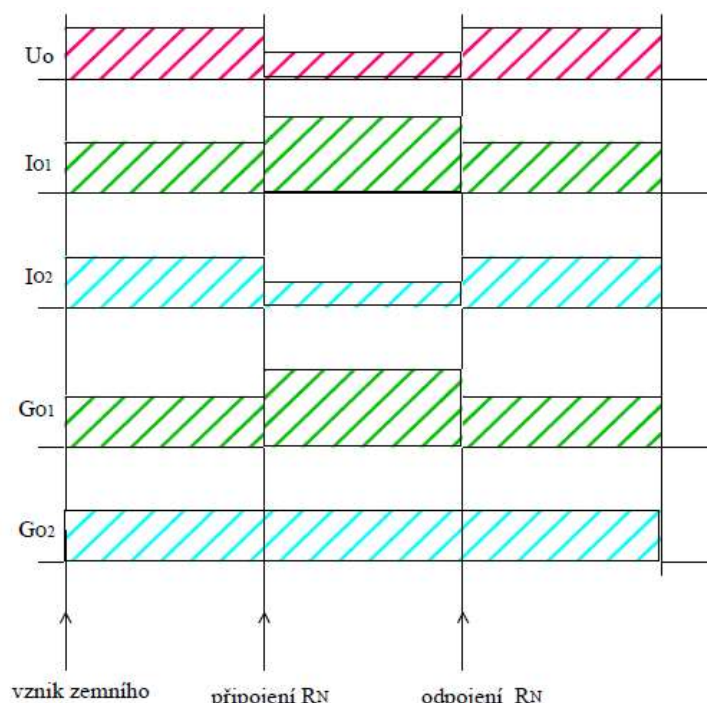
Pro vývod bez poruchy platí:

$$\bar{I} = \bar{I}_{cb} + \bar{I}_{cc} \quad (3.5)$$

3.6 Metoda připojení odporníku

Pokud se jedná o síť izolovanou používá se tzv. admitanční princip, který je založený na tom, že dochází k vyhodnocení pouze jalové složky admittance, kterou je kapacitní susceptance B_0 . Kapacitní susceptance je přímo úměrná změně jalových složek poruchových zemních proudů. U této metody dochází právě k porovnávání B_0 , kdy vývod s nejvyšším nárůstem kapacitní susceptance je označen jako vývod se zemní poruchou. Citlivost této metody je vyšší nežli u výše uvedených metod, a to z důvodu, že lze snížit prahovou hodnotu jmenovitého napětí U_N , kdy dojde k detekci ZS až na 15–20 % fázové hodnoty napětí. Tudíž lze identifikovat i vysoko ohmické zemní spojení. [7]

Pokud jde o síť kompenzovanou vyhodnocuje se činná složka admitance, tudíž konduktance G_0 odtud konduktanční princip. Konduktance je úměrná změně činných složek poruchových zemních proudů. U této metody se využívá pro zvýšení činné složky zemního proudu odporník, hodnota odporníku zhruba $0,2\Omega$, který je připojen k výkonovému samotné kompenzační tlumivky.

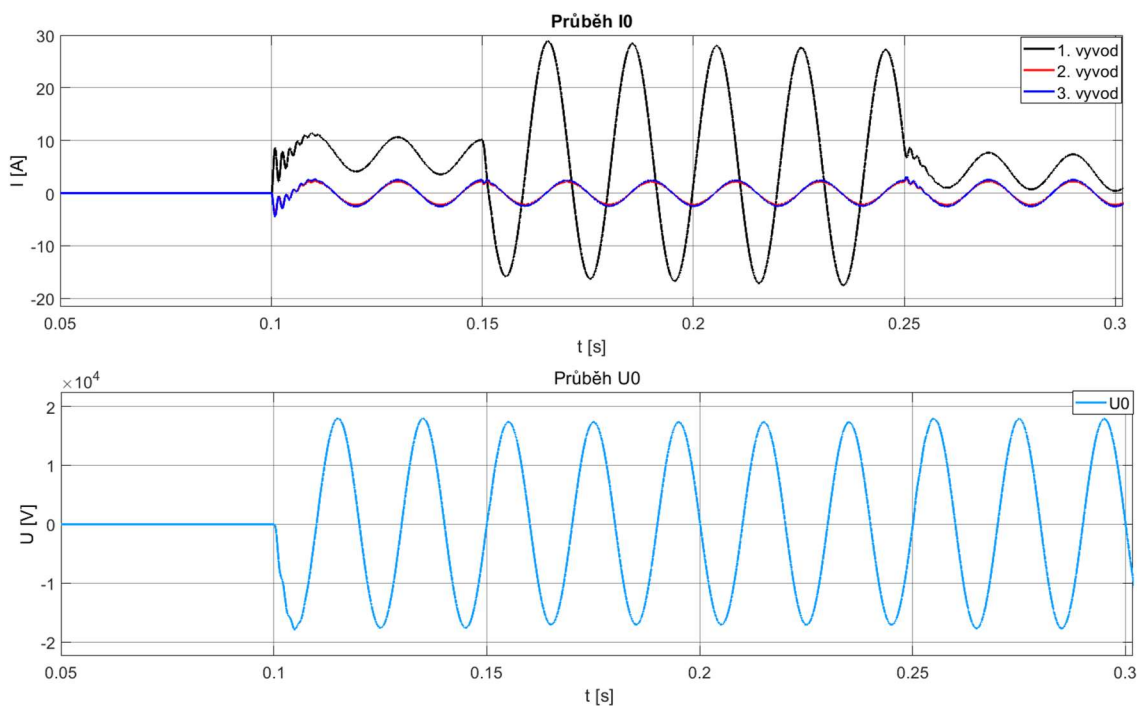


Obr. 3.8 Konduktanční princip [6]

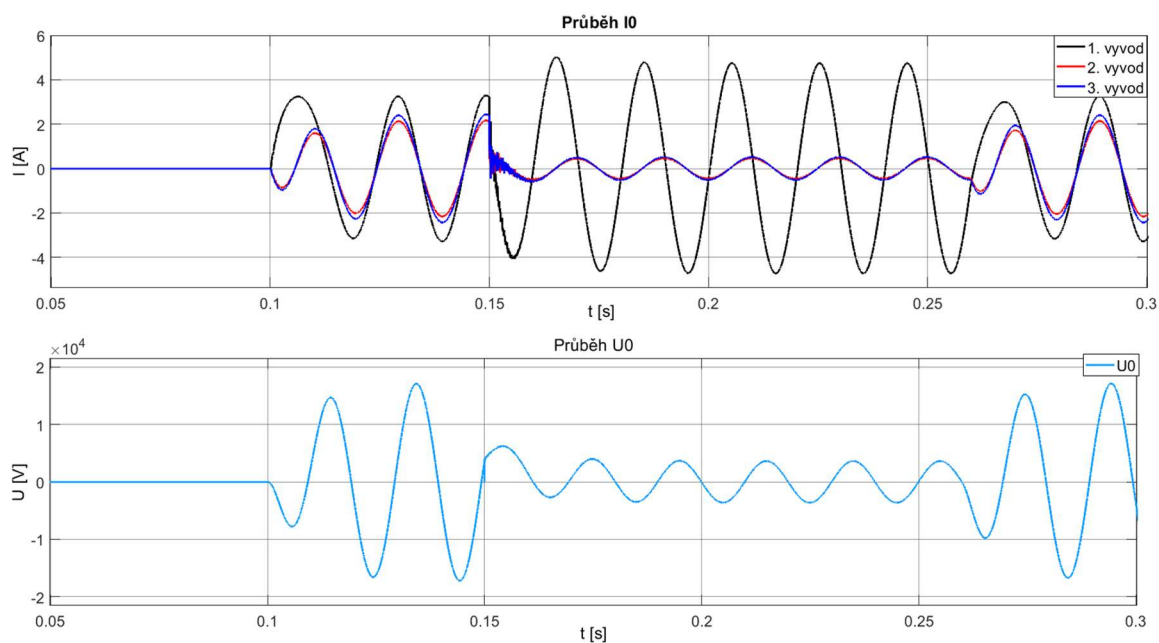
Dle Obr. 3.8 je vidět, že pro nepostižený vývod (index 2) se konduktance G_{02} nemění, zatímco po připojení odporníku R_N se u postiženého vývodu (index 1) konduktance G_{01} zvýšila.

Pomocí vytvořeného modelu distribuční sítě se třemi vývody na hladině 22 kV je možné níže zobrazit, jak tato metoda ve skutečnosti funguje. V provozu se využívá zpoždění automatiky v řádu sekund k odfiltrování mžikových zemních spojení. V modelu je to vytvořeno pomocí spínače odporníku, který je výkonový a má hodnotu $0,2\Omega$, připojeného k pomocnému vinutí kompenzační tlumivky. V modelu je čas, kdy dojde k poruše 0,5 sekundy a k připojení odporníku nastaven na hodnotu 0,75 sekundy, tudíž 0,25 sekundy od vzniku poruchy, v reálu je to, ale zhruba 10x delší časový interval.

Jakmile dojde k připojení odporníku, vývodem, který je zasažen poruchou, protéká skrze součtový transformátor proudu, který v simulaci je nahrazen 3 ampérmetry, jejichž signály jsou pomocí součtového operátoru sečteny a tím získám nulovou složku protékajícího proudu, vyšší hodnota proudu nežli u vývodů, které jsou v pořádku bez poruchy.



Obr. 3.9 Připojení odporníku $R_{PORUCHY}=1m\Omega$



Obr. 3.10 Připojení odporníku $R_{PORUCHY}=1k\Omega$

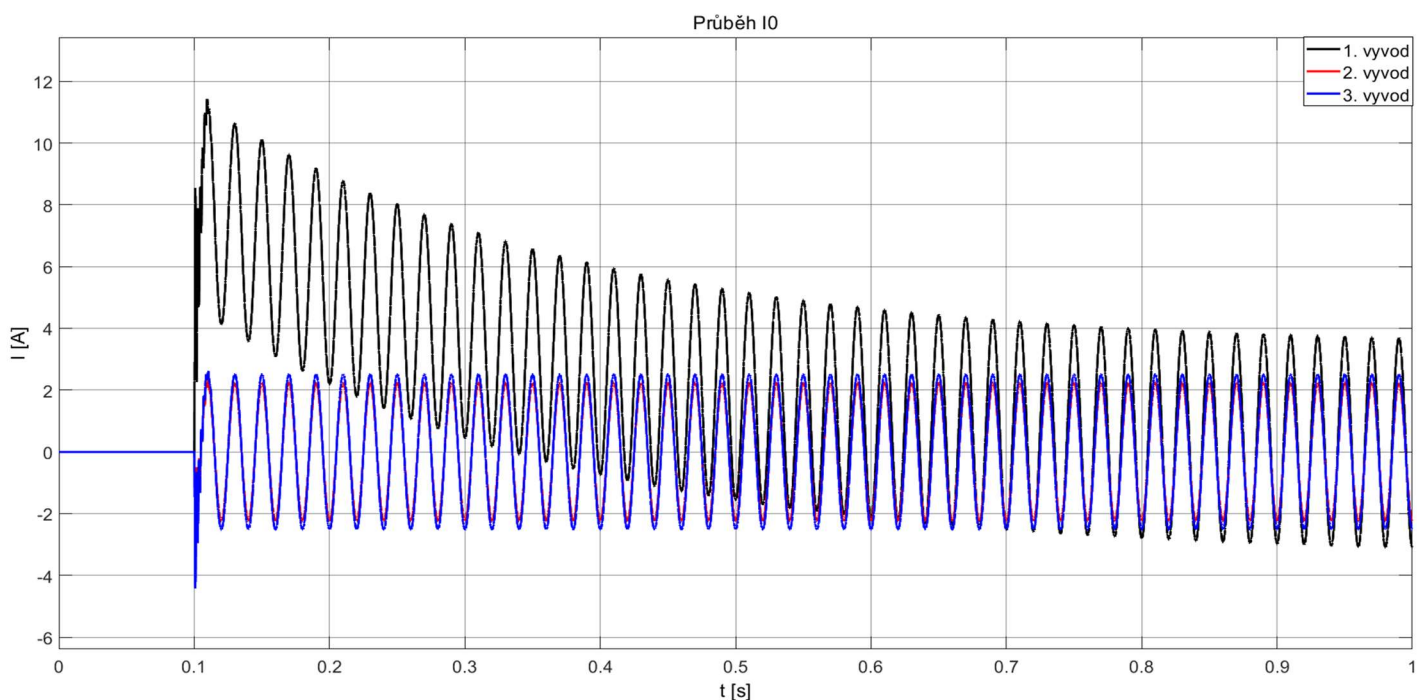
Na Obr. 3.9 jsou znázorněny průběhy proudů všech tří vývodů v horní části a ve spodní části je průběh napětí U_N na kompenzační tlumivce. V čase 0 s až 0,1 s je bezporuchový provoz sítě, v čase 0,1 s dochází na vývodu č.1 (černá barva) k nízko ohmické zemní poruše vzdálené od rozvodny a blízko zátěži, tím pádem se napětí U_0 pohybuje okolo 100 % fázové hodnoty jmenovitého napětí sítě. V čase 0,15 s je poté k pomocnému vinutí připojen odporník, vzápětí tedy narůstá činný proud protékající postiženým vývodem, po čase 0,1 s, tzn. v čase 0,25 s dochází k odpojení odporníku a dochází opět ke snížení proudu. Ochrana tedy může bezpečně odpojit postižený vývod od rozvodny vysokého napětí. Problémem, ale může být, pokud ZS není nízko ohmické, ale odpor poruchy je v řádech $k\Omega$, tento typ poruchy je znázorněn na Obr. 3.10.

V tomto případě totiž změna velikosti nulové složky proudu u postiženého vývodu není tak razantní a zřejmá jak u případu výše uvedeného. Tudíž může být dosti problematické pro ochranu bezpečně vybavit postižený vývod.

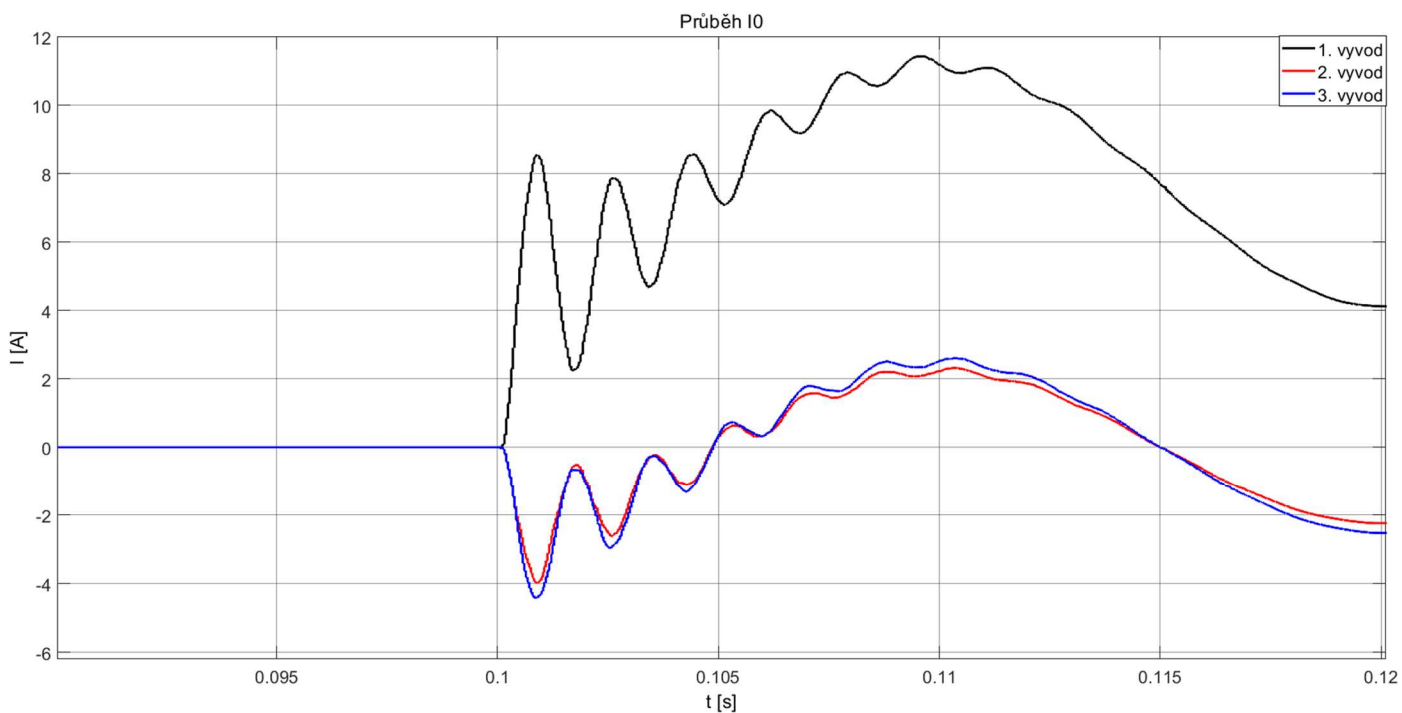
Tato metoda je tedy dobře použitelná, pokud nastane ZS kovového typu tzn. že $R_{PORUCHY}$ by se měl pohybovat maximálně v jednotkách Ω .

3.7 Princip směru transientu po vzniku ZS

Tato metoda je založena na netočivé složce proudu protékajícím jednotlivými vývody rozvodny vysokého napětí. Ve skutečnosti jde o to, že u postiženého vývodu v důsledku vybíjení kapacit nepostižených vývodů do místa poruchy, je průběh v proti fázi vůči zdravým vývodům rozvodny. Metodu první půl vlny jsem pomocí modelu sítě se třemi vývody, který je vyobrazen výše, provedl pro kovové zemní spojení ($R_{PORUCHY}$ je $1\text{ m}\Omega$) a pro odporové zemní spojení ($R_{PORUCHY}$ je $1\text{ k}\Omega$).

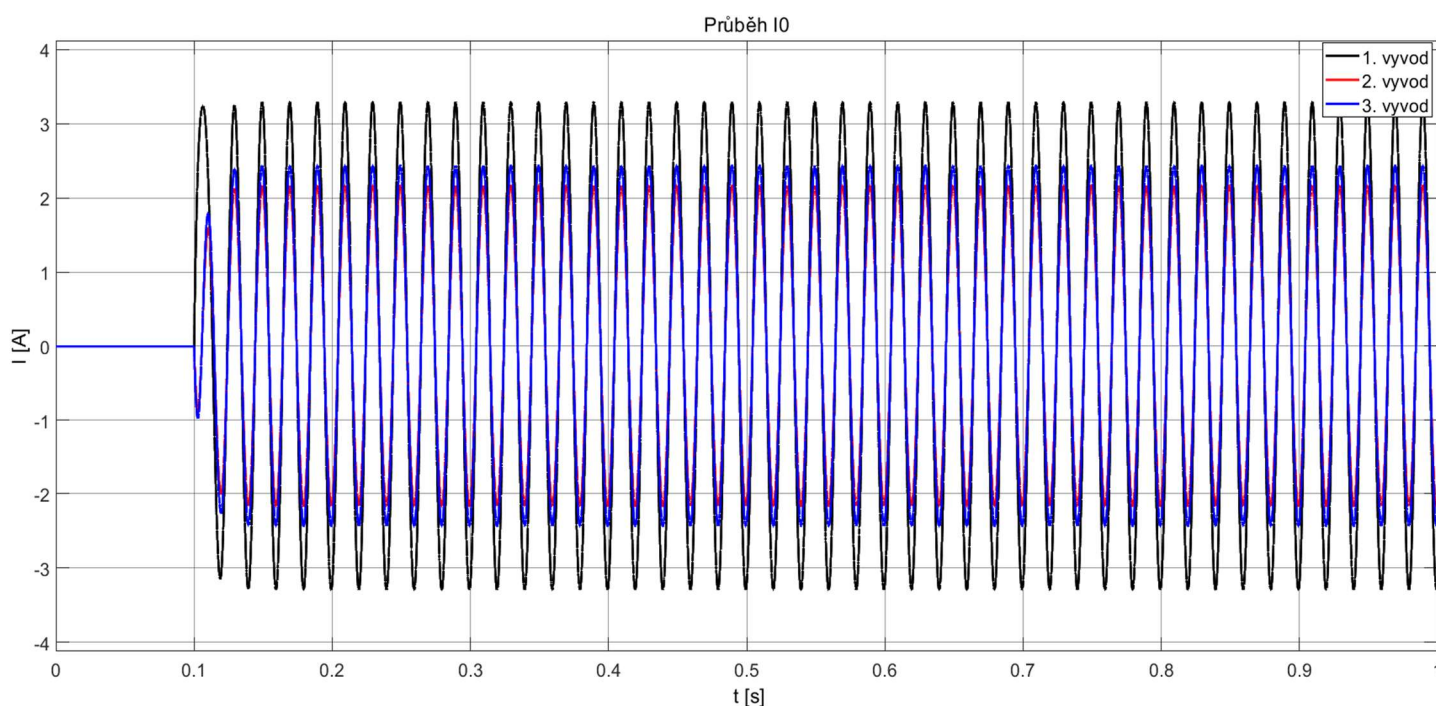


Obr. 3.11 Průběh nulové složky proudu během vzniku ZS při $R_{PORUCHY}=1\text{ m}\Omega$



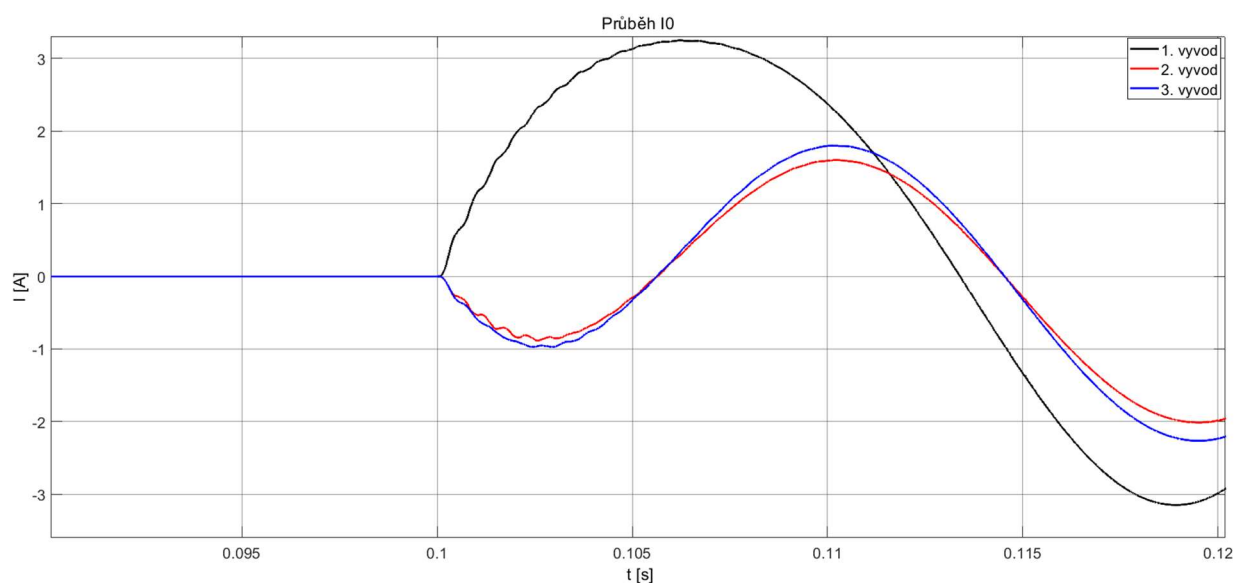
Obr. 3.12 Detail transientu při $R_{PORUCHY}=1\text{ m}\Omega$

Z Obr. 3.11 je patrné, že v době vzniku zemní poruchy tzn. v čase 0,1 s dochází k přechodovému ději způsobeným vybitím kapacity postižené fáze do kapacit zdravých fází. Pomocí nulové složky proudu jsme poté schopni bezpečně identifikovat poškozený vývod rozvodny, jelikož jak je patrné z Obr. 3.12 u poškozeného vývodu je průběh transientu v proti fázi vůči ostatním vývodům, které nejsou zasaženy ZS.

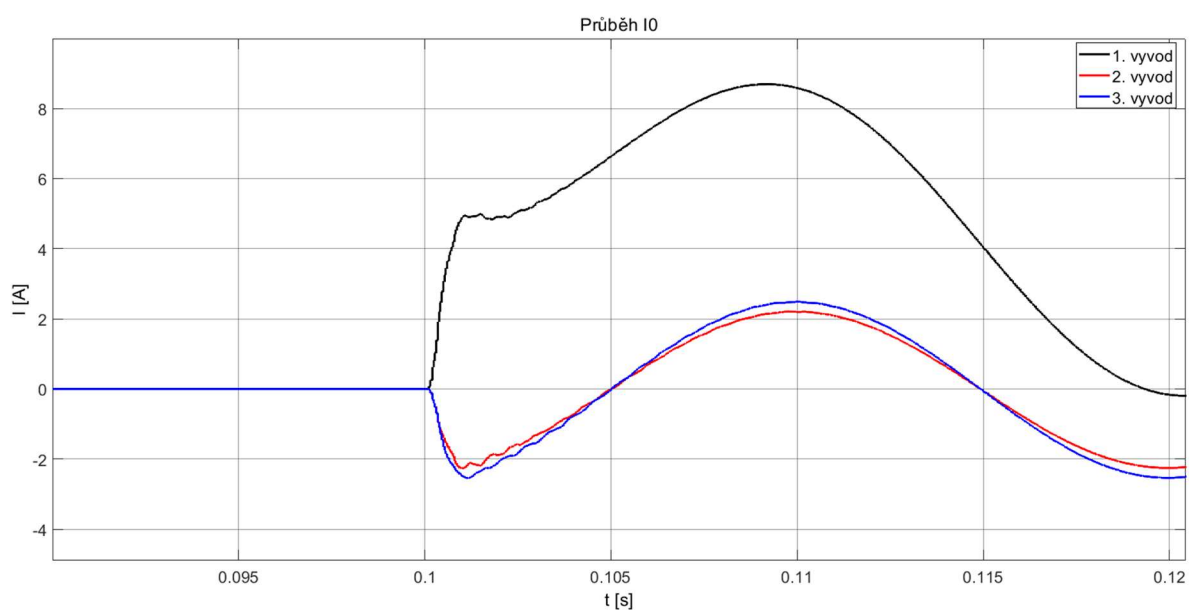


Obr. 3.13 Průběh nulové složky proudu během vzniku ZS při $R_{PORUCHY}=1$ k Ω

Pokud dojde k poruše odporového charakteru, poté díky větší hodnotě elektrického odporu dojde k většímu útlumu přechodového děje, tudíž počáteční peak není dostatečně velký dokonce viz. Obr. 3.14, kdy při poruše o velikosti elektrického odporu 1000 Ω není počáteční peak ani znázorněn oproti Obr. 3.12.



Obr. 3.14 Detail transientu při $R_{PORUCHY}=1\text{ k}\Omega$



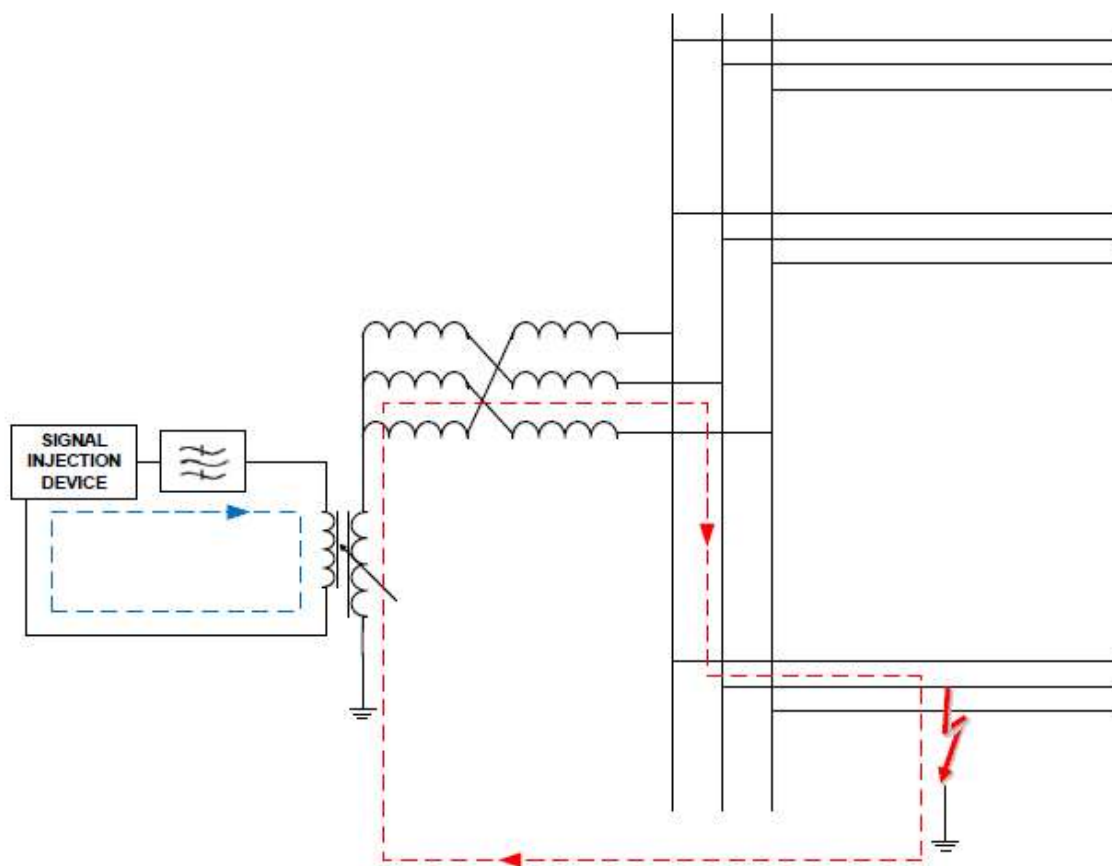
Obr. 3.15 Detail transientu při $R_{PORUCHY}=100\ \Omega$

Pokud porovnáme průběhy pro kovové zemní spojení viz. Obr. 3.12 a pro odporová ZS viz. Obr. 3.14 a Obr. 3.15 lze bezpečně poškozený vývod rozpoznat pouze pro kovové zemní spojení, kdy počáteční nárazová hodnota nulové složky proudu je dostatečně velká.

4 Lokalizace poruchy v distribuční síti

4.1 Lokalizace zemního spojení pomocí injektáže proudu

Pomocí modelu distribuční sítě viz. Obr. 3.1 jsem vytvořil možnost lokalizace ZS. Tento způsob lokalizace je založen na injektáži proudu, v modelu je vytvořen pomocí proudového zdroje, který injektuje proud o frekvenci rozdílné od hodnoty 50 Hz a násobků této frekvence (vyšších harmonických).



Obr. 4.1 Injektáž proudu [7]

V kompenzovaných nebo neuzemněných sítích je při menší frekvenci injektáže větší pravděpodobnost, že tento signál se bude uzavírat skrze odpor poruchy. Ale při použití vyšší hodnoty frekvence, jsou hodnoty, které se dají měřit vyšší, a tudíž dochází k přesnějšímu měření vzdálenosti. Injektovaný signál může být sinusového charakteru, stejnosměrný, pulzní atp.

Aby bylo snazší zpracovat injektovaný signál vzorkovací frekvence, by měla být frekvence injektáže vynásobena celým číslem. [8]

V této metodě se vzdálenost poruchy určí pomocí výpočtu, když známe napětí mezi uzlem transformátoru a zemi, proud protékající od proudového zdroje k místu zemního spojení. Pomocí Fourierova rozkladu průběhu tohoto napětí jsem byl schopen vyfiltrovat pouze hodnotu týkající se frekvence injektovaného proudu. Druhý parametr potřebný k výpočtu je velikost a úhel proudu tekoucího od proudového zdroje do místa poruchy. Jakmile tyto hodnoty znám, jsem schopný dopočítat se k vzdálenosti poruchy od rozvodny.

4.1.1 Ruční výpočet vzdálenosti

Při poruše ve vzdálenosti 30 km od rozvodny tudíž na konci vývodu č.1. Do ručního výpočtu jsem zvolil frekvenci 120 Hz a provozní indukčnost 1,2 mH/km. Hodnoty proudu a napětí jsem pomocí implementované funkce osciloskopu v Plecsu nechal projít spektrální analýzou, odkud jsem si odečetl amplitudu a fázový posun. Následně ze znalosti velikosti injektované frekvence jsem schopen dopočítat velikost impedance od rozvodny k místu poruchy. Výpočet jsem provedl i pro poruchu, která nastala v polovině vývodu tedy 15 kilometrů od rozvodny. Při výpočtu jsem uvažoval, že se jedná o kovové ZS o hodnotě $R_{PORUCHY}=1m\Omega$.

Parametry mého vedení v modelu:

Tabulka 4.1 Parametry vedení

Provozní indukčnost	L_{p1km}	1,2	mH/km
Kapacita vůči zemi	C_{p1km}	10	nF/km
Svod	G_{1km}	1	M Ω /km
Provozní elektrický odpor	R_{p1km}	0,5	Ω /km

Hodnota provozní indukčnosti v mém modelu:

$$L_{p1km} = 1,2 \text{ (mH/km)}$$

Frekvence injektáže:

$$f_{injektáž} = 120 \text{ (Hz)}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{injektáž} \quad (4.1)$$

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} = \frac{9,84399 \cdot e^{j\varphi}}{0,304905 \cdot e^{j\varphi}} = \frac{9,84 \cdot e^{j(-1,54)}}{0,305 \cdot e^{j(-2,59)}} = \frac{0,2303 - j9,83}{-0,26 - j0,16} = 16,13 + j27,82 \quad (4.2)$$

$$\bar{Z} = R + j \cdot X_L = (R_P + R_{PORUCHY}) + j \cdot X_L \quad (4.3)$$

$$j \cdot X_L = j27,82 \quad (4.4)$$

$$X_L = 27,82$$

$$X_L = \omega \cdot L_P$$

$$L_P = \frac{X_L}{\omega} = \frac{27,92}{2 \cdot \pi \cdot f_{injektáž}} = \frac{27,82}{2 \cdot \pi \cdot 120} = 0,0368 \text{ (H)} \quad (4.5)$$

Vzdálenost poruchy od rozvodny:

$$l = \frac{L_P}{L_{p1km}} = \frac{0,0368}{0,0012} = 30,67 \text{ (km)} \quad (4.6)$$

Výsledek ručního výpočtu mi vyšel 30,67 km což je o 0,67 km více, než je porucha ve skutečnosti vzdálena od rozvodny.

Dále jsem vyzkoušel výpočet, pokud je porucha v polovině vývodu č.1 tzn. pro vzdálenost 15 km, kdy hodnota provozní indukčnosti a frekvence injecktáže byla totožná.

$$\bar{Z} = \frac{\bar{U}}{\bar{I}} = \frac{9,68 \cdot e^{j\varphi}}{0,61 \cdot e^{j\varphi}} = \frac{9,84 \cdot e^{j \cdot (-2,57)}}{0,61 \cdot e^{j \cdot (-1,52)}} = \frac{-8,28 - j5,32}{0,031 - j0,61} = 8,01 - j13,95 \quad (4.7)$$

$$\bar{Z} = R + j \cdot X_L = (R_P + R_{PORUCHY}) + j \cdot X_L \quad (4.8)$$

$$j \cdot X_L = j13,95$$

$$X_L = 13,95 \quad (4.9)$$

$$L_P = \frac{X_L}{\omega} = \frac{13,95}{2 \cdot \pi \cdot f_{injecktáž}} = \frac{13,95}{2 \cdot \pi \cdot 120} = 0,0185 (H)$$

$$l = \frac{L_P}{L_{p1km}} = \frac{0,0185}{0,0012} = 15,41(km) \quad (4.10)$$

V tomto případě vzdálenost poruchy vyšla přesně 15 kilometrů od rozvodny a je patrné, že zde je výpočet přesnější nežli u poruchy na konci vedení. Tato odchylka může být způsobena tím, že při výpočtu jsem zanedbal kapacitu vedení vůči zemi. Odchylka by se také dala zmenšit použitím menší velikosti frekvence. Tím by došlo k zvýšení reaktance kapacit a injektovaný proud by se spíše uzavíral pouze místem poruchy.

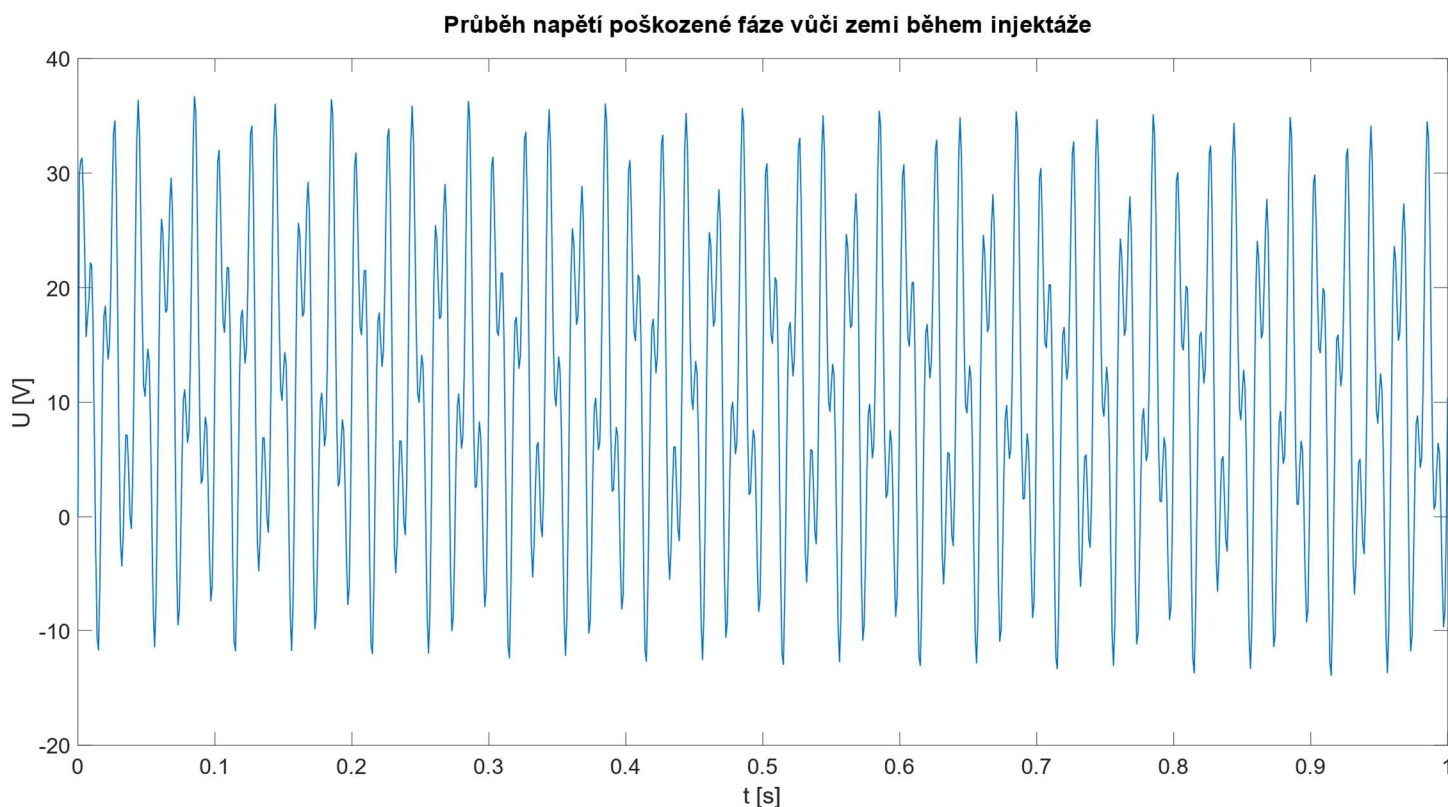
Při zadání totožných hodnot do skriptu viz. Příloha A vyšla hodnota vzdálenosti totožná. Dále jsem do skriptu zadal hodnoty prvků vedení pro vzdálenost od rozvodny činící 15 km. Výsledkem výpočtu je 15.2568 km. Takže tato metoda se zdá být dostatečně přesná, tak aby došlo k lokalizaci poruchy a následně k jejímu odstranění v případě, že se jedná o poruchu trvalou.

4.1.2 Výpočet vzdálenosti pomocí algoritmu v programu Matlab

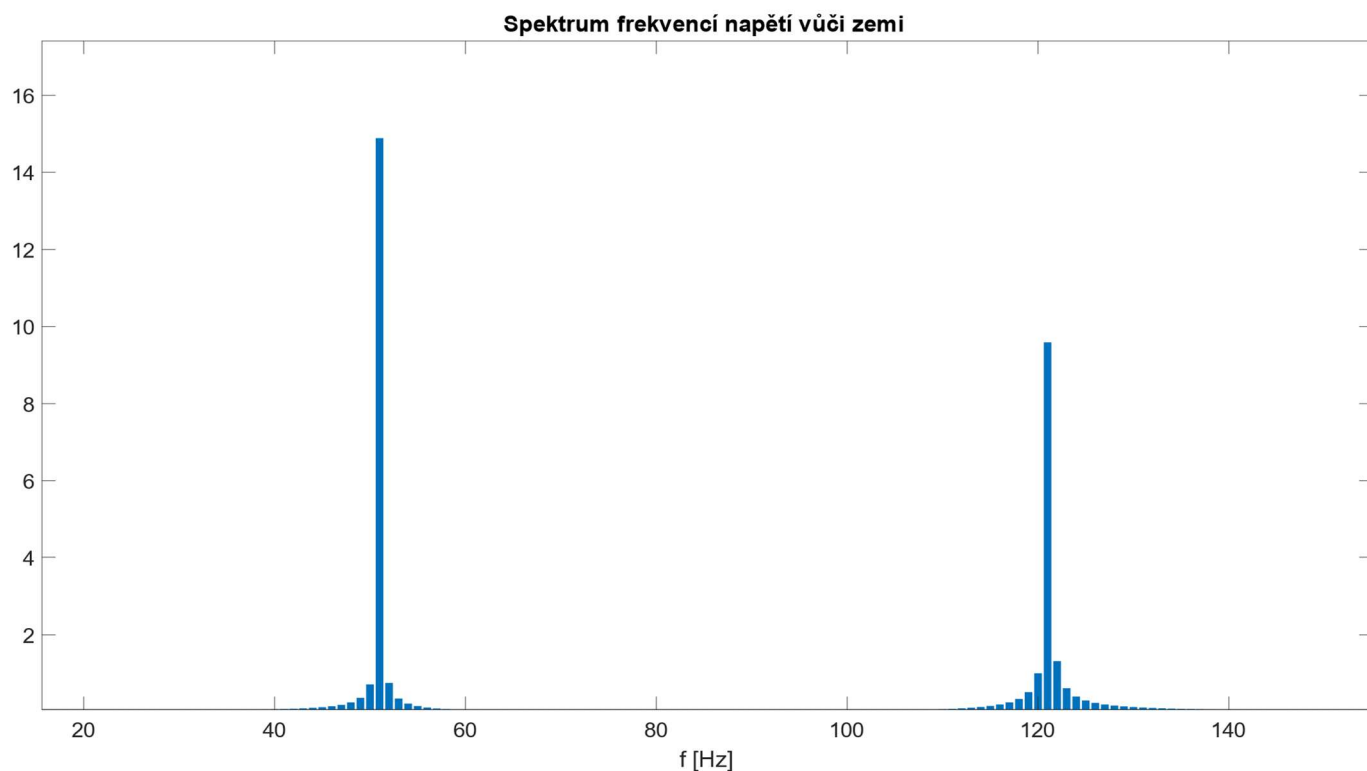
V této části práce jsem navázal na předchozí výpočet akorát jsem se snažil ruční výpočet převést do výpočetního programu Matlab. Výpočet je proveden pomocí fft funkce, rychlé diskrétní Fourierovi transformace, která je implementována v Matlabu. Nejdříve provedu výpočet pro $f_{\text{injektáže}}=120$ Hz, tak abych mohl výsledek porovnat s ručním výpočtem.

Pro kompletní délku vývodu tzn. 30 km vyšla vzdálenost poruchy 29,91 km. Tento výsledek je přesnější oproti ručnímu výpočtu a byl proveden pomocí algoritmu viz. Příloha C.

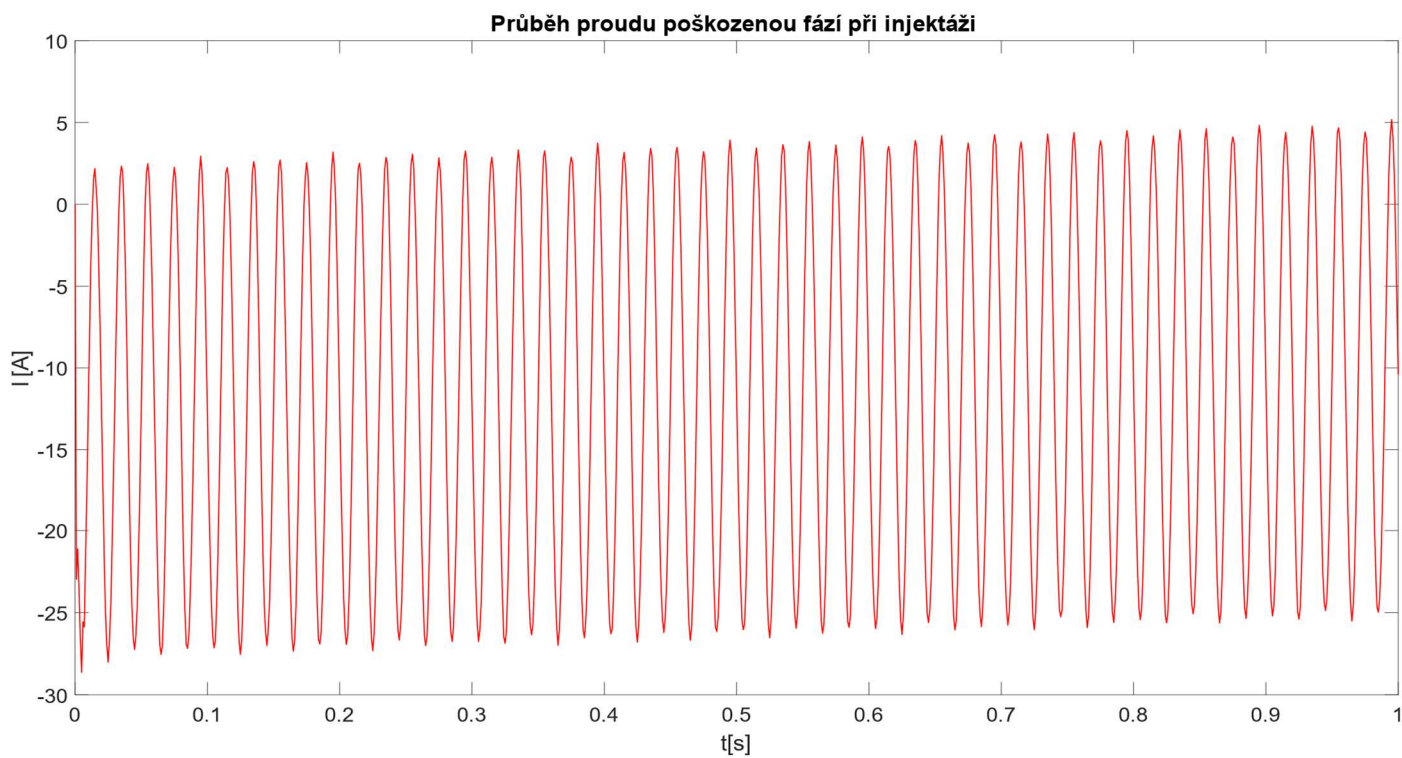
Z Obr. 4.2 je názorně vidět, že průběh napětí je sinusový a skládá se minimálně ze dvou složek frekvence. Konkrétně na tomto obrázku je to z frekvence sítě 50 Hz a frekvence injektáže 120 Hz viz. Obr. 4.4. V tomto obrázku je frekvence 50 Hz a 120 Hz předvedena jako 51. respektive 121. složka.



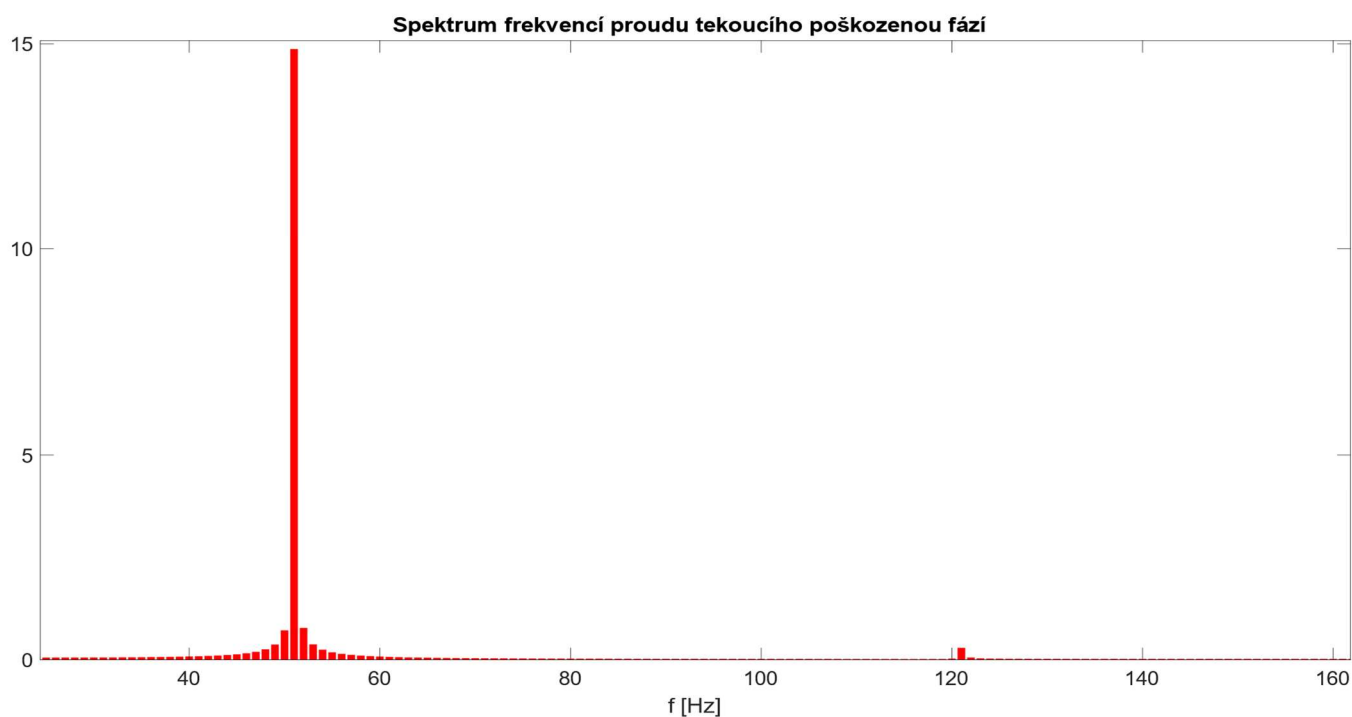
Obr. 4.2 Průběh napětí vůči zemi během injektáže $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz



Obr. 4.4 Spektrum frekvencí napětí vůči zemi při $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz



Obr. 4.3 Průběh proudu skrz poškozenou fázi během injektáže $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz



Obr. 4.5 Spektrum frekvencí proudu tekoucího poškozenou fází $f_{INJEKTÁŽE}=120$ Hz

Pro tento výpočet byla vzorkovací frekvence 12000 Hz, tedy 100násobek frekvence injecktáže. Byl tedy splněn Shannonův vzorkovací teorém, který říká, že frekvence vzorkování musí být alespoň dvojnásobná vůči nejvyšší hodnotě frekvence spektra, aby nedošlo ke zkreslení dat.

Při použití algoritmu při stejné vzorkovací frekvenci pro vzdálenost 15 km, vyšla hodnota vzdálenosti poruchy 15,21 km od rozvodny.

Tabulka 4.2 Porovnání metod a výsledků

Typ výpočtu	Vzdálenost ZS	Výsledek	Odchylka
Ruční výpočet	15 km	15,41 km	2,73 %
	30 km	30,67 km	2,23 %
Algoritmus	15 km	15,21 km	1,33 %
	30 km	29,91 km	0,33 %

Při porovnání výsledků je vidno, že algoritmus je přesnější nežli můj ruční výpočet. Nejpřesněji vyšla vzdálenost při použití algoritmu na celou délku vývodu.

Dále chci svůj algoritmus použít na různé hodnoty frekvencí, kdy vzorkovací frekvence bude pokaždé 100násobek injektované frekvence. A vzdálenost ZS bude umístěna v polovině vývodu z rozvodny. Zemní spojení bude kovové o stejné hodnotě jak výše tedy $R_{\text{PORUCHY}}=1 \text{ m}\Omega$.

Tabulka 4.3 Porovnání výsledků různých injektovaných frekvencí

Vzdálenost poruchy je 15 km		
frekvence [Hz]	vzdálenost [km]	Odchylka [%]
60	14,84	1,07
70	14,99	0,07
80	15,06	0,40
90	15,09	0,60
180	15,57	3,80
240	16,19	7,93
Vzdálenost poruchy je 5 km		
frekvence [Hz]	vzdálenost [km]	Odchylka [%]
60	4,96	0,80
70	4,97	0,60
80	4,99	0,20
90	4,99	0,20
180	5,04	0,80
240	5,1	2,00
Vzdálenost poruchy je 25 km		
frekvence [Hz]	vzdálenost [km]	Odchylka [%]
60	25,22	0,88
70	25,4	1,60
80	25,63	2,52
90	25,57	2,28
180	27,23	8,92
240	29,27	17,08

Tato metoda je velmi závislá na použití velikosti frekvence či vzdálenosti poruchy. Pomocí této metody se dá za použití frekvence řádově desítek hertzů bezpečně lokalizovat porucha kovového charakteru do vzdálenosti i 25 km. Pro tuto vzdálenost při použití injektovaného signálu o frekvenci 60 Hz vyšla vzdálenost poruchy po výpočtu v algoritmu 25,22 kilometru od místa injektáže, tedy od rozvodny. Odchyłka od 25 kilometrů nastavených při simulaci je pod 1 %, tedy dá se porucha bezpečně lokalizovat v řádech stovek metrů.

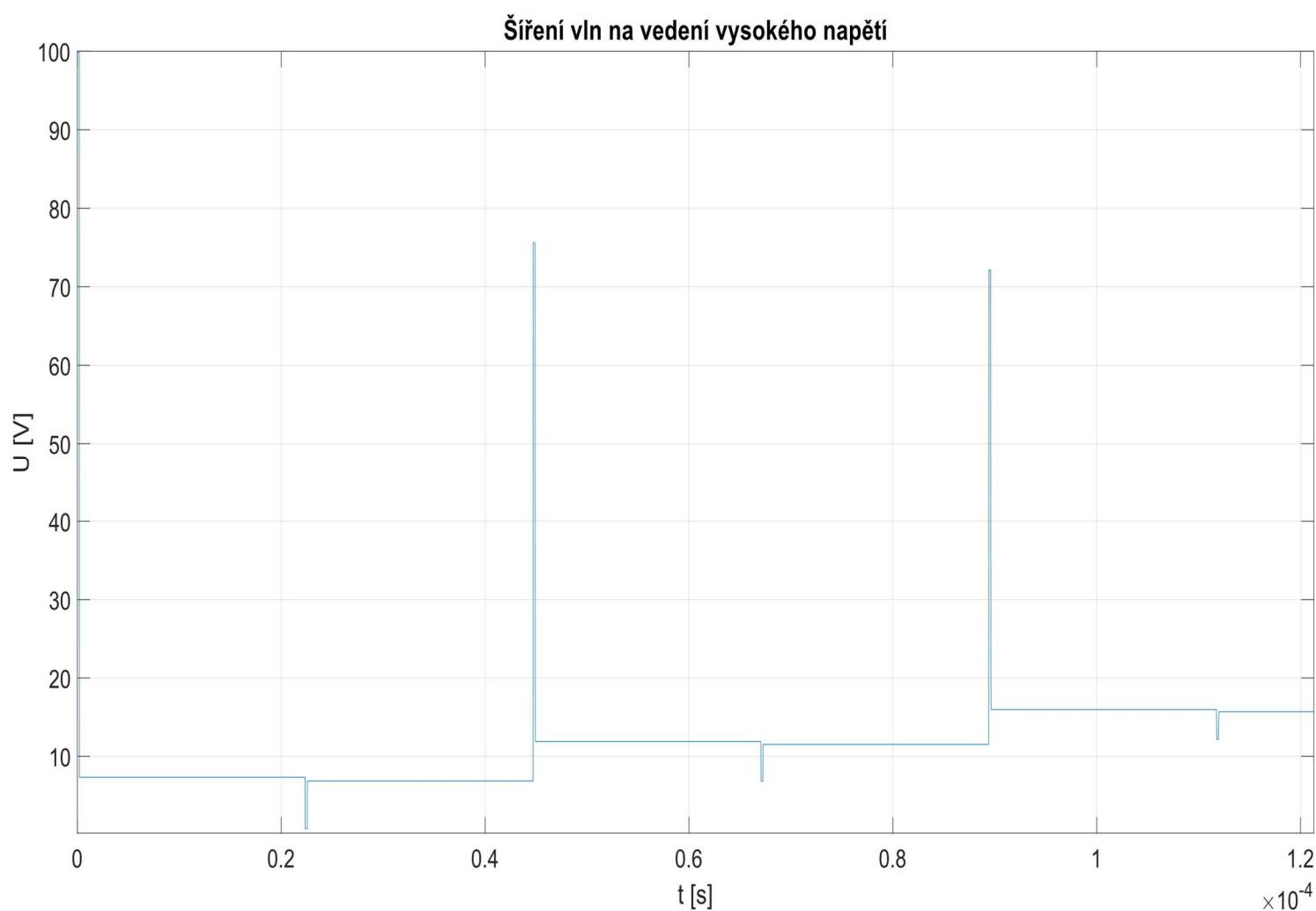
4.2 Metoda založená na odrazech vln na vedení

Tato metoda je založená na principu elektromagnetických vln. Pokud vedení není impedančně přizpůsobené putují na něm v obou směrech elektromagnetické vlny. Pokud by se jednalo o ideální venkovní vedení ve vakuu poté by rychlost šíření vln dosahovala rychlosti světla tzn. zhruba 300 000 km/s. V případě kabelového vedení je tato rychlost menší a to cca 50 až 150 tisíc kilometrů za sekundu. V mém případě jsem použil model distribučního vedení, které je součástí programu Plecs a jelikož velikost provozního odporu není nulová, rychlost šíření bude nepatrně menší. Simulační model viz. Příloha F.

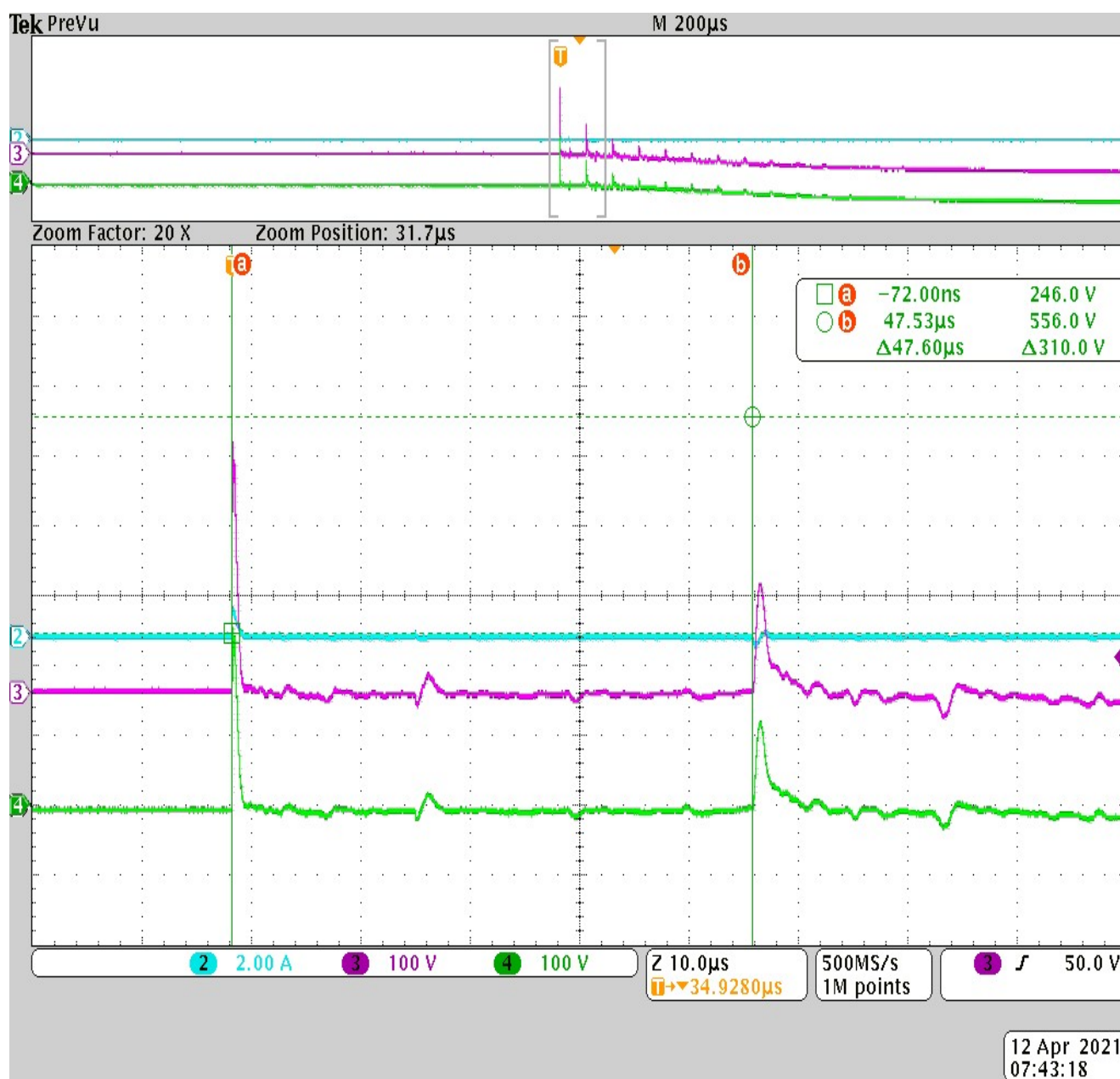
Tato metoda spočívá v tom, že na velmi krátký časový interval se k postižené fázi připojí napěťový zdroj, vznikne na vedení puls. V případě, že vedení je naprázdno tzn. že není uzemněno, se tento puls vrátí ve stejné polaritě. Jakmile je vedení uzemněno, poté se puls vrací v polaritě opačné.

Jakmile tedy počítám s vedením s homogenním rozložením parametrů a znám časovou hodnotu návratu vlny pro jednu vzdálenost, tato časová hodnota počítá jak se směrem k poruše, tak i zpět, tudíž časová hodnota na 1 km vzdálenosti poruchy od rozvodny se musí vydělit na polovinu.

Simulací neuzemněného vedení vysokého napětí dlouhého 7 km jsem dosáhl hodnoty návratu vlny 44,7 μ s. V porovnání s daty, které jsem obdržel od svého vedoucího diplomové práce, který se zabývá projektem na rozvodně v Kralovicích, je tato hodnota velmi podobná, když hodnota v Kralovicích vyšla 47,6 μ s viz. Obr. 4.7 z měření na rozvodně, který mi byl poskytnut vedoucím diplomové práce.

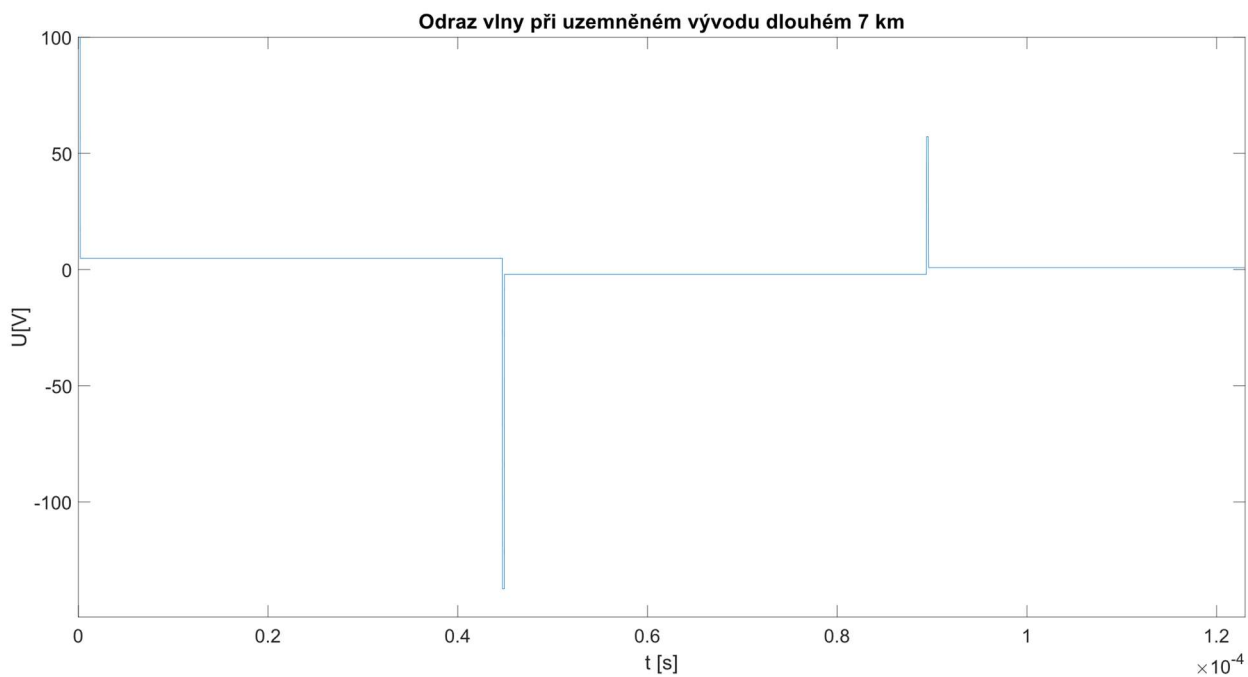


Obr. 4.6 Šíření vln na neuzemněném vedení dlouhém 7 km simulace

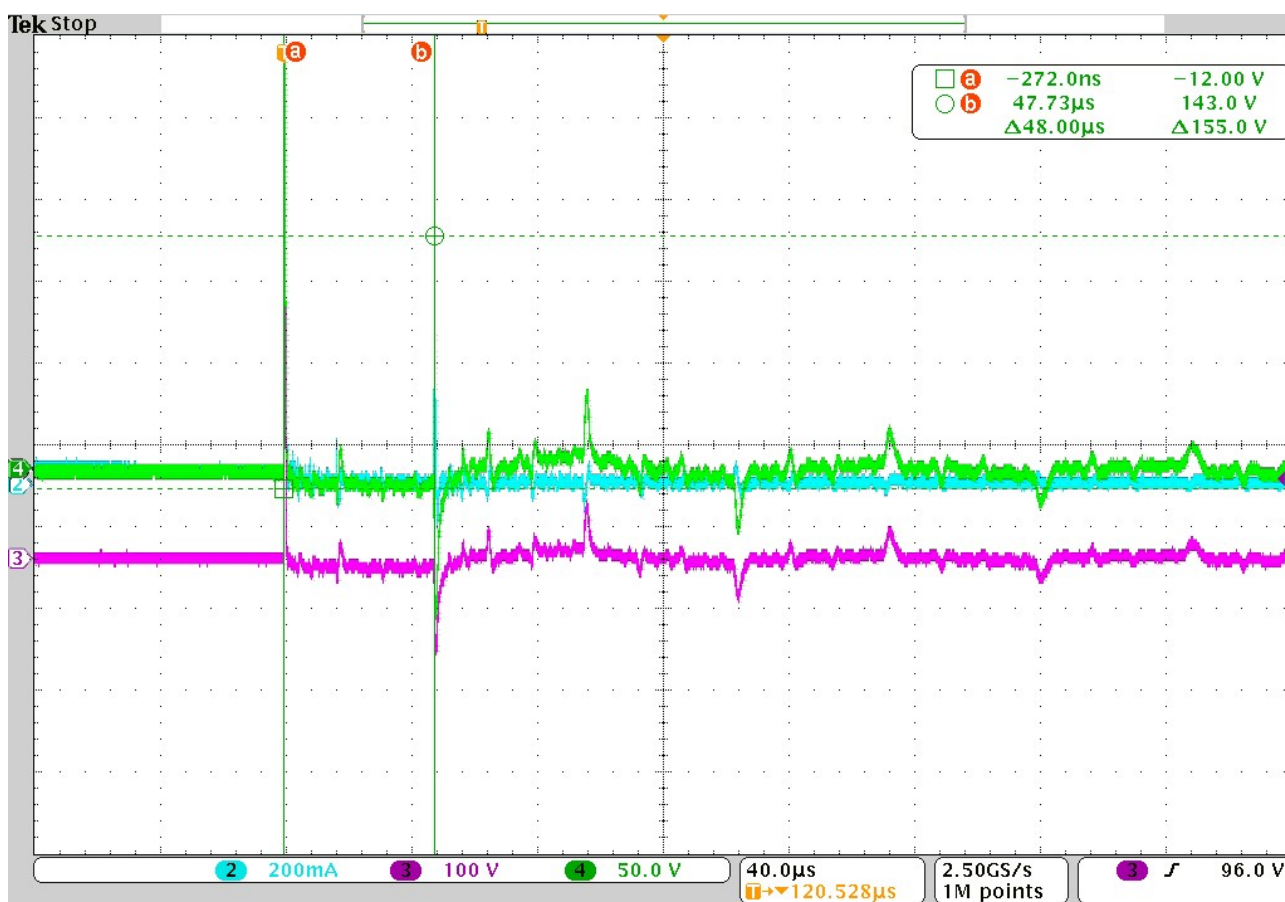


Obr. 4.7 Odraz vlny na 7 km neuzemněného distribučního vedení rozvodna Kralovice [9]

Pokud se ale nejedná o neuzemněnou část vedení, poté se vlna vrací v opačné polaritě viz. Obr. 4.8 a Obr. 4.9. kde je toto tvrzení podpořeno simulací, respektive opět měření v rozvodně Kralovice. V simulaci mi časový úsek vyšel 44,7 μs oproti reálným datům, ve kterých byl úsek dlouhý 48 μs. V těchto obrázcích je také znázorněno, že dochází i k několika násobným odrazům.

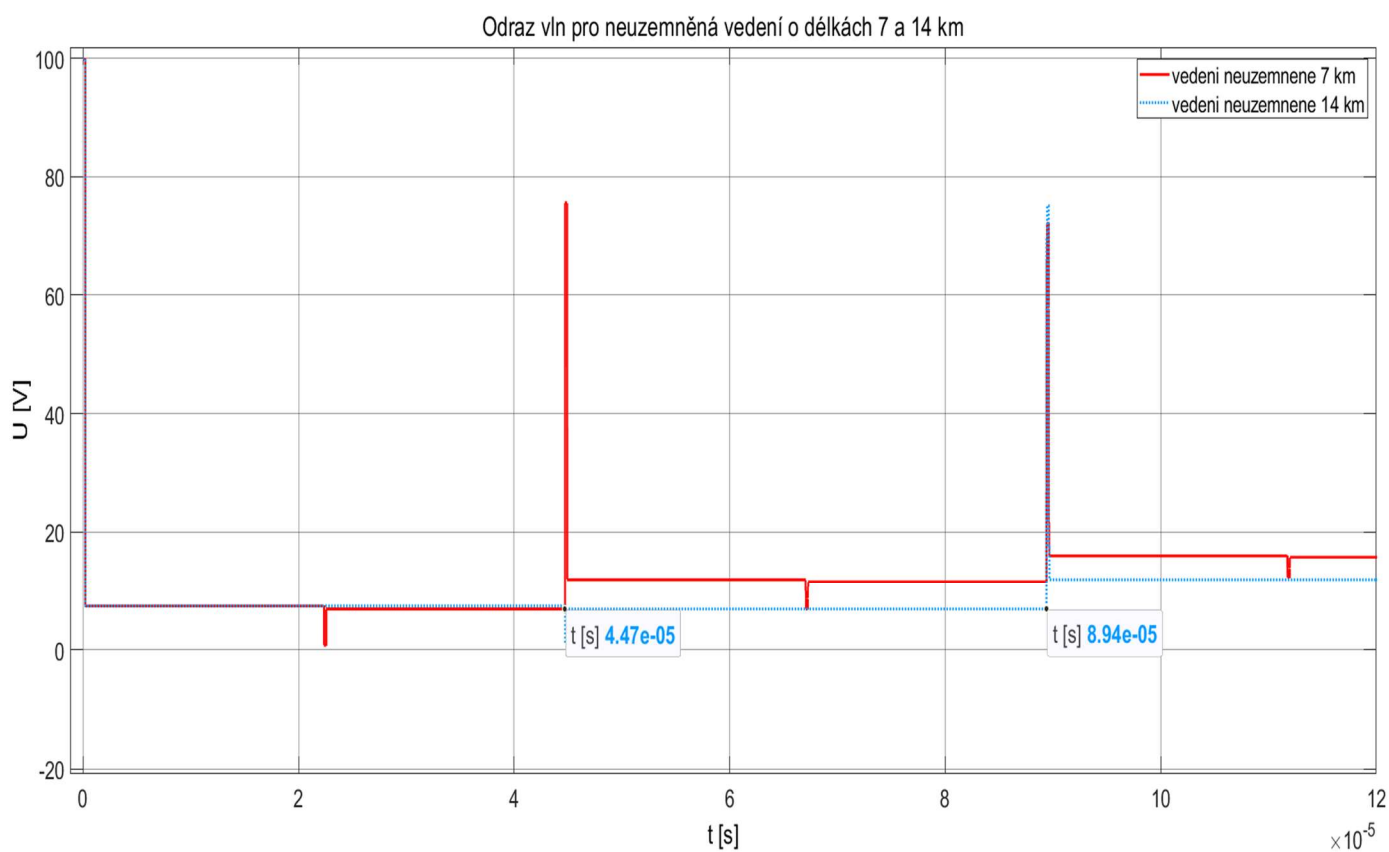


Obr. 4.8 Odraz vlny při uzemněném 7 km vedení simulace

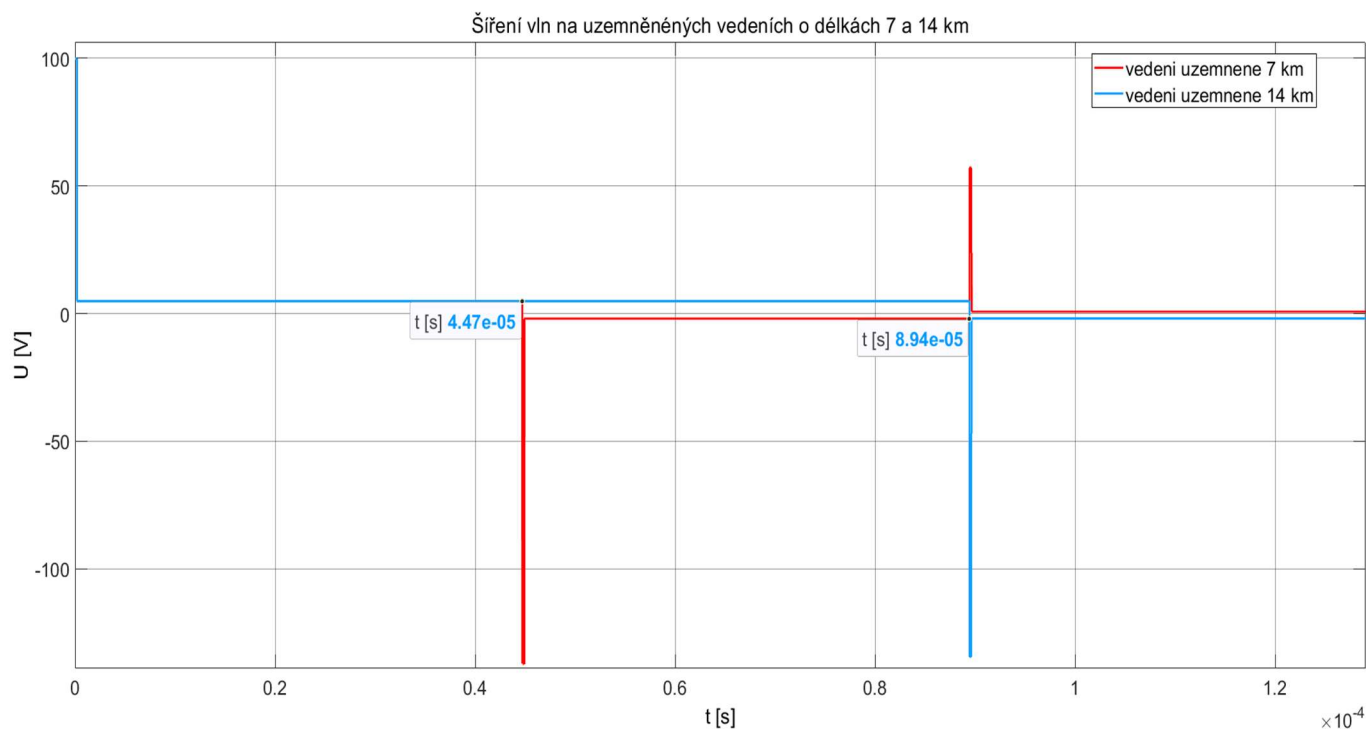


Obr. 4.9 Odraz vlny při uzemněném 7 km vedení Kralovice [9]

Dle teoretických předpokladů, pokud úsek bude dlouhý dvojnásobně, čas odrazu by měl být také dvojnásobný, což jsem se rozhodl pomocí simulace potvrdit. V Obr. 4.10 a Obr. 4.11 jsou znázorněny časy, kdy došlo k prvním návratům vlny po vedení. V případě neuzemněného vedení o délce 7 km je čas návratu $44,7 \mu\text{s}$, ale pro vedení 14 km je tato hodnota dvojnásobná tedy $89,4 \mu\text{s}$. Podporuje to tedy mé tvrzení, že délka vedení vysokého napětí je přímo závislá na době návratu elektromagnetické vlny.



Obr. 4.10 Odrazy pro neuzemněná vedení 7 a 14 km simulace



Obr. 4.11 Šíření vln pro uzemněná vedení 7 a 14 km simulace

Při použití této metody je přesnost vyhodnocení délky velmi dobrá, pokud se jedná o vedení, kdy jeho parametry, tedy indukčnost, svod, kapacita, jsou na celé délce vedení konstantní. V reálném světě je toto více méně nemožné, ale pokud jsou parametry vedení podobné a není na něm přechod venkovního vedení na kabelové a opačně dalo by se použitím této metody dostat k relativně přesným výsledkům, stejně jak u metody injektáže proudu. Při výpočtu je, ale nutné respektovat fakt, že vedení může být jak uzemněné, tudíž vlna se vrací ve stejné polaritě anebo může být neuzemněné, tedy elektromagnetická vlna se vrací v proti fázi.

5 Závěr a shrnutí výsledků

V této diplomové práci jsem se zajímal o distribuční sítě vysokého napětí a o jednofázové poruchy, ke kterým na nich dochází. Jelikož se jedná většinou o sítě kompenzované je za splnění určitých podmínek možné síť s touto poruchou provozovat. Nelze je však provozovat trvale, pokud se jedná o zemní spojení trvalého charakteru, proto je nejdříve potřeba bezpečně identifikovat poškozený vývod.

Metody identifikace poškozeného vývodu jsem prováděl ty, které bezpečně identifikují poškozený vývod kovovým zemním spojením, kdy odpor poruchy je běžně v tisících ohmů. První mnou popsaná metoda souvisí s připojením odporníku k pomocnému vinutí zášací tlumivky, kdy si na malý okamžik úmyslně zkažíme kompenzaci kapacitních proudů zášací tlumivkou. Tím nastane na malý okamžik nárůst nulové složky proudu právě postiženého vývodu. Na tento nárůst poté může zareagovat osazená ochrana v rozvodně.

Dále jsem popsal metodu první půl vlny, kdy v případě vzniku zemního spojení kovového charakteru, ale i odporového, dochází nejdříve k vybíjení kapacit vůči zemi do místa poruchy. To má za následek to, že nulová složka proudu u poškozeného vývodu má v době přechodového děje v první půl vlně opačnou polaritu oproti vývodům zdravým. Při použití ochrany, která je schopna rozpoznat směr nulové složky v krátkém časovém okamžiku, je možno bezpečně indikovat poškozený vývod.

Metody lokalizace jsem se snažil použít v práci dvě. První metoda je založena na injektáži proudu do postižené fáze, kdy hodnota frekvence je odlišná od frekvence sítě a násobků této frekvence, aby nedošlo ke zkreslení vyššími harmonickými v síti. Tato metoda, jak jsem ji v diplomové práci interpretoval je schopna bezpečně lokalizovat zemní spojení na vzdálenost poruchy zhruba 50 km od rozvodny, jelikož při vyšších vzdálenostech začíná do výsledků simulací promlouvat provozní kapacita, která se se zvyšující vzdáleností zvyšuje tudíž reaktance se zmenšuje a dochází k většímu větvení injektovaného proudu a tento proud neteče pouze místem kovového zemního spojení. Zároveň i při zvyšování frekvence injektáže se reaktance kapacity zvyšuje, tudíž osobně jsem použil v simulacích pouze vybrané frekvence

do maximální hodnoty 240 Hz. I pro tuto hodnotu byl výsledek z důvodu výše uvedeného již zkreslený, kdežto pro hodnoty 60, 70, 80, 90 i 120 Hz byl výsledek přesnější.

Posledním bodem mé práce bylo stvoření simulace odrazů a šíření vln po distribučním vedení, kdy jsem vedení použil jak uzemněné, tak i neuzemněné. Tato metoda i následná simulace je založená na rychlosti šíření světla ve vakuu. Když se jedná o venkovní vedení teoretická hodnota šíření zhruba 300 000 kilometrů za sekundu, podle rychlosti šíření světla ve vakuu, v simulaci jsem dospěl k hodnotě zhruba 290 tisíc kilometrů za sekundu. Tato hodnota odpovídá tomu, že vedení například není uloženo ve vakuu, tudíž dochází ke zpoždění elektromagnetické vlny. Pokud se jedná o vedení se stejnými parametry na celé vzdálenosti je tato metoda velmi přesná.

Z této diplomové práce je tedy zřejmé, že pokud nastane v distribuční síti zemní spojení jde sice o problém, ale ve srovnání se zkraty, kdy je nutné okamžitě vypnout porušený úsek, se nejedná až o tolik velký. Při použití výše popsaných metod identifikací poškozeného vývodu jsme v distribuční soustavě bezpečně lokalizovali poškozenou linku vysokého napětí. Poté je vhodné po doladění, pro určitou rozvodnu vysokého napětí, jedné z metod lokalizace zemní spojení, lokalizovat kde se porucha na distribuční lince nachází, protože pokud by se jednalo o poruchu trvalou je třeba co nejdříve příčinu, např. větev na vedení, odstranit, jelikož při dlouhodobém kompenzování kapacitních proudů dochází k namáhání zhášecí tlumivky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMAN, Petr, DRÁPELA, Jiří, MIŠÁK, Stanislav, ORSÁGOVÁ, Jaroslava, PAAR, Martin, TOPOLÁNEK, David a kol. *Provoz distribučních soustav* [online] 1. vyd. Praha: ČVÚT, 2011. 265 s. ISBN 978-80-01-04935-8, Dostupné z : <https://docplayer.cz/5613732-Provoz-distribu-nich-soustav-petr-toman-ji-i-drapela-stanislav-misak-jaroslava-orsagova-mar-n-paar-david-topolanek-a-kol.html>
- [2] CIMBOLINEC, Ivan. *Provozování distribučních soustav – Síť vysokého napětí s kompenzací kapacitních proudů*. Powerwiki. [online]. Dostupné z: http://www.powerwiki.cz/attach/APES/2-Kompenzovane_site_vn.pdf
- [3] CIMBOLINEC, Ivan. *Síť vysokého napětí s odporníkem v uzlu vn napájecího transformátoru*. Powerwiki. [online]. Dostupné z: https://www.powerwiki.cz/attach/APES/3-Odpornikove_site_vn.pdf
- [4] *Zemní spojení v trojfázových soustavách*. Powerwiki [online]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [5] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Zemní spojení (předmět KEE/EE2)*
- [6] LOOS, Matthieu. *Single Phase to Ground Fault Detection and Location in Compensated Network*. Dizertační práce. [online]. Dostupné z: <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/209544/1/008934c7-71a2-400c-b5d5-78fb9e848eac.txt>
- [7] Materiály z předmětu OZS, *Indikace zemního spojení*
- [8] Buigues, G., Valverde, V., Zamora, I., Mazón, J., Torres, E.. *Signal injection techniques for fault location in distribution networks*. [online]. Dostupné z: <http://www.icrepq.com/icrepq'12/330-buigues.pdf>
- [9] TALLA, Jakub. *Osobní materiály*

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u izolované sítě IT	12
Obr. 1.2 Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u kompenzované sítě IT	12
Obr. 1.3: Zapojení uzlu sekundárního vinutí transformátoru u odporňkové sítě ITr ..	13
Obr. 2.1 Rozklad nesouměrné 3f soustavy na souměrné složky [1]	15
Obr. 2.2 Zjednodušené schéma izolované soustavy s jedním vývodem	16
Obr. 2.3 Fázorový diagram napětí a proudu v symetrické síti	17
Obr. 2.4 Schéma izolované soustavy s jednofázovou poruchou na fázi A.....	17
Obr. 2.5 Fázorový diagram napětí a proudu v symetrické síti při ZS na fázi A.....	18
Obr. 2.6 Fázor poruchového proudu v symetrické síti	18
Obr. 2.7 Kompenzovaná soustava	19
Obr. 2.8 Kompenzovaná síť s poruchou na fázi A	20
Obr. 2.9 Principiální schéma zhášecí tlumivky [1]	21
Obr. 2.10 Příklad rezonanční křivky zhášecí tlumivky [1]	22
Obr. 2.11 Zjednodušené schéma Swedish Neutral [1]	23
Obr. 2.12 Distribuční síť bez připojeného shuntu	24
Obr. 2.13 Distribuční síť s připojeným shuntem v transformovně 110/22 kV.....	24
Obr. 3.1 Zjednodušené schéma v programu Matlab Simulink.....	26
Obr. 3.2 Část vedení jedné fáze v modelu.....	27
Obr. 3.3 ZS kovové průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$	29
Obr. 3.4 ZS odporové průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ k}\Omega$	29
Obr. 3.5 ZS přerušované průběh napětí $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$	30
Obr. 3.6 Filtr napětí pro indikaci postiženého vývodu ZS [7].....	30
Obr. 3.7 Zapojení filtru proudu u venkovních vedení [7]	31
Obr. 3.8 Konduktanční princip [6]	33
Obr. 3.9 Připojení odporníku $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$	34
Obr. 3.10 Připojení odporníku $R_{PORUCHY} = 1 \text{ k}\Omega$	34
Obr. 3.11 Průběh nulové složky proudu během vzniku ZS při $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$	36
Obr. 3.12 Detail transientu při $R_{PORUCHY} = 1 \text{ m}\Omega$	36
Obr. 3.13 Průběh nulové složky proudu během vzniku ZS při $R_{PORUCHY} = 1 \text{ k}\Omega$	37
Obr. 3.14 Detail transientu při $R_{PORUCHY} = 1 \text{ k}\Omega$	38
Obr. 3.15 Detail transientu při $R_{PORUCHY} = 100 \Omega$	38

Obr. 4.1 Injektáž proudu [7]	39
Obr. 4.2 Průběh napětí vůči zemi během injektáže $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz.....	43
Obr. 4.4 Průběh proudu skrz poškozenou fázi během injektáže $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz....	44
Obr. 4.3 Spektrum frekvencí napětí vůči zemi při $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz.....	44
Obr. 4.5 Spektrum frekvencí proudu tekoucího poškozenou fází $f_{\text{INJEKTÁŽE}}=120$ Hz..	45
Obr. 4.6 Šíření vln na neuzemněném vedení dlouhém 7 km simulace	48
Obr. 4.7 Odraz vlny na 7 km neuzemněného distr. vedení rozvodna Kralovice [8]	49
Obr. 4.8 Odraz vlny při uzemněném 7 km vedení simulace	50
Obr. 4.9 Odraz vlny při uzemněném 7 km vedení Kralovice.....	50
Obr. 4.10 Odrazy pro neuzemněná vedení 7 a 14 km simulace.....	51
Obr. 4.11 Šíření vln pro uzemněná vedení 7 a 14 km simulace.....	52

Seznam tabulek

Tabulka 4.1 Parametry vedení.....	40
Tabulka 4.2 Porovnání metod a výsledků	45
Tabulka 4.3 Porovnání výsledků různých injektovaných frekvencí	46

Přílohy

Příloha A – skript k simulačnímu modelu v Plecsu

```
delka simulace
t=1;
vzorkovani=1e-3;
%zavedeni parametru vedeni
%delky vyvodu
delka1=40;
delka2=30;
delka3=50;
%pasivní parametry vedeni
Rvedeni=0.5;
Lprovoz=1.2e-3;
svod=1*10^6;
kapacita=1e-8;
%Odporu poruch
Rporucha1=1000;
Rporucha2=5;
%Zateze vyvodu
Ra1=2000; Ra2=3000; Ra3=4000;
Rb1=2300; Rb2=3000; Rb3=3800;
Rc1=1900; Rc2=3000; Rc3=3600;
%fazove napeti
napeti_faze=(22/sqrt(3))*sqrt(2)*10^3;
%odporu ZS
zapnuti_poruchy_1=0;
zapnuti_poruchy_2=6;
%pripnuti odporniku
pripnuti_odporniku=0.75;
odpornik=0.2*((napeti_faze*napeti_faze)/(500*500));
odepnuti_odporniku=0.9;
%odepnuti poruchy
```

```
odepnuti_poruchy=1.1;
omega50=2*pi*50;
%indukcnost tlumivky
Petersen=(1/(3*(omega50*omega50)*kapacita*(delka1+delka2+delka
3)));
%nacteni modelu
open_system('C:\Users\MBuli\Desktop\DIPLOMKA\sit_22kv');
SimOut=sim('C:\Users\MBuli\Desktop\DIPLOMKA\sit_22kv');
%Zavedeni napeti a proudu
U=SimOut.Napeti;
I=SimOut.Proud;
close_system('C:\Users\MBuli\Desktop\DIPLOMKA\sit22',1);
```

Příloha B – Skript pro ruční výpočet vzdálenosti v Matlabu

```
%Vypocet vzdalenosti poruchy pomoci injektaze proudu
LnakmmH=input('Zadej provozni indukcnost v mh na 1km:');
LnakmH=LnakmmH/1000;
%proudoveho zdroje frekvence
f=input("Zadej frekvenci pouzitou k injektazi pomoci
proudoveho zdroje:");
%omega
omega=2*pi*f;
%Napeti
Uvelikost=input("Velikost napeti ve V cini:");
Uuhel=input("Uhel napeti v rad je");
U=Uvelikost*exp(i*Uuhel);
%Proud
Ivelikost=input("Velikost proudu v A cini:");
Iuhel=input("Uhel proudu v rad je");
I=Ivelikost*exp(i*Iuhel);
%Celkova impedance
Z=U/I;
%realna cast Z - reaktance X
X = imag(Z);
```

```
%Vypocet indukcnosti
Lcelkem=X/omega;
%Vzdalenost poruchy
l=Lcelkem/LnakmH;
fprintf("Vzdalenost poruchy je %2f km \n",l);
```

Příloha C – Skript pro injektáž a výpočet vzdálenosti v Matlabu

```
%Vypocet vzdalenosti pomoci injektaze proudu
load_system('C:\Users\MBuli\Desktop\model');
%delky vyvodu
%delka=18;
delka=input('Delka vyvodu postizeneho poruchou v pulce je: ');
delka2=20;
delka3=30;
%parametry site
fazove_napeti=17.96*10^3;
f=50;
%frekvence injektaze
omega50=2*pi*f;
%pasivni parametry site
Rprovoz=0.5;
Lprovoz=1.2e-3;
kapacita=1e-8;
%vypocet Petersenovy tlumivky
Petersenova_tlumivka=1/(3*(omega50*omega50)*kapacita*(delka+de
lka2+delka3));
%Zatez
R1=1000;
R2=1500;
R3=1400;
%Odpor ZS
Rporucha=1e-3;
%injektaz
```

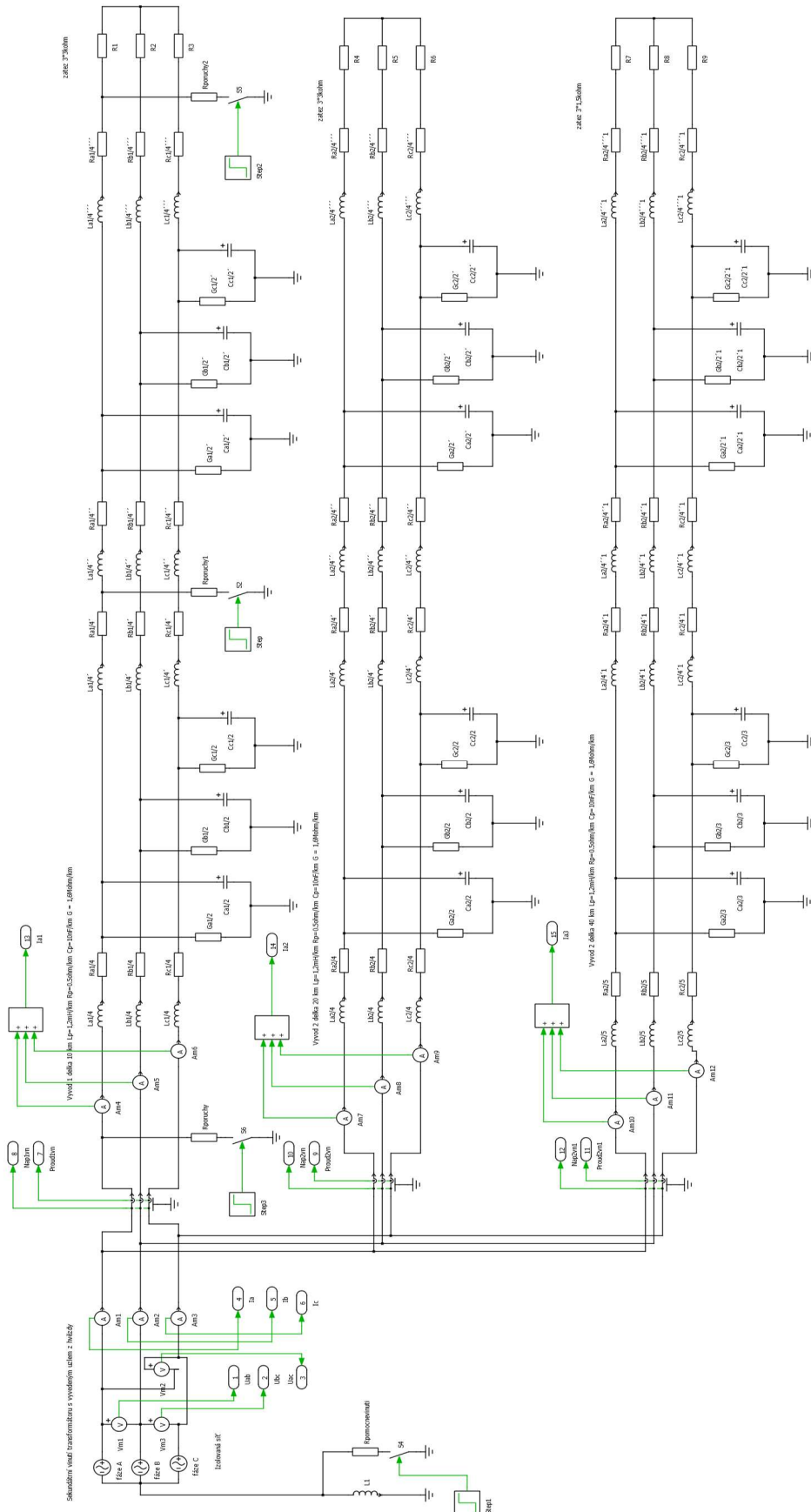
```
amplituda=10;
frekvence_injektaze=120;
omega=2*pi*frekvence_injektaze;
vzorkovani=1/1200;
zapnuti_poruchy=0;
Simout=sim('C:\Users\MBuli\Desktop\model');
U=Simout.Napeti;
I=Simout.Proud;
ti=I.time;
i=I.signals.values;
tu=U.time;
u=U.signals.values;
Uf=fft(u);
If=fft(i);
Uabsf=2*abs(Uf)/length(u);
Iabsf=2*abs(If)/length(i);
Uf1=2*Uf/length(u);
If1=2*If/length(i);
Uff=Uf1(frekvence_injektaze+1);
Iff=If1(frekvence_injektaze+1);
Z=Uff/Iff;
%realna cast Z - reaktance X
X = imag(Z);
%Vypocet indukcnosti
Lcelkem=X/omega;
%Vzdalenost poruchy
l=abs(Lcelkem/Lprovoz);
fprintf("Vzdalenost poruchy je %.1f km \n",l);
```

Příloha D – Skript výpočet vzdálenosti pomocí návratu vlny v Matlabu

```
%Neuzemnena
open_system('C:\Users\MBuli\Desktop\DIPLOMKA\Odrazy');
delka_vedeni=14;
simulace=sim('C:\Users\MBuli\Desktop\DIPLOMKA\Odrazy');
```

```
vystup=simulace.simout1;
hodnoty=vystup1.signals.values;
cas=vystup.time;
[pks,locs] = findpeaks(hodnoty,cas,'MinPeakProminence',10);
period = max(diff(locs));
casnakm=9.582e-05/15;
vzdalenost=period/casnakm;
rychlost_sireni=(1/casnakm1)*2;
fprintf("Porucha je na neuzemnenem vedeni vzdalena %.2f
km\n",vzdalenost1);
```

Příloha E – Simulační model se 3 vývody



Příloha F – model šíření vln

