

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza a simulace zemních poruch  
v distribučních sítích vn**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří ŠKRLETA**  
Osobní číslo: **E12N0125P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Analýza a simulace zemních poruch v distribučních sítích vn**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zpracujte analýzu zemních poruch v sítích vn metodou Fortescue a metodou uzlových napětí.
2. Převeďte tuto problematiku do simulačního prostředí MATLAB Simulink.
3. Porovnejte a ověřte analytické výpočty s naměřenou reálnou zemní poruchou.
4. Vyhodnoťte získané výsledky z analytických výpočtů a ze simulace.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Skripta k předmětu Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie
2. Příručky k simulačnímu nástroji MATLAB simulink
3. Internetové podklady
4. Dle uvážení a pokynů udá konzultant

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

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na zemní spojení v distribučních sítích vysokého napětí, konkrétně na hladině 22 kV. První polovina práce je zaměřena spíše teoreticky, je zde uvedeno dělení poruch, způsoby provozu uzlu sítě a metody detekce zemního spojení. Opomenuty nejsou ani metody analytického řešení zemních poruch. Druhá polovina práce je věnována výpočtu zemního spojení v konkrétní síti a následně simulacím, ve kterých jsou vyhodnocovány průběhy napětí a proudů při různých stavech sítě. Závěr diplomové práce je věnován vyhodnocení analytického řešení a simulací a jejich porovnání s reálnou zemní poruchou.

## **Klíčová slova**

Zemní spojení, distribuční síť, simulace, metody detekce, uzel

**Abstract**

This thesis is focused on earth faults in 22 kV distribution high voltage networks. The first part is focused more theoretically, there is specified faults classification, network earthing arrangement and earth fault detection methods. There are also mentioned methods of solution of earth faults. The second part is dedicated to calculation of earth fault in a specific network and simulations in which voltage and current waveforms are evaluated. The final part is dedicated to the evaluation of analytical solutions and simulation results and their comparison with a real earth fault.

**Key words**

Earth fault, distribution network, simulation, detection methods, network earthing

## **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 29.4.2014

Jiří Škrleta

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce paní doc. Ing. Lucii Noháčové, Ph.D. a odbornému konzultantovi panu Ing. Františku Žákovi za cenné rady a odbornou pomoc, kterou mi poskytli během zpracování mé diplomové práce.

## Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>9</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Sítě vysokého napětí</b> .....	<b>11</b>
1.1 Dělení poruch .....	11
1.2 Uzemnění uzlu sítě .....	11
1.2.1 Síť s izolovaným uzlem.....	12
1.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku .....	14
1.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor .....	16
1.2.4 Síť s přechodně uzemněným uzlem .....	17
1.3 Kompenzační tlumivka.....	18
<b>2 Metody detekce zemního spojení</b> .....	<b>20</b>
2.1 Aktivní metody detekce zemního spojení .....	20
2.2 Pasivní metody detekce zemního spojení.....	20
2.2.1 Statické metody .....	20
2.2.2 Dynamické metody.....	23
<b>3 Metody řešení zemních poruch</b> .....	<b>24</b>
3.1 Metoda uzlových napětí .....	24
3.1.1 Síť s izolovaným uzlem.....	24
3.1.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku .....	26
3.1.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor .....	26
3.2 Metoda souměrných složek .....	27
3.2.1 Síť s izolovaným uzlem.....	27
3.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku .....	30
3.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor .....	31
<b>4 Analytické řešení konkrétní sítě</b> .....	<b>33</b>
4.1 Metoda souměrných složek .....	33



---

4.1.1 Zjednodušený výpočet.....	33
4.1.2 Výpočet s uvažováním impedancí vedení a transformátoru .....	35
4.2 Metoda uzlových napětí .....	38
<b>5 Simulace zemního spojení .....</b>	<b>40</b>
5.1 Nevyladěný stav .....	41
5.2 Vyladěný stav .....	42
5.3 Vyladěný stav s odporníkem .....	43
5.4 Porovnání s izolovanou sítí .....	44
5.5 Vliv okamžiku vzniku zemního spojení na průběh napětí a proudu .....	45
5.6 Vliv zatížení na průběh napětí a proudu .....	47
5.7 Přerušované zemní spojení .....	48
5.8 Shrnutí .....	49
<b>6 Reálná zemní porucha .....</b>	<b>50</b>
6.1 Porovnání s analytickým řešením.....	51
6.2 Porovnání se simulací.....	52
<b>7 Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>53</b>
7.1 Analytický výpočet.....	53
7.2 Výsledky simulace.....	54
<b>Závěr .....</b>	<b>55</b>
<b>Použité zdroje .....</b>	<b>57</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>58</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$U_a, U_b, U_c$ .....	napětí fázových vodičů vůči zemi (V)
$U_{fa}, U_{fb}, U_{fc}$ .....	napětí zdroje (V)
$U_0$ .....	napětí uzlu (V)
$U_L$ .....	napětí na tlumivce (V)
$U_R$ .....	napětí na uzlovém rezistoru (V)
$I_a, I_b, I_c$ .....	proud ve fázových vodičích (A)
$I_p$ .....	poruchový proud (A)
$I_L$ .....	proud tlumivkou (A)
$I_R$ .....	proud uzlovým rezistorem (A)
$k_{a0}, k_{b0}, k_{c0}$ .....	kapacita fáze vůči zemi (F)
$G, G_0$ .....	svod (S)
$R_p$ .....	odpor poruchy/zemního spojení ( $\Omega$ )
$R$ .....	odpor uzlového rezistoru ( $\Omega$ )
$L$ .....	indukčnost kompenzační tlumivky (H)
$\omega$ .....	úhlová frekvence ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )
$F, F^{-1}$ .....	matice Fortescue, inverzní matice Fortescue
$U_1, U_2, U_0$ .....	složková napětí (V)
$I_1, I_2, I_0$ .....	složkové proudy (A)
$X_1, X_2, X_0$ .....	složkové reaktance ( $\Omega$ )
$Z_1, Z_2, Z_0$ .....	složkové impedance ( $\Omega$ )
$C$ .....	kapacita vůči zemi (F)

## Úvod

Sítě vysokého napětí dosahují v České republice délky přes 70 tisíc kilometrů a po sítích nízkého napětí se jedná o druhé nejdelší. Není proto překvapením, že jsou velmi často vystaveny vlivům ovlivňujícím jejich bezporuchový chod. Převážnou část délky sítí vn tvoří síť o napěťové hladině 22 kV a právě poruchám v této síti je věnována moje diplomová práce.

Práce je členěna do sedmi kapitol. První kapitola je věnována sítím vysokého napětí. Nejprve je provedeno dělení poruch vyskytujících se v těchto sítích a dále jsou uvedeny způsoby provozu uzlu sítě. Pro každý způsob uzemnění jsou následně uvedeny rozdíly v projevu zemního spojení. Jelikož je další část práce věnována hlavně kompenzované síti, je poslední část této kapitoly zaměřena na kompenzační tlumivku.

Druhá kapitola se zabývá metodami detekce zemního spojení. Je provedeno jejich rozdělení a také popis každé metody.

Třetí kapitola úzce souvisí s kapitolou první. Pro každý způsob provozu uzlu sítě z kapitoly první jsou zde popsány způsoby řešení zemního spojení. Kapitola je pro přehlednost rozdělena na dvě části, nejprve je uvedena metoda uzlových napětí a následně metoda souměrných složek.

Čtvrtou a pátou kapitolu bych označil za klíčové části diplomové práce. Čtvrtá kapitola je věnována analytickému řešení konkrétní sítě. Pátá kapitola plynule navazuje na předchozí a je v ní provedeno převedení konkrétní řešené sítě do prostředí simulačního programu MATLAB Simulink. Velká pozornost je věnována zemnímu spojení při různých stavech sítě a vyhodnocení průběhů napětí a proudů.

Šestá kapitola je zaměřena na reálnou zemní poruchu a její srovnání s analytickým řešením a se simulací provedenou v předchozí kapitole. Hlavním prvkem kapitoly jsou opět průběhy napětí a proudů.

Sedmá a poslední část mé diplomové práce je věnována vyhodnocení výsledků získaných v kapitole čtyři a pět.

## 1 Sítě vysokého napětí

Sítě vysokého napětí pokrývají velkou část území České republiky, přičemž protínají území venkova, městské okraje a další oblasti, kde jsou vystaveny atmosférickým vlivům, cizím zásahům i četným přepětím, které mají nepříznivý vliv na jejich bezporuchový chod.

Následkem těchto vlivů často vznikají izolační vady fáze vůči zemi – zemní spojení. Na rozdíl od jednofázového zkratu prochází místem poruchy u zemního spojení pouze malý proud kapacitního charakteru. Pokud tento proud přesáhne hodnotu 5A, dochází většinou při zemním spojení k zapálení oblouku, který u kabelových sítí téměř vždy zasáhne sousední fáze. Porucha se poté mění na dvoufázový nebo třífázový zkrat.

### 1.1 Dělení poruch

Ve své diplomové práci se budu dále zabývat jednofázovými poruchami, které můžeme dělit následovně.

Podle velikosti přechodového odporu:

- Odporové zemní spojení – přechodový odpor v řádu stovek  $\Omega$
- Kovové zemní spojení – přechodový odpor v jednotkách  $\Omega$ , většinou zanedbatelný

Podle doby trvání:

- Mžikové spojení – méně než 0,5s
- Krátkodobé spojení – méně než 5 min.
- Přerušované spojení – několikrát se opakující mžikové nebo krátkodobé spojení
- Trvalé spojení – trvá až do odstranění závady, většinou několik hodin

### 1.2 Uzemnění uzlu sítě

V České republice jsou u sítí vysokého napětí využívány čtyři způsoby uzemnění uzlu sítě.

Malé sítě průmyslových závodů a vlastních spotřeb elektráren a tepláren se provozují s izolovaným uzlem. U těchto sítí se důsledky přechodných poruch izolace jedné fáze proti zemi odstraňují samočinně.

Převažujícím způsobem uzemnění uzlu v našich distribučních sítích vn je uzemnění uzlu přes zhašecí tlumivku. Výhodou tohoto zapojení je, že i rozsáhlejší sítě lze provozovat se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení poruchy, takže doba přerušení dodávky

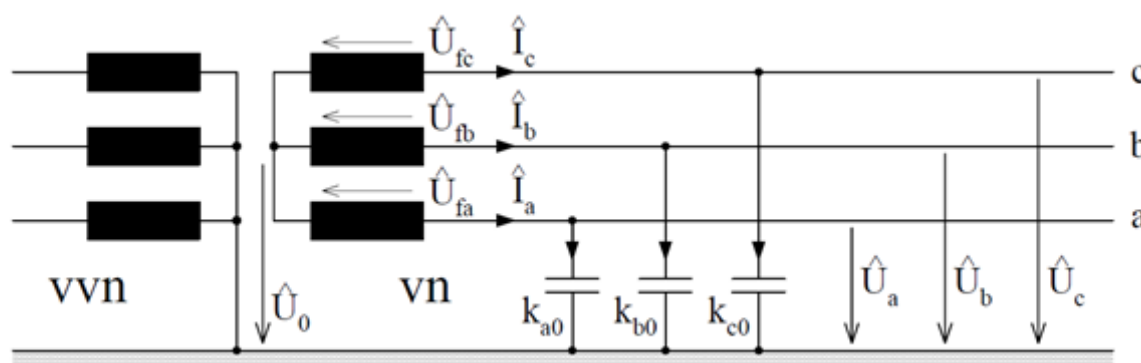
elektrické energie je velmi krátká. Navíc většina přechodných zemních spojení se zháší sama.[1]

S postupným rozšiřováním kabelových sítí dochází ke snižování počtu přechodných poruch. U většiny případů dochází k přechodu trvalého zemního spojení ve zkrat. Z tohoto důvodu pak zaniká výhoda provozu sítě s kompenzováním zemních kapacitních proudů přes zhášecí tlumivku. Ve spojení s požadavkem na rychlé vypínání zemních poruch se tyto sítě provozují většinou s uzemněním uzlu přes rezistor, který omezuje proudy jednopólových poruch.

Spojení výhod provozu kompenzace zemních kapacitních proudů a provozu přes rezistor je provoz s krátkodobým přechodným uzemněním uzlu přes rezistor. Tento způsob provozu se používá v menším rozsahu u smíšených sítí. Jedná se vlastně o provoz s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde se při trvalém poruše krátkodobě připojí paralelně ke zhášecí tlumivce rezistor. Tím dojde ke zvětšení poruchového proudu a vytvoří se podmínky pro spolehlivý náběh ochrany postiženého vývodu. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady, neboť je nutno použít jak zhášecí tlumivku, tak i omezující rezistor a spínací přístroje.[1]

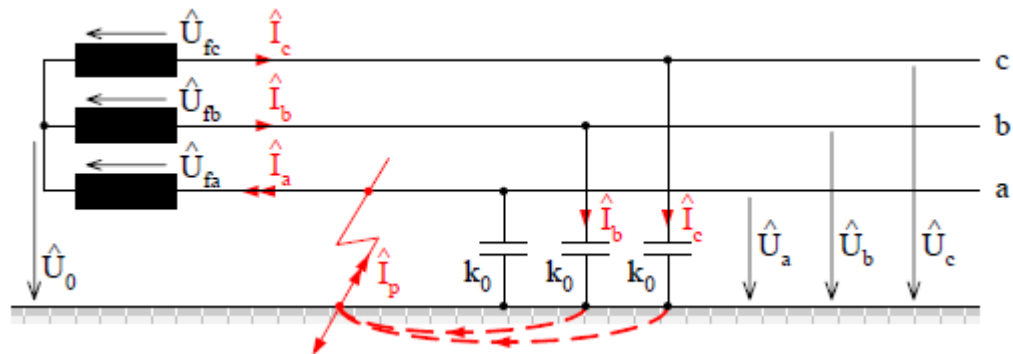
### 1.2.1 Sít' s izolovaným uzlem

S izolovaným uzlem bývají provozovány menší sítě, kde poruchový zemní proud nepřesahuje 10A. Schéma sítě v bezporuchovém stavu je zobrazeno na obrázku č.1.

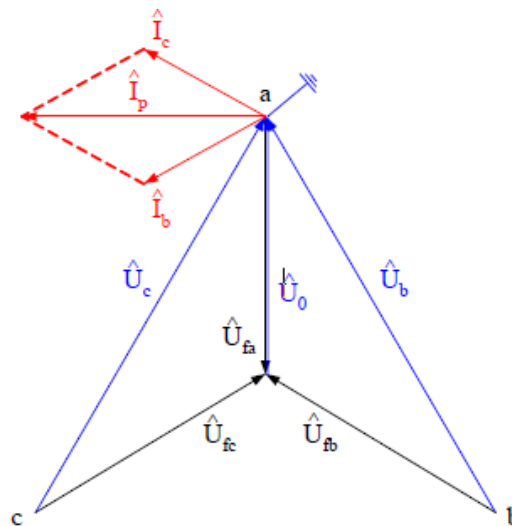


Obr. 1: Sít' s izolovaným uzlem - bezporuchový stav [1]

V případě kovového zemního spojení bude schéma sítě vypadat jako na obrázku č.2.



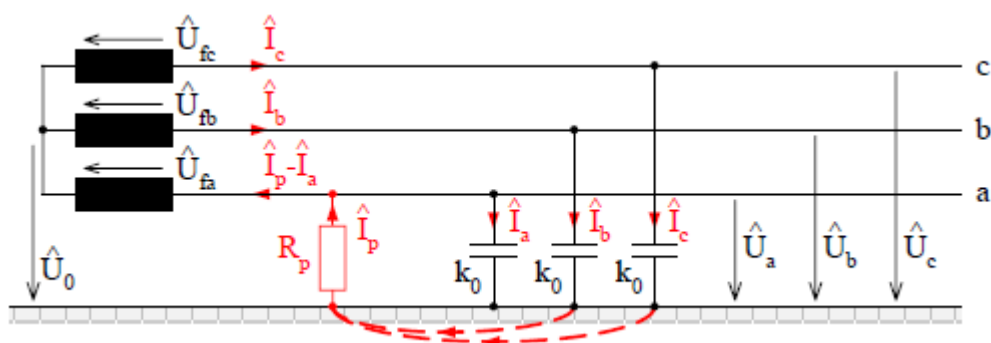
Obr. 2: Síť s izolovaným uzlem – kovové zemní spojení [1]



Obr. 3: Napět'ové a proudové poměry při kovovém zemním spojení [1]

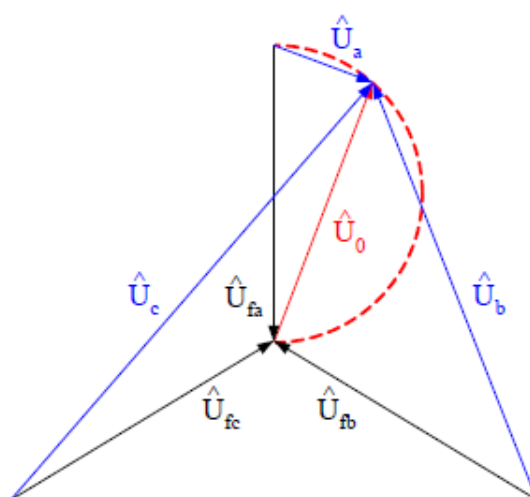
Z fázorového diagramu na obrázku č. 3 je vidět, že napětí v postižené fázi je nulové, v uzlu vzroste na hodnotu fázového napětí a ve zdravých fázích na hodnotu sdruženého napětí. Poruchový proud má kapacitní charakter, je součtem proudů tekoucích zdravými fázemi a jeho velikost závisí na velikosti sítě. U venkovních vedení 22kV tento proud dosahuje hodnot přibližně 0,063A/km. U kabelových sítí, kde jsou kapacity vodičů mnohonásobně větší, se udává hodnota 3,5-4,5 A/km.

V případě odporového zemního spojení, jehož schematické zobrazení je vidět na obrázku č. 4, se poměry nepatrně změní.



Obr. 4: Síť s izolovaným uzlem – odporové zemní spojení [1]

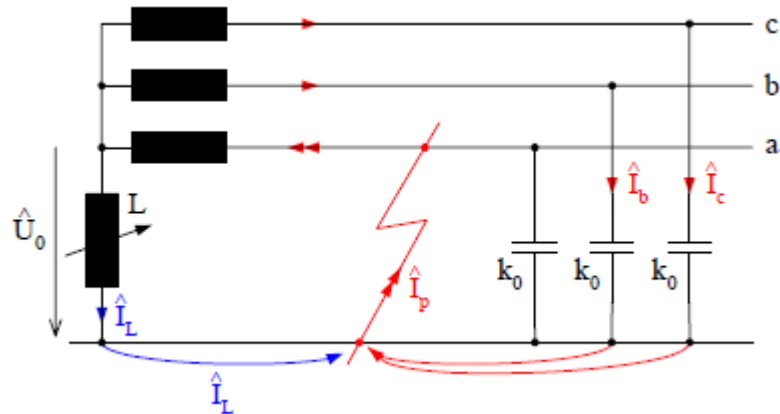
Napětí v postižené fázi nebude nulové, ale závislé na odporu poruchy  $R_p$ . S touto změnou souvisí i změna velikosti napětí v uzlu sítě. Přesné napěťové poměry jsou vidět na obrázku č. 5, kde kružnice představuje hodnotu odporu  $R_p$ . Z diagramu je vidět, že v určitém případě může napětí jedné zdravé fáze vzrůst na hodnotu větší, než je hodnota sruženého napětí.



Obr. 5: Napěťové poměry při odporovém zemním spojení [1]

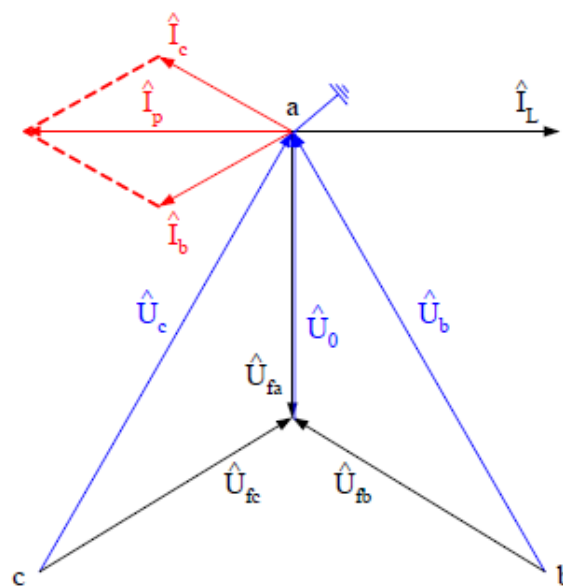
### 1.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku

Kompensace poruchových proudů je doporučena u sítí s poruchovým proudem přesahujícím 5A, u sítí s poruchovým proudem vyšším než 10A je kompenzace nutná. Nejčastějším způsobem v sítích vn je využití plynule regulovatelné tlumivky. Schéma takovéto sítě je na obrázku č. 6.



**Obr. 6: Sít' s uzlem uzemněným přes tlumivku [1]**

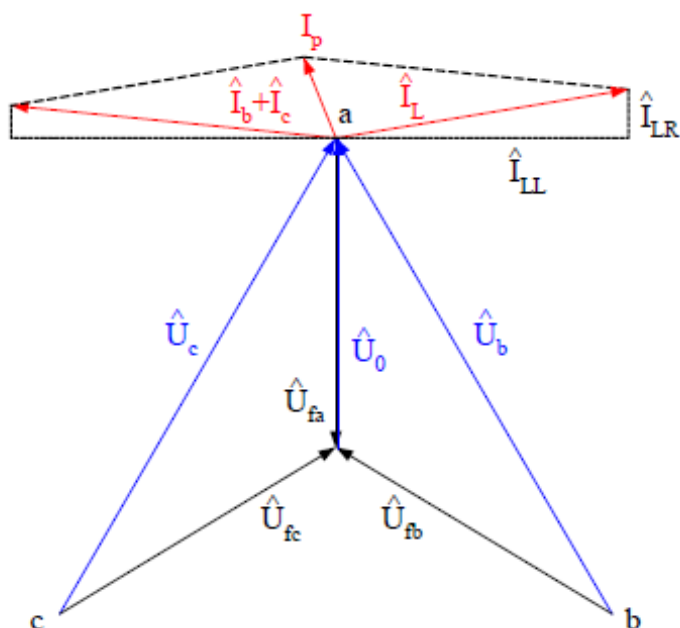
Při kovovém zemním spojení je napětí uzlu rovno fázovému napětí. Proud tekoucí od tlumivky směrem k místu zemního spojení je v protifázi s kapacitním proudem tekoucím zdravými fázemi a v případě vhodně nastavené indukčnosti kompenzační tlumivky dojde ke kompenzaci poruchového kapacitního proudu (viz. Obrázek č. 7) a uhašení oblouku.



**Obr. 7: Napět'ové a proudové poměry při ideální kompenzaci poruchového proudu [1]**

Ve skutečnosti teče místem poruchy zbytkový proud, který se skládá z nevykompenzovaného proudu vlivem nastavení tlumivky, z nevykompenzované činné složky, která je dána činným odporem tlumivky a svody na vedení, a z proudů vyšších harmonických. Tento stav je vidět na obrázku č. 8.

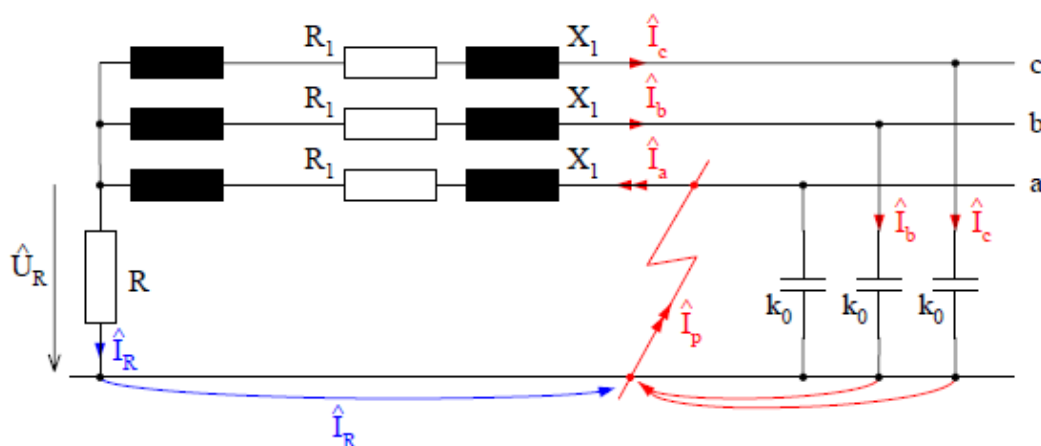




Obr. 8: Napěťové a proudové poměry při skutečné kompenzaci poruchového proudu [1]

### 1.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor

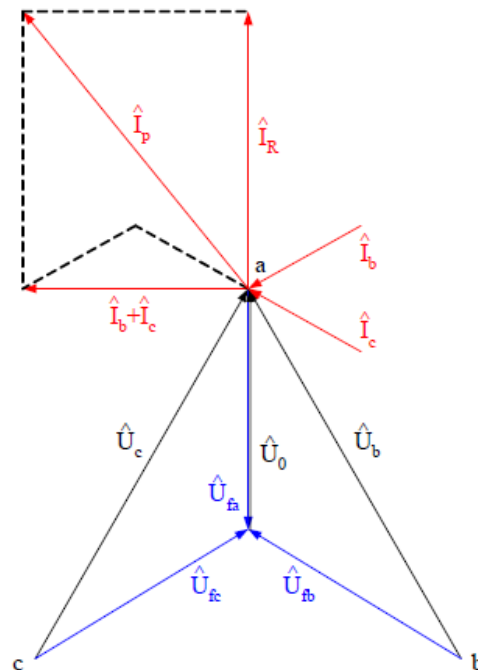
Uzemnění uzlu sítě přes rezistor je vhodné zejména u kabelových sítí, kde je většina poruch trvalá, a proto se zmenšení poruchového proudu neprojeví samozhášením poruch jako při obloukových poruchách u venkovních vedení. Zhášecí tlumivka navíc neomezuje přepětí při vzniku zemního spojení a izolace zdravých fází při provozu zemního spojení je namáhána zvýšeným napětím a přináší riziko vzniku vícenásobných poruch. K uzemnění uzlu se využívají odporové dekády, které se nastavují podle rozsahu sítě.



Obr. 9: Síť s uzlem uzemněným přes rezistor [1]

V případě poruchy v síti s uzlem uzemněným přes rezistor dojde k poklesu napětí v dané fázi a napětí v uzlu se zvýší na hodnotu fázového napětí. Místem poruchy protéká proud,

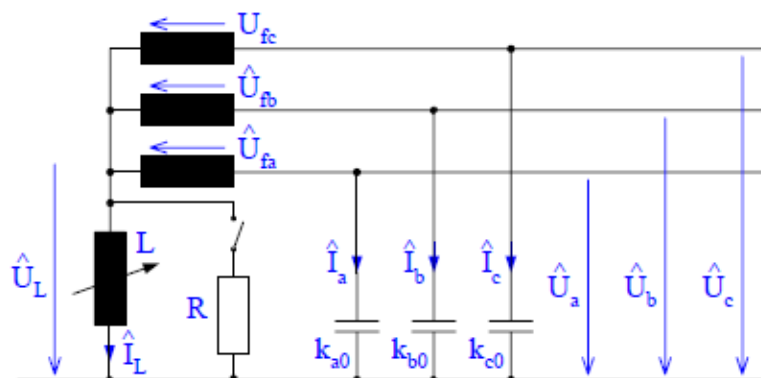
který je dán součtem proudů činným odporem a kapacitního proudu celé sítě. Velikost poruchového proudu je opět závislá na rozloze sítě, ale klesá se vzdáleností místa poruchy od transformátoru. Vhodnou volbou odporu se omezuje velikost poruchového proudu. Odstranění poruchy se poté provádí obdobně jako u jednofázového zkratu.



Obr.10: Napět'ové a proudové poměry při zemním spojení v blízkosti transformátoru[1]

#### 1.2.4 Síť s přechodně uzemněným uzlem

Jedná se o síť uzemněnou přes zhášecí tlumivku, ke které je při trvajícím zemním spojení paralelně připnut rezistor. Připnutím odporu dojde ke zvětšení poruchového proudu a tím se zlepší podmínky pro činnost ochran.



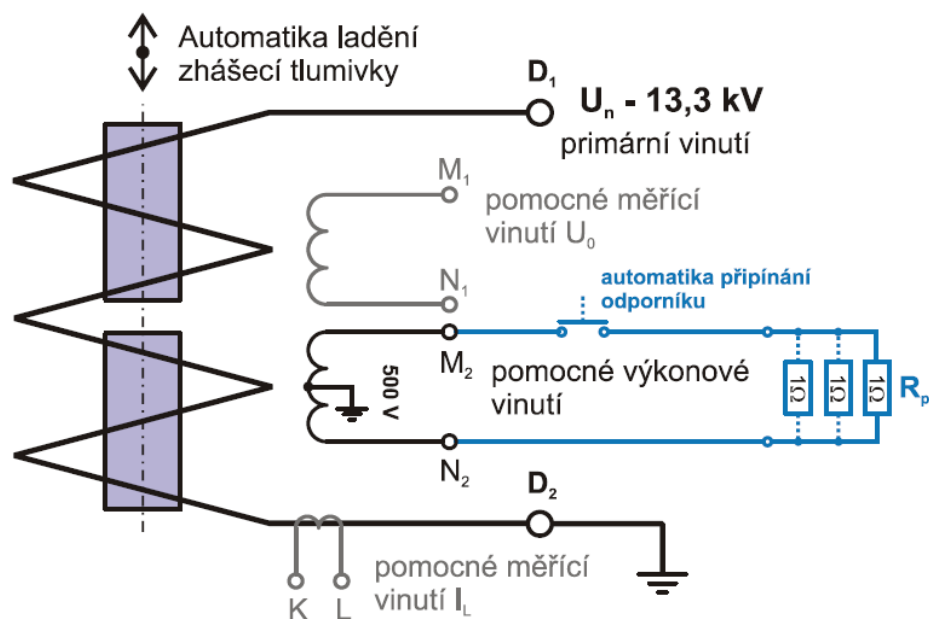
Obr. 11: Síť s přechodně uzemněným uzlem [1]

Druhou možností je zatěžování pomocného vinutí zhášecí tlumivky odporem. U tohoto řešení však není činná složka proudu větší než kapacitní proud sítě. V obou případech je připojení odporu řízeno automaticky při trvajícím zemním spojení.

### 1.3 Kompenzační tlumivka

Kompenzační tlumivka je zařízení, které slouží ke kompenzaci zemního kapacitního proudu. Instaluje se v napájecích rozvodnách distribuční soustavy a připojuje se k uzlu napájecího transformátoru. V případě, že uzel transformátoru není vyveden, je možné tlumivku připojit k uměle vytvořenému uzlu nebo k uzlu pomocného transformátoru v zapojení  $Y_n d1$ .

Počet zhášecích tlumivek je volen na základě počtu napájecích transformátorů, samostatně provozovaných přípojníc a také na velikosti kapacitního proudu napájené sítě. Každá kompenzační tlumivka připojená k transformátoru 110 kV/vn pro venkovní nebo smíšenou síť s poruchovým proudem větším než 50A musí být vybavena samočinnou regulací vyladění tlumivky a možností manuální regulace proudu tlumivkou, dále musí obsahovat ukazatel proudového nastavení a napětí na tlumivce a automatiku připínání odporníku.

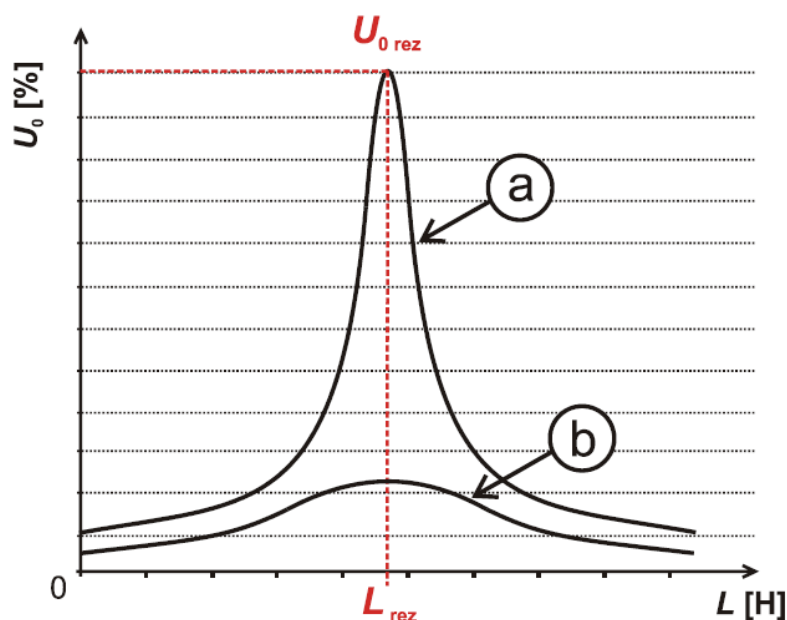


**Obr. 12: Zjednodušené schéma zhášecí tlumivky s automatikou připínání odporníku [3]**

Na obrázku číslo 12 je vidět schéma běžně používané zhášecí tlumivky. Tlumivka obsahuje primární vinutí s hodnotou napětí 13,3 kV, které je automatikou ladění nastavováno do požadovaného stavu kompenzace, dvě pomocná vinutí pro měření kompenzačního proudu

a netočivé složky uzlového napětí a výkonové vinutí s hodnotou napětí 500 V pro připojení sestavy odporníků.

Pro správnou funkci kompenzace je nezbytné znát rezonanční křivku soustavy. Tato křivka vyjadřuje závislost uzlového napětí na kompenzačním proudu. Zjišťování rezonanční křivky probíhá postupným laděním zhašecí tlumivky připojené k soustavě v bezporuchovém stavu. Tento postup je možný pouze u nesymetrických soustav, například u soustavy s vysokým podílem venkovních vedení. U kabelových sítí je nutné nejdříve vytvořit umělou nesymetrii soustavy, jelikož pro symetrické sítě je rezonanční křivka velmi plochá. Z rezonanční křivky lze poté zjistit velikost kapacitního proudu sítě, velikost svodového proudu, činitel útlumu a činitel nesymetrie. Příklad rezonanční křivky pro venkovní a kabelové vedení je uveden na obrázku číslo 13.



Obr. 13: Příklad rezonanční křivky - a) venkovní vedení b) kabelové vedení [3]

## 2 Metody detekce zemního spojení

Provoz sítě se zemním spojením je jedním ze stavů se zvýšeným rizikem výskytu závažné poruchy, která by mohla vést až k přerušení dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu je metodám vedoucím k lokalizaci zemního spojení věnována velká pozornost, neboť volba vhodné metody vede ke snížení času potřebného k odstranění poruchy a ke snížení jejích důsledků. Využívaných metod je velké množství a lze je rozdělit do dvou základních skupin, na metody aktivní a pasivní.

### 2.1 Aktivní metody detekce zemního spojení

Tyto metody používají k lokalizaci zemního spojení injektovaný signál. Tento signál může mít konstantní frekvenci nebo se frekvence může měnit.

Ke generování signálu se používají napěťové transformátory, které při výskytu zemního spojení začnou generovat signál a injektovat ho do obvodu. Signál se přes místo poruchy uzavírá do smyčky. Postižené vedení a místo zemního spojení je následně určeno sledováním signálu. Nevýhodou aktivní metody je nutnost využití zařízení pro generování signálu, jehož úroveň je závislá na výkonu napěťového transformátoru. Další nevýhodou je malá pravděpodobnost správné lokalizace vysoko-impedančních zemních spojení nebo přerušovaných obloukových zemních spojení. Metoda je také závislá na celkové kapacitě soustavy, s rostoucí kapacitou se přesnost lokalizace snižuje.

### 2.2 Pasivní metody detekce zemního spojení

Tyto metody využívají k detekci zemního spojení měření parametrů napětí a proudů. Podle způsobu vyhodnocování se metody dělí na metody statické (využívající ustáleného stavu) a na metody dynamické (využívající signál během přechodového děje).

#### 2.2.1 Statické metody

##### ➤ Porovnávání amplitudy nulové složky proudu

Tato metoda vyhodnocuje amplitudy nulových složek proudů v jednotlivých vývodech. Je-li vlivem poruchy překročena přednastavená hodnota, začnou se porovnávat amplitudy nulových složek proudů jednotlivých vývodů a jako postižené vedení je označeno to s maximální amplitudou. Nevýhodou metody je nízká citlivost a nutnost přesného měření nulové složky proudu. To je problémem hlavně u vedení,

kde jeden vývod značně převyšuje délku ostatních vývodů a u vysoko-impedančních zemních spojení.

➤ **Porovnávání fáze nulové složky proudu**

Tato metoda porovnává fáze nulových složek proudů jednotlivých vývodů. V postiženém vývodu je fáze nulové složky opačná než v nepostižených vývodech. Přesnost této metody je závislá na rozloze sítě (velikosti nulové složky proudu), s rostoucí velikostí sítě se přesnost zvyšuje. Správné vyhodnocení komplikuje také proudové nesymetrie a vysoko-impedanční zemní spojení.

Nízkou citlivost výše uvedených metod je možné zvýšit jejich kombinací. Nejprve se vyberou vývody s nejvyšší amplitudou nulové složky a u těchto vývodů se provede porovnání fází nulové složky. Vývod s opačnou fází nulové složky je označen za postižený. V případě vysoko-impedančního zemního spojení nebo u soustavy s mnoha krátkými vedeními není ani tato kombinace metod zárukou spolehlivé detekce zemního spojení.

➤ **Určení toku jalového výkonu nulové složky**

Tato metoda vyhodnocuje tok jalového výkonu, respektive jeho znaménka. U postiženého vývodu předbíhá nulová složka proudu napětí o  $90^\circ$ , u zdravého vývodu se proud o  $90^\circ$  opožďuje. Pokud je znaménko jalového výkonu záporné, je vývod označen za postižený, pokud je znaménko kladné, je vývod zdravý. Odpadá tak nutnost porovnání výkonů s ostatními vývody, ale problém obtížné lokalizace poruch s malým nulovým proudem přetrvává.

➤ **Metoda maximální změny jalové složky nulového proudu**

U této metody se nejprve v bezporuchovém stavu vybere pro jednotlivé vývody referenční signál nulové složky proudu společně s fázovým posunem nulové složky napětí. Při vzniku zemního spojení se vyhodnotí jejich změna a za vývod s poruchou je označen ten s maximální změnou.

Všechny výše uvedené metody se využívají v izolovaných soustavách. V kompenzovaných sítích je využít nelze.

➤ **Metoda detekce činného výkonu nulové složky**

Tato metoda je založena na nemožnosti plně vykompenzovat poruchový proud, u kterého vždy přetrvává činná složka nulového proudu. Z tohoto důvodu je možné tuto metodu využít i u kompenzovaných sítí. V postiženém vývodu je činná složka proudu a tím i činný výkon nulové složky vyšší a má opačný směr než u zdravých vývodů.

➤ **Metoda páté harmonické**

Vlivem nelineárních zařízení a zemního spojení v síti se mohou generovat vyšší harmonické, mezi kterými má významný podíl pátá harmonická. Zhášecí tlumivka kompenzuje první harmonickou, proto je možné využít pátou harmonickou pro přesnější lokalizaci místa poruchy, jelikož pátá harmonická proudu je u postiženého vedení vyšší a má opačný směr než u zdravých vývodů. Celá metoda je velmi závislá na přesnosti měření a vyváženosti proudových transformátorů.

➤ **Metoda vyšších harmonických**

Tato metoda využívá stejný princip jako metoda páté harmonické, ale před vyhodnocením je provedena suma 3., 5. a 7. harmonické.

➤ **Admitanční princip nulové složky**

U postiženého vedení se vlivem zemního spojení mění i admitance. Tato metoda porovnává nulovou admitanci před poruchou a při poruše a za postižený vývod je označen ten s největším nárůstem nulové admitance. Tato metoda je přesnější než výše uvedené.

➤ **Metoda zpětné složky nulového proudu**

Tato metoda je založena na měření zpětné složky proudu, která je vyvolána zemním spojením a prochází postiženým vedením od místa poruchy k transformátoru. U postiženého vývodu je tato složka mnohem vyšší než u zdravých vývodů. Pokud dojde k překročení přednastavených limitů, je vývod označen za postižený.

### 2.2.2 Dynamické metody

#### ➤ **Metoda první půl-periody**

Při vzniku zemního spojení dojde vlivem kapacit jednotlivých vývodů k přechodovému ději, během kterého dojde k vybití kapacity postižené fáze. Tento vybíjecí proud je patrný v první půl-periodě po vzniku zemního spojení. Uvedená metoda poté porovnává fáze nulové složky napětí a proudu. Jsou-li napětí a proud ve fázi, jedná se o zdravý vývod. Jsou-li složky v protifázi, jedná se o postižený vývod. Výhodou této metody je možnost využití v kompenzovaných sítích a také pro oblouková zemní spojení. Nevýhodou je krátký časový interval pro správné vyhodnocení.

#### ➤ **Připínání odporníku**

Tato metoda využívá pro určení postiženého vývodu připnutí odporníku do uzlu sítě. Po vzniku zemního spojení se na krátkou dobu připojí odporník a následně se vyhodnotí napěťové a proudové poměry. Pokud je diference amplitudy proudu postižené fáze kladná, jedná se o postižený vývod. V opačném případě je vývod zdravý. Metodu lze použít i pro lokalizaci pomocí nulových složek. Nevýhodou této metody je zvýšené proudové zatížení v místě poruchy.



## 3 Metody řešení zemních poruch

### 3.1 Metoda uzlových napětí

#### 3.1.1 Sít' s izolovaným uzlem

##### Dokonalé zemní spojení

Napět'ové poměry podle Obr. 2:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0 \quad (2)$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0 \quad (3)$$

$$\bar{U}_a = 0 \quad (4)$$

Proudové poměry podle Obr.2:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a = \bar{I}_b + \bar{I}_c \quad (5)$$

$$\bar{I}_b = j\omega k_0 \bar{U}_b \quad (6)$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_0 \bar{U}_c \quad (7)$$

Z rovnic (1) až (4) plyne, že napětí uzlu transformátoru se zvýší na zápornou hodnotu napětí postižené fáze

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (8)$$

a napětí nepostižených fází stoupnou na hodnotu sdruženou:

$$\bar{U}_b = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fb} = (-1 + a^2)\bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{j30^\circ} \bar{U}_{fa} \quad (9)$$

$$\bar{U}_c = \bar{U}_0 + \bar{U}_{fc} = (-1 + a)\bar{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ} \bar{U}_{fa} \quad (10)$$

Poruchový zemní proud:

$$\begin{aligned} \bar{I}_p = \bar{I}_b + \bar{I}_c &= j\omega k_0 (\bar{U}_b + \bar{U}_c) = j\omega k_0 [(-1 + a^2) + (-1 + a)] \bar{U}_{fa} = \\ &= j\omega k_0 (-3 + a^2 + a + 1) \bar{U}_{fa} = -3j\omega k_0 \bar{U}_{fa} = \\ &= 3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (A) \end{aligned} \quad (11)$$

**Odporové zemní spojení**

Napěťové poměry podle Obr.4:

$$\bar{U}_a - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fa} = 0 \quad (12)$$

$$\bar{U}_b - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fb} = 0 \quad (13)$$

$$\bar{U}_c - \bar{U}_0 - \bar{U}_{fc} = 0 \quad (14)$$

Proudové poměry podle Obr.4:

$$\bar{I}_a = j\omega k_0 \bar{U}_a \quad (15)$$

$$\bar{I}_b = j\omega k_0 \bar{U}_b \quad (16)$$

$$\bar{I}_c = j\omega k_0 \bar{U}_c \quad (17)$$

Poruchový proud:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c = -\frac{\bar{U}_a}{R_p} \quad (18)$$

Napětí uzlu:

$$\bar{U}_0 = -\frac{j\omega(k_{a0} + a^2k_{b0} + ak_{c0}) + \frac{1}{R_p}}{j\omega(k_{a0} + k_{b0} + k_{c0}) + \frac{1}{R_p}} \bar{U}_{fa} \quad (V) \quad (19)$$

Poruchový proud v kapacitně symetrické síti:

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

$$\bar{I}_p = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \frac{R_p^{-1}}{3j\omega k_0 + R_p^{-1}} \quad (A) \quad (20)$$

### 3.1.2 Sít' s uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku

#### Dokonalé zemní spojení

Napět'ové a proudové poměry podle Obr.6:

$$\bar{U}_0 = -\bar{U}_{fa} \quad (21)$$

$$\bar{I}_L = -j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} \quad (22)$$

Při úplné kompenzaci:

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \quad (23)$$

Z rovnic (11) a (22):

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (24)$$

Úpravou získám potřebnou velikost zhašecí tlumivky (ideální) pro úplnou kompenzaci zemního proudu:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} (H) \quad (25)$$

Výkon tlumivky:

$$S = \bar{U}_0 \cdot \bar{I}_L^* = 3j\omega k_0 \bar{U}_0^2 = j\omega k_0 U^2 \quad (26)$$

V reálném prostředí není úplná kompenzace možná, poruchový proud je poté:

$$\bar{I}_p = \left[ \frac{1}{R_L} + 3G_0 + j\left(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L}\right) \right] \bar{U}_0 (A) \quad (27)$$

### 3.1.3 Sít' s uzlem uzemněným přes rezistor

Podmínka tlumení přepětí:

$$\bar{I}_R \geq \bar{I}_{kap} \Rightarrow \frac{U_f}{R} \geq 3\omega k_0 U_f \quad (28)$$

Z toho určím velikost uzlového rezistoru:

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (29)$$

Napětí uzlu sítě:

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_f \frac{R}{R + R_p - jRR_{por}3\omega C} \quad (V) \quad (30)$$

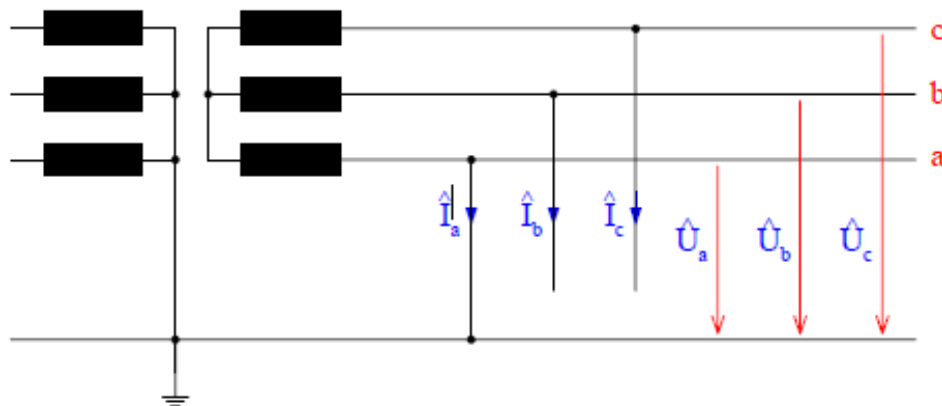
Poruchový proud je dán součtem kapacitního proudu sítě a proudu uzlového rezistoru:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_{kap} + \bar{I}_R = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega k_0\right)\bar{U}_0 \quad (A) \quad (31)$$

### 3.2 Metoda souměrných složek

Metoda souměrných složek je uvedena pro dokonalé zemní spojení. V případě odporového zemního spojení by v náhradních složkových schématech byl do série zapojen ještě odpor poruchy.

#### 3.2.1 Sít' s izolovaným uzlem



Obr. 14: Schematické znázornění zemního spojení [1]

Pro zemní spojení ve fázi **a** platí následující rovnice:

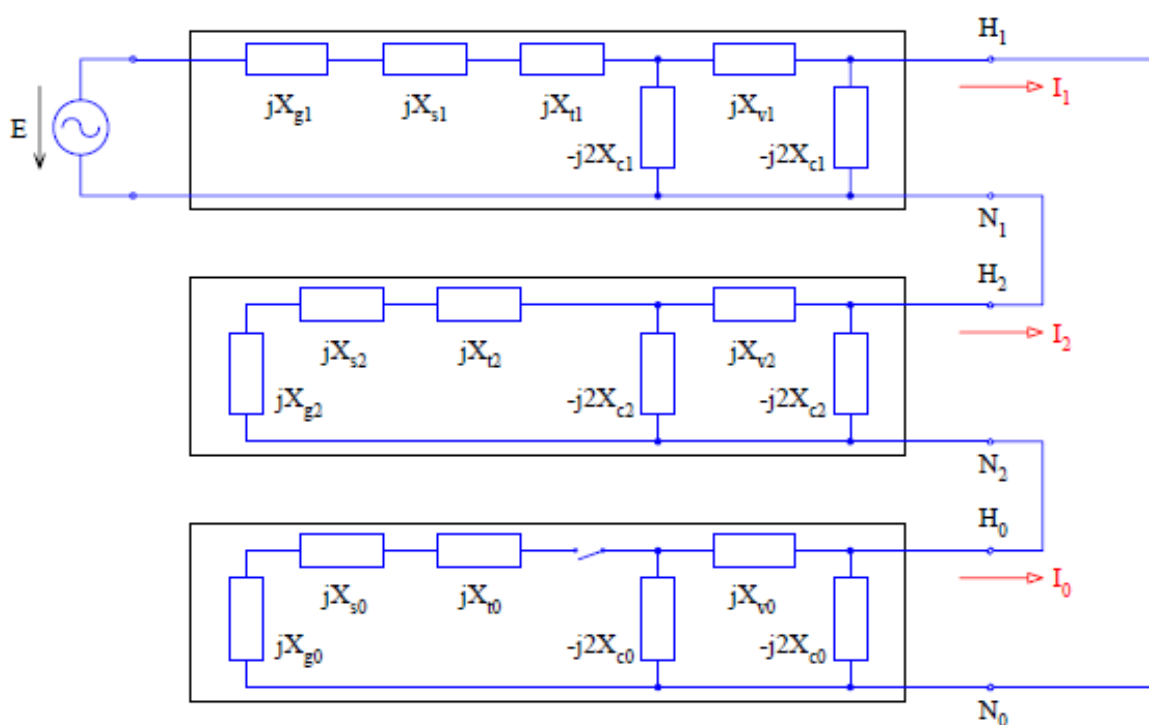
$$\begin{aligned} U_a &= 0 \\ I_b &= 0 \\ I_c &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Rovnice pro výpočet složkových proudů:

$$I_F = F^{-1}I = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_A \\ I_A \\ I_A \end{bmatrix} \quad (33)$$

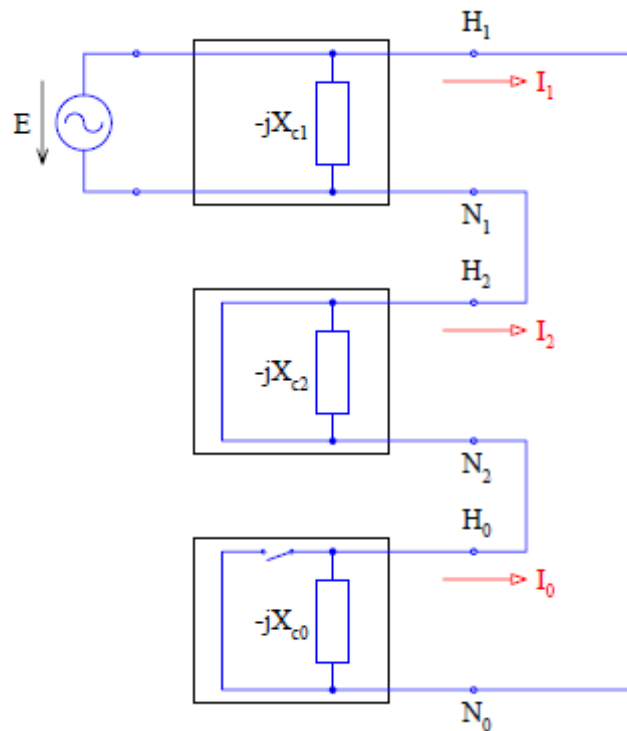
$$I_1 = I_2 = I_0 = \frac{1}{3}I_A \quad (34)$$

Z rovnice (34) vyplývá, že lze náhradní schémata složkových soustav sériově spojit – viz. obrázek č.15.



**Obr. 15: Propojení složkových soustav [1]**

Vzhledem k tomu, že kapacitní reaktance vedení jsou mnohonásobně větší než rezistence a indukční reaktance, lze schéma ještě více zjednodušit do podoby na obrázku č. 16.



**Obr. 16: Zjednodušené složkové náhradní schéma izolované sítě [1]**

Reaktance jednotlivých soustav:

$$X_1 = 0 \quad (35)$$

$$X_2 = 0 \quad (36)$$

$$X_0 = X_{c0} = X_C \quad (37)$$

Složkové proudy:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{\bar{E}}{-jX_{c0}} \quad (38)$$

Složková napětí:

$$\bar{U}_1 = (\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)\bar{I}_1 = \bar{E} \quad (39)$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2\bar{I}_1 = 0 \quad (40)$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0\bar{I}_1 = -\bar{E} \quad (41)$$

Fázové proudy:

$$\bar{I}_A = 3\bar{I}_1 \quad (42)$$

$$\bar{I}_B = 0 \quad (43)$$

$$\bar{I}_C = 0 \quad (44)$$

Poruchový proud:

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_A = -3j \frac{\bar{E}}{X_{c0}} = -3j\omega k_0 \bar{E} \quad (45)$$

Fázová napětí určím pomocí transformační matice  $\mathbf{F}$ :

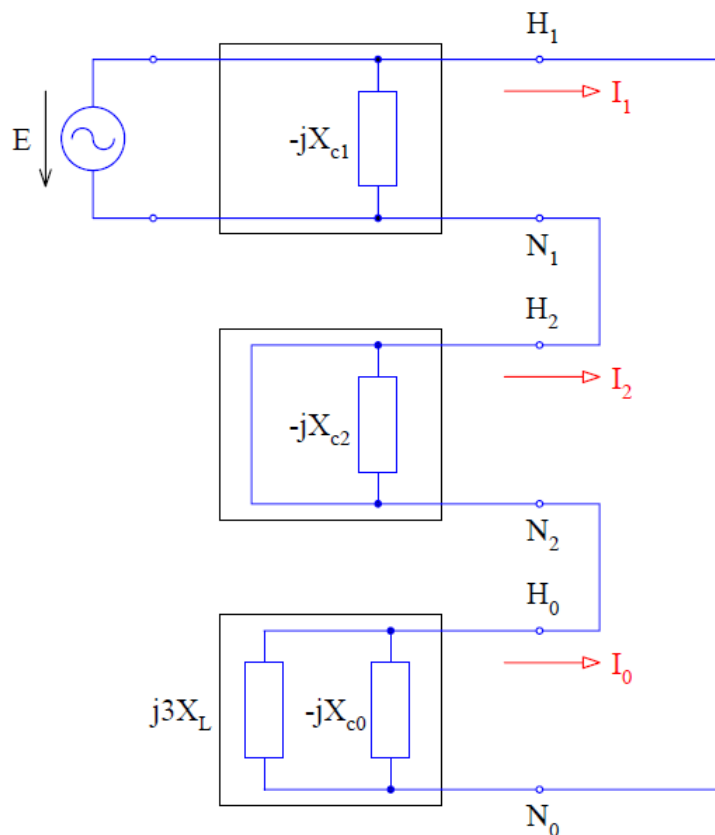
$$\bar{U} = \mathbf{F}U_F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

$$\bar{U}_A = 0 \quad (47)$$

$$\bar{U}_B = a^2\bar{U}_1 + a\bar{U}_2 + \bar{U}_0 = a^2\bar{E} - \bar{E} = (a^2 - 1)\bar{E} \quad (48)$$

$$\bar{U}_C = a\bar{U}_1 + a^2\bar{U}_2 + \bar{U}_0 = a\bar{E} - \bar{E} = (a - 1)\bar{E} \quad (49)$$

### 3.2.2 Síť s uzlem uzemněným přes zhašecí tlumivku



Obr. 17: Zjednodušené složkové náhradní schéma sítě uzemněné přes tlumivku [1]

Obdobně jako u sítě izolované jsou rezistence a indukční reaktance zanedbány.

Reaktance jednotlivých soustav:

$$X_1 = 0 \quad (50)$$

$$X_2 = 0 \quad (51)$$

$$X_0 = j \frac{3X_L X_{c0}}{X_{c0} - 3X_L} \quad (52)$$

Sousledný proud:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{\bar{E}}{j \frac{3X_L X_{c0}}{X_{c0} - 3X_L}} = -j \frac{X_{c0} - 3X_L}{3X_L X_{c0}} \bar{E} \quad (53)$$

Poruchový proud:

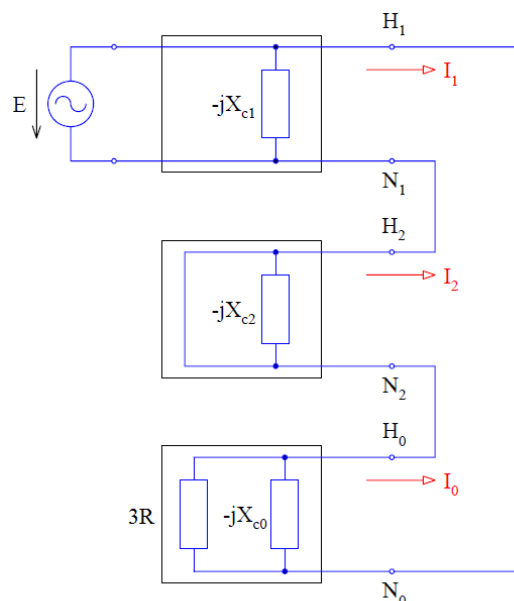
$$\bar{I}_p = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_1 = j \frac{X_{c0} - 3X_L}{X_L X_{c0}} \bar{E} \quad (A) \quad (54)$$

Podmínka plné kompenzace:

$$X_{c0} - 3X_L = 0 \quad (55)$$

$$X_L = \frac{1}{3} X_{c0} = \frac{1}{3\omega k_0} \quad (56)$$

### 3.2.3 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor



Obr. 18: Zjednodušené složkové náhradní schéma sítě uzemněné přes rezistor



Obdobně jako u sítě izolované a sítě uzemněné přes tlumivku jsou rezistence a indukční reaktance zanedbány.

Reaktance jednotlivých soustav:

$$X_1 = 0 \quad (57)$$

$$X_2 = 0 \quad (58)$$

$$X_0 = \frac{j3RX_{c0}}{jX_{c0} - 3R} \quad (59)$$

Sousledný proud:

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{\bar{E}}{\frac{j3RX_{c0}}{jX_{c0} - 3R}} = \frac{jX_{c0} - 3R}{j3RX_{c0}} \bar{E} \quad (60)$$

Poruchový proud:

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_1 = -\frac{jX_{c0} - 3R}{jRX_{c0}} \bar{E} \text{ (A)} \quad (61)$$

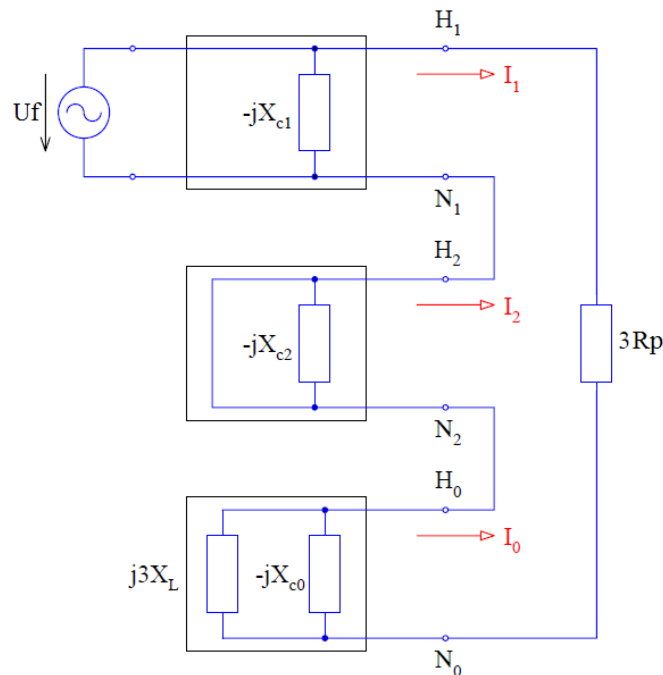
## 4 Analytické řešení konkrétní sítě

### 4.1 Metoda souměrných složek

Pro analytické řešení jsem zvolil kompenzovanou kabelovou síť na napěťové hladině 22kV, s dvěma vývody o délce 2x15km, kapacitou kabelu  $C=0,24\mu\text{F}/\text{km}$ . Dále jsem uvažoval odporové zemní spojení o přechodovém odporu  $R_p=100\Omega$ .

#### 4.1.1 Zjednodušený výpočet

Řešení budu nejprve provádět při zanedbání podélných reaktancí a svodů.



Obr. 19: Zjednodušené složkové schéma řešené sítě

Nejprve určím hodnotu fázového napětí a kapacitu vedení:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{22000}{\sqrt{3}} = 12701,7V$$

$$C = C' \cdot l = 0,24 \cdot 30 = 7,2\mu F$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{100\pi \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 442,09\Omega$$

Následně jsem určil potřebnou velikost zhášecí tlumivky:

$$X_L = \frac{1}{3} X_c = \frac{1}{3 \cdot 100\pi \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} (\Omega)$$

$$X_L = 147,36\Omega \Rightarrow L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{147,36}{100\pi} = 0,46H$$

Nyní určíme složkové reaktance:

$$X_1 = 0$$

$$X_2 = 0$$

Při úplné kompenzaci je reaktance nulové složky nekonečná a poruchový proud je nulový:

$$X_0 = j \frac{3X_L X_{c0}}{X_{c0} - 3X_L} \rightarrow \infty, \bar{I}_P = 0$$

Při výpočtu budu uvažovat rozladění tlumivky o -10%, které se využívá z důvodu nalezení místa poruchy:

$$X_L = 0,9 \cdot 147,36 = 132,62\Omega$$

$$X_0 = j \frac{3X_L X_C}{X_C - 3X_L} = j \frac{3 \cdot 132,62 \cdot 442,09}{442,09 - 3 \cdot 132,62} = j3978,87\Omega$$

Výsledná impedance:

$$\bar{Z} = X_1 + X_2 + X_0 + 3R_P = 300 + j3978,87\Omega$$

Pomocí Ohmova zákona určím složkové proudy:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}} = \frac{12701,7}{300 + j3978,87} = 0,23 - j3,17 \text{ A}$$

Pomocí složkových proudů určím ze smyček složková napětí:

$$\bar{U}_1 = U_f - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 = 12701,7 - 0 = 12701,7V$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2 \bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0 \bar{I}_1 = -(j3978,87) \cdot (0,23 - j3,17) = -12622,57 - j952,14V$$

Fázová napětí určím ze složkových napětí pomocí matice Fortescue:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 12701,7 \\ 0 \\ -12622,57 - j952,14 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 79,12 - j952,14 \\ -18973,42 - j11952,13 \\ -18973,42 + j10047,85 \end{bmatrix} V \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} |U_a| \\ |U_b| \\ |U_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 955,43 \\ 22424,19 \\ 21469,75 \end{bmatrix} V$$

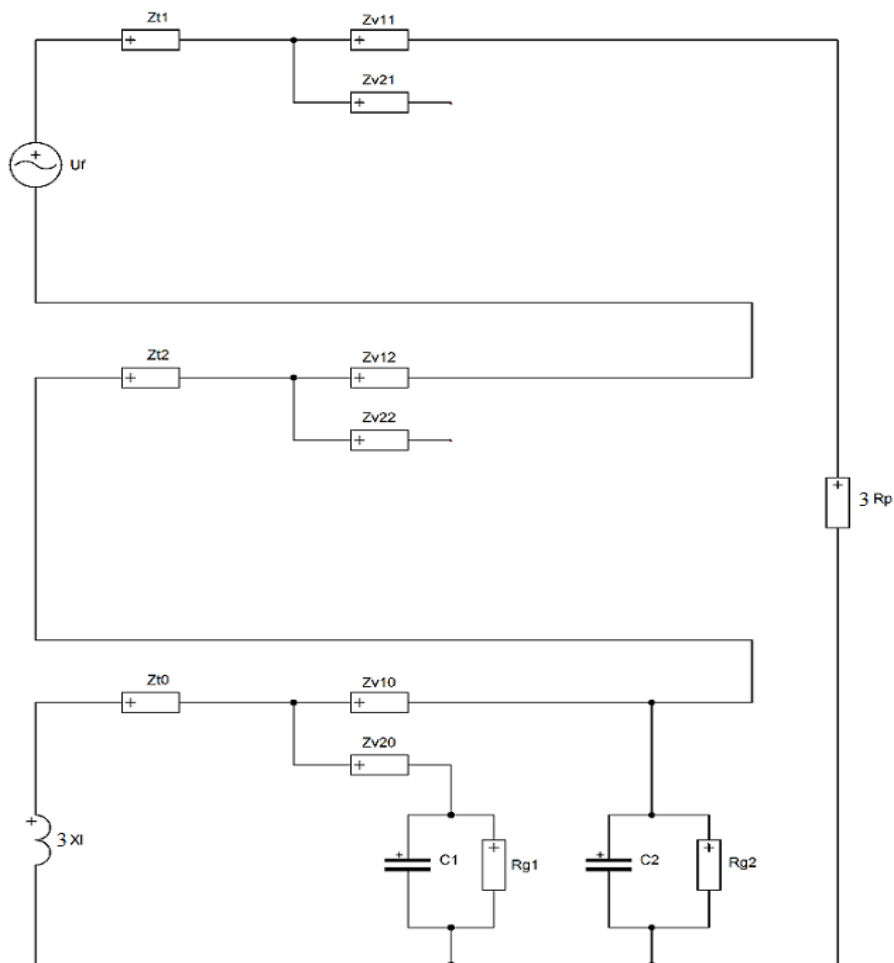
Obdobně jako napětí určím i proudy:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,23 - j3,17 \\ 0,23 - j3,17 \\ 0,23 - j3,17 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,71 - j9,52 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} A$$

$$\begin{bmatrix} |I_a| \\ |I_b| \\ |I_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9,54 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} A$$

#### 4.1.2 Výpočet s uvažováním impedancí vedení a transformátoru



Obr. 20: Složkové schéma řešené sítě

Nyní provedu výpočet s respektováním reaktancí a odporů transformátoru a s uvažováním svodů. Transformátor má výkon  $S_n=40\text{MVA}$ , převod  $p=110/22\text{kV}$ , napětí nakrátko  $u_k=9,5\%$  a ztráty nakrátko  $P_k=86\text{kW}$ . Vedení je realizováno kabelem 22-AXEKVCEY o průřezu  $3 \times 120\text{mm}^2$ , odpor je  $R=0,253\Omega/\text{km}$ , indukčnost  $L=0,62\text{mH}/\text{km}$  a kapacita  $C'=0,24\mu\text{F}/\text{km}$ . Svodem protéká 1% kapacitního proudu.

Nejprve určíme impedance všech prvků:

#### Transformátor

$$|Z_{T1}| = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{9,5}{100} \cdot \frac{22^2}{40} = 1,18\Omega$$

$$R_{T1} = \frac{\Delta P_k}{S_N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = \frac{86 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^6} \cdot \frac{22^2}{40} = 0,026\Omega$$

$$X_{T1} = \sqrt{Z_{T1}^2 - R_{T1}^2} = \sqrt{1,1858^2 - 0,0260^2} = 1,18\Omega$$

$$Z_{T1} = Z_{T2} = Z_{T0} = R_{T1} + jX_{T1} = 0,026 + j1,18\Omega$$

#### Podélná impedance vedení

$$R_{V11} = R_{V21} = R_V \cdot l = 0,253 \cdot 15 = 3,79\Omega$$

$$X_{V11} = X_{V21} = X_V \cdot l = \omega L \cdot l = 100\pi \cdot 0,62 \cdot 10^{-3} \cdot 15 = 2,92\Omega$$

$$Z_{V11} = Z_{V21} = R_{V11} + jX_{V11} = 3,79 + j2,92$$

#### Kapacita vedení

$$C_1 = C_2 = C' \cdot l = 0,24 \cdot 15 = 3,6\mu\text{F}$$

$$X_{C1} = X_{C2} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{100\pi \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}} = 884,19\Omega$$

#### Svod

$$R_{G1} = R_{G2} = X_C \cdot \frac{100}{1} = 884,1941 \cdot 100 = 88419,41\Omega$$

#### Tlumivka

Pro možnost porovnání výsledků obou výpočtů zvolím opět rozladění o -10%.

$$L' = \frac{1}{3\omega^2 C} = \frac{1}{3 \cdot (100\pi)^2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 0,46\text{H} - \text{plná kompenzace}$$

$$L = L' \cdot 0,9 = 0,46 \cdot 0,9 = 0,42\text{H}$$

$$X_L = \omega L = 100\pi \cdot 0,4221715 = 132,62\Omega$$

Nyní určím složkové impedance:

Sousledná a zpětná

$$Z_1 = Z_2 = Z_{T1} + Z_{V11} = 0,026 + j1,18 + 3,79 + j2,92 = 3,8 + j4,10\Omega$$

Nulová

$$Z_{01} = 3jX_L + Z_{T0} = 3 \cdot j132,62 + 0,026 + j1,18 = 0,026 + j399,07\Omega$$

$$Z_{02} = Z_{V20} + \frac{R_{G1} \cdot (-jX_{C1})}{R_{G1} - jX_{C1}} = 3 \cdot (3,79 + j2,92) + \frac{88419,41 \cdot (-j884,19)}{88419,41 - j884,19} =$$

$$= 20,22 - j875,33\Omega$$

$$Z_{03} = \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} = \frac{(0,026 + j399,07) \cdot (20,22 - j875,33)}{0,026 + j399,07 + 20,22 - j875,33} =$$

$$= 14,26 + j732,85\Omega$$

$$Z_{04} = Z_{03} + Z_{V10} = 14,26 + j732,85 + 3 \cdot (3,79 + j2,92) =$$

$$= 25,64 + j741,62\Omega$$

$$Z_0 = \frac{Z_{04} \cdot \frac{R_{G2} \cdot (-jX_{C2})}{R_{G2} - jX_{C2}}}{Z_{04} + \frac{R_{G2} \cdot (-jX_{C2})}{R_{G2} - jX_{C2}}} = \frac{(25,64 + j741,62) \cdot \left( \frac{88419,41 \cdot (-j884,19)}{88419,41 - j884,19} \right)}{25,64 + j741,62 + \left( \frac{88419,41 \cdot (-j884,19)}{88419,41 - j884,19} \right)} =$$

$$= 1159,48 + j4322,73\Omega$$

Celková impedance:

$$\bar{Z} = \bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3R_p = 1467,12 + j4330,95\Omega$$

Složkový proud:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{U}_f}{\bar{Z}} = \frac{12701,7}{1467,12 + j4330,95} = 0,89 - j2,63A$$

Pomocí složkových proudů určím ze smyček složková napětí:

$$\bar{U}_1 = U_f - \bar{Z}_1 \bar{I}_1 = 12701,7 - (3,8 + j4,10) \cdot (0,89 - j2,63) =$$

$$= 12687,48 + j6,39V$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{Z}_2 \bar{I}_1 = -(3,8 + j4,10) \cdot (0,89 - j2,63) = -14,21 + j6,39V$$

$$\bar{U}_0 = -\bar{Z}_0 \bar{I}_1 = -(1159,48 + j4322,73) \cdot (0,89 - j2,63) =$$

$$= -12405,59 - j802,05V$$

Fázová napětí určíme ze složkových napětí pomocí matice Fortescue:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 12687,48 + j6,39 \\ -14,21 + j6,39 \\ -12405,59 - j802,05 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 267,68 - j789,27 \\ -18742,22 - j11808,44 \\ -18742,22 + j10191,54 \end{bmatrix} \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} |U_a| \\ |U_b| \\ |U_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 833,43 \\ 22151,98 \\ 21333,98 \end{bmatrix} \text{ V}$$

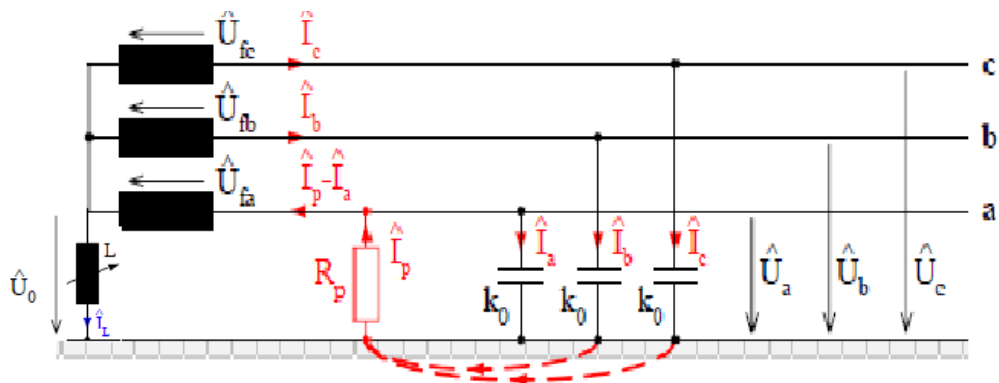
Obdobně jako napětí určíme i proudy:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0,89 - j2,63 \\ 0,89 - j2,63 \\ 0,89 - j2,63 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} 2,67 - j7,89 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} |I_a| \\ |I_b| \\ |I_c| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,33 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A}$$

## 4.2 Metoda uzlových napětí

Pro výpočet touto metodou použijí stejnou síť jako u metody souměrných složek. Pro možnost porovnání výsledků budu opět uvažovat rozladění tlumivky o 10%.



Obr. 21: Kompenzovaná síť s odporovou zemní poruchou

$$\bar{L} = \frac{1}{3\omega^2 C} = \frac{1}{3 \cdot (100\pi)^2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 0,46H$$

$$L = 0,9 \cdot 0,46H = 0,42H$$

Nejprve je nutné určit napětí v uzlu sítě:

$$\bar{U}_0 = \bar{U}_f \frac{\frac{1}{R_p}}{\frac{1}{R_p} + j\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)}$$

$$\bar{U}_0 = 12701,7 \cdot \frac{\frac{1}{100}}{\frac{1}{100} + j\left(3 \cdot 100 \cdot \pi \cdot 7,2 \cdot 10^{-6} - \frac{1}{100 \cdot \pi \cdot 0,42}\right)}$$

$$\bar{U}_0 = 12701,7 \cdot \frac{\frac{1}{100}}{\frac{1}{100} - j0,00075398}$$

$$\bar{U}_0 = 12629,9 + j952,27 V$$

Pomocí napětí v uzlu určím napětí ve fázích:

$$\bar{U}_a = \bar{U}_{fa} - \bar{U}_0 = 12701,7 - 12629,9 - j952,27 = 71,80 - j952,27 V$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_b = \bar{U}_{fb} - \bar{U}_0 &= 12701,7 \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 12629,9 - j952,27 = \\ &= -18980,75 - j11952,26V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_c = \bar{U}_{fc} - \bar{U}_0 &= 12701,7 \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - 12629,9 - j952,27 = \\ &= -18980,75 + j10047,72 V \end{aligned}$$

Nyní už pouze určím poruchový proud:

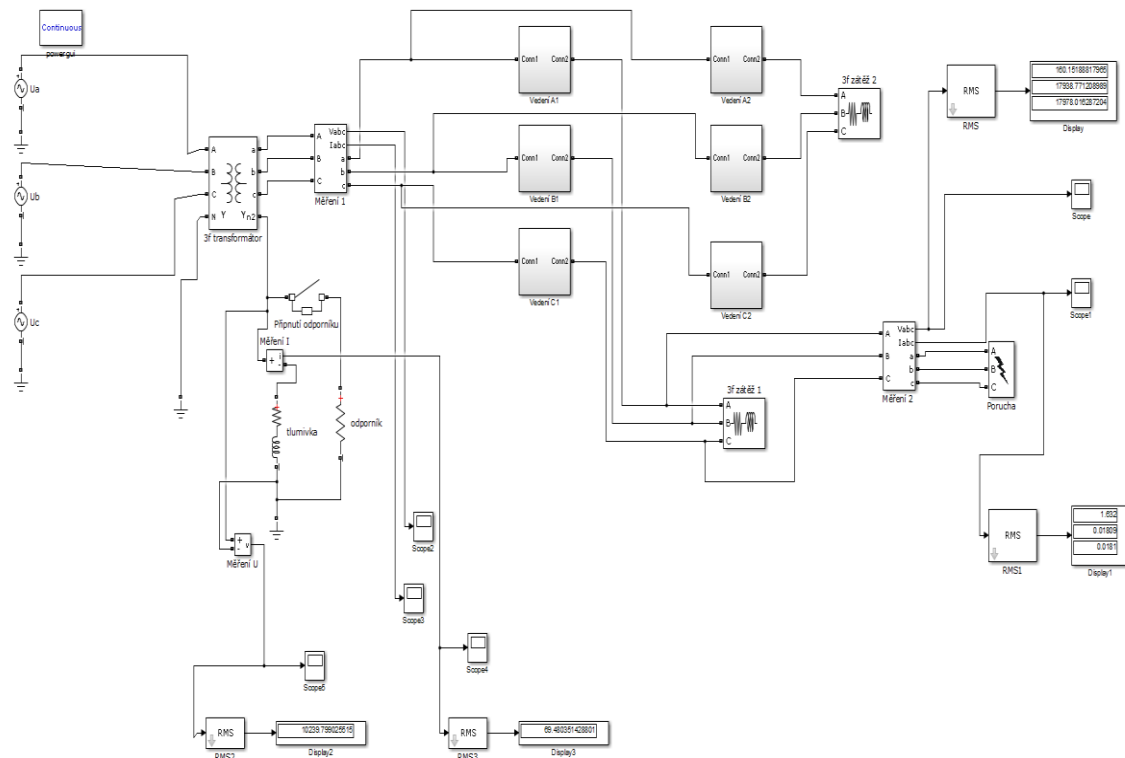
$$\begin{aligned} \bar{I}_{POR} = \bar{I}_A = \bar{U}_0 \cdot j\left(3\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) &= (12629,9 + j952,27) \cdot (-j0,00075398) = \\ &= 0,71 - j9,52 A \end{aligned}$$



## 5 Simulace zemního spojení

Pro simulaci zemního spojení byl využit program Matlab Simulink a knihovny SimPowerSystems. Stejně jako u analytického řešení byla zvolena kabelová kompenzovaná síť s dvěma vývody o délce 15 km. Transformátor má výkon  $S_n=40\text{MVA}$ , převod  $p=110/22\text{kV}$ , napětí nakrátko  $u_k=9,5\%$  a ztráty nakrátko  $P_k=86\text{kW}$ . Vedení je realizováno kabelem 22-AXEKVCEY o průřezu  $3 \times 120\text{mm}^2$ , odpor je  $R=0,253\Omega/\text{km}$ , indukčnost  $L=0,62\text{mH}/\text{km}$  a kapacita  $C'=0,24\mu\text{F}/\text{km}$ . Svodem protéká 1% kapacitního proudu. Vedení je nejprve simulováno jakou nezatíženou, poté je uvažován činný odběr 18MW a jalový odběr 8,7MVar v každé větvi. Zátěž je zapojená do trojúhelníka. Simulace je dále provedena pro odporové zemní spojení o přechodovém odporu  $100\Omega$ . Pro kompenzaci je využita tlumivka o indukčnosti  $L=0,4691\text{H}$  s možností připnutí sekundárního odporníku o velikosti  $5\Omega$ . Zemní spojení je ve fázi **a**.

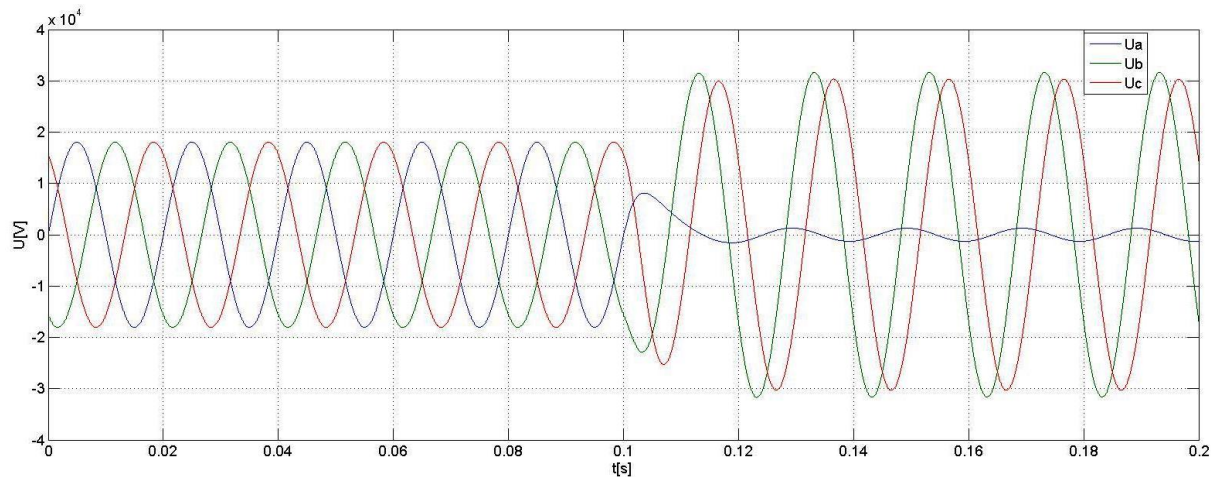
Zmenšené schéma zapojení je uvedeno na obrázku číslo 22, schéma v plné velikosti je uvedeno v příloze 1. V celé kapitole jsou zmiňovány hodnoty napětí a proudů, pokud se jedná o špičkové hodnoty přepětí nebo proudové rázy, uvádím hodnotu maximální, tedy amplitudu. V případě ustáleného stavu uvádím hodnotu efektivní.



Obr. 22: Schéma zapojení v programu Simulink

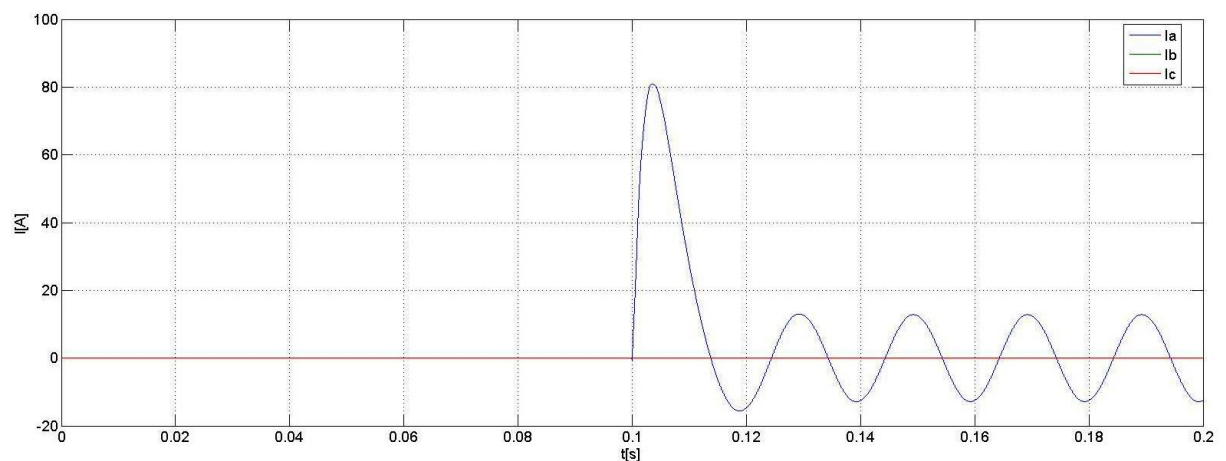
## 5.1 Nevyladěný stav

Simulaci jsem z důvodu možného porovnání s analytickými výpočty nejprve provedl s tlumivkou rozladěnou o -10%. Zemní spojení nastává v čase 0,1 s.



**Obr. 23: Průběh napětí v nevytunovaném stavu**

Z grafu je vidět, že napětí v bezporuchovém stavu dosahuje fázových hodnot. Po ustálení zemního spojení poklesne napětí ve fázi **a** na hodnotu 907,7 V. Vlivem odporového zemního spojení vzroste napětí ve fázi **b** nad hodnotu sdruženého napětí, konkrétně na 22374 V a napětí ve fázi **c** na hodnotu 21452,9 V.

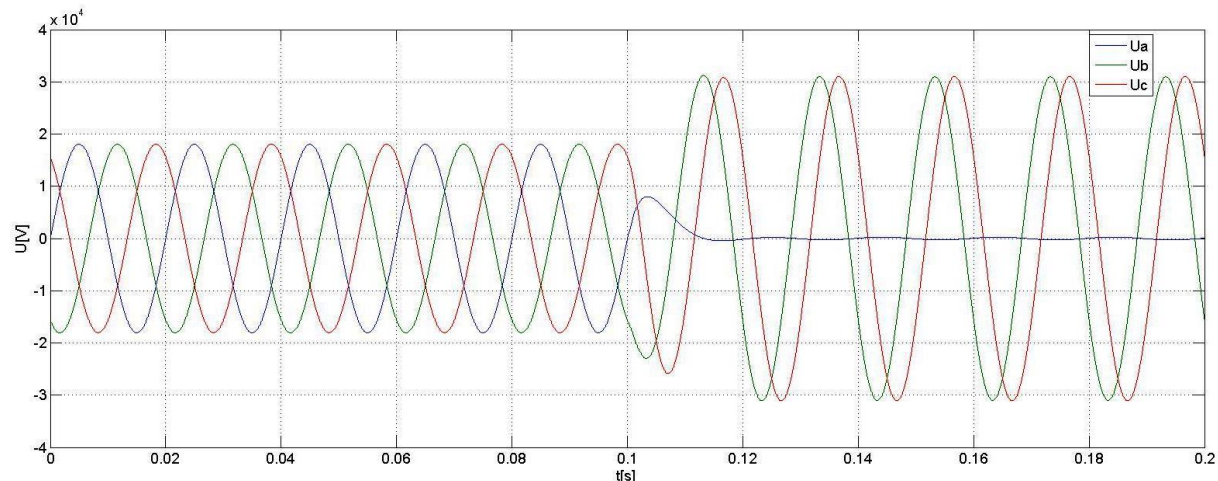


**Obr. 24: Průběh proudu v nevytunovaném stavu**

Na průběhu proudu vidíme přechodný děj, který nastává v čase sepnutí zemního spojení. Proud ve fázi **a** vzroste až na maximální hodnotu 80,85 A a poté se ustálí na hodnotě 9,085 A. Proud v ostatních fázích jsou nulové.

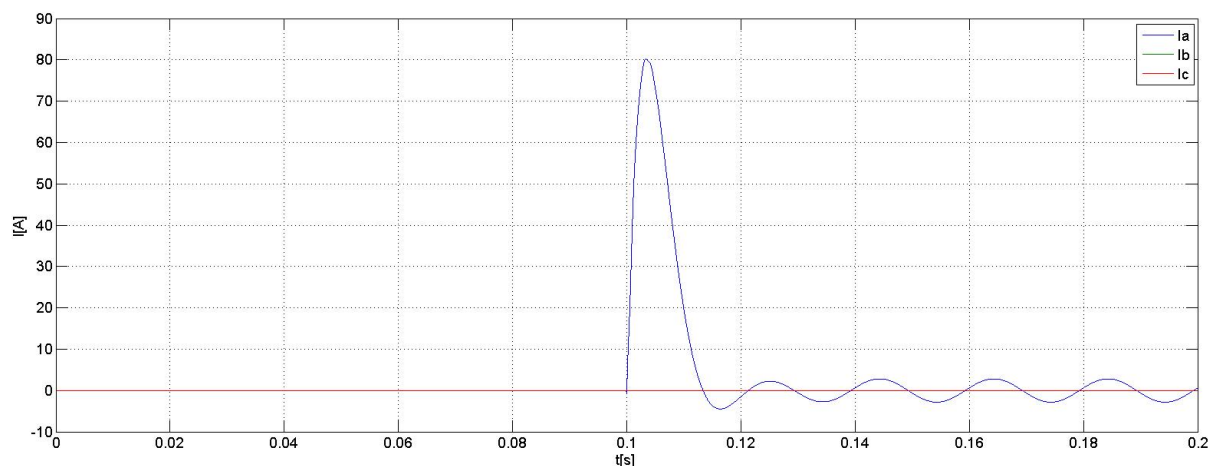
## 5.2 Vyladěný stav

Nyní jsem provedl simulaci pro plně vykompenzovaný stav. Zemní spojení opět nastává v čase 0,1 s.



**Obr. 25: Průběh napětí ve vyladěném stavu**

Ve vyladěném stavu jsou průběhy podobné jako u stavu nevyladěného, rozdílem je velikost napětí v daných fázích. Ve fázi **a** se napětí ustálí na hodnotě 195,6 V, je tedy menší než čtvrtinové oproti nevyladěnému stavu. Tento pokles má vliv i na zdravé fáze, ve fázi **b** se napětí ustálí na hodnotě 21907,2 V a ve fázi **c** na hodnotě 21956,8 V. Zde je vidět, že napětí zdravých fází již nepřekročí hodnotu sdruženého napětí.

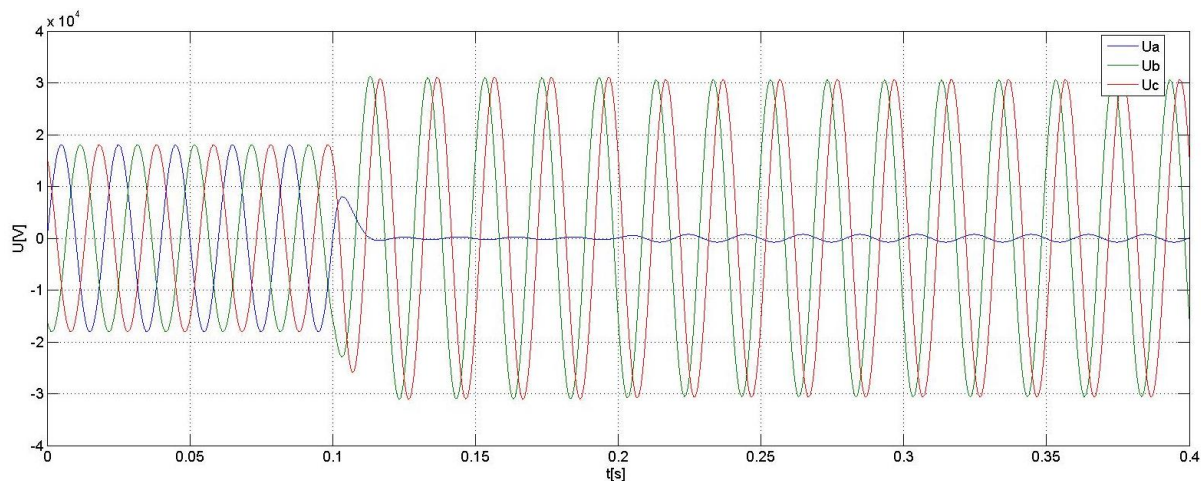


**Obr. 26: Průběh proudu ve vyladěném stavu**

U proudu je stejně jako u napětí možné pozorovat obdobný průběh jako v nevyladěném stavu a zase pokles efektivní hodnoty poruchového proudu. Ten dosahuje během přechodového děje maximální hodnoty 80,15 A a poté se ustálí na hodnotě 1,99 A. Oproti nevyladěnému stavu se opět jedná o pokles na méně než čtvrtinovou hodnotu a v tomto stavu by mohla být síť provozována až do odstranění poruchy.

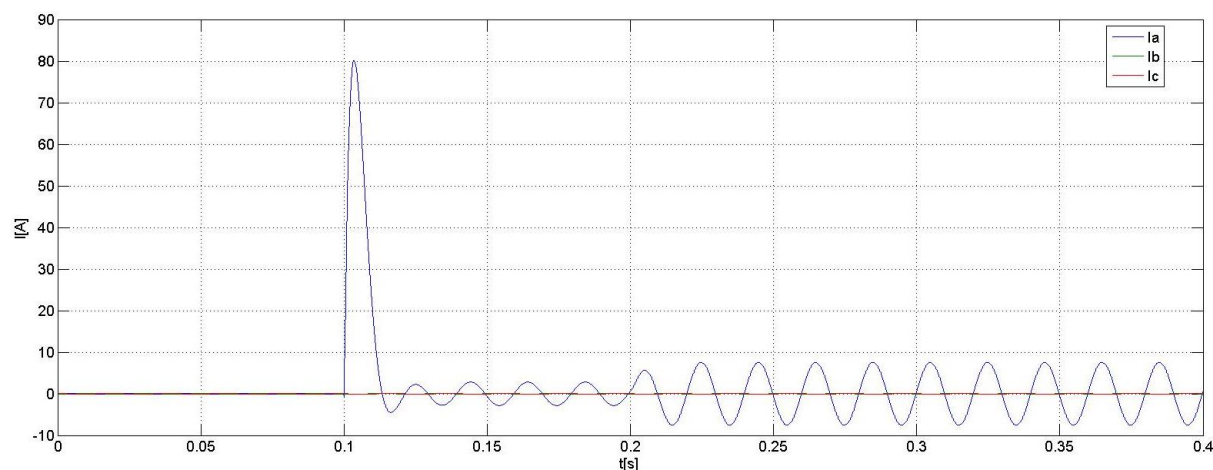
### 5.3 Vyladěný stav s odporníkem

Nyní provedu simulaci kompenzované sítě ve vyladěném stavu s připnutím sekundárního odporníku  $5\Omega$ . Jak je vidět ze schématu simulované sítě na obrázku číslo 22, odporník je pro zjednodušení připojen přímo paralelně bez sekundárního vinutí, proto byla jeho hodnota přepočtena na  $3537,8\Omega$ . Zemní spojení nastává v čase  $0,1\text{ s}$ , odporník je připnut v čase  $0,2\text{ s}$ .



**Obr. 27: Průběh napětí ve vyladěném stavu s odporníkem**

Do času  $0,2\text{ s}$  se jedná o vyladěnou kompenzovanou síť popisovanou v kapitole 5.2. Po připnutí odporníku v čase  $0,2\text{ s}$  se zvýší napětí v postižené fázi na hodnotu  $528,5\text{ V}$ , to způsobí pokles napětí v uzlu z hodnoty  $12505,4\text{ V}$  na hodnotu  $12158,6\text{ V}$  a z tohoto důvodu poklesnou i hodnoty napětí ve zdravých fázích. Konkrétně na hodnotu  $21600,5\text{ V}$  ve fázi **b** a  $21662,9$  ve fázi **c**.

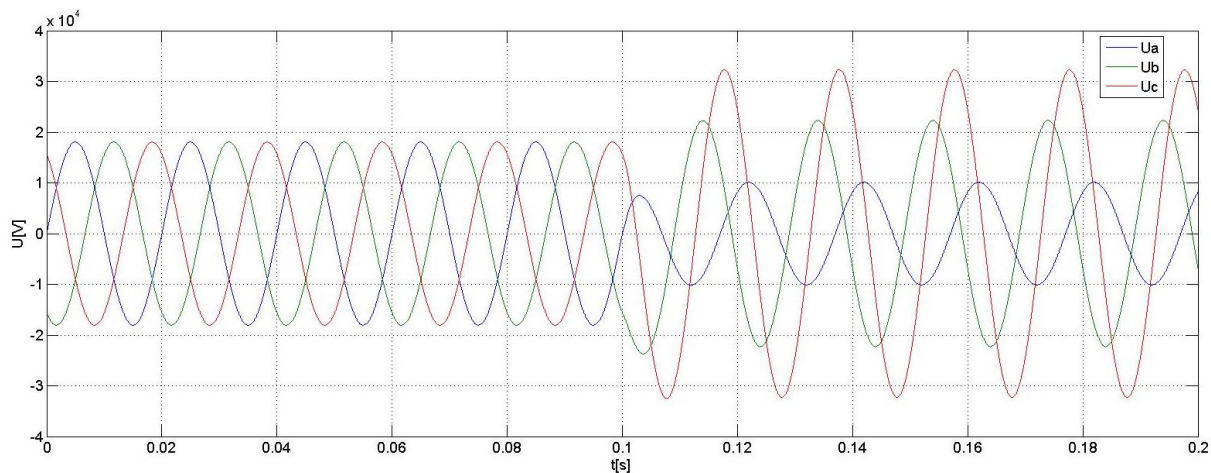


**Obr. 28: Průběh proudu ve vyladěném stavu s odporníkem**

Z průběhu proudu je vidět, že po připnutí odporníku vzroste poruchový proud z hodnoty  $1,99\text{ A}$  na hodnotu  $5,32\text{ A}$ . To je způsobeno nárůstem činné složky, která teče přes odporník. Tohoto jevu je využíváno při detekci zemního spojení.

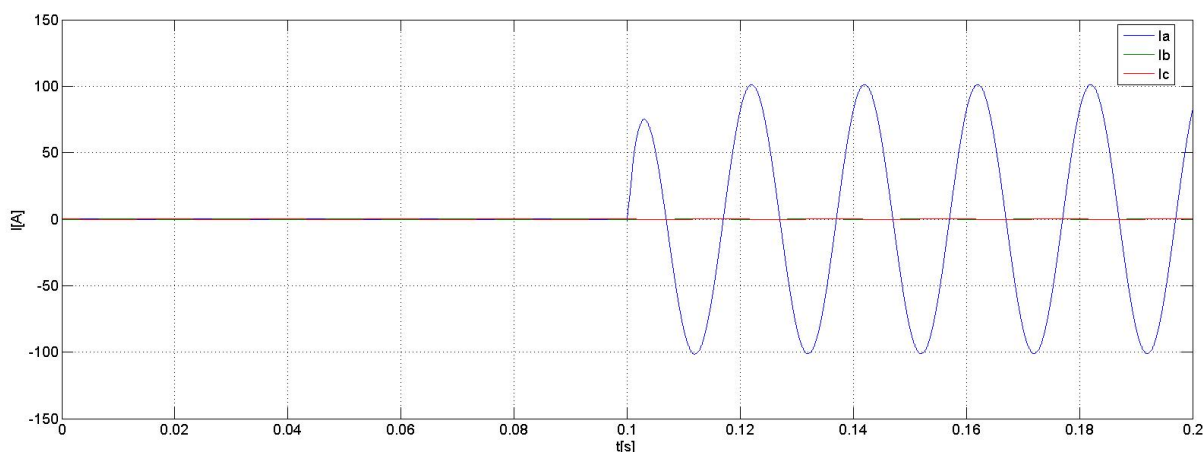
## 5.4 Porovnání s izolovanou sítí

Přestože má diplomová práce je zaměřena hlavně na kompenzovanou síť, pro porovnání jsem provedl simulaci stejného zapojení pro síť s izolovaným uzlem.



**Obr. 29: Průběh napětí v izolované síti**

Z grafu je patrné, že průběhy napětí v izolované síti se od kompenzované výrazně liší. Napětí v postižené fázi **a** poklesne na hodnotu 7152,1 V. Napětí ve fázi **b** se ustálí na hodnotě 15766,2 V. Nejvíce namáhána je fáze **c**, kde napětí přesáhne hodnotu sdruženého napětí a ustálí se na hodnotě 22825,5 V.



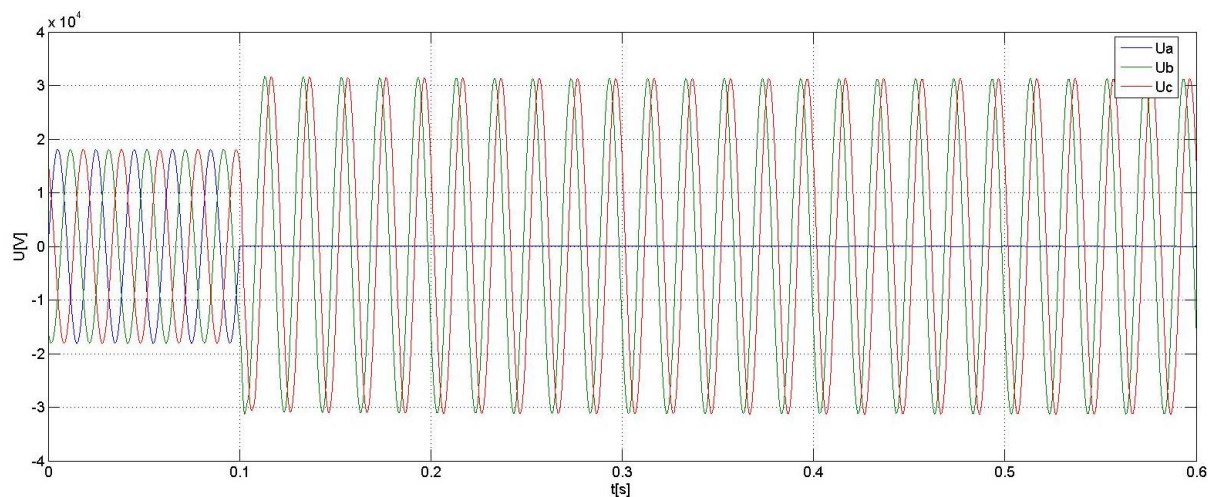
**Obr. 30: Průběh proudu v izolované síti**

Z průběhu proudu je opět patrná výrazná odlišnost od kompenzované sítě. Zatímco u sítě kompenzované nastal po vzniku zemního spojení přechodový děj s výrazným proudovým rázem, u sítě izolované tento ráz není a poruchový proud velmi rychle dosáhne ustáleného stavu. Výraznou nevýhodu pro izolovanou síť představuje velikost poruchového proudu, jehož efektivní hodnota 71,54 A je přibližně 36x větší než u sítě kompenzované. Z tohoto důvodu je jasné, že síť by nemohla být provozována jako izolovaná, protože překračuje povolenou hodnotu 10A a případná kroková a dotyková napětí by byla velmi vysoká.

## 5.5 Vliv okamžiku vzniku zemního spojení na průběh napětí a proudu

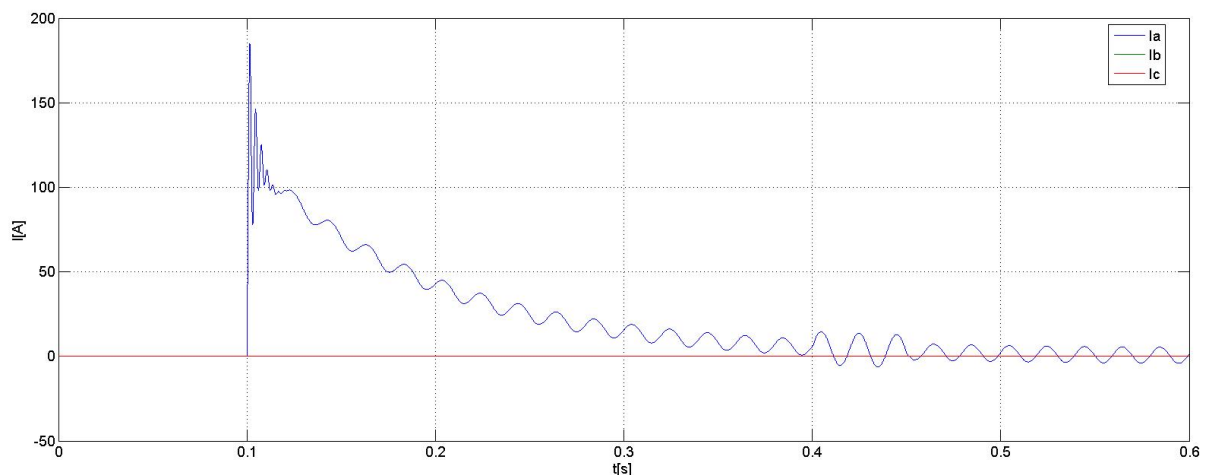
Nyní se zaměřím na to, jaký vliv má okamžik vzniku zemního spojení na průběh napětí a proudu. Pro názornost jsem v této simulaci uvažoval kovové zemní spojení, tedy s přechodovým odporem  $0 \Omega$ .

Nejprve budu uvažovat vznik zemního spojení v čase  $0,1s$ , tedy v čase, kdy je napětí postižené fáze v nule.



**Obr. 31: Kovové zemní spojení vzniklé v napěťové nule – průběh napětí**

Z průběhu napětí je patrné, že napětí v postižené fázi bude nulové a napětí zdravých fází vzroste na hodnotu sdruženého napětí.

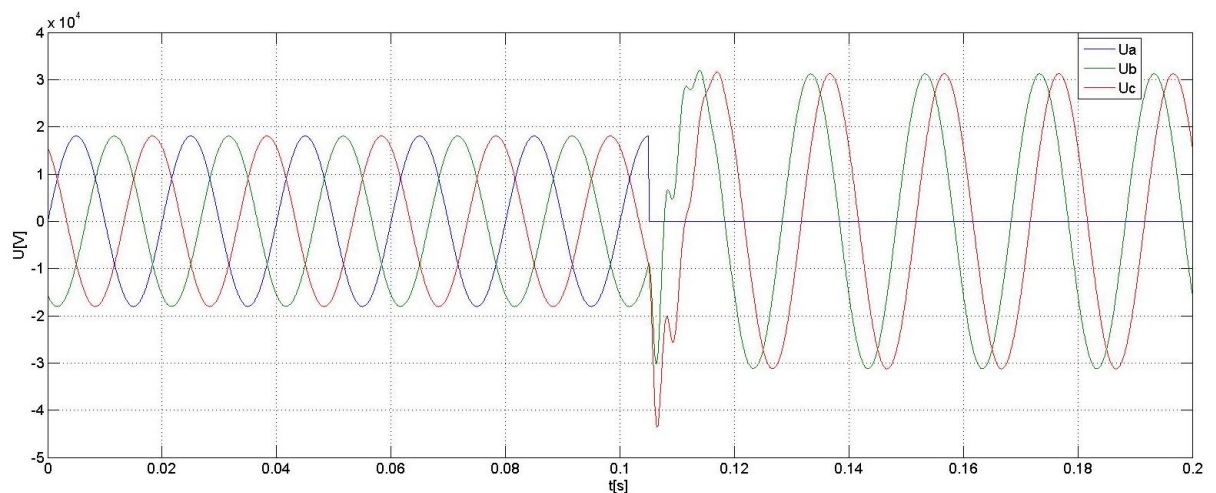


**Obr. 32: Kovové zemní spojení vzniklé v napěťové nule – průběh proudu**

Průběh proudu je již od pohledu zajímavější. Jak je z něho patrné, pokud zemní spojení vznikne v čase napěťové nuly, vyvine se největší stejnosměrná složka poruchového proudu. V simulaci tato složka odezněla velmi pomalu, proud se ustálil až kolem času  $0,5s$ , tedy  $0,4s$

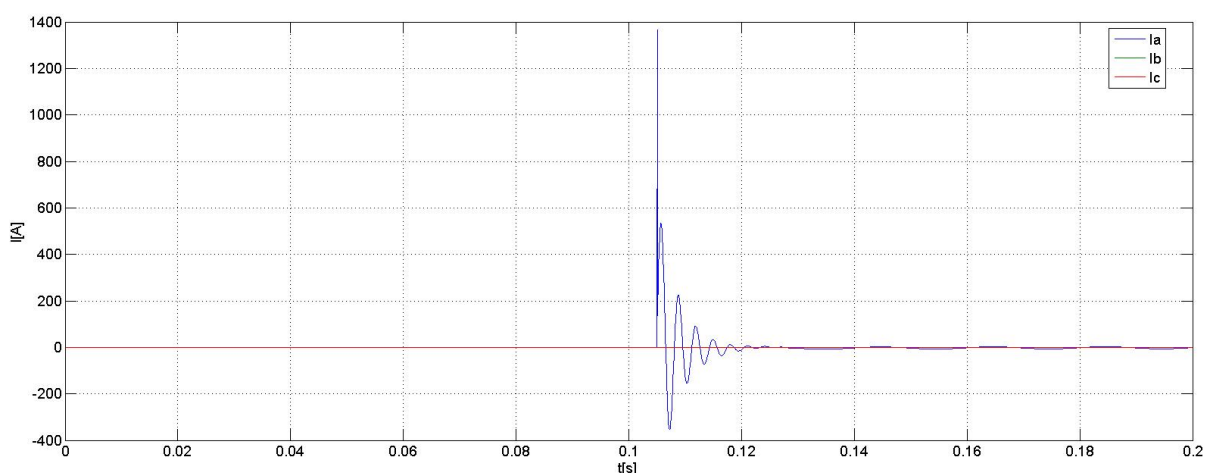
po vzniku zemního spojení. To je způsobeno hlavně dlouhými vedeními, tedy velkými podélnými reaktancemi. Reálná síť obsahuje mnoha kratších vývodů, časová konstanta je potom výrazně kratší. V reálné síti by se proud ustálil přibližně do doby 0,2s, tedy 0,1s po vzniku zemního spojení.

Nyní uvažuji vznik zemního spojení v čase 0,105s, tedy v napět'ovém maximu.



**Obr. 33: Kovové zemní spojení vzniklé v napět'ovém maximu – průběh napětí**

Z průběhu napětí je vidět, že napětí postižené fáze opět poklesne na 0. Napětí zdravých fází se opětovně ustálí na hodnotách sdruženého napětí, ale tentokrát nejprve dojde k přechodnému ději, který způsobí přepětí, které ve fázi c dosáhne až na hodnotu 43580 V, tedy přibližně o 40% větší, než je amplituda sdruženého napětí. Toto přepětí může být nebezpečné pro jistící prvky a izolátory.

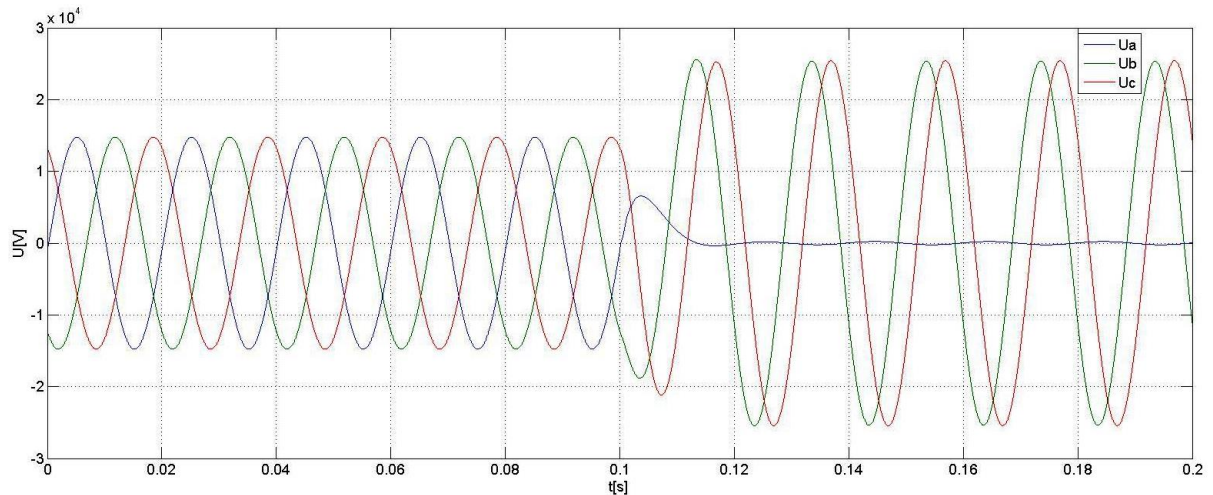


**Obr. 33: Kovové zemní spojení vzniklé v napět'ovém maximu – průběh napětí**

Z průběhu proudu je vidět, že nyní se stejnosměrná složka nevyvine a proud se ustálí mnohem rychleji – přibližně za 20ms. Prvotní proudový ráz je sice mnohem větší – 1400 A – ale z důvodu krátkého trvání není tak nebezpečný, neboť jeho energetické účinky jsou malé.

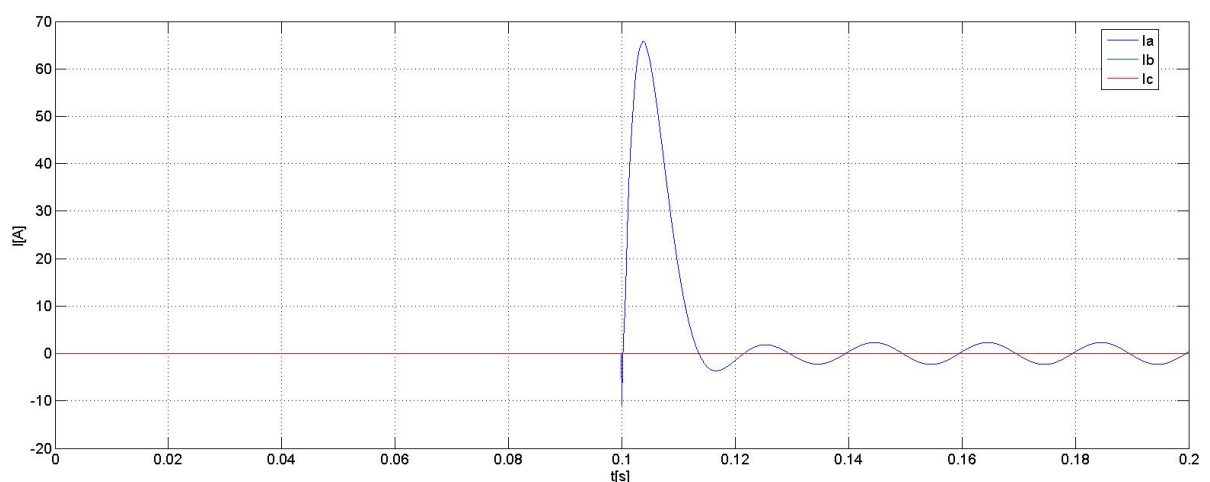
## 5.6 Vliv zatížení na průběh napětí a proudu

V této simulaci uvažují zatížení každého vývodu činným výkonem 18MW a jalovým výkonem 8,7MVar, tedy s celkovým zatížením sítě 40MVA. Ostatní prvky jsou zachovány, síť je plně vyladěna. Z tohoto důvodu je možné přímé porovnání s kapitolou 5.2



**Obr. 34: Průběh napětí ve vyladěném stavu při plném zatížení sítě**

Jak je z grafu patrné, průběhy jsou téměř totožné s průběhy vyladěné sítě v nezatíženém stavu z kapitoly 5.2, jediným rozdílem jsou hodnoty napětí. Z důvodu plného zatížení už nedosahují napětí v bezporuchovém stavu na hodnotu fázovou, ale jejich efektivní hodnota je vlivem úbytku napětí pouze 10451 V oproti 12701,7 V ve stavu naprázdno. Tento úbytek napětí se projeví i při zemním spojení a hodnoty napětí ve zdravých fázích jsou 17938,7 V a 17978 V. Z výše uvedeného je jasné, že napětí není v dovolených mezích a při provozu by bylo nutné nastavit jinou odbočku na transformátoru.



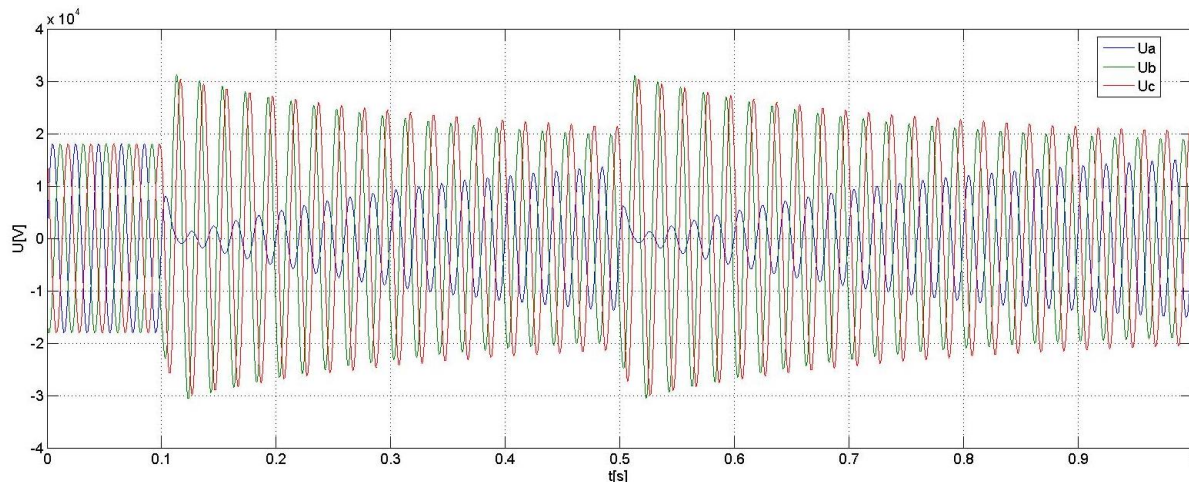
**Obr. 35: Průběh proudu ve vyladěném stavu při plném zatížení sítě**

U proudu je situace shodná s napětím. Oproti stavu naprázdno je zde vidět pokles maximální hodnoty proudu z 80,15 A na hodnotu 65,8 A, což je způsobeno již zmíněným poklesem napětí. Ustálená hodnota poté poklesla z 1,99 A na 1,63 A.



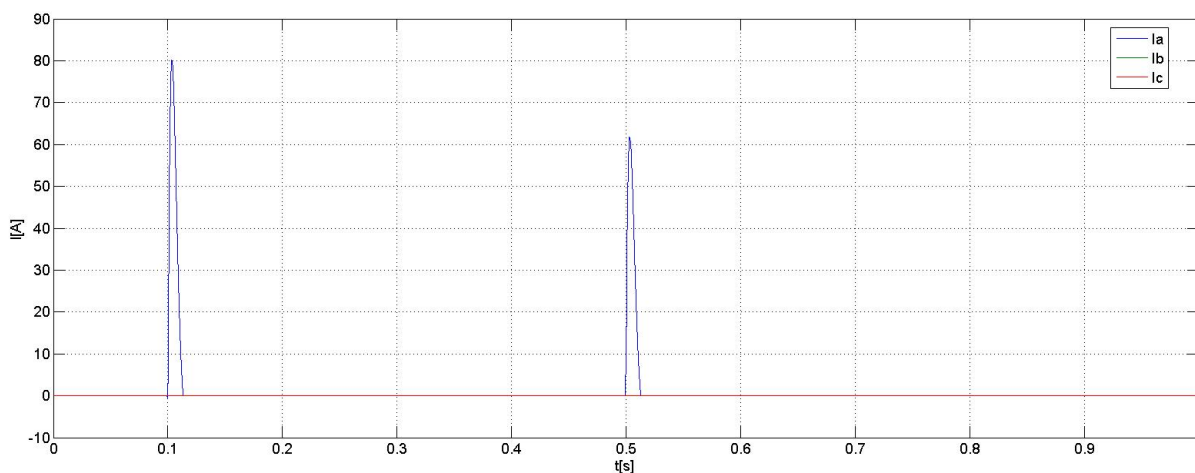
## 5.7 Přerušované zemní spojení

Poslední simulací je simulace přerušovaného zemního spojení. Zemní spojení nastává v čase 0,1s a je vypnuto v čase 0,105s, následně sepnutí v čase 0,5s a opětovné vypnutí v čase 0,505s. Opět se jedná o odporové zemní spojení o přechodovém odporu  $100\Omega$ .



**Obr. 36: Průběh napětí při přerušovaném zemním spojení**

Z průběhu napětí je vidět vznik zemního spojení v čase 0,1s. Po jeho následném vypnutí dochází k zotavení napětí. Jelikož doba potřebná pro celkové zotavení je větší než doba před opětovným vznikem zemního spojení v čase 0,5s, nezotaví se napětí úplně. To je vidět i poté, jelikož první špička poruchového napětí ve fázi **a** má menší hodnotu, než u prvního zemního spojení. Po vypnutí druhého zemního spojení dochází opětovně k zotavení napětí ve fázích.



**Obr. 37: Průběh proudu při přerušovaném zemním spojení**

Z průběhu proudů je přesně vidět čas zapnutí a vypnutí zemního spojení. Jelikož celková doba obou zemních spojení je pouze 5ms, ani v jedné případě se poruchový proud nestihl ustálit. Za zmínku stojí také menší proudový ráz u druhého zemního spojení, to je způsobeno

již zmíněným nedostatečným časem pro zotavení napětí a druhé zemní spojení tak vzniká při nižším než fázovém napětí ve fázi **a**.

## 5.8 Shrnutí

V tabulce níže jsou uvedeny efektivní hodnoty napětí všech fází a efektivní hodnota poruchového proudu.

typ sítě	$U_a(\text{V})$	$U_b(\text{V})$	$U_c(\text{V})$	$I_a(\text{A})$
kompensovaná vyladěná	195,59	21907,19	21956,85	1,99
kompensovaná nevyładěná	907,72	22374,04	21452,93	9,08
kompensovaná s odporníkem	528,49	21600,49	21662,92	5,32
kompensovaná s plným zatížením	160,15	17938,77	17978,02	1,632
izolovaná	7152,11	15766,23	22825,55	71,54

**Tab. 1: Srovnání zemních poruch v různých sítích**

Z tabulky je patrný výrazný rozdíl mezi sítí izolovanou a kompenzovanou. Poruchový proud by bez kompenzace dosahoval hodnoty 71,54 A, tato hodnota je z hlediska norem týkajících se provozu sítí zcela nepřijatelná, neboť dotykové a krokové napětí by dosahovaly hodnot ohrožujících zdraví. Další nevýhodou této sítě je výrazné přepětí ve fázi **c**.

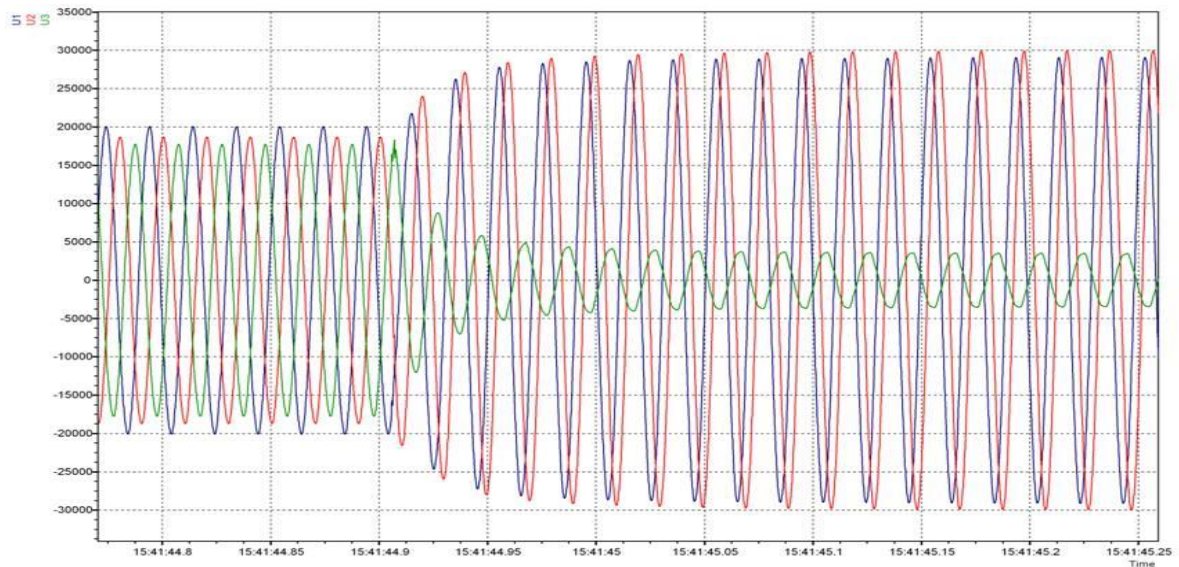
V případě nevyładěného stavu kompenzované sítě by byla norma splněna a síť by mohla být provozována do odstranění poruchy. Velikost poruchového proudu by navíc umožnila spolehlivou detekci postiženého vývodu.

U vyladěného stavu kompenzované sítě je proud velmi malý a v případě detekce by byl připnut sekundární odporník, který by způsobil nárůst proudu na téměř trojnásobnou hodnotu. Výhodou tohoto uzemnění je možnost provozování sítě i se zemním spojením až do jeho odstranění. Pokud jsou navíc distribuční transformátory v zapojení  $D/y_n$ , neovlivnilo by případné zemní spojení odběr na sekundární straně transformátoru.

Kompensovaná síť s plným zatížením by vyhovovala normám ohledně zemního spojení, problémem však jsou velké úbytky napětí, které přesahují dovolených 10%. Z tohoto důvodu by bylo nutné zvolit jinou odbočku na transformátoru a zvýšit napětí na sekundárním vinutí.

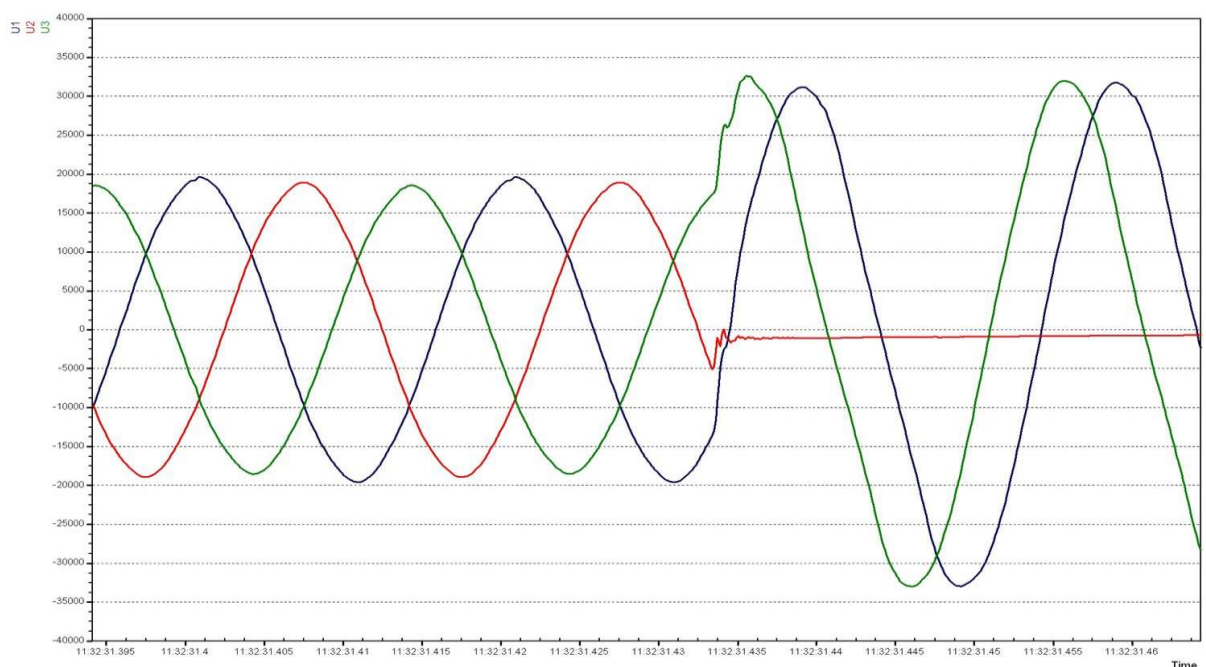
## 6 Reálná zemní porucha

Pro možné porovnání analytických výpočtů i simulací uvedu nyní grafy reálných zemních poruch v distribuční síti 22 kV.



**Obr. 38: Průběh napětí reálného odporového zemního spojení**

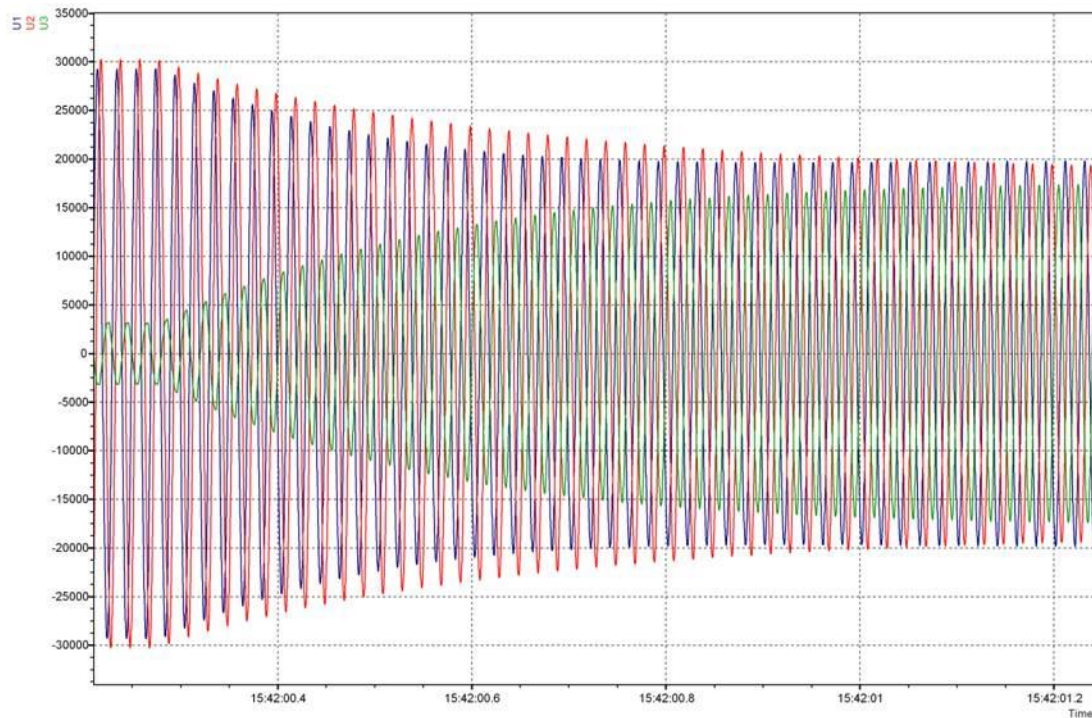
Na prvním grafu je vidět průběh napětí při odporovém zemním spojení ve fázi **c**. Napětí v postižené fázi poklesne a napětí zdravých fází se zvýší téměř na hodnotu sdruženou. Vzhledem k velikosti napětí v postižené fázi je vidět, že síť není zcela vykompenzována.



**Obr. 39: Průběh napětí reálného kovového zemního spojení**

Na druhém grafu je vidět průběh napětí při kovovém zemním spojení ve fázi **b**. Dle předpokladů napětí v postižené fázi poklesne k nule a napětí zdravých fází dosáhnou hodnoty

sdužené. Vzhledem k tomu, že napětí postižené fáze bylo v době vzniku zemního spojení nenulové, vidíme ve zdravé fázi c i vznik přepětí, které přesahuje hodnotu sduženého napětí.



**Obr. 40: Zotavení napětí po konci odporového zemního spojení**

Na posledním grafu vidíme průběh zotavování napětí po skončení zemního spojení. Zároveň je vidět, že napětí není ještě plně zotavené.

## 6.1 Porovnání s analytickým řešením

Pro porovnání s analytickým řešením využijí obrázek 38. Jelikož pro analytické řešení i simulaci byla použita zjednodušená síť, nelze provádět přímé porovnání hodnot. V obou případech je však vidět, že napětí v postižené fázi poklesne v závislosti na odporu zemního spojení. Jelikož napětí postižené fáze je přímo úměrné poruchovému proudu a odporu poruchy, lze z grafu určit, že odpor zemního spojení byl v případě reálné poruchy větší, než u analytického řešení. Pokud by tomu tak nebylo, musel by místem zemního spojení téct proud mnohonásobně převyšující dovolenou hodnotu 10A a tato síť by nemohla být provozována. Také lze vypořadovat, že síť pravděpodobně nebyla zcela vykompenzována. Při porovnání napětí zdravých fází lze říci, že v obou případech dosahují hodnoty napětí hodnot sdužených. V celkovém porovnání lze zhodnotit analytické řešení jako správné a odpovídající reálné zemní poruše.

## 6.2 Porovnání se simulací

Pro porovnání reálné poruchy se simulací je možné využít všech tří grafů. U prvního grafu by bylo porovnání stejné jako při porovnávání s analytickým výpočtem. Zjednodušeně lze tedy říci, že výsledky simulace nevytlačeného stavu kompenzované sítě odpovídají reálné zemní poruše.

Pro porovnání s druhým grafem bych využil simulaci z kapitoly 5.5, přesněji obrázek číslo 33. Při reálné poruše nevzniklo zemní spojení při průchodu napětí maximem jako u simulace, ale i přesto je vidět obdobný průběh obou grafů. Za zmínku stojí hlavně přechodový děj způsobující přepětí ve zdravé fázi, které přesahuje hodnotu sdruženého napětí. V obou případech je napětí postižené fáze po ustálení nulové. Opět lze tedy simulaci hodnotit jako správnou a odpovídající reálné poruše.

Pro porovnání s posledním grafem bych využil simulaci přerušovaného zemního spojení z kapitoly 5.7, přesněji obrázek číslo 36. Na obou grafech je vidět průběh zotavování napětí po skončení odporového zemního spojení. Také je vidět, že napětí se za danou dobu nestihlo zotavit ani u reálné poruchy ani u simulace. Jelikož celkové průběhy jsou velmi podobné, tak bych stejně jako v předchozích případech simulaci hodnotil jako správnou a odpovídající.

## 7 Zhodnocení výsledků

### 7.1 Analytický výpočet

Analytický výpočet byl prováděn dvěma metodami, metodou Fortescue a metodou uzlových napětí. Řešení metodou Fortescue bylo navíc rozděleno na dva způsoby, se zanedbáním a bez zanedbání podélných parametrů vedení a svodů.

Nejprve bych se zaměřil na metodu Fortescue se zanedbáním podélných parametrů a svodů. Tato metoda je z důvodu uvažování pouze odporu poruchy a kapacit vedení vůči zemi velmi jednoduchá a rychlá. Je proto vhodné ji zvolit pro přibližný výpočet. Výhodou metody je dostatečná přesnost – pro zadanou síť se poruchový proud od metody bez zanedbání prvků liší o přibližně 14%. Výsledky jsou proto dostatečné pro vytvoření představy o ustáleném stavu zemní poruchy. Nevýhodou metody je nemožnost počítat s plnou kompenzací, jelikož by vznikla paralelní rezonance a poruchový proud by vycházel nulový. Dle teoretických poznatků o plné kompenzaci je to sice správně, ale v reálné síti tato situace nastat nemůže.

Metoda uzlových napětí je obdobou zjednodušeného výpočtu pomocí metody Fortescue. Opět uvažujeme pouze odpor poruchy a uzlové prvky, tedy kapacitu vůči zemi a případnou tlumivku. Výhody a nevýhody jsou stejné jako u zjednodušeného výpočtu metodou Fortescue. Výpočet je však ještě jednodušší a rychlejší.

Metoda Fortescue bez zanedbání podélných prvků a svodů je oproti výše uvedeným složitější a časově náročnější, avšak také přesnější. Složitost výpočtu závisí na složitosti konfigurace sítě, přesněji na počtu vývodů. Je však možné spočítat i plně vykompenzovanou síť a výsledky jsou přímo porovnatelné s provedenou simulací.

Výsledky získané metodou uzlových napětí a metodou Fortescue bez uvažování podélných prvků jsou přímo porovnatelné a pro danou síť se téměř dokonale shodují, z tohoto důvodu lze obě metody využít jako kontrolu pro metodu druhou a také výsledek považovat za správný. Velikost poruchového proudu získaná těmito metodami je 9,55 A.

Výsledky získané metodou Fortescue bez zanedbání podélných prvků se od výše uvedených nepatrně liší. Velikost poruchového proudu je 8,33 A. Jak je vidět, ve srovnání s předešlou hodnotou je tato hodnota menší, což odpovídá teoretickým předpokladům. Uvažováním podélných prvků a svodů vzrostla celková reaktance obvodu a poklesl poruchový proud.

## 7.2 Výsledky simulace

Simulace byla provedena pro mnoho parametrů a podrobné zhodnocení každého případu je možné nalézt v kapitole 5. Zde se zaměřím na zhodnocení výsledků nevy laděné kompenzované sítě a jejich porovnání s analytickým výpočtem. Efektivní hodnota poruchového proudu získaná ze simulace je 9,085 A. Tato hodnota je mezi výsledky ze zjednodušeného a přesnějšího výpočtu. Hodnota by měla odpovídat výsledkům z řešení pomocí metody Fortescue s uvažováním podélných prvků a svodů. Nepřesnost je pravděpodobně způsobena zaokrouhlováním při analytickém výpočtu a také nepřesným určením nulové složky impedance vedení. V analytickém výpočtu jsem uvažoval, že nulová složka impedance je třikrát větší než složka sousledná. Tento koeficient však závisí na uspořádání vodičů a může se pohybovat i kolem dvojnásobku, přesné určení nulové složky pro výpočet proto není možné. I přes tyto nepatrné odlišnosti je možné brát výsledky z analytického výpočtu a ze simulace za porovnatelné. Hodnoty fázových napětí se liší pouze nepatrně a v obou případech je největší napětí ve fázi b, tato hodnota dokonce v obou případech převyšuje hodnotu sdruženého napětí.

## Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo analyzovat zemní spojení v distribučních sítích vysokého napětí.

Z teoretických poznatků o dělení poruch, jejich detekci a o způsobu uzemnění uzlu sítě uvedených v prvních dvou kapitolách vyplynulo, že nejpoužívanějším způsobem uzemnění uzlu sítě je využití kompenzační tlumivky s paralelně připojitelným odporníkem, který se připojuje v případě trvajících zemního spojení.

V návaznosti na předchozí kapitoly jsem pro každý způsob provozu uzlu sítě specifikoval metody řešení. Uvedl jsem náhradní schéma dané sítě a částečně odvodil rovnice pro analytické řešení.

Analytické řešení zvolené sítě jsem následně provedl oběma metodami uvedenými v kapitole číslo tři. Z důvodu možného výpočtu zjednodušenými metodami jsem zvolil ne zcela vykompenzovaný stav, tedy s rozladěním tlumivky o -10%. Potvrdil jsem, že výsledky získané metodou souměrných složek při zanedbání podélných prvků a svodů se shodují s metodou uzlových napětí. Výsledky získané metodou souměrných složek bez zanedbání podélných prvků a svodů se od předchozích výsledků nepatrně liší. Dle teoretických předpokladů by měla být výsledná impedance větší, tedy poruchový proud menší a to se potvrdilo. Rozdíl mezi oběma metodami činil v případě poruchového proudu přibližně 14%. Lze tedy říci, že pro orientační výpočet a získání představy o ustáleném stavu zemního spojení jsou zjednodušené metody dostatečné. Jejich výhodou je také rychlost takového výpočtu. Pro přesnější výpočet však podélné prvky zanedbat nelze.

Tímto se dostávám ke stěžejní části mé práce a to je simulace zemního spojení. Simulace v nevytuněném stavu je téměř plně porovnatelná s analytickým řešením metodou souměrných složek. Nepatrné rozdíly jsou způsobeny výpočtem nulové složky impedance vedení a zaokrouhlením. Simulaci jsem následně provedl i pro vytuněný stav a z porovnání je patrné, že důkladné vytunění dané sítě je nutné. Zvolené rozladění tlumivky o 10% způsobí nárůst proudu na čtyřnásobek oproti vytuněnému stavu. V dalších simulacích jsem ukázal význam přepnutí odporníku, který je využíván při detekci zemního spojení, danou sít' jsem porovnal s izolovanou, která, jak je patrné z velikosti poruchového proudu 71,5 A, by nemohla být provozována, a následně jsem provedl simulaci při plné zátěži sítě, což ukázalo nutnost přepnutí odbočky transformátoru. Z hlediska napěťových poměrů jsem jako nejpříznivější vyhodnotil zemní spojení, které vznikne v čase napěťové nuly. Pokud zemní spojení vznikne



v čase, kdy je napětí v maximu, dojde k přechodovému ději s výrazným přepětím, které u dané sítě přesáhlo o 40% hodnotu sdruženého napětí.

Posledním bodem práce bylo porovnání získaných hodnot s reálnou poruchou. Vzhledem k rozdílnosti sítí nelze porovnání provést pouhým porovnáním hodnot, ale i přesto lze analytický výpočet provedený metodou souměrných složek s uvažováním podélných prvků a svodů brát za srovnatelný s reálnou poruchou, výpočty lze tedy označit za správné. V případě simulace je porovnání jednodušší, jelikož lze porovnat dané průběhy. Jak odporové, tak i kovové zemní spojení má stejné průběhy napětí při reálné poruše i při simulaci. Tímto jsem potvrdil správnost simulace.

**Použité zdroje:**

- [1] Zemní spojení v trojfázových soustavách. Powerwiki [online]. [cit. 2014-04-22].  
Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [2] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 189 s. ISBN 9788070433072.
- [3] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. Průmyslová elektroenergetika. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, 154 s. ISBN 80-708-2703-3.
- [4] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORSÁGOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. Provoz distribučních soustav. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 263 s. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [5] BERMANN, Jiří. Transformátorová koncepce ČR+SR, Způsoby zemnění uzlu. Konference ČK CIRED. 2006.
- [6] TOPOLÁNEK, David, Drahomír PERNICA a Karel HODER. Metody indikace zemních spojení. Konference ČK CIRED. 2008.
- [7] Často používané aplikace tlumivek v silnoproudé elektrotechnice. Elektrevue [online]. [cit. 2014-04-22].  
Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/cz/clanky/teoreticka-elektrotechnika/0/casto-pouzivane-aplikace-tlumivek-v-silnoproude-elektrotechnice/>
- [8] Jílek, D. Způsoby provozování uzlů elektrických sítí. Diplomová práce, Fakulta elektrotechnická, ZČU, 2012.
- [9] Matlab Documentation [online]. [cit. 2014-04-22].  
Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/>

## Přílohy

### Příloha 1 – Schéma zapojení v Simulinku

