

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Simulace jednofázového zemního spojení v sítích
s izolovaným či neúčinně uzemněným středem**

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

Jméno a příjmení: **Bc. Michal ČERNIČEK**
Osobní číslo: **E13N0141P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Simulace jednofázového zemního spojení v sítích s izolovaným
či neúčinně uzemněným středem**
Zadávající 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 :

Předmětem diplomové práce je simulace jednofázového zemního spojení v distribučních sítích s izolovaným a neúčinně uzemněným středem. Cílem práce je analýza poruchového proudu (amplitudy a úhlu natočení) v závislosti na zatížení sítě, odporu poruchového spojení a parametrů vedení.

1. Vytvořte simulační model distribuční sítě s izolovaným či neúčinně uzemněným středem.
2. Provedte simulaci jednofázového poruchového spojení v závislosti na zatížení sítě, odporu spojení a parametrů vedení.
3. Provedte analýzu velikosti a úhlu natočení poruchového proudu.
4. Sestavte fázorové diagramy.

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na simulace zemního spojení v síti vysokého napětí na hladině 22kV. Tyto simulace jsou prováděny především v sítích s izolovaným středem, ale také v sítích s neúčinně uzemněným středem přes zhášecí tlumivku. První část práce je zaměřena spíše teoreticky, v druhé části jsou už přímo provedené simulace.

Klíčová slova

Zemní spojení, simulace, síť 22kV, Simulink, Petersenova tlumivka, síť s izolovaným středem, PLECS

Abstract

This thesis is focused on simulation earth fault in 22 kV high voltage networks. This simulation are performed in isolated networks, also in compensated networks. The first part of thesis is focused more theoretically and the second part is focused on simulation in these networks.

Key words

Earth fault, simulation, 22kv network, simulink, Petersen coil, isolated network, PLECS

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 16.5.2016

Michal Černiček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Komrskovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 SÍŤ VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	10
1.1 ANALÝZA ZPŮSOBU UZEMNĚNÍ UZLŮ SÍŤI VN	11
1.1.1 Síť vn s izolovaným uzlem	12
1.1.2 Síť vn uzemněné přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku.....	13
1.2 ZEMNÍ SPOJENÍ	15
1.2.1 Dělení zemních spojení.....	15
1.2.2 Kovové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	16
1.2.3 Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem.....	18
1.2.4 Zemní spojení v síti s uzlem uzemněným přes tlumivku	20
2 MATEMATICKÝ MODEL SÍŤE VN 22 KV.....	22
2.1 MATEMATICKÝ MODEL KONKRÉTNÍCH UVAŽOVANÝCH SÍŤI VN 22 KV	22
2.2 PARAMETRY UVAŽOVANÉ SÍŤE.....	25
2.3 SESTAVENÍ MATEMATICKÉHO MODELU SÍŤE VN 22 KV	25
2.3.1 Simulink	26
3 SIMULACE JEDNOFÁZOVÝCH ZEMNÍCH SPOJENÍ V SÍTI 22 KV	27
3.1 KOVOVÉ ZEMNÍ SPOJENÍ V SÍTI 22 KV S IZOLOVANÝM UZLEM SÍŤE	27
3.2 CITLIVOST NA ODPOR PORUCHY V SÍTI IZOLOVANÝM UZLEM	30
3.3 CITLIVOST NA ODEBÍRANÝ VÝKON V SÍTI IZOLOVANÝM UZLEM.....	36
3.4 KOMPENZACE ZHÁŠECÍ TLUMIVKOU	39
4 ANALÝZA POSTIŽENÝCH A NEPOSTIŽENÝCH VÝVODŮ PŘI JEDNOFÁZOVÉM ZEMNÍM SPOJENÍ.....	43
4.1 Síť s IZOLOVANÝM STŘEDEM	44
4.2 Síť KOMPENZOVANÁ PŘES ZHÁŠECÍ TLUMIVKU.....	47
4.2.1 Lokalizace postiženého vývodu připínáním odporníku ke zhášecí tlumivce	50
ZÁVĚR.....	52
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	53

Seznam symbolů a zkratek

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)
I_a, I_b, I_c	.....proudy ve fázových vodičích (A)
I_{ca}, I_{cb}, I_{cc}	.....proudy příčných kapacit (A)
I_z	.....proud tekoucí místem zemního spojení (A)
I_{cp}	.....kapacitní složka poruchového proudu (A)
I_w	.....činná složka poruchového proudu (A)
I_{0zt}	.....proud tekoucí přes zhášecí tlumivku (A)
I_{0v}	.....proud na vývodu zemního spojení (A)
R_z	.....odpor zemního spojení (Ω)
P_{max}	.....maximální hodnota odebíraného výkonu (kW)
Ω	.....uhlová frekvence ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)

Úvod

Předkládaná diplomová práce na téma Simulace jednofázového zemního spojení v sítích s izolovaným či neúčinně uzemněným středem je zaměřena především na simulování zemního spojení v sítích vn 22kV a sledování změny daných parametrů při zemním spojení.

Práce je členěna do čtyř kapitol. První kapitola je věnována sítím vysokého napětí, které v České republice dosahují délky přes 70 tisíc kilometrů. Nejprve analyzuji uzemnění uzlu sítě. Dále pak uvedu, co je to zemní spojení, jeho výskyt a rozdělení dle určitých parametrů.

V druhé kapitole se budu zabývat matematickým modelem sítě. Nakreslím zde model sítě, popíši prvky a parametry, co se v něm vyskytují. Dále pak bude pojednáno o tom, kde byl sestaven.

Třetí kapitola už je přímo zaměřena na simulace jednofázových zemních spojení v sítích vn 22kV. Tato kapitola je rozdělena do čtyř částí. V první části budu simulovat kovové zemní spojení v síti s izolovaným středem, dále potom odporové zemní spojení. Ve třetí části této kapitoly budu simulovat změnu odběru v síti a sledovat, jaký to bude mít vliv na ostatní parametry. Na závěr této kapitoly budu simulovat síť s neúčinně uzemněným středem přes zhášecí tlumivku.

Poslední, tedy čtvrtá kapitola je věnována analýze zemního spojení postiženého a nepostiženého vývodu. Tato kapitola je rozdělena do dvou částí, kde v první části použiji k simulaci síť s izolovaným středem a v druhé části síť neúčinně uzemněnou přes zhášecí tlumivku.

1 Sítě vysokého napětí

Sítě vysokého napětí patří mezi jedny z nejrozsáhlejších částí elektrizační soustavy. Pomocí těchto sítí rozvádíme elektrickou energii v rámci menších územních celků, jako jsou např. městské části, průmyslové objekty, vesnice.

Sítě vysokého napětí můžeme rozdělit, dle charakteru provozu sítě, na distribuční soustavy s napěťovými hladinami 10, 22 a 35kV a dále potom na soustavy průmyslových, elektrárenských a důlních provozů s napěťovými hladinami 6 a 10kV. Základní parametry a možnosti provozu sítí vysokého napětí jsou dány způsobem spojení nulového bodu vn vinutí napájecího transformátoru se zemnicí soustavou. Výběr systému uzemnění nám definuje možnosti provozu soustavy z hlediska chránění, bezpečnosti, dimenzování a dodávky elektrické energie. V případě bezporuchového stavu symetrické sítě se způsob uzemnění prakticky nikterak neprojeví na jejím provozu. K zásadnímu rozdílu dochází v případě poruchy, kdy nastane vodivé spojení jedné fáze se zemí. Když tato porucha nastane v síti účinně uzemněné, či uzemněné přes uzlový odpor, mluvíme o jednofázovém zkratu, poruchový proud dosahuje takové úrovně, že další provoz postižené soustavy je nepřijatelný. V takovémto případě musí dojít k co nejrychlejšímu odpojení postiženého vedení, a tím pádem k přerušení dodávky elektrické energie. V sítích izolovaných, či neúčinně uzemněných se jedná o zemní spojení, jehož poruchový proud nedosáhne tak vysoké úrovně a není zapotřebí okamžité odpojení postiženého vývodu. Právě velikost poruchového proudu je do značné míry ovlivněna použitým systémem uzemnění a je tedy rozhodná pro dimenzování, zhodnocení mechanických následků způsobených poruchou, či určení rizika úrazu elektrickým proudem. Vzhledem k velké členitosti a rozloze jsou soustavy vn, které protínají velkou část našeho území, vystaveny mnoha nepříznivým vlivům. Tyto vlivy, mezi které například patří atmosférické podmínky, způsobují na venkovním vedení značné množství přechodných zemních spojení, která v krátkém čase sama odezní bez nutnosti přerušení dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu jsou naše distribuční soustavy vysokého napětí přednostně provozovány jako neúčinně uzemněné.[3]

Distribuční společnost	Délka vedení vn [km]
ČEZ Distribuce, a. s.	49697
E.ON Distribuce, a. s.	21754
PREdistribuce, a. s.	3829

Tab.1: Instalovaná délka vedení vn v ČR k 1.1.2011

1.1 Analýza způsobu uzemnění uzlů sítí vn

Tyto sítě se nejčastěji provozují s izolovaným uzlem sítě anebo neúčinně uzemněným uzlem sítě. Na základě požadavků chování sítě při příčných jednofázových poruchách vybíráme způsob uzemnění uzlu sítě. Téma způsobu uzemnění uzlu sítě je jedním z nejvíce diskutovaných témat. Mezi důležité parametry při určování způsobu uzemnění uzlu sítě patří spolehlivost zásobování elektrickou energií, bezpečnost provozu sítě, velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu. Nejdůležitějším z těchto parametrů je velikost nabíjecího zemního kapacitního proudu sítě, který nám nejvíce ovlivňuje volbu způsobu uzemnění uzlu sítě. Určení velikosti nabíjecího kapacitního zemního proudu bývá obtížné zejména u sítí s uzemněným uzlem přes nízkohmový odpor. Určení hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu celé sítě je jen jedna z částí úlohy. V sítích vn je potřeba znát i hodnoty nabíjecích kapacitních zemních proudů u jednotlivých vývodů. Tato znalost je zvláště důležitá u sítí s izolovaným uzlem a u sítí s kompenzací zemních kapacitních proudů. Při velmi vysokých hodnotách nabíjecích zemních kapacitních proudů ve vývodech může dojít vlivem průchodu nabíjecího zemního kapacitního proudu k nárůstu ztrát přenosu elektrické energie. Způsob uzemnění uzlu sítě však tyto ztráty neovlivňuje. Je ale důležité znát tyto hodnoty nabíjecích kapacitních zemních proudů alespoň přibližně. Tyto hodnoty je dobré znát jak pro celou síť, tak i pro nejrozsáhlejší vývody. Přesné hodnoty ve většině případů není potřeba znát. Chceme-li určit hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu, je potřeba se zaměřit na metody, které budeme moci jednoduchým způsobem použít ve stávajících vn sítích. Dalším důležitým faktorem je při zjišťování

hodnoty nabíjecího zemního kapacitního proudu fakt, že bychom neměli zásadním způsobem ovlivnit připojené odběratele. To může být zásadním omezujícím faktorem při použití některých metod.

Sítě vn jsou realizovány pomocí kabelového vedení, venkovního vedení a, v dnešní době nejčastěji, smíšenými sítěmi. Sítě jsou provozovány jako paprskové, někdy také jako okružní a jen v oblastech s hustým zalidněním se výjimečně můžeme setkat s mřížovými sítěmi. Způsob provozu sítě je ovlivněn ztrátami v závislosti na velikosti přenášené elektrické energie, ale záleží také na systému chránění, který odpovídá kvalitě a možnostem použitých ochran.

Snaha o zajištění spolehlivého, efektivního a bezpečného provozu sítí vn vede k volbě rozličných způsobů uzemnění uzlu sítě. Jelikož jsme dosud neobjevili systém uzemnění uzlu sítě, který by byl ve všech parametrech nejlepší, setkáváme se i v rámci jedné energetické společnosti s více způsoby uzemnění uzlu sítě. Nejčastěji používaným způsobem uzemnění uzlu zdroje je uzemnění přes zhášecí tlumivku. Tento způsob uzemnění uzlu zdroje byl vynalezen na počátku 20. století panem Petersenem. [3]

1.1.1 Sítě vn s izolovaným uzlem

Sítě vn s izolovaným uzlem jsou většinou provozovány v malém rozsahu, jen výjimečně tvoří rozsáhlé sítě. U sítí s izolovaným uzlem je při jednofázovém zemním spojení poruchový proud tvořen převážně zemním kapacitním proudem sítě. Velikost jednofázového poruchového proudu je tak přímo ovlivněna velikostí sítě. U jednofázového zemního spojení je možno provozovat síť po omezenou dobu, je-li hodnota zemního kapacitního proudu nízká.

Z důvodu rychlého nárůstu napětí a z důvodu kapacitního charakteru proudu v postižené fázi nedochází k samovolnému zániku zemního **spojení**. V závislosti na okamžiku přerušení zemního spojení se napětí v postižené fázi proti zemi může zvednout až na dvojnásobek maximální hodnoty fázového napětí.

U sítí s vysokou hodnotou zemního kapacitního proudu jsou pro chránění postačující jednoduché nadproudové nulové články ochran. Sítě s nízkou hodnotou kapacitního proudu je nutné chránit pomocí směrových zemních ochran. Pro nastavení ochran v síti

vycházíme z celkové hodnoty zemního kapacitního proudu sítě. Pro nastavení ochran je tento údaj velmi důležitý. Dále pro nastavení vývodových ochran je důležité znát hodnoty zemního kapacitního proudu vývodu. Pokud jsou nám známy hodnoty zemních kapacitních proudů, můžeme zvolit vhodnou metodu chránění a také tyto ochrany přesně nastavit. Zemní ochrany v síti s izolovaným uzlem bývají spolehlivé.

Jelikož v sítích s izolovaným uzlem není žádným způsobem uzel sítě se zemí spojen, jsou velikosti napětí proti zemi dány poměrem příčných parametrů sítě. To má za následek nestabilitu fázových napětí. Při spínání v síti, nebo při vypínání poruch v síti, případně při nesymetrické změně rázového zatížení, můžeme v síti sledovat výrazné změny fázového napětí. Oproti tomu sdružené hodnoty napětí nejsou v tak velké míře ovlivněny. Vzhledem k tomu, že odběratelé jsou připojeni na sdružená napětí, nejsou změnami fázových hodnot napětí tolik ovlivněny. Použité izolační materiály nám ovlivňují změny fázových hodnot napětí. Tyto změny mohou zapříčinit rychlejší stárnutí izolace, a tím pádem i zvýšené četnosti poruch v síti.[3]

1.1.2 Síť vn uzemněné přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku



Obr. 1: Zhášecí tlumivka od firmy EGE [6]

Nejčastější způsob uzemnění uzlu sítě je uzemnění přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku (Petersenovu tlumivku). Je to jeden z nejsložitějších způsobů uzemnění uzlu zdroje a k jeho efektivnímu provozu je od techniků potřebná velmi dobrá znalost

problematiky. Uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku omezuje významným způsobem poruchový proud tekoucí místem zemní poruchy a to až na hodnotu jednotek procent zemního kapacitního proudu sítě. Ve zbytkovém proudu zemní poruchy je obsažena jak činná, tak i jalová složka základní harmonické, tak i proudy vyšších harmonických. Snížení velikosti poruchového proudu pomáhá k samovolnému zániku zemních poruch, především u venkovních vedení. Zde přibližně 70% zemních poruch zanikne samovolně. To má za následek celkový pokles poruch vůči ostatním způsobům uzemnění uzlu sítě až o 50%. Dalším pozitivem při omezení poruchového zemního proudu je snížení uvolněné energie v místě zemní poruchy a nízká hodnota dotykového napětí. Po omezenou dobu je provoz této sítě v některých případech možný. Provoz sítě se zemním spojením napomáhá ke snížení doby přerušování dodávky elektrické energie. Ve výrobních závodech nám krátkodobý provoz se zemním spojením umožňuje řádným způsobem vypnout daná zařízení, což může výrazně snížit škody na těchto zařízeních. Tyto výhody provozu uzlu sítě se projeví až při vyladění zhášecí tlumivky vůči fázové zemní kapacitě sítě. Dnešní automatiky ladění zhášecí tlumivky zajistí její spolehlivé vyladění.

Při zapínání vývodů do zemní poruchy dochází k přepětovým stavům v síti, ve vyladěném stavu tlumivky dojde k jejich omezení. Při vzniku zemní poruchy dochází k vyvolání přechodového děje u fázových napětí. Tento děj má za následek zvýšení fázových napětí ve zdravých fázích až na úroveň sdruženého napětí. V postižené fázi dojde k poklesu napětí až na nulovou hodnotu. Dosažená úroveň přepětí je vůči síti s izolovaným uzlem výrazně nižší.

Uzemnění uzlu sítě přes plynule laditelnou zhášecí tlumivku nám umožňuje nalézt i vysokoodporová zemní spojení. Tyto poruchy se často vyskytují ve venkovních sítích. Citlivost na vysokoodporové zemní poruchy je dána nízkou hodnotou poruchového proudu, který na odporu poruchy vyvolá menší úbytek napětí. I u kabelových sítí je omezení poruchového proudu výhodné, jelikož dojde k omezení rozsahu škod. Výhodou těchto sítí je možnost provozu se zemním spojením po omezenou dobu, nebo možnost rychlého vypínání vývodu se zemní poruchou. U těchto sítí se musí používat směrové zemní ochrany. Pro správnou funkci těchto ochrany je důležitá přesnost měření nulové složky napětí a proudu. [3]

1.2 Zemní spojení

K zemnímu spojení dochází při vodivém spojení jedné fáze se zemí a to pouze v sítích izolovaných, nebo nepřímo uzemněných uzlem sítě. Při zemním spojení vzniká nesymetrie vodičů vůči zemi.

Největší rozdíl mezi zemním spojením a jednofázovým zkratem je ten, že v místě zemního spojení prochází pouze malý proud kapacitního charakteru, kdežto zkratový proud je až několikanásobně větší než provozní proud a má induktivní charakter. V sítích s větší rozlohou, kde se poruchový proud dostane přes hodnotu 5A, vznikne při zemním spojení zpravidla oblouk, který se rozroste do značných rozměrů a je velice pohyblivý a skoro vždy zasáhne vedlejší fáze. Důsledkem toho poté dochází k dvoufázovému, či třífázovému zkratu. Hořící oblouk ničí izolátory, přepaluje vodiče a dřevěné stožáry.

Nebezpečným jevem jsou přepětí, která vzniknou při nestabilním hoření oblouku, převážně při přerušovaném zemním spojení. Na zdravých fázích se může objevit napětí až 4,5 krát větší, než je efektivní hodnota fázového napětí.[2]

1.2.1 Dělení zemních spojení

Podle velikosti přechodového odporu v místě zemního spojení se rozlišují:

- Odporová zemní spojení - hodnota přechodového odporu je řádově několik set Ω
- Kovová a oblouková zemní spojení - hodnota přechodového odporu je jen několik Ω , většinou zanedbatelná

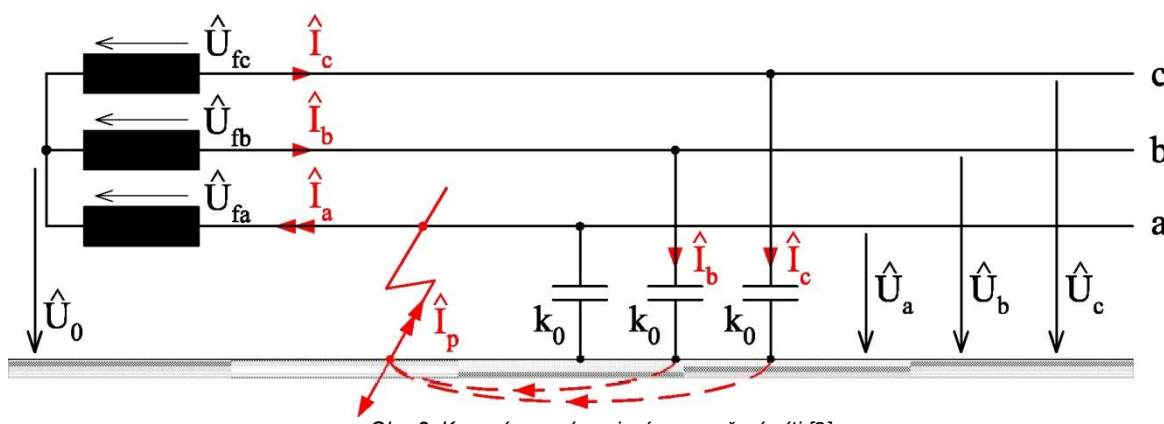
Podle doby trvání těchto stavů se rozlišují:

- Mžiková zemní spojení - do 0,5 s

- Krátkodobá zemní spojení - do 5 min
- Přerušovaná zemní spojení – mžiková nebo krátkodobá zemní spojení několikrát po sobě se opakující
- Trvalá zemní spojení - až do okamžiku odstranění, většinou několik hodin

1.2.2 Kovové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

O kovovém zemním spojení mluvíme v případě, že hodnota přechodového odporu v místě poruchy je jen několik Ω , což je hodnota většinou zanedbatelná. Při zemním spojení v sítích s izolovaným uzlem nepřesahuje poruchový zemní proud hodnotu 10A.



Obr. 2: Kovové zemní spojení v souměrné síti [2]

Na obr.2 je vidět, že poruchový proud je tvořen ze dvou proudů, tekoucích kapacitami nepostižených fází. Třetí kapacita postižené fáze je překlenuta poruchou.

Z obr. 2 vyplývají vztahy:

$$\hat{I}_p = \hat{I}_a = \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (1)$$

$$\hat{U}_a = 0 \quad (2)$$

$$\hat{I}_b = j\omega k_0 \hat{U}_b \quad (3)$$

$$\hat{I}_c = j\omega k_0 \hat{U}_c \quad (4)$$

$$\hat{U}_a - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fa} = 0 \quad (5)$$

$$\hat{U}_b - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fb} = 0 \quad (6)$$

$$\hat{U}_c - \hat{U}_0 - \hat{U}_{fc} = 0 \quad (7)$$

Z uvedených rovnic plynou tyto závěry:

rovnice (2): při dokonalém zemním spojení klesne napětí postižené fáze na nulu

rovnice (5): napětí uzlu transformátoru stoupne na hodnotu záporného napětí postižené fáze:

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

rovnice (6): $\hat{U}_b = \hat{U}_0 + \hat{U}_{fb} = (-1 + \hat{a}^2)\hat{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{j30}\hat{U}_{fa} \quad (9)$

rovnice(7): $\hat{U}_c = \hat{U}_0 + \hat{U}_{fc} = (-1 + \hat{a})\hat{U}_{fa} = -\sqrt{3}e^{-j30}\hat{U}_{fa} \quad (10)$

Při dokonalém zemním spojení stoupnou napětí nepostižených fází proti zemi na sdruženou hodnotu.

Rovnice (1,3,4) dávají zemní poruchový proud:

$$\hat{I}_p = \hat{I}_b + \hat{I}_c = j\omega k_0(\hat{U}_b + \hat{U}_c) \quad (11)$$

Dosazením za \hat{U}_b , \hat{U}_c z rovnic (9), (10) bude:

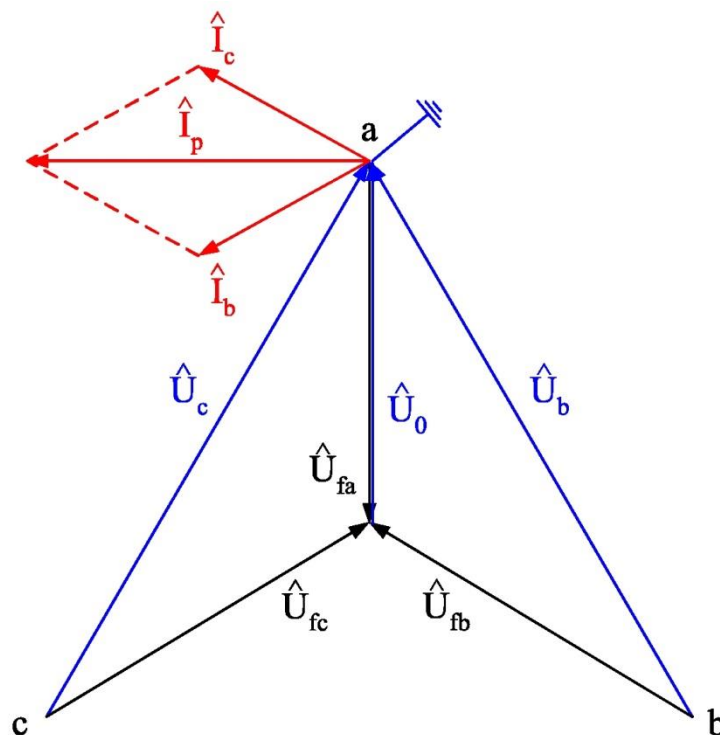
$$\hat{I}_p = j\omega k_0[(-1 + \hat{a}^2) + (-1 + \hat{a})]\hat{U}_{fa} \quad (12)$$

Po další úpravě obdržíme hledaný poruchový proud:

$$\hat{I}_p = j\omega k_0(-2 + \hat{a}^2 + \hat{a} + 1 - 1)\hat{U}_{fa} \quad (13)$$

$$\hat{I}_p = -3j\omega k_0\hat{U}_{fa} = 3j\omega k_0\hat{U}_0 \quad (A; s^{-1}, F, V) \quad (14)$$

Poruchový proud nám předbíhá napětí uzlu soustavy o 90° a je součtem kapacitních proudů nepostižených fází. Často bývá značen jako kapacitní proud sítě a je měřítkem pro její rozsah i volbu způsobu provozu sítě. [2]



Obr. 3: Napětové a proudové poměry při zemním spojení [2]

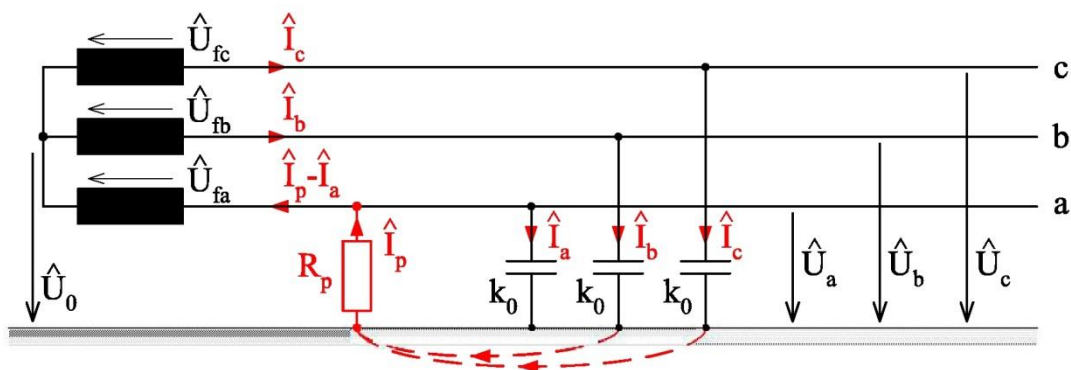
Poruchový zemní proud \hat{I}_p závisí na celkové rozloze sítě připojené k transformátoru. Za kapacitu k_0 (F) lze dosadit $k_0 = k_{01} \cdot l$ (F; F / km, km). Velikost poruchového zemního proudu prakticky nezávisí v dané síti na vzdálenosti místa poruchy od transformátoru.

$$I_p = 3\omega k_{01} 1U_f(A; s^{-1}, \frac{F}{km}, km, V) \quad (15)$$

U venkovních vedení sítí se uvažuje kapacitní proud 0,063 A/km. U kabelových vedení dosahují měřené kapacity mnohonásobně vyšších hodnot než u venkovního vedení a kromě toho jsou také závislé na průřezu jader, druhu izolace a konstrukci kabelu. Orientačně můžeme uvažovat pro kabely 22 kV s průřezem 120 až 240 mm² a papírovou izolací měřené kapacitní proudy v rozmezí 3,5 až 4,5 A/km. [2]

1.2.3 Odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem

O odporovém zemním spojení mluvíme tehdy, je-li hodnota přechodového odporu v místě poruchy nezanedbatelná, řádově několik set Ω .



Obr. 4: Odporové zemní spojení [2]

Napětí postižené fáze proti zemi je v tomto případě nenulové a pro poruchový proud platí:

$$\hat{I}_p = -\frac{\hat{U}_a}{R_p} = \hat{I}_a + \hat{I}_b + \hat{I}_c \quad (16)$$

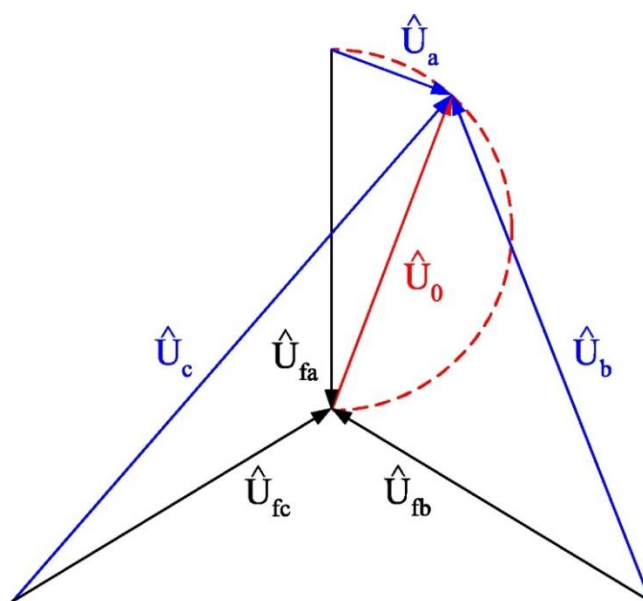
Stav $R_p = 0$ odpovídá dokonalému zemnímu spojení, kdy $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$.

Stav $R_p = \infty$ odpovídá bezporuchovému provoznímu stavu, kdy $\hat{U}_0 = 0$

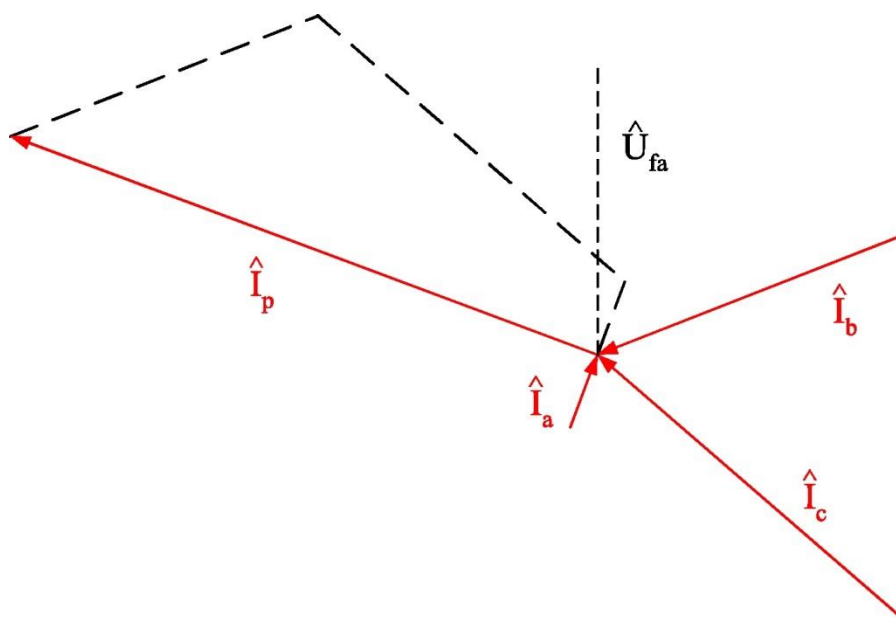
Vztah pro napětí uzlu lze obecně vyjádřit jako funkci odporu poruchy R_p :

$$\hat{U}_0 = f(R_p) \quad (17)$$

Na následujícím fázorovém diagramu je zobrazen pohyb fázoru \hat{U}_0 po kružnici v Gaussově rovině při změně odporu R_p . Za těchto okolností může napětí jedné zdravé fáze přesáhnout i hodnoty sdruženého napětí sítě. [2]



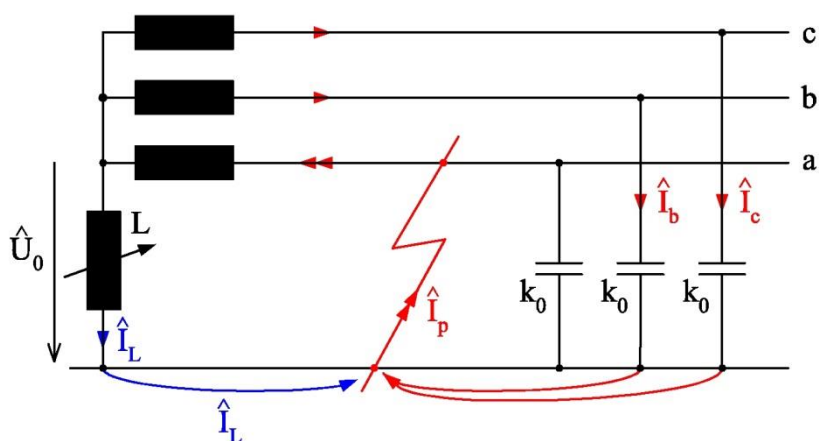
Obr. 5: Fázorový diagram napětí při odporovém zemní spojení [2]



Obr. 6: Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení [2]

1.2.4 Zemní spojení v síti s uzlem uzemněným přes tlumivku

V sítích, kde zemní proud převyšuje hodnotu 5A, je doporučena jeho kompenzace, při proudech nad 10A už je kompenzace nutná. V rozvodnách vn se používá několik možných způsobů, avšak nejčastější z nich je plynule regulovatelná zhášecí tlumivka, která se připojuje mezi úzel transformátoru a zem.



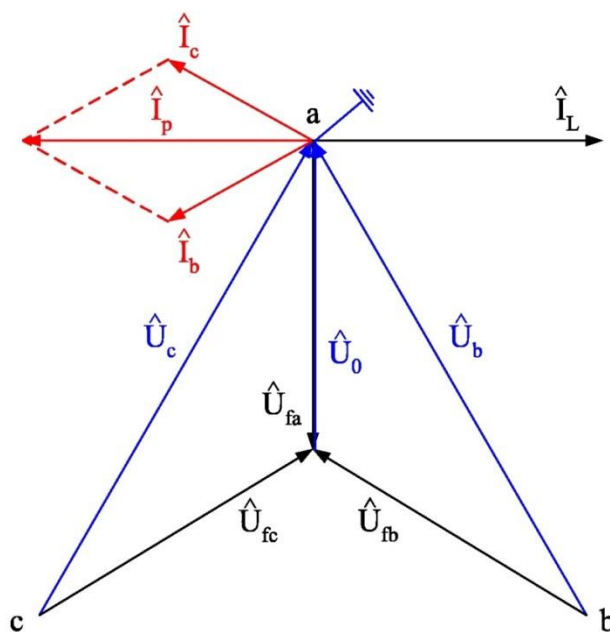
Obr. 7: Zemní spojení v síti s neúčinně uzemněným uzlem zdroje přes tlumivku [2]

V bezporuchovém stavu je při kapacitně souměrné síti napětí uzlu $U_0 = 0$, při běžných nesymetriích bývá $U_0 < 0,01 U_f$.

Při dokonalém zemním spojení bude napětí uzlu $\hat{U}_0 = -\hat{U}_{fa}$. Proud tekoucí přes ideální zhášecí tlumivku bude zpožděn o 90° za napětím \hat{U}_0 :

$$\hat{I}_L = -j \frac{\hat{U}_0}{\omega L} \quad (18)$$

Při vhodné velikosti nastavené indukčnosti dojde ke kompenzaci zemních proudů. Indukční proud tekoucí od tlumivky k místu zemního spojení je v protifázi s kapacitními proudy zdravých fází a tím pádem dojde k uhašení oblouku. [2]



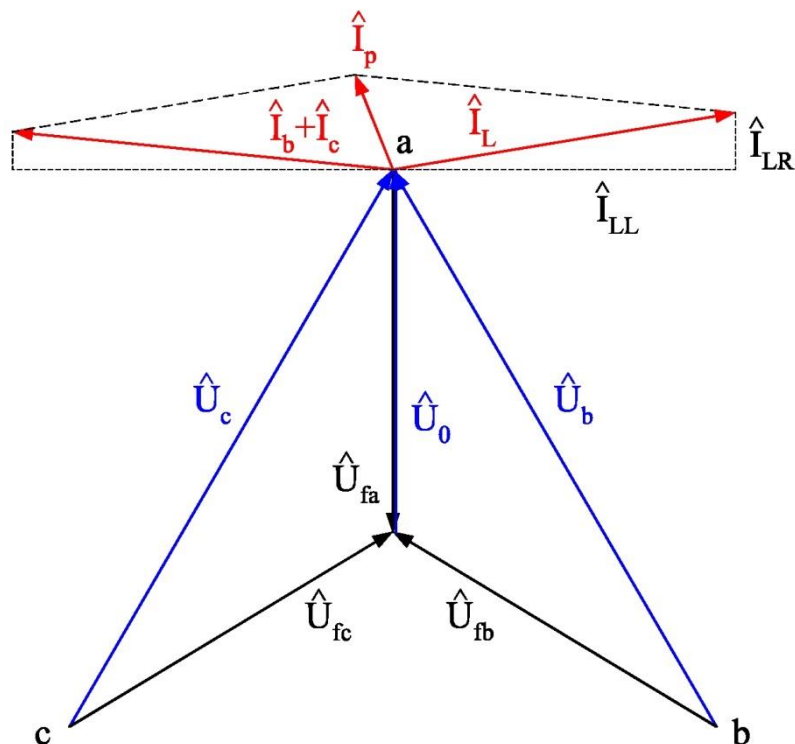
Obr. 8: Napětíové a proudové poměry při ideální kompenzaci poruchového proudu [2]

Při ideální kompenzaci neteče místem poruchy žádný proud, tím pádem se neudrží ani oblouk a zhasne. Bohužel při skutečných poměrech zůstane v místě poruchy zbytkový proud, který se skládá z nevykompenzovaného proudu, díky nepřesně nastavené indukčnosti a z nevykompenzovatelné činné složky, která je způsobena svody vedení a činným odporem zhášecí tlumivky a dále také proudy vyšších harmonických. Pokud je tento zbytkový proud menší než 5A, dojde k uhašení oblouku vlivem deionizace jeho dráhy.

Poruchový proud pak lze vyjádřit takto:

$$\hat{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L}) \right] \hat{U}_0 \quad (19)$$

Kde R_L je odpor tlumivky a G_0 svodový odpor jedné fáze.



Obr. 10: Napětové a proudové poměry při skutečné kompenzaci poruchového proudu [2]

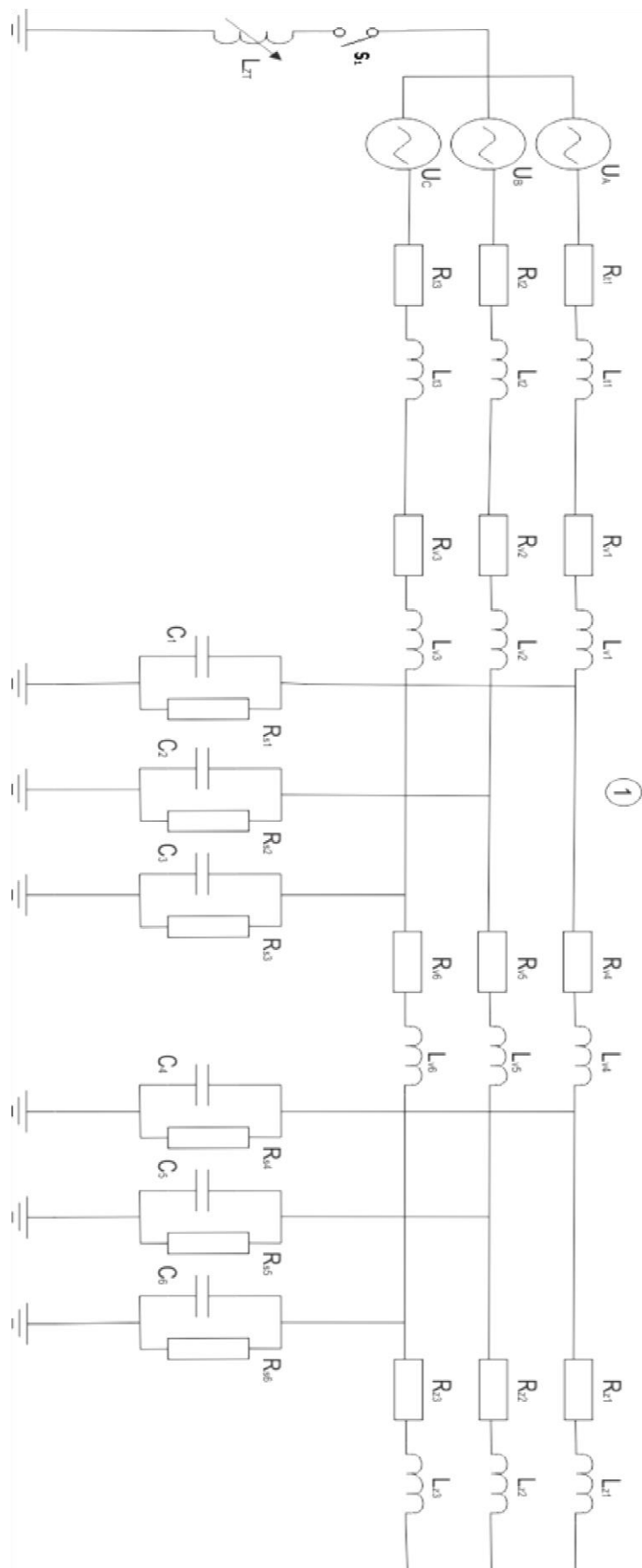
Poruchový proud je u dobře vyladěné kompenzované sítě mnohem nižší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. Nižší velikost poruchového proudu snižuje nároky na uzemnění sítě. U obloukových zemních poruch jsou výrazně zvýšeny podmínky pro jeho samozhášení, nedochází k opětovným zápalům oblouku.

Vhodná velikost zhášecí tlumivky je stanovena při volbě tlumivky a jejím návrhu výpočtem. Tlumivka se potom nastavuje v dané síti za bezporuchového stavu sítě. Při připnutí anebo odepnutí některého vedení do rozvodny je zapotřebí tlumivku přeladit. V dnešní době se používají tlumivky se samočinným laděním. [2]

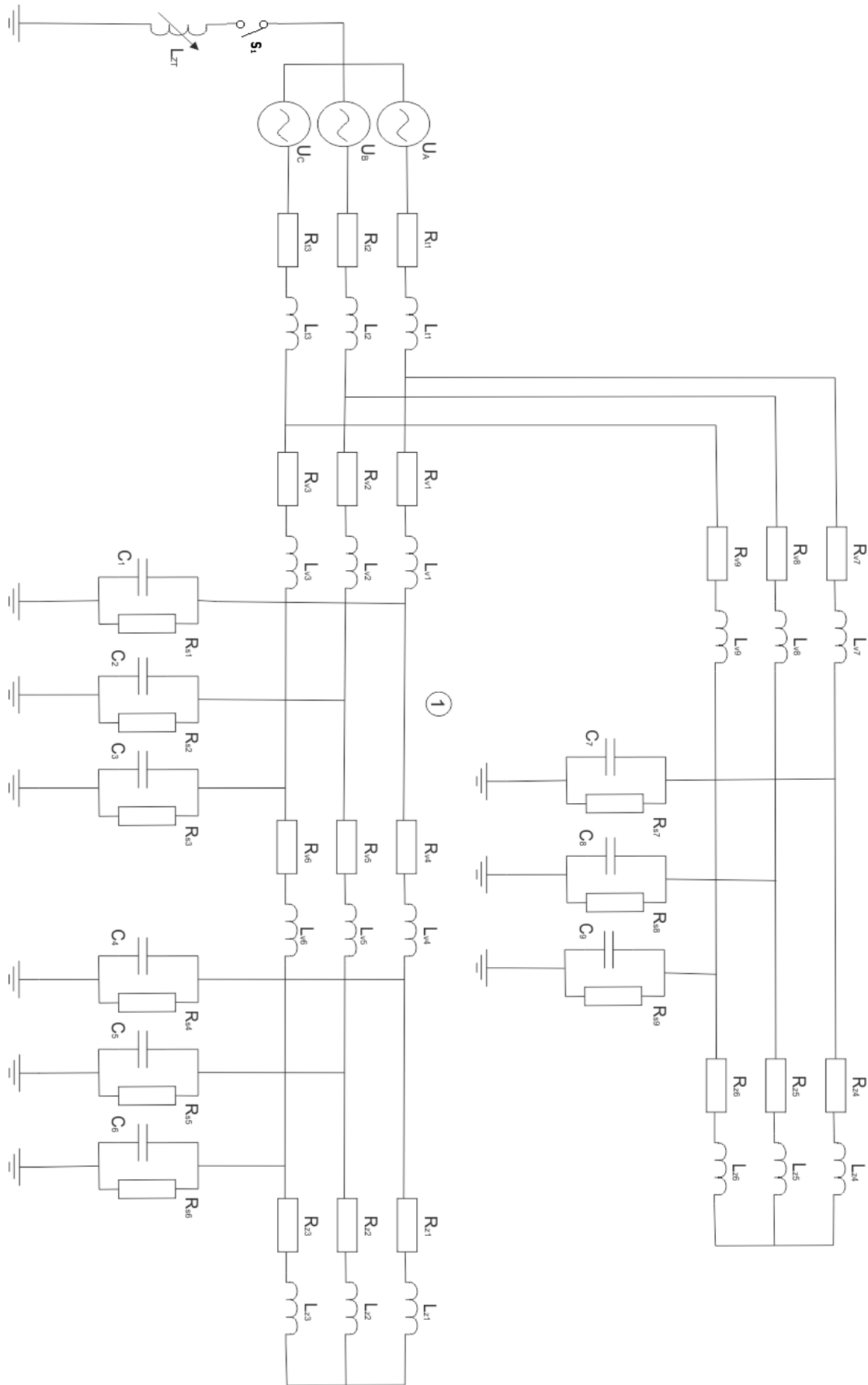
2 Matematický model sítě vn 22 kV

2.1 Matematický model konkrétních uvažovaných sítí vn 22 kV

Na obr. 10 je model uvažované sítě s jedním vývodem a na obr. 11 je model uvažované sítě se dvěma vývody. Na modelu je vyobrazena konkrétní uvažovaná síť s izolovaným středem. V případě, že bude uvažována síť neúčinně uzemněnou, sepne spínač S_1 a do obvodu se připojí zhášecí tlumivku L_{zt} .



Obr. 10: Model konkrétní simulované sítě 22kV s jedním vývodem



Obr. 11: Model konkrétní simulované sítě 22kV se dvěma vývody

2.2 Parametry uvažované sítě

R_{t1}, R_{t2}, R_{t3}	0,026 Ω
R_{v1}, R_{v2}, R_{v3}	8,68 Ω
R_{v7}, R_{v8}, R_{v9}	
R_{v4}, R_{v5}, R_{v6}	21,7 Ω
R_{s1}, R_{s2}, R_{s3}	1,498G Ω
R_{s7}, R_{s8}, R_{s9}	
R_{s4}, R_{s5}, R_{s6}	3,747G Ω
R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}	171,6 Ω
R_{z4}, R_{z5}, R_{z6}	
L_{t1}, L_{t2}, L_{t3}	3,76mH
L_{v1}, L_{v2}, L_{v3}	24,2mH
L_{v7}, L_{v8}, L_{v9}	
L_{v4}, L_{v5}, L_{v6}	60,5mH
L_{z1}, L_{z2}, L_{z3}	1,214H
L_{z4}, L_{z5}, L_{z6}	
C_1, C_2, C_3	85nF
C_7, C_8, C_9	
C_4, C_5, C_6	212,5nF

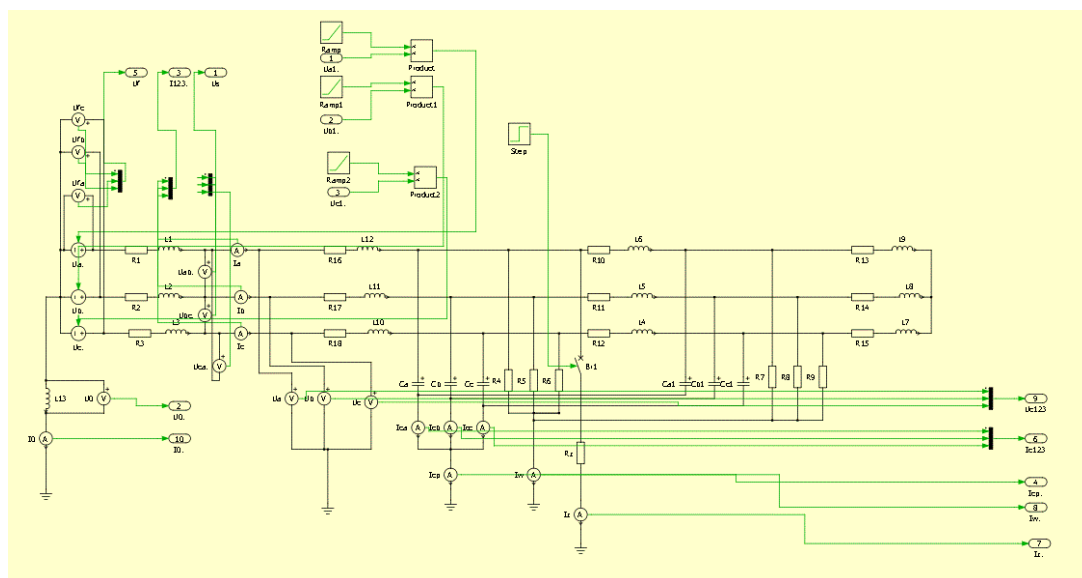
Obr. 12: Parametry sítě

Parametry $R_{t1}, R_{t2}, R_{t3}, L_{t1}, L_{t2}, L_{t3}$ respektují Transformátor 110/22 kV s parametry $S_n=40$ MVA, $u_k=9,5\%$ a $\Delta P_k=86$ kW. Parametry $R_{z1}, R_{z2}, R_{z3}, L_{z1}, L_{z2}, L_{z3}$ respektují první zátěž a parametry $R_{z4}, R_{z5}, R_{z6}, L_{z4}, L_{z5}, L_{z6}$ druhou zátěž, obě zátěže mají stejné parametry $P=940$ kW a $\cos\phi=0,91$. Parametry $R_{v1}, R_{v2}, R_{v3}, L_{v1}, L_{v2}, L_{v3}, C_1, C_2, C_3, R_{s1}, R_{s2}, R_{s3}$ respektují první část vedení dlouhou 20km. Parametry $R_{v4}, R_{v5}, R_{v6}, L_{v4}, L_{v5}, L_{v6}, C_4, C_5, C_6, R_{s4}, R_{s5}, R_{s6}$ respektují druhou část vedení dlouhou 50 km. Parametry $R_{v7}, R_{v8}, R_{v9}, L_{v7}, L_{v8}, L_{v9}, C_7, C_8, C_9, R_{s7}, R_{s8}, R_{s9}$ respektují třetí část vedení dlouhou 20 km. Vedení má tyto parametry příčná kapacita $C=0,00425$ μ F/km, odpor vedení $R=0,434$ Ω /km, indukčnost vedení $L=1,21$ mH/km a svodem protéká 1% kapacitního proudu.

2.3 Sestavení matematického modelu sítě vn 22 kV

Matematický model sítě vn 22kV byl sestaven v programu Matlab/Simulink s využitím knihovny PLECS. Byly sestaveny dva modely sítě. Na prvním modelu byla sestavena síť jedním vývodem a na druhém modelu síť se dvěma vývody. Byly uvažovány

sítě se symetrickým zdrojem napětí U , dále byla uvažována symetrická zátěž a byly zanedbány mezifázové kapacity. Při řešení zemního spojení v programu Matlab/Simulink nejprve nastavíme parametry simulace. Těmito parametry jsou: řešitel diferenciálních rovnic, který nastavíme na ode3, typ kroku simulace, typem kroku simulace bude pevný krok s vzorkovací frekvencí $1e^{-6}$ a posledním parametrem je doba trvání simulace – tu nastavíme na 0,16 s. Jakmile nastavíme tyto parametry, zakreslíme celé schéma uvažované sítě. To znamená, že do schématu umístíme trojfázový zdroj zapojený do hvězdy, do uzlu zdroje umístíme cívku, kterou připojíme přes spínač. Tato cívka nám reprezentuje zhášecí tlumivku. Dále zde umístíme pro každou fázi pasivní prvky zastoupené cívkami, rezistory a kondenzátory. Tyto prvky nám v dané síti reprezentují transformátor, vedení a zátěž. Dále zde umístíme rezistor mezi fází a zem, který připojíme přes spínač. Tento rezistor reprezentuje velikost odporu zemního spojení. Nakonec vše řádně pospojujeme.



Obr. 12: Ilustrativní model sítě vn 22kv v programu PLECS

2.3.1 Simulink

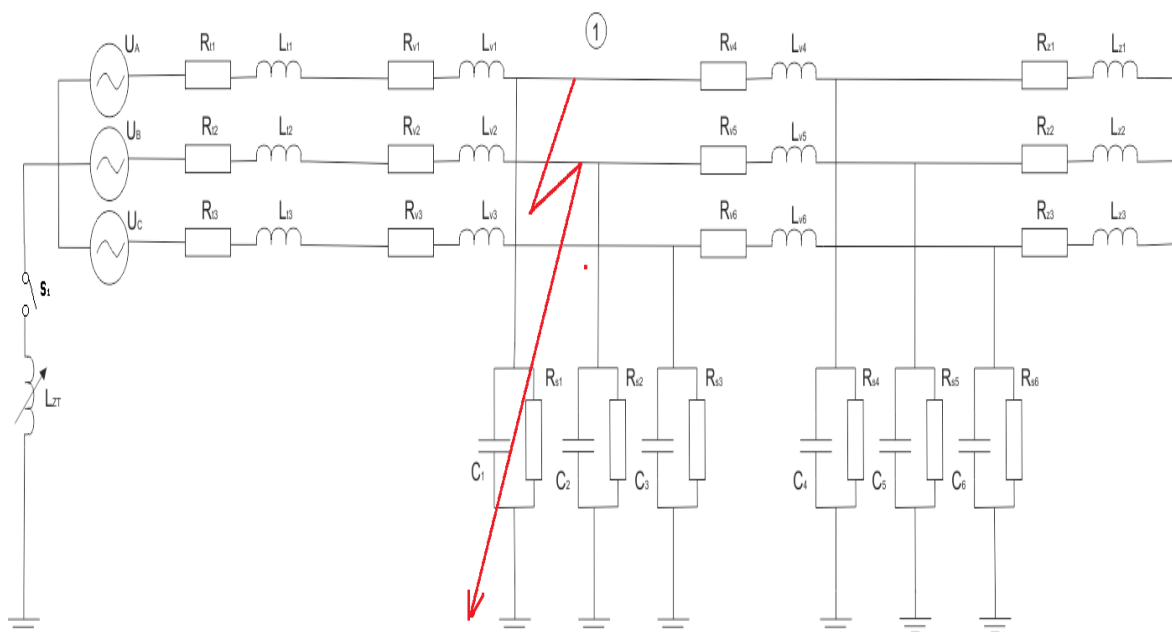
Simulink je rozšiřující nástavbou programu Matlab. Na rozdíl od Matlabu, Simulink nepracuje s příkazovým řádkem, ale využívá příkazy a funkce v podobě grafických bloků. Bloky jsou uspořádány do knihoven, dle oblasti jejich využití. Simulink slouží k simulaci chování dynamických systémů v závislosti na čase.[4]

Vytváření modelů je principiálně poměrně snadné. V okně Simulink Library Browser jsou v jednotlivých knihovnách umístěny potřebné grafické bloky, které se přetáhnou do okna modelu. Tam jsou pospojovány pomocí myši. Tyto bloky lze rozkliknout a upravit

tak jejich parametry. Jedním z nejpoužívanějších bloků je například Scope, jehož rozkliknutím se zobrazí časové průběhy sledovaných veličin.[4]

3 Simulace jednofázových zemních spojení v síti 22 kV

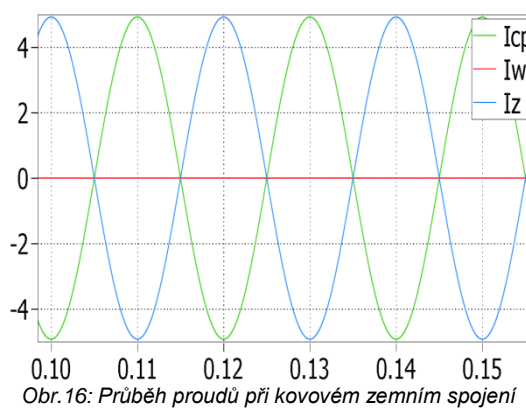
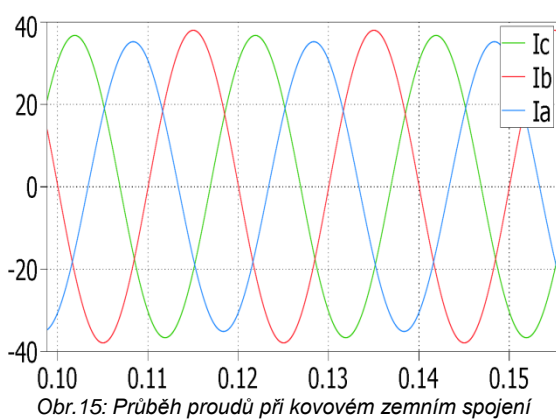
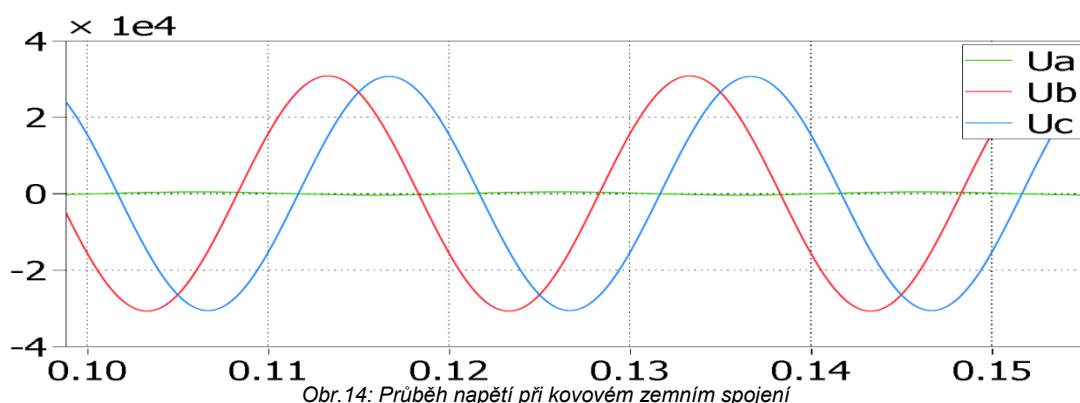
V následujících podkapitolách bude simulováno zemní spojení. K zemnímu spojení dojde vždy ve fázi A v bodě 1. Konkrétní síť, která v tomto případě bude uvažována, je na obr. 13. V případě, že bude simulována síť s izolovaným středem, zůstane spínač S_1 v rozpojeném stavu. Pokud bude simulována síť s neúčinně uzemněným středem, bude spínač S_1 sepnut.



Obr.13: Zemní spojení v uvažované síti

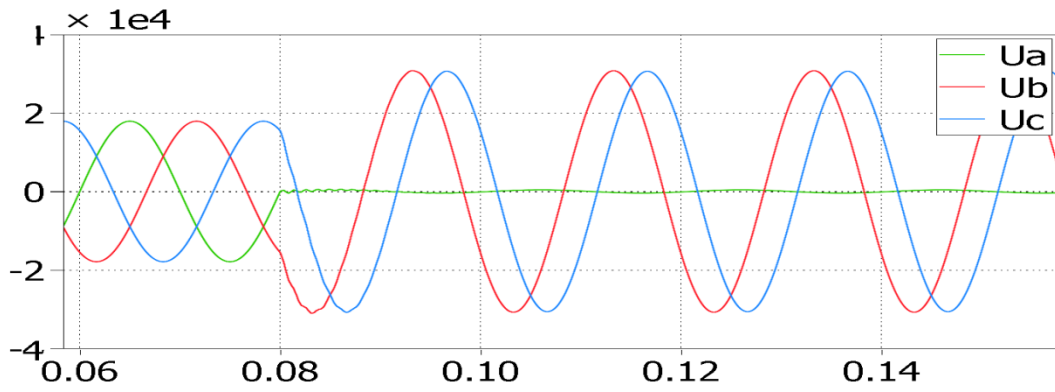
3.1 Kovové zemní spojení v síti 22 kV s izolovaným uzlem sítě

V této části bude simulováno kovové zemní spojení v síti s izolovaným středem. Odpor zemního spojení bude nastaven na $R_z=0$. hodnota odebíraného výkonu $P=940$ kW A budu sledováno, jaký to bude mít vliv na proudy a napětí v síti.

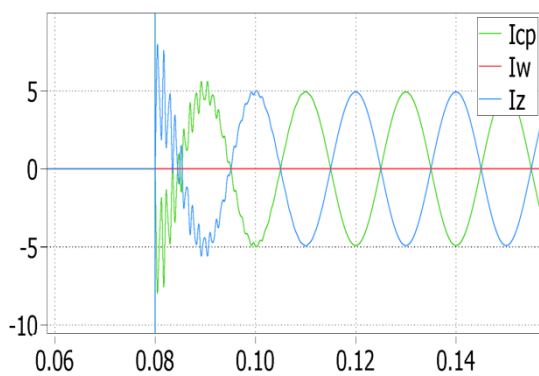


Z grafu napětí je patrné, že hodnota napětí v postižené fázi A, tj. U_a , kleslo napětí téměř na nulu a hodnoty fází U_b a U_c dosáhly téměř sdružených hodnot. Hodnoty proudů I_a , I_b a I_c už nejsou díky zemnímu spojení stejné, ale mají rozdílnou hodnotu. Proud I_w , činná složka poruchového proudu, je přibližně 1% z proudu kapacitního I_{cp} . Proud I_{cp} , kapacitní poruchový proud, dosahuje hodnoty téměř 5A a je přímo v protifázi s hodnotou proudu I_z , celkovým proudem tekoucím zemním spojením.

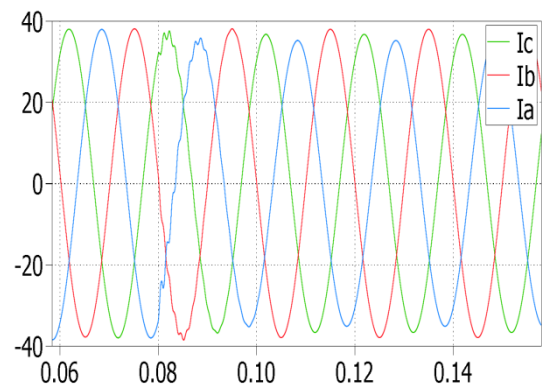
Dále bude simulováno zemní spojení v přechodovém ději. Takže se zapne simulace bez zemního spojení a v čase $t=0.08$ se spojí fáze A se zemí pomocí spínače, tím dojde k zemnímu spojení.



Obr.17: Průběh napětí při kovovém zemním spojení v přechodovém ději

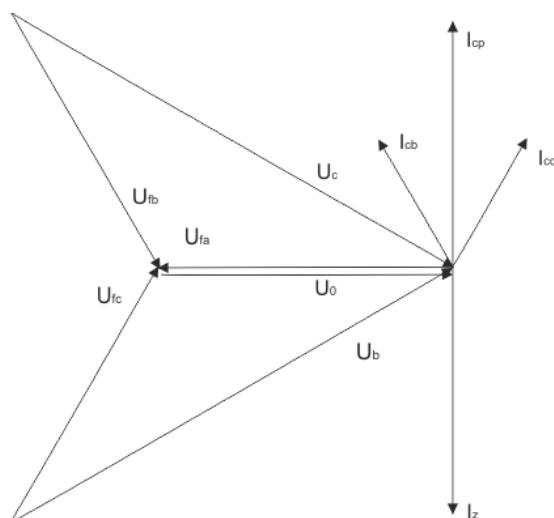


Obr.18: Průběh proudů při kovovém zemním spojení v přechodovém ději



Obr.19: Průběh proudů při kovovém zemním spojení v přechodovém ději

Proudy I_{cp} a I_z dosáhnou během přechodového děje mnohonásobně větších hodnot než v ustáleném stavu.

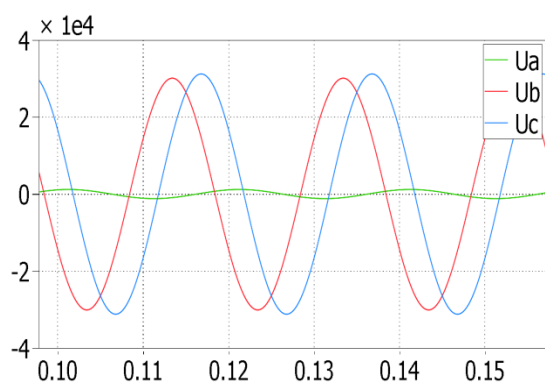


Obr.20: Fázorový diagram napětí a proudů při kovovém zemním spojení

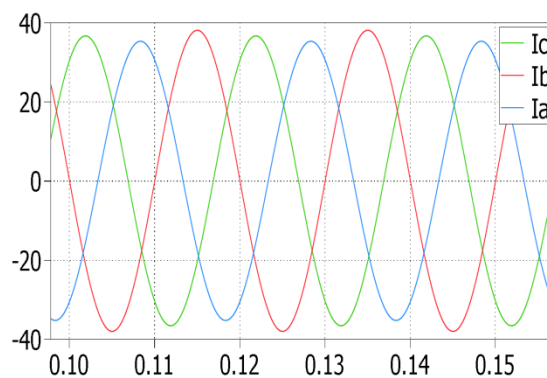
Na více uvedeném fázorovém diagramu jsou zobrazeny fázové hodnoty napětí před vznikem zemního spojení U_{fa} , U_{fb} , U_{fc} . Dále pak napětí U_b, U_c to jsou hodnoty jednotlivých napětí proti zemi při zemním spojení. Napětí U_0 , je napětí uzlu sítě proti zemi při zemním spojení. Proud I_{cb} , I_{cc} , jsou kapacitní složky svodových proudů v jednotlivých fázích při zemním spojení, proud I_{cp} celkový kapacitní proud a proud I_z je celkový proud tekoucím místem zemního spojení

3.2 Citlivost na odpor poruchy v síti izolovaným uzlem

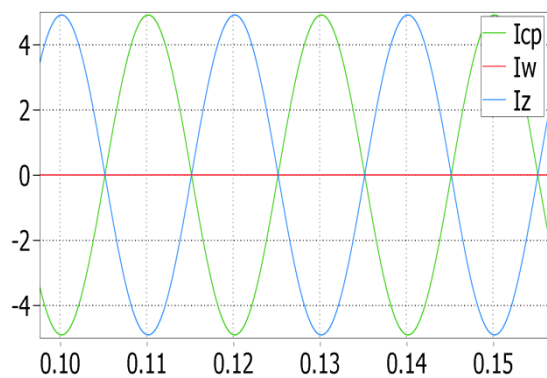
V této části bude simulováno odporové zemní spojení v síti s izolovaným uzlem, schéma zapojení dle obr.13. Budu nastavovat zemní odpor R_z od 250 až do 5000 Ω a budu sledovat, jaký to bude mít vliv na průběhy napětí a proudů. Provedu 8 simulací z nich zaznamenám průběhy proudů a napětí a dále potom nakreslím fázorové diagramy.



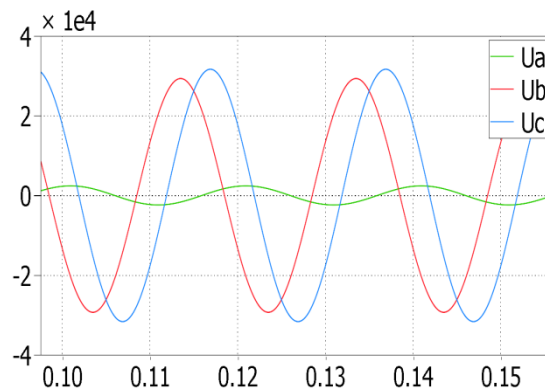
Obr.21: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=250\Omega$



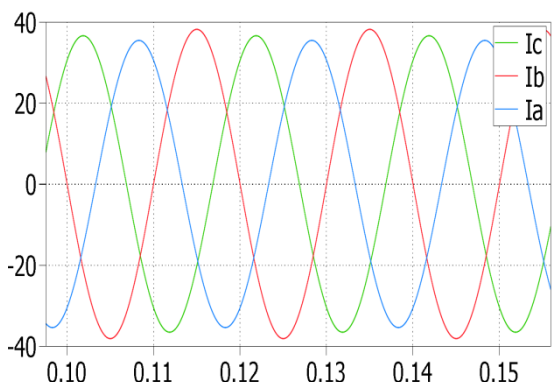
Obr.22: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=250\Omega$



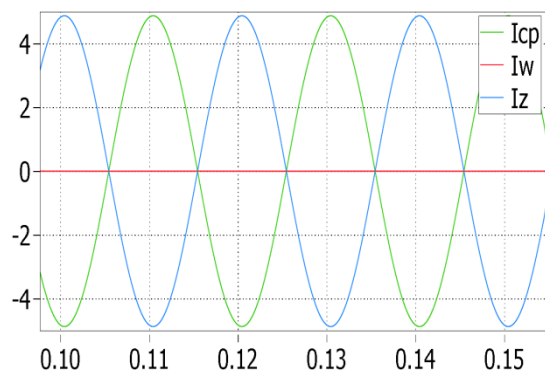
Obr.23: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=250\Omega$



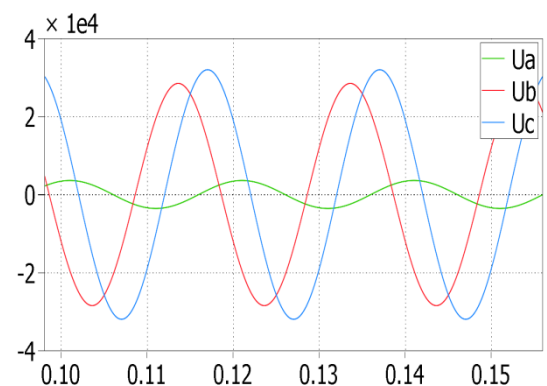
Obr.24: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=500\Omega$



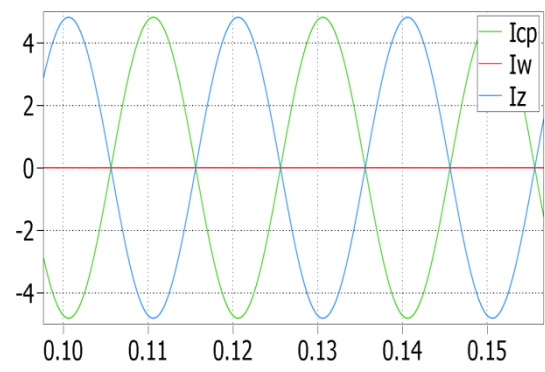
Obr.25: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=500\Omega$



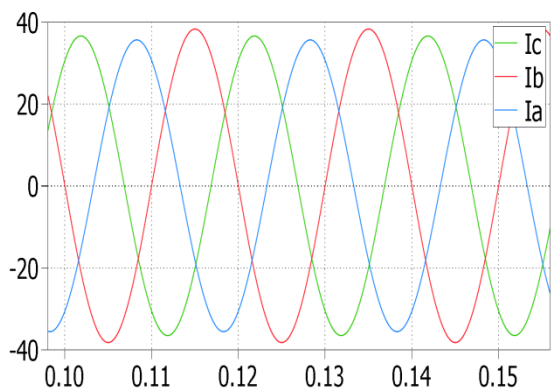
Obr.26: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=500\Omega$



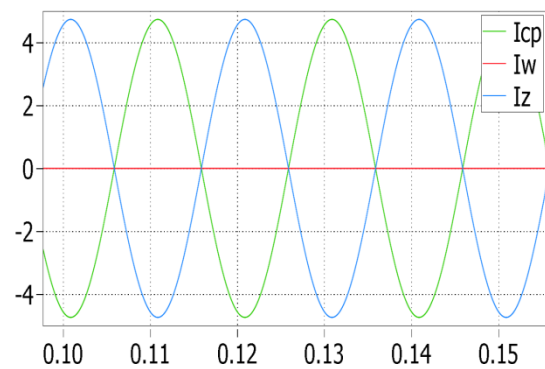
Obr.27: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=750\Omega$



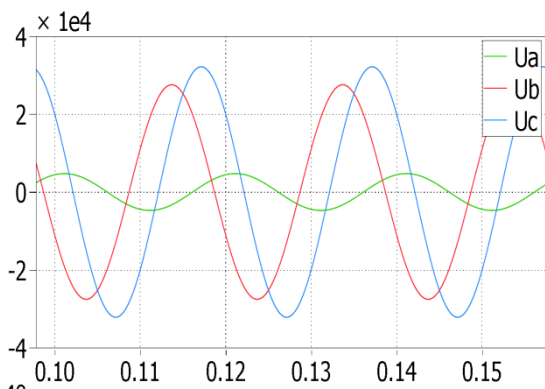
Obr.28: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=750\Omega$



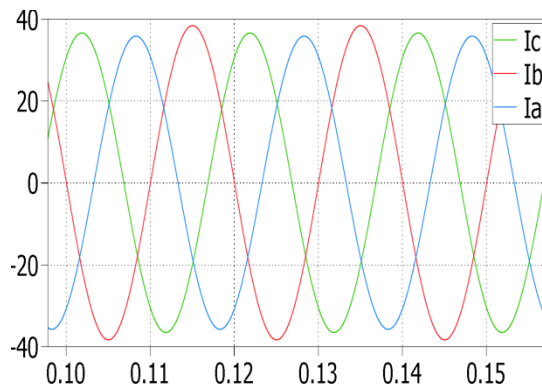
Obr.29: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=750\Omega$



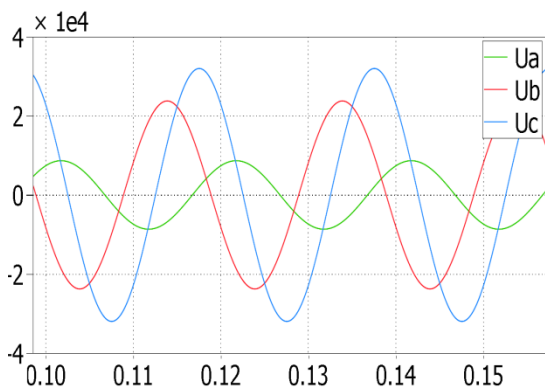
Obr.30: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=1000\Omega$



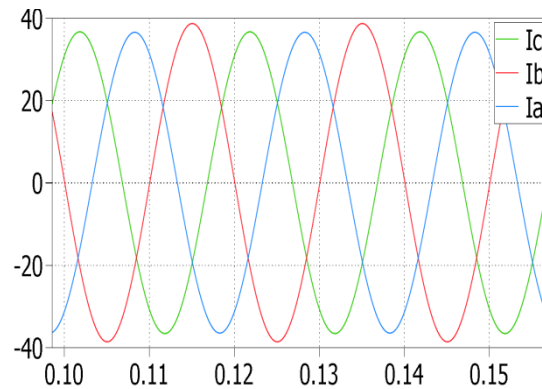
Obr.31: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=1000\Omega$



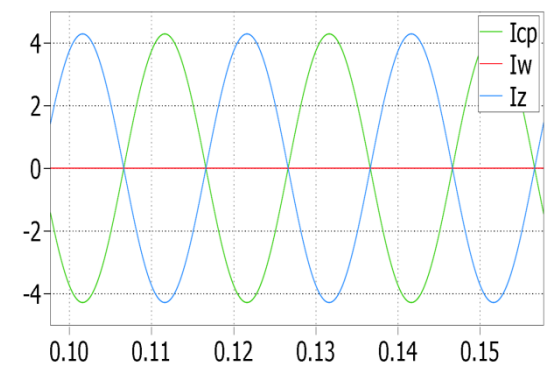
Obr.32: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=1000\Omega$



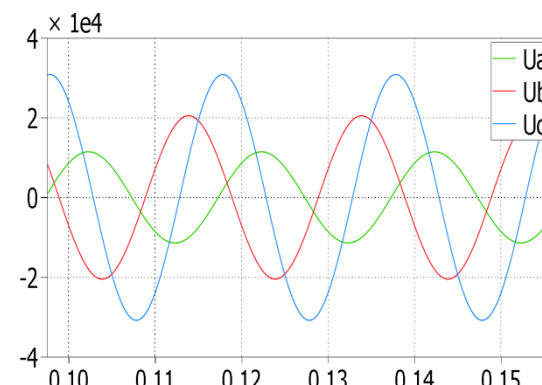
Obr.33: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=2000\Omega$



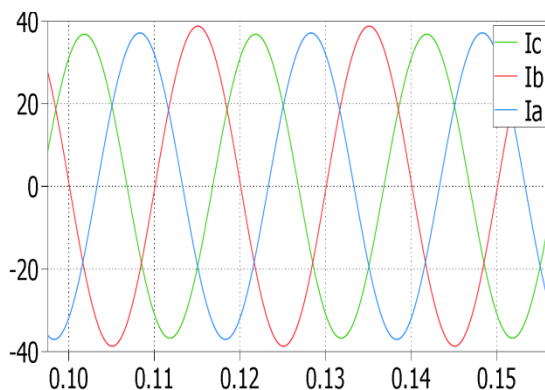
Obr.34: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=2000\Omega$



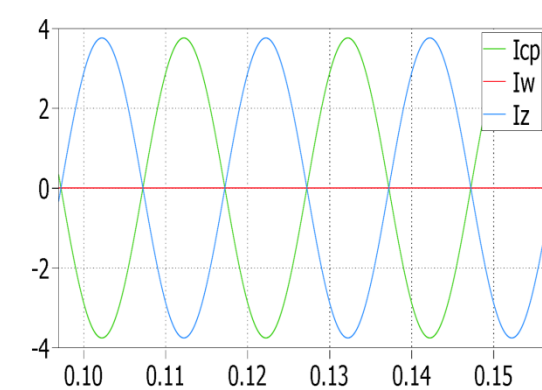
Obr.35: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=2000\Omega$



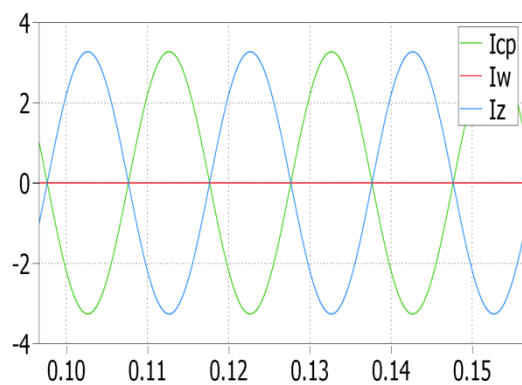
Obr.36: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=3000\Omega$



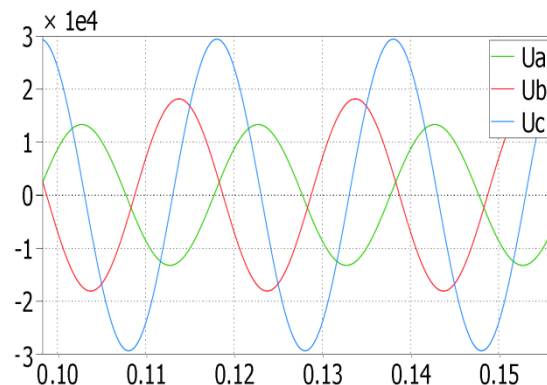
Obr.37: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=3000\Omega$



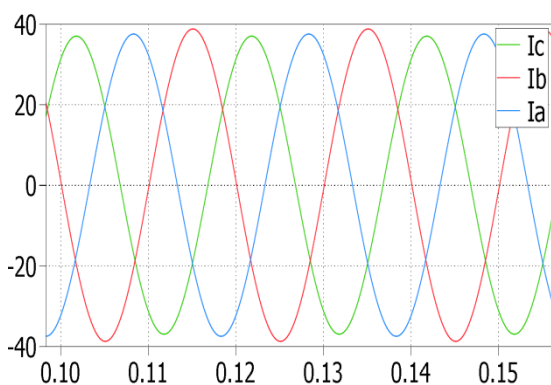
Obr.38: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=3000\Omega$



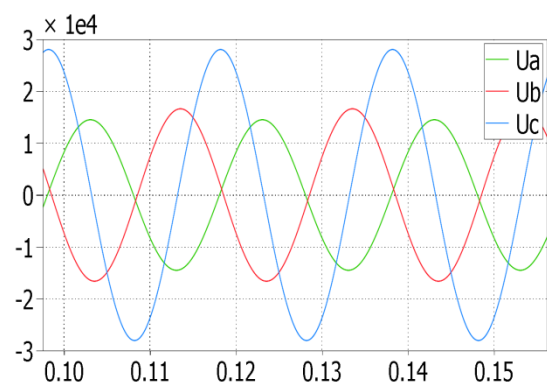
Obr.39: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=4000\Omega$



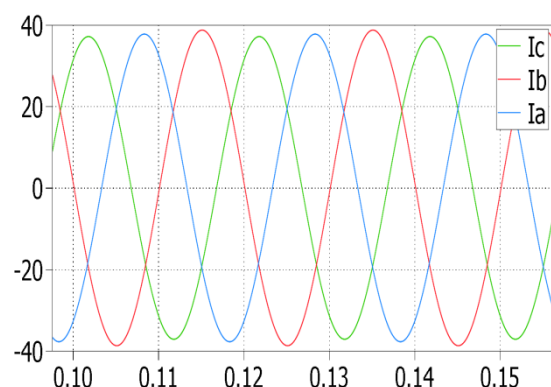
Obr.40: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=4000\Omega$



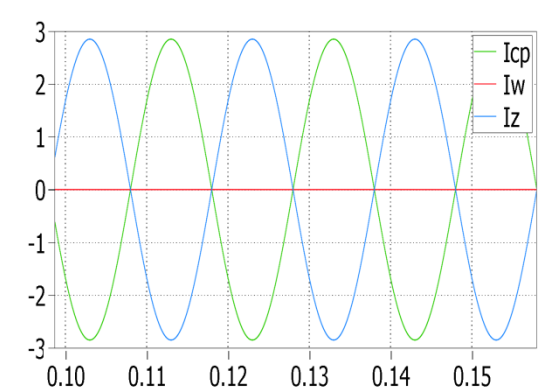
Obr.41: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=4000\Omega$



Obr.42: Průběh napětí při zemním odporu $R_z=5000\Omega$

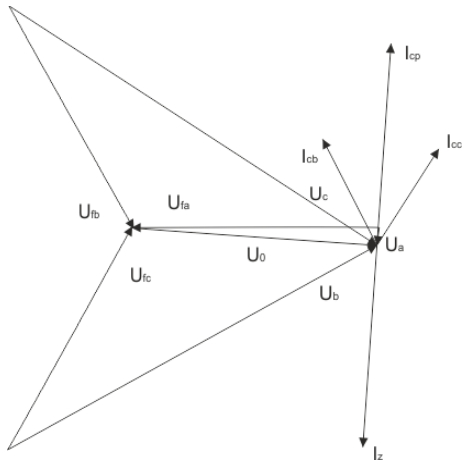


Obr.43: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=5000\Omega$

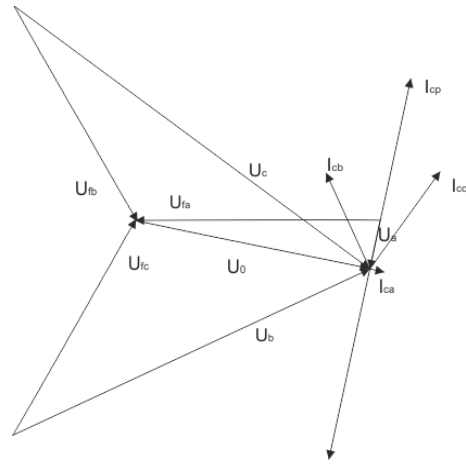


Obr.44: Průběh proudů při zemním odporu $R_z=5000\Omega$

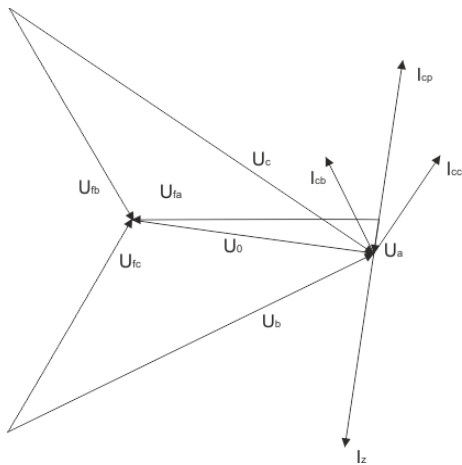
Na výše uvedených grafech je vidět jak napětí U_a v poškozené fázi roste od minimálních hodnot při zemním odporu $R_z=250\Omega$, až se téměř srovná s klesajícím napětím U_b při zemním odporu $R_z=5000\Omega$. Napětí U_c si drží přibližně stejnou hodnotu napětí někde okolo sdružené hodnoty. Proud I_{cp} a I_z nám s rostoucí hodnotou odporu klesají. A proudy I_a , I_b , a I_c jsou téměř konstantní.



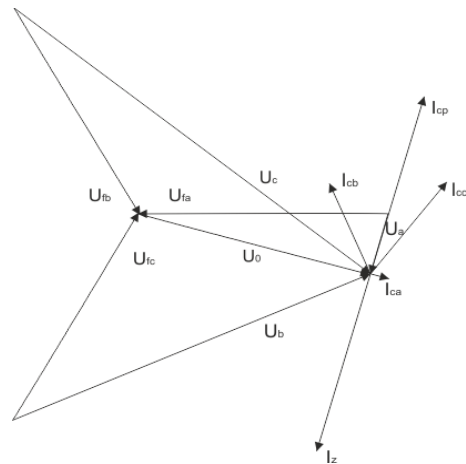
Obr.45: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=250\Omega$



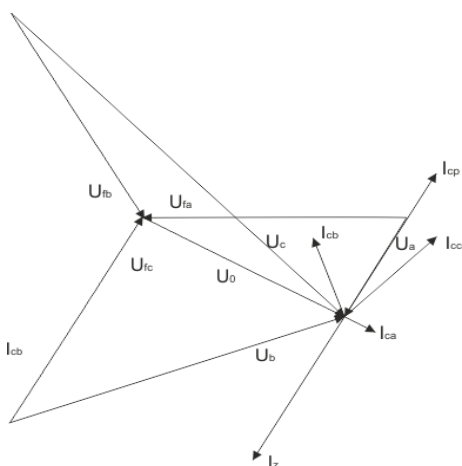
Obr.46: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=750\Omega$



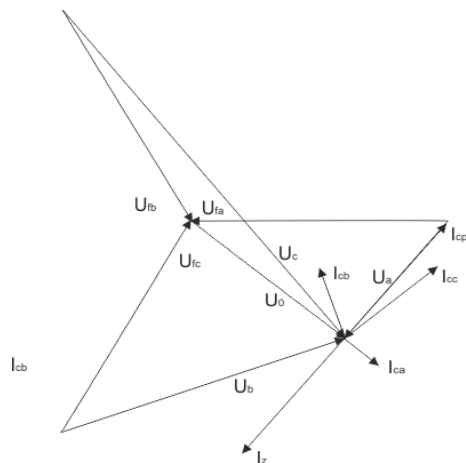
Obr.47: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=500\Omega$



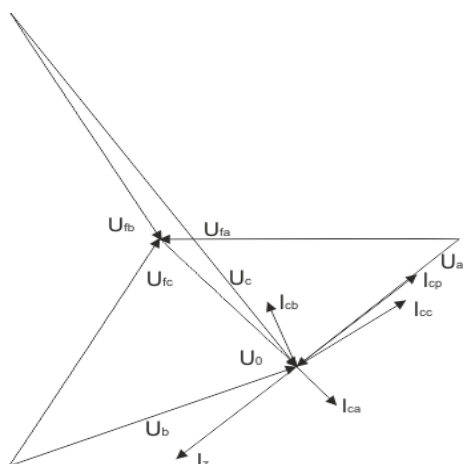
Obr.48: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=1000\Omega$



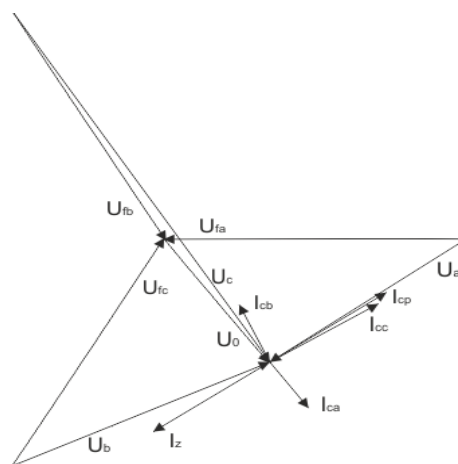
Obr.49: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=2000\Omega$



Obr.50: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=3000\Omega$

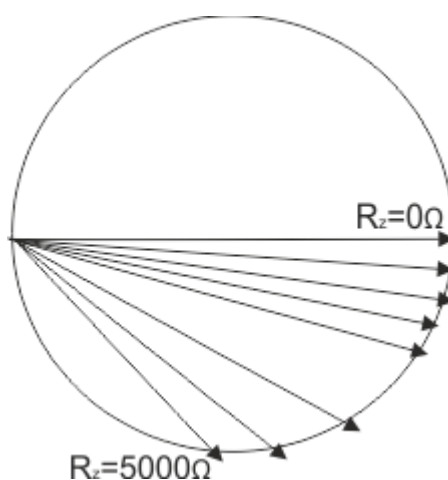


Obr.51: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=4000\Omega$



Obr.52: Fázorový diagram napětí a proudů při zemním odporu $R_z=5000\Omega$

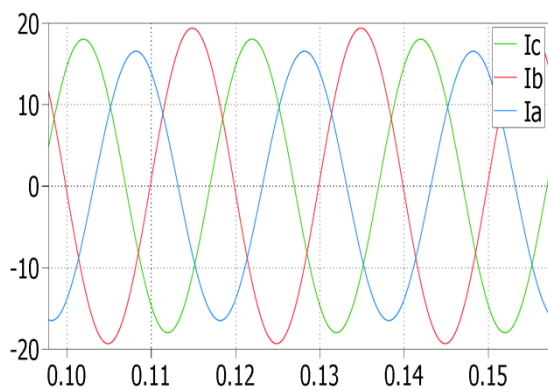
Z výše uvedených fázorových diagramů je vidět jak se nám se změnou odporu mění velikosti a fáze napětí U_a , U_b a U_c . Dále pak velikosti a fáze proudů I_{ca} , I_{cb} a I_{cc} . V neposlední řadě se mění i velikosti a fáze proudů I_{cp} a I_{cz} , které jsou vůči sobě v protifázi. Z výše uvedených fázorových diagramů je také vidět, jak fázor napětí U_0 při změně odporu R_z opisuje Thaletovu kružnici. Pro lepší názornost bude ukázán pohyb fázoru na následujícím obr. 53. Největší hodnotu má fázor napětí U_0 při kovovém zemním spojení.



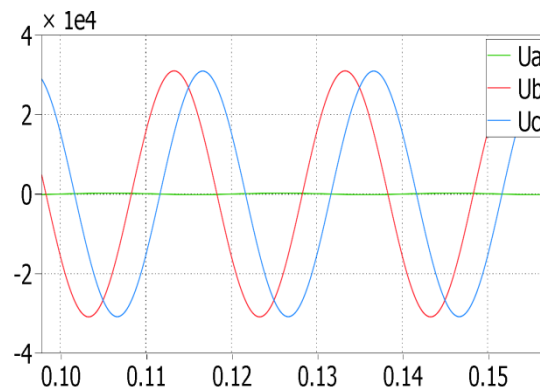
Obr.53: Pohyb fázoru U_0 po kružnici

3.3 Citlivost na odebíraný výkon v síti izolovaným uzlem

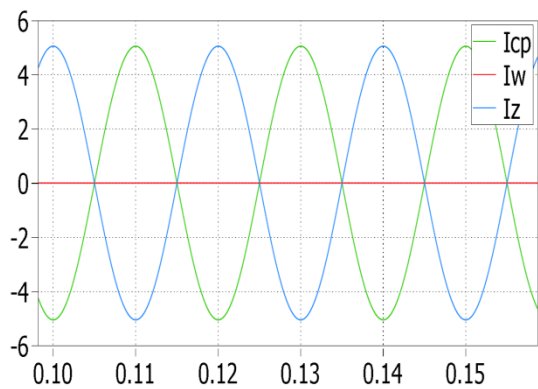
V této části bude simulováno vliv odebíraného výkonu na průběhy napětí a proudů při zemním spojení. Budu uvažovat: $P_{\max}=940\text{kW}$, $P=0\text{kW}$ a $P=0,5\cdot P_{\max}$.



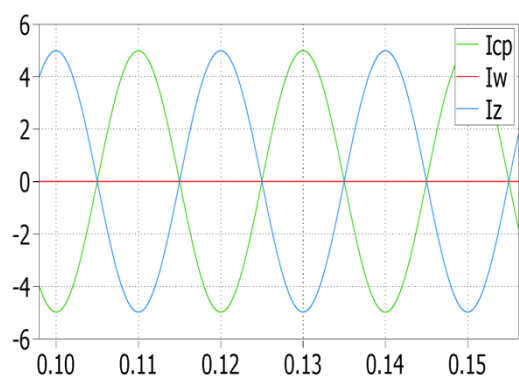
Obr.54: Průběh proudů při $P=0\text{kW}$



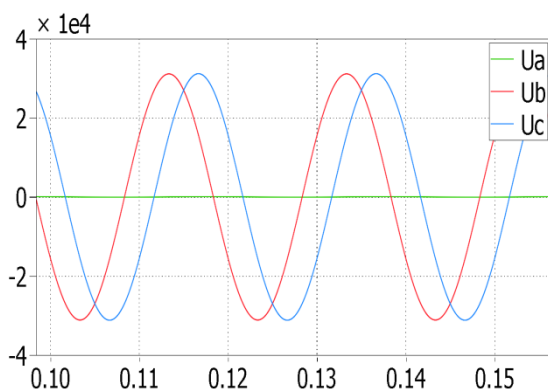
Obr.55: Průběh napětí při $P=0\text{kW}$



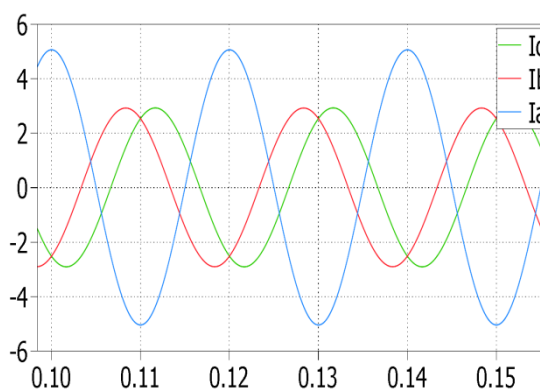
Obr.56: Průběh proudů při $P=0\text{kW}$



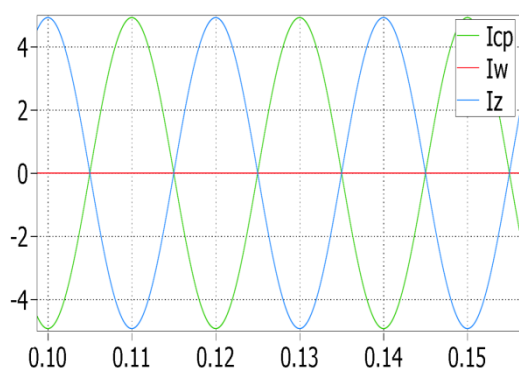
Obr.57: Průběh proudů při $P=0,5\cdot P_{\max}$



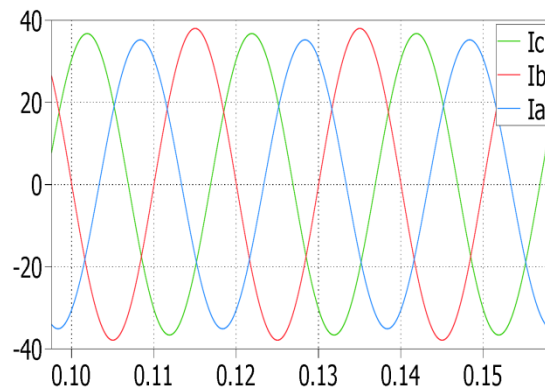
Obr.58: Průběh napětí při $P=0,5\cdot P_{\max}$



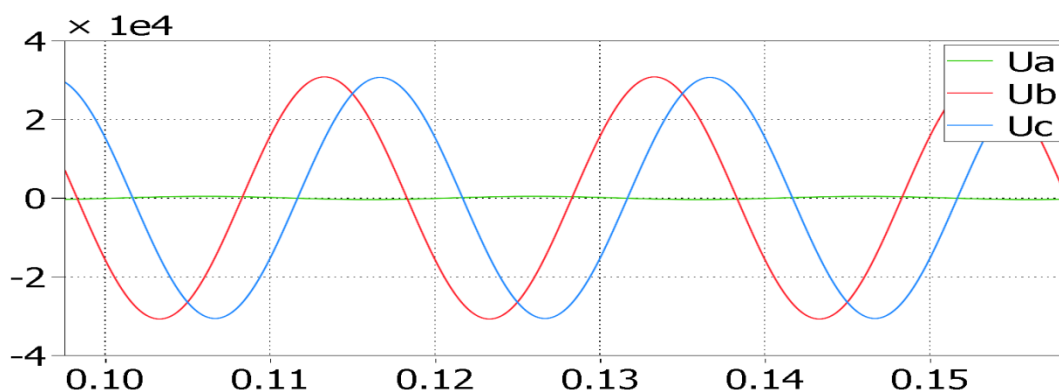
Obr.59: Průběh proudů při $P=0,5\cdot P_{\max}$



Obr.60: Průběh proudů při $P=P_{max}$

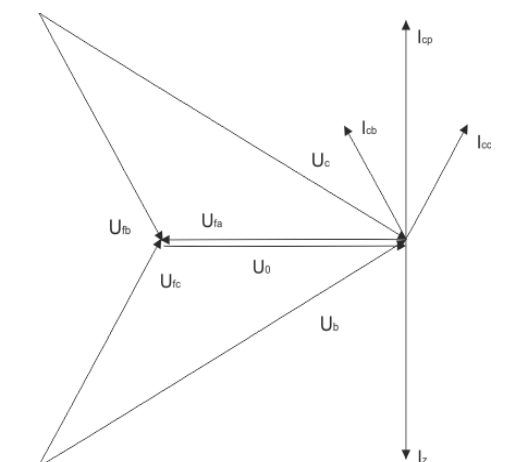


Obr.61: Průběh proudů při $P=P_{max}$

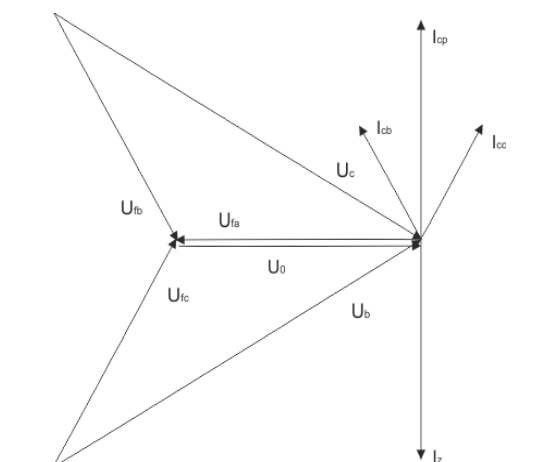


Obr.62: Průběh napětí při $P=P_{max}$

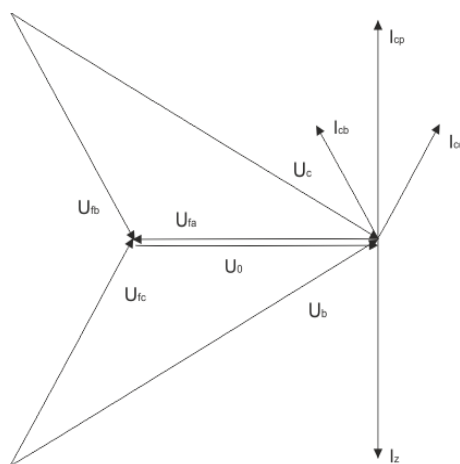
Z výše uvedených grafů je patrné, že s rostoucím odběrem rostou i velikosti proudů I_a , I_b , I_c . Při nulovém odběru jsou tyto proudy téměř rovny kapacitním svodovým proudům. Jelikož zvolená zátěž má ve všech třech případech nízkou hodnotu odběru, dojde pouze ke změně proudů ve všech třech fázích, ale hodnoty napětí zůstanou stejné.



Obr.63: Fázorový diagram napětí a proudů při $P=0kW$



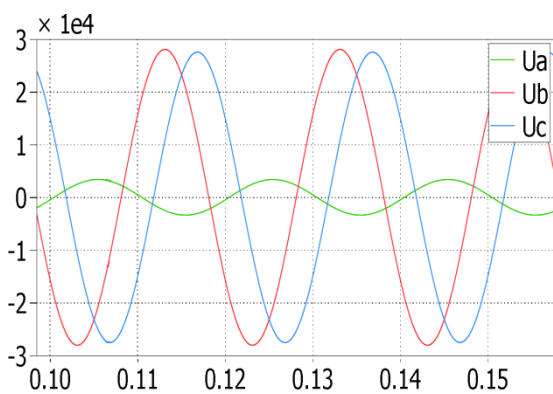
Obr.64: Fázorový diagram napětí a proudů při $P=0,5 \cdot P_{max}$



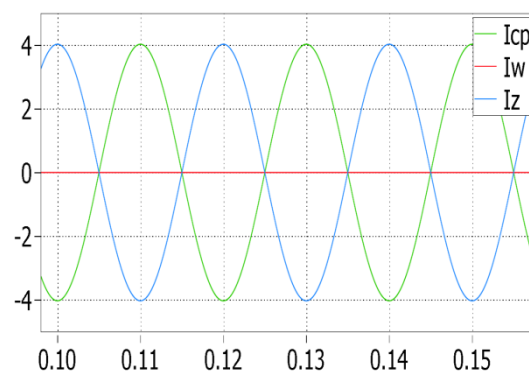
Obr.65: Fázorový diagram napětí a proudů při $P=P_{max}$

Vzhledem k tomu, že byl ve všech třech případech zvolen malý odběr, jsou i výše uvedené fázorové diagramy téměř totožné.

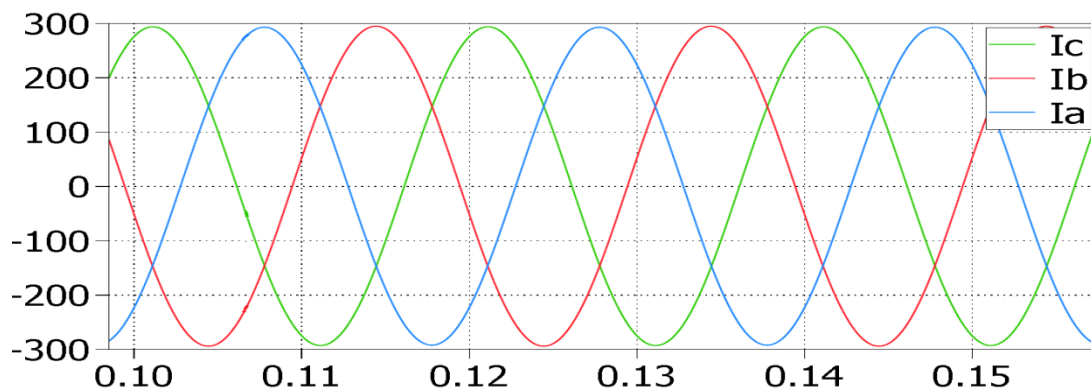
Jelikož by mělo dojít i ke zvýšení hodnoty napětí v postižené fázi, a tím pádem k poklesu hodnot napětí nepostižených fázích. Provedu pro názornost simulaci s odebíraným výkonem P_{max} zvětšeném 20 krát.



Obr.66: Průběh napětí při 20krát zvětšeném P_{max}

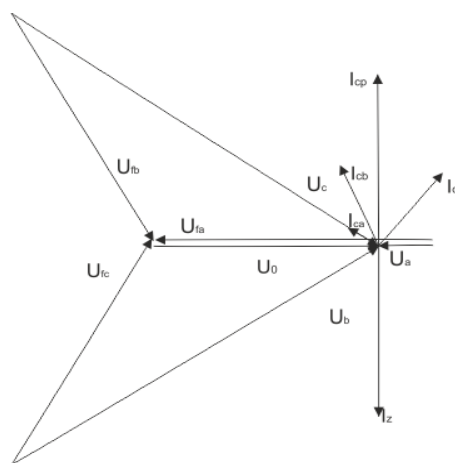


Obr.67: Průběh proudů při 20krát zvětšeném P_{max}



Obr.68: Průběh proudů při 20krát zvětšeném P_{max}

Z výše uvedených grafů už je vidět jak se zvýší napětí U_a , a dojde k poklesu napětí U_b a U_c . Také dojde k snížení hodnoty proudů I_{cp} a I_z .

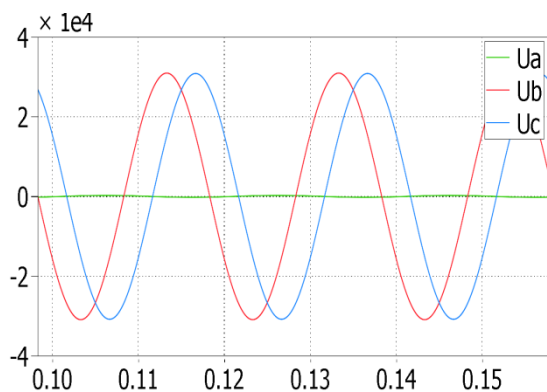


Obr.69: Fázorový diagram napětí a proudů při 20krát zvětšeném P_{max}

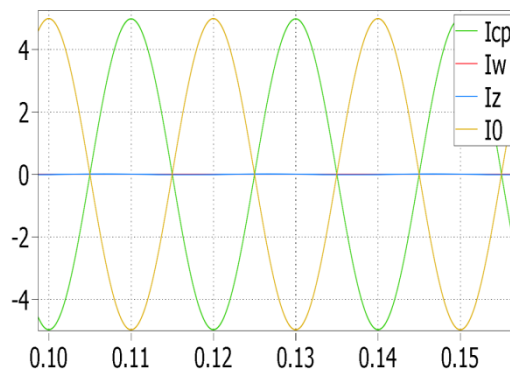
Na fázorovém diagramu je vidět jak dojde ke zmenšení hodnoty napětí U_0 , což je způsobeno úbytkem napětí ve fázi A. Dále je zde vidět jak se změní hodnoty a fáze jednotlivých svodových kapacitních proudů I_{ca} , I_{cb} a proudu I_{cc}

3.4 Kompenzace zhášecí tlumivkou

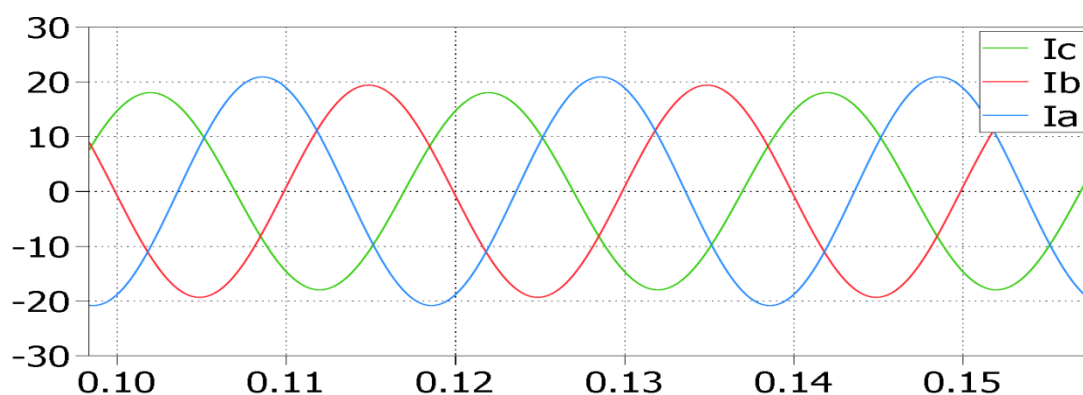
V této části bude simulováno zemní spojení v síti s neúčinně uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku. Zemní odpor R_z bude nastaven na hodnotu $0,5\Omega$ odebíraný výkon na hodnotu $P=0,5 \cdot P_{max}$. Zhášecí tlumivku bude vyladěna tak, aby plně vykompenzovala poruchový kapacitní proud.



Obr.70: Průběh napětí při plné kompenzaci



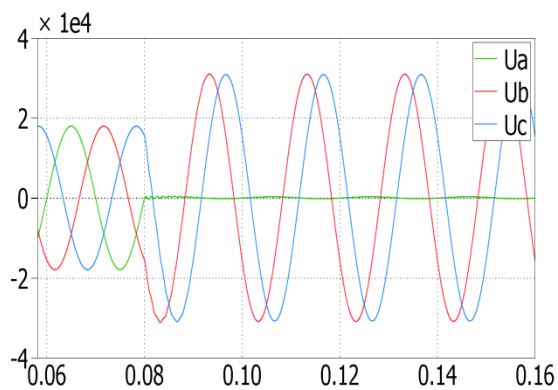
Obr.71: Průběh proudů při úplné kompenzaci



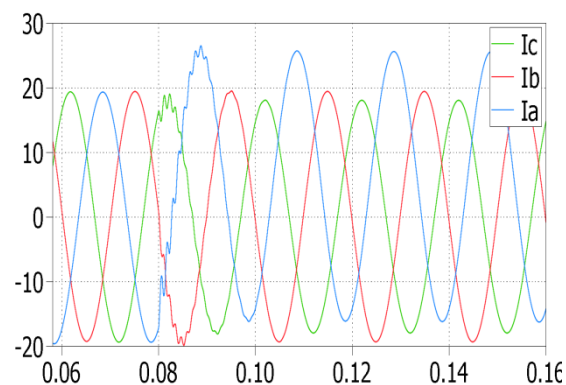
Obr.72: Průběh proudů při úplné kompenzaci

Na obr. 72 je krásně vidět jak dojde k vykompenzování svodového kapacitního proudu I_{cp} proudem zášací tlumivky I_0 , který má stejnou velikost, ale opačný směr. Zbytkový proud tekoucí místem zemního spojení I_z je téměř nulový.

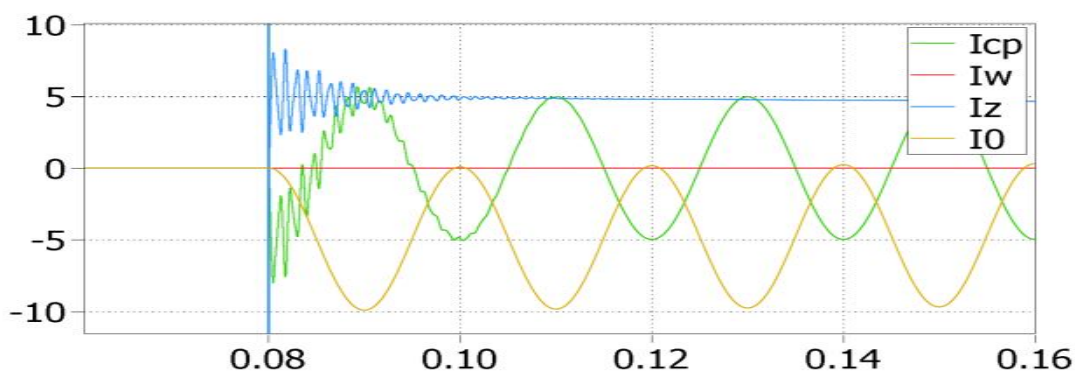
Dále bude simulováno zemní spojení v přechodovém ději. Takže se zapne simulace bez zemního spojení a v čase $t=0.08$ se spojí fáze A se zemí pomocí spínače, tím dojde k zemnímu spojení.



Obr.73: Průběh napětí při plné kompenzaci v přechodovém ději

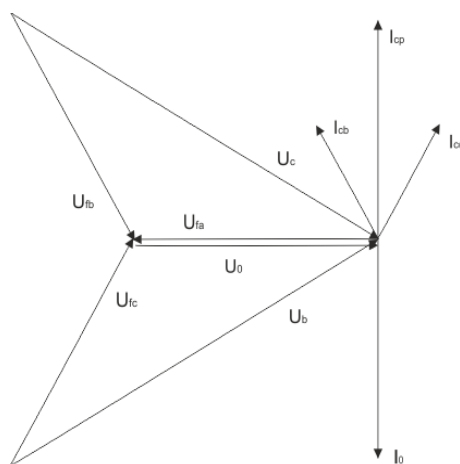


Obr.74: Průběh proudů při plné kompenzaci v přechodovém ději



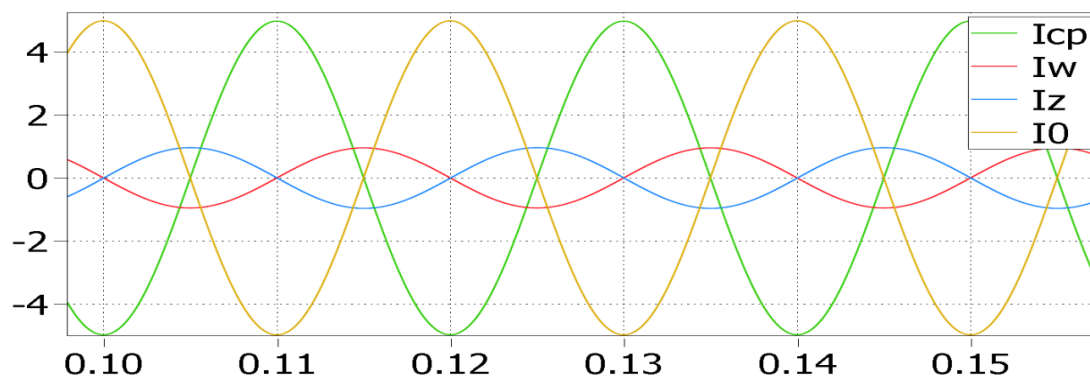
Obr.75: Průběh proudů při plné kompenzaci v přechodovém ději

Na obr.73 je znázorněno jak vlivem zemního spojení dojde v postižené fázi A k poklesu z fázové hodnoty napětí U_a na napětí s téměř nulovou hodnotou. Ve zdravích fázích U_b a U_c dojde k nárůstu napětí na hodnotu sdruženého napětí. Na obr.58 není zobrazena maximální hodnota proudů I_{cp} a I_z , který dosáhne mnohonásobně větších hodnot než v ustáleném stavu. Můžeme zde, ale vidět jak nám proud I_z pomalu klesá, jeho střídavá složka odezní rychle, zato jeho stejnosměrná složka odeznívá po dobu několika vteřin. Stejnosměrná složka se zde vyvine jelikož zemní spojení nenastane v napět'ovém maximu. Doba odeznívání stejnosměrné složky je závislá na délce vedení.

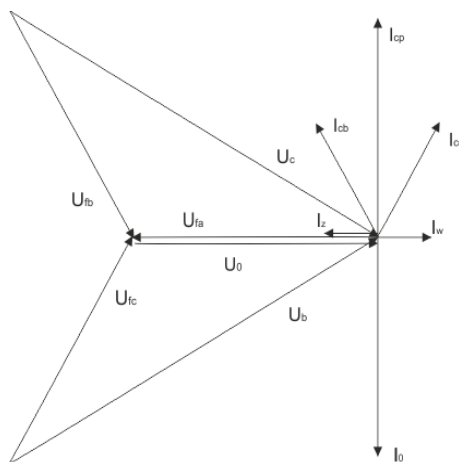


Obr.76: Fázorový diagram napětí a proudů při plné kompenzaci

Vzhledem k tomu, že činný svodový proud má velmi nízké hodnoty, dojde k úplné kompenzaci kapacitního proudu. Tím pádem, zemním spojením neteče žádný proud. Pro názornost bude razantně snížen svodový odpor, tím pádem zemním spojením poteče činná složka poruchového proudu, kterou tlumivka nedokáže vykompenzovat, což bude viditelné na obr.77.



Obr.77: Průběh proudů při kompenzaci se zvýrazněným svodem



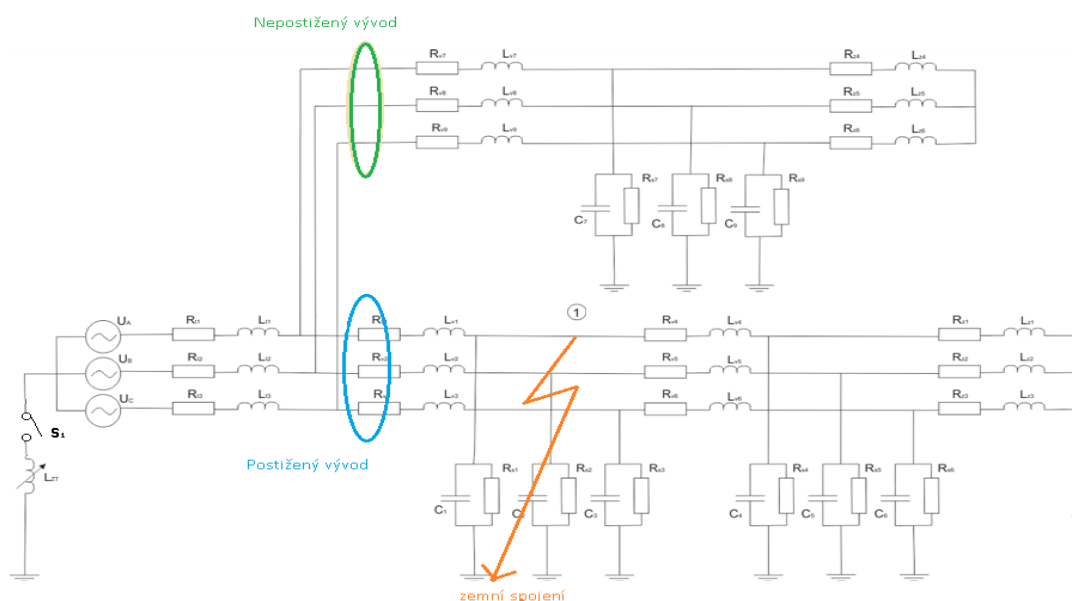
Obr.78: Fázorový diagram napětí a proudů při kompenzaci se zvýrazněným svodem

Na výše uvedeném fázorovém diagramu je vidět, že tlumivka nedokáže vykompenzovat činnou složku poruchového proudu I_w a tím pádem nám zemní spojení teče proud I_z , který má činný charakter.

4 Analýza postižených a nepostižených vývodů při jednofázovém zemním spojení

V této kapitole bude simulováno zemní spojení v sítích s izolovaným středem, tak i v sítích s neúčinně uzemněným středem přes zhášecí tlumivku. K zemnímu spojení dojde vždy ve fázi A, v bodě 1 na postiženém vývodu, konkrétní síť, která v tomto případě bude uvažována, je na obr.79. Pokud bude uvažována síť s izolovaným středem, zůstane spínač S_1 rozepnut. V případě uvažované neúčinně uzemněné sítě bude spínač S_1 sepnut a tím dojde k připojení zhášecí tlumivky k nulovému bodu sítě. Svodové odpory budou uvažovány mnohonásobně menší, než byly zvoleny, aby se zde projevila i činná složka svodového proudu, která je důležitá při určování postiženého vývodu. Zemní odpor R_z bude roven nule. Bude se zde měřit nulová složka napětí i proudů na postiženém a nepostiženém vývodu. Dále se zde bude měřit činná a kapacitní složka svodového proudu, proud tekoucí zhášecí tlumivkou, celkový proud tekoucí zemním spojením.

Měření nulové složky proudu ve vývodu je nejdůležitější pro identifikaci vývodu s jednofázovou poruchou v síti. Největší problém při těchto měření je zajištění požadované přesnosti. To klade vysoké nároky na měřicí přístroje.



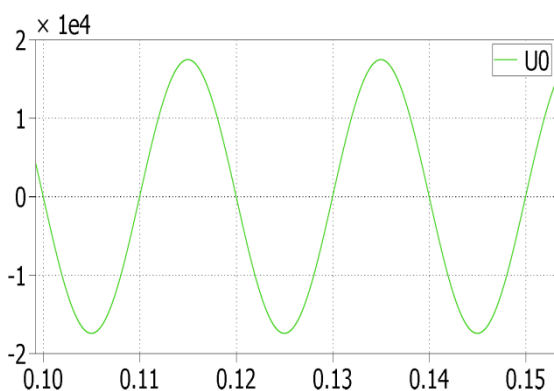
Obr.79: zemní spojení v síti s dvěma vývody

4.1 Síť s izolovaným středem

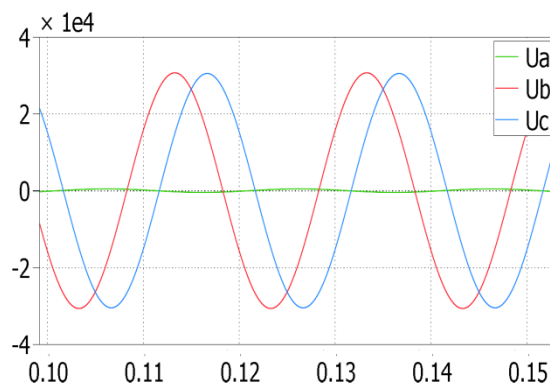
V této podkapitole bude simulováno zemní spojení v síti s izolovaným středem se dvěma vývody jak je vidět na obr.79. Síť bude zatížena výkonem $P=940$ kW. Zemní odpor poruchy $R_z=0$. A mnohonásobně snížím činný svodový odpor. Nejprve provedu simulace pro nepostižený vývod, potom bude simulován vývod postižený.

A) Nepostižený vývod

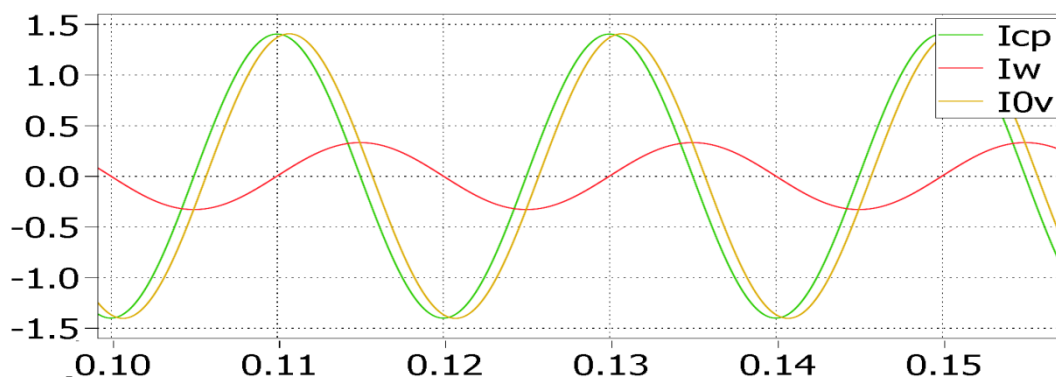
Nepostižený vývod je na obr.79 označen zelenou barvou



Obr.80: Průběh nulové složky napětí na nepostiženém vývodu



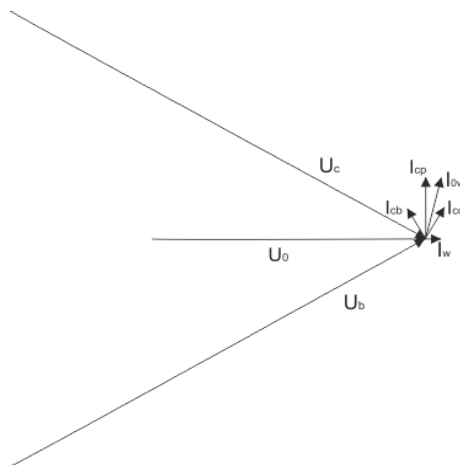
Obr.81: Průběh napětí na nepostiženém vývodu



Obr.82: Průběh proudů na nepostiženém vývodu

Napětí na ve fázi A na nepostiženém vývodu klesne na téměř nulovou hodnotu, kdežto napětí ve zdravých fázích vzrostou na téměř sdruženou hodnotu. Nulová složka napětí dosáhne téměř fázové hodnoty. Velikost nulové složky proudu I_{0v} je téměř totožná s velikostí proudu I_{cp} . Rozdíl je zde pouze ve fázi. Tento fázový posuv způsobuje proud I_w .

Proud I_w je přibližně čtvrtinový vůči proudu I_{cp} a posunut o 90° . Ve skutečnosti by tento proud I_w byl někde okolo 1% z proudu I_{cp} , ale pro názornost byl zvýšen.

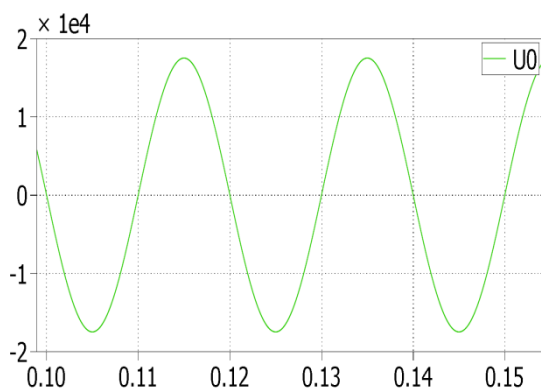


Obr.83: Fázorový diagram napětí a proudů na nepostiženém vývodu

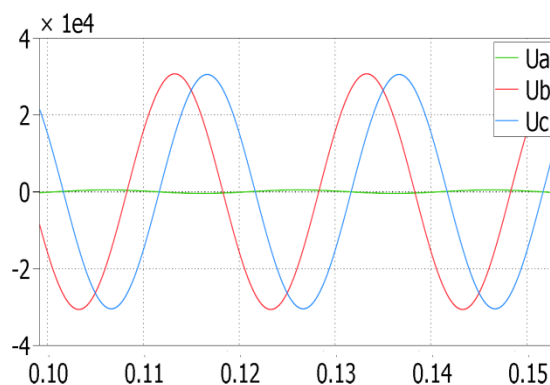
Z fázorového diagramu je vidět, že fázový posuv nulové složky proudu I_{0v} na zdravém vývodu je vůči nulové složce napětí U_0 menší než 90° , tento posuv je dán poměrem činné a kapacitní složky svodového proudu na nepostiženém vývodu. Jak můžeme vidět na výše uvedeném fázorovém diagramu, tak nulová složka proudu I_{0v} je dána fázorovým součtem proudu I_{cp} a proudu I_w , které jsou odebíraný tímto vývodem.

B) Postižený vývod

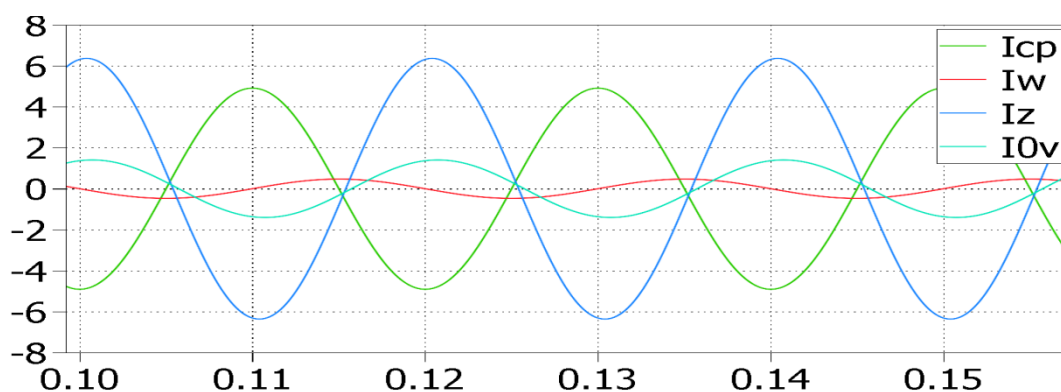
Postižený vývod je na obr.79 označen modrou barvou



Obr.84: Průběh nulové složky napětí na postiženém vývodu

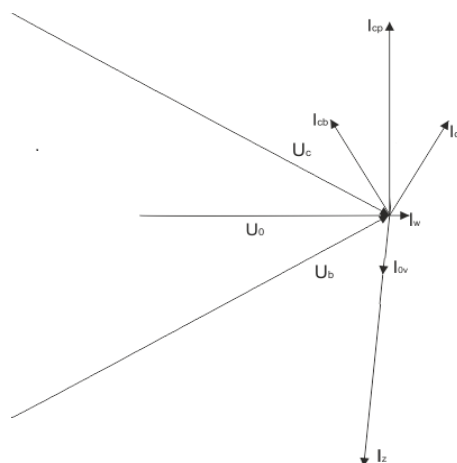


Obr.85: Průběh napětí na postiženém vývodu



Obr.86: Průběh proudů na postiženém vývodu

Z výše uvedených grafů je patrné, že napětí v postižených fázích A, B, C jsou téměř stejná jako tato napětí v nepostižených fázích. Taktéž nulová složka napětí na postiženém vývodu je podobná jako na nepostiženém vývodu. Nulová složka proudu I_{0v} je na postiženém vývodu v protifázi s nulovou složkou proudu I_{0v} na nepostiženém vývodu, toho se využívá při detekci postiženého vývodu. Kapacitní složka svodového proudu I_{cp} je u postiženého vývodu větší než u nepostiženého, to je dáno tím, že síť s postiženým vývodem je větších rozměrů.



Obr.87: Fázorový diagram napětí a proudů na postiženém vývodu

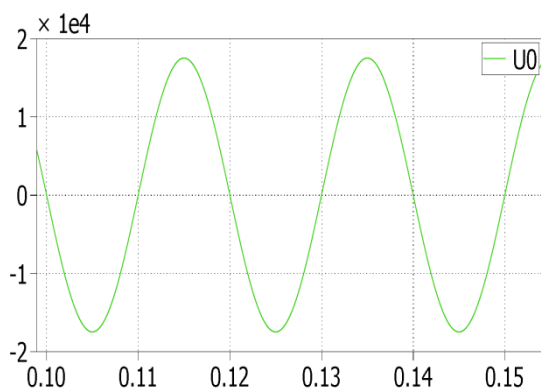
Z fázorového diagramu je vidět, že fázový posuv nulové složky proudu I_{0v} na postiženém vývodu je vůči nulové složce napětí U_0 téměř 270° a závisí na poměru proudů I_{cp} a I_w na nepostiženém vývodu. Podobně jako u vývodu nepostiženého je z postiženého vývodu odebírána jak činná tak kapacitní složka svodového proudu, ale v tomto případě nemá žádný vliv na úroveň netočivé složky proudu.

4.2 Síť kompenzovaná přes zhášecí tlumivku

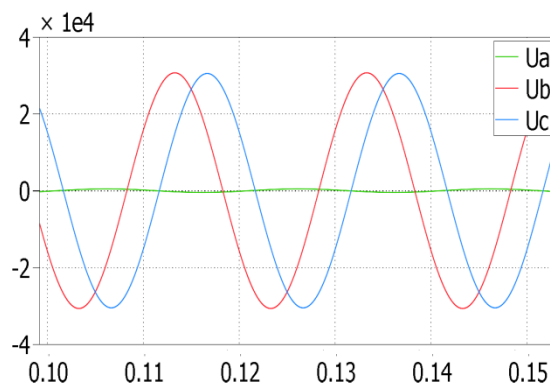
V této podkapitole bude simulováno zemní spojení v síti s neúčinně uzemněným středem přes zhášecí tlumivku se dvěma vývody, jak je vidět na obr.79; spínač S_1 v tomto případě bude sepnut. Zhášecí tlumivka bude nastavena tak, aby plně vykompenzovala kapacitní složku svodového proudu. Síť bude zatížena výkonem $P=940$ kW. Zemní odpor poruchy $R_z=0$. Mnohonásobně bude snižován činný svodový odpor. Nejprve provedu simulace pro nepostižený vývod, potom bude simulován vývod postižený.

A) Nepostižený vývod

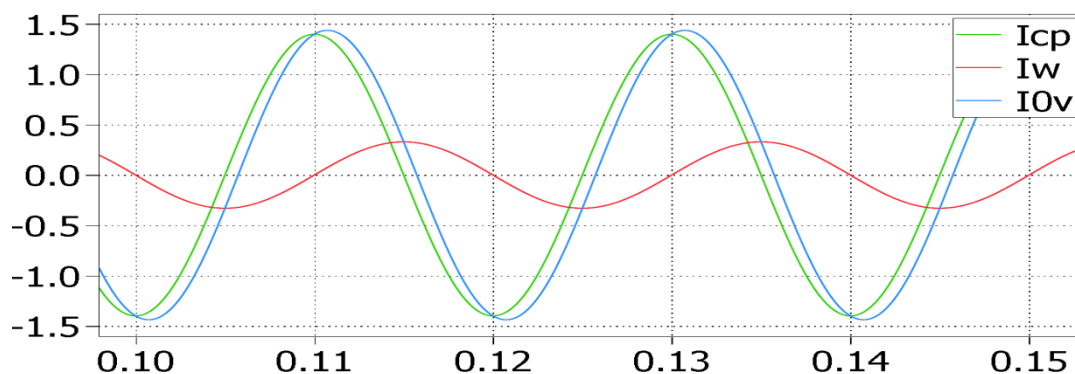
Nepostižený vývod je na obr.79 označen zelenou barvou



Obr.88: Průběh nulové složky napětí na nepostiženém vývodu

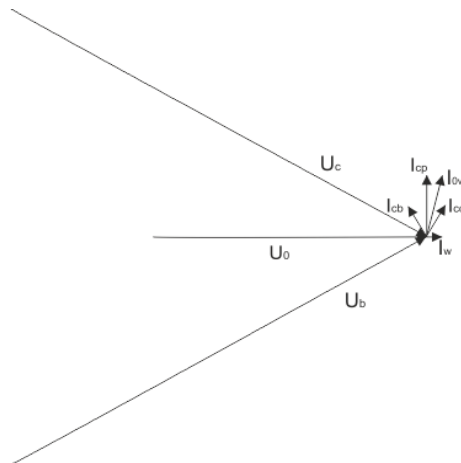


Obr.89: Průběh napětí na nepostiženém vývodu



Obr.90: Průběh proudů na nepostiženém vývodu

Jak je z výše uvedených grafů patrné, tak napěťové i proudové poměry na nepostiženém vývodu v síti a s neúčinně uzemněným středem přes zhášecí tlumivku jsou totožné jako napěťové a proudové poměry na nepostiženém vývodu v síti s izolovaným středem.

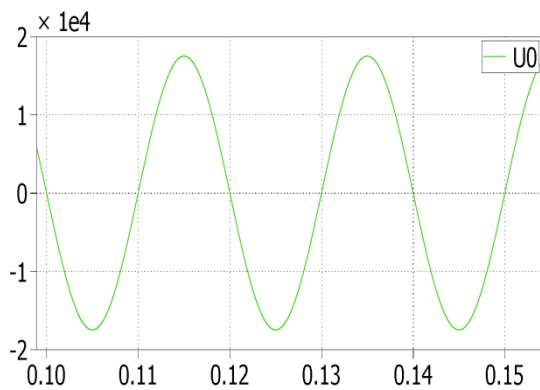


Obr.91 Fázorový diagram napětí a proudů na nepostiženém vývodu

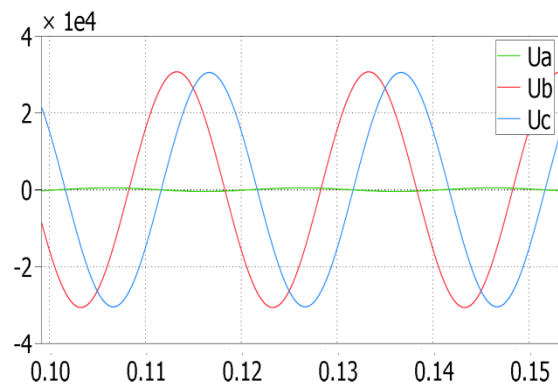
I výše uvedený fázorový diagram je totožný s fázorovým diagramem vyobrazeném na obr.83, který zobrazuje napěťové a proudové poměry na nepostiženém vývodu v síti s izolovaným středem.

B) Postižený vývod

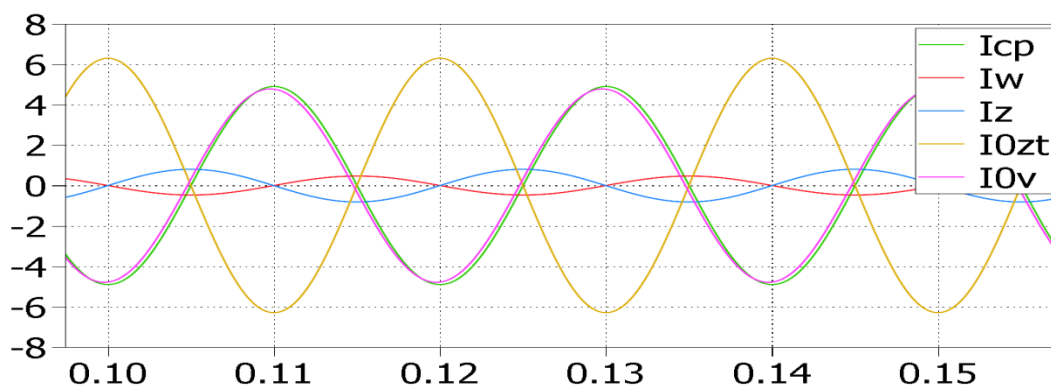
Postižený vývod je na obr.79 označen modrou barvou.



Obr.92: Průběh nulové složky napětí na postiženém vývodu

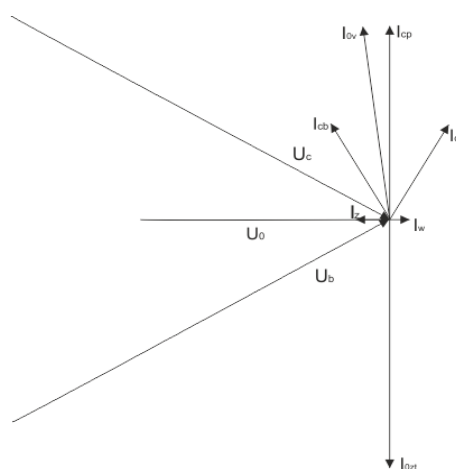


Obr.93: Průběh napětí na postiženém vývodu



Obr.94: Průběh proudů na postiženém vývodu

Z výše uvedených grafů je patrné, že napěťové poměry na postiženém vývodu jsou téměř totožné s napěťovými poměry na nepostiženém vývodu. Z postiženého vývodu je odebrána kapacitní složka svodového proudu I_{cp} a také činná složka svodového proudu I_w , jelikož dochází ke kompenzaci celkového kapacitního proudu tekoucího postiženým i nepostiženým vývodem pomocí indukčního proudu zhášecí tlumivky, je nulová složka proudu I_{0v} dána kapacitní složkou svodového proudu postižené fáze a činnou složkou svodového proudu na nepostiženém vývodu měřeném v opačném směru.



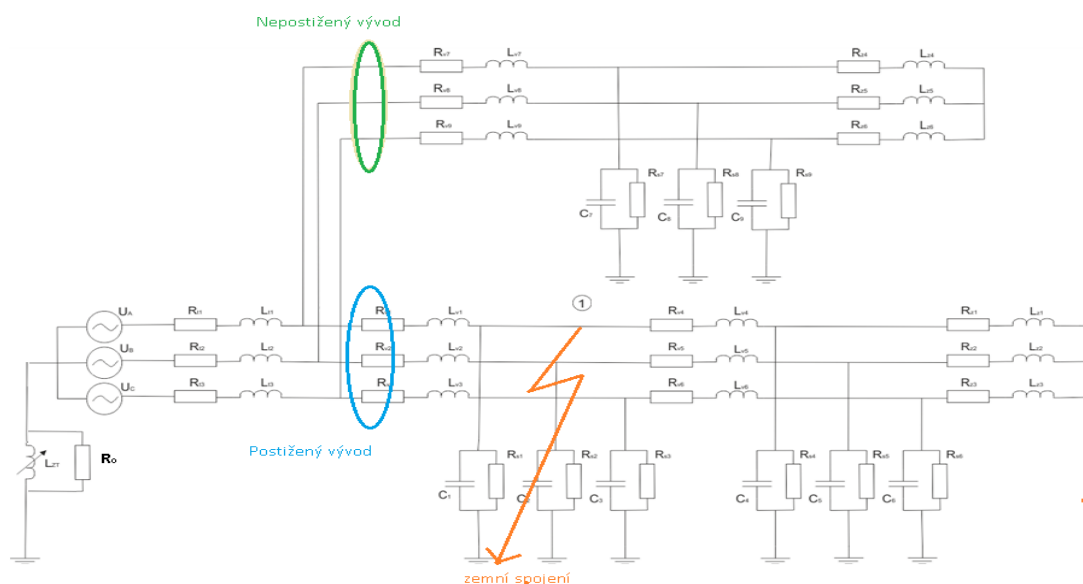
Obr.95: Fázorový diagram napětí a proudů na postiženém vývodu

Z výše uvedeného fázorového diagramu je vidět, že fázový posuv mezi nulovou složkou napětí U_0 a nulovou složkou proudu I_0 je větší než 90° . Tento posuv je závislý na poměru kapacitní a činné složky svodového proudu na nepostiženém vývodu. Dále zde můžeme vidět, jak induktivní proud zhášecí tlumivky I_{0zt} působí přímo proti kapacitní složce svodového proudu I_{cp} a dojde k plnému vykompenzování. Zemní spojením nám teče pouze činná složka proudu.

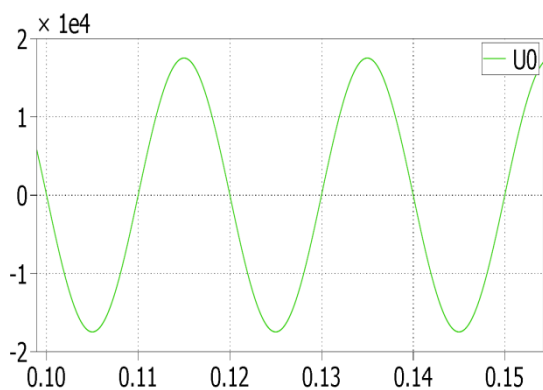
4.2.1 Lokalizace postiženého vývodu připínáním odporníku ke zhášecí tlumivce

Jelikož nelze zcela vykompenzovat poruchový proud, vždy tam zůstane nějaká zbytková činná složka poruchového proudu, lze pro lokalizaci poruchy využít směru tohoto reziduálního proudu. U postiženého vývodu má činná složka netočivého proudu vyšší hodnoty a opačný směr oproti nepostiženému vývodu. Zásadní vliv na správnou funkci této metody, mají vhodně navržené měřicí proudové transformátory a velikost činné složky netočivého proudu. Vzhledem k nízké úrovni reziduálního proudu mohou špatně navržené měřicí transformátory zapříčinit neselektivní působení ochran. Pro zvýšení úrovně činné složky netočivého proudu a tím pádem i zvednutí citlivosti zemních ochrany je využito krátkodobého připojení pomocného odporníku.

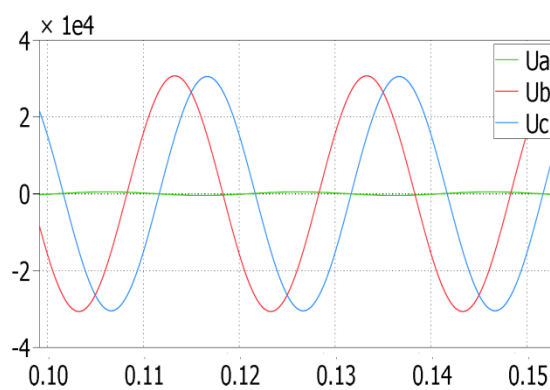
V této části kapitoly bude simulováno zemní spojení v kompenzované síti na postiženém vývodu s připnutým odporníkem. Tento odporník bude připnut paralelně k zhášecí tlumivce, jak lze vidět na obr.96. Hodnota odporníku bude nastavena na 2000Ω . Ostatní parametry zůstanou stejné jako v předchozí simulaci.



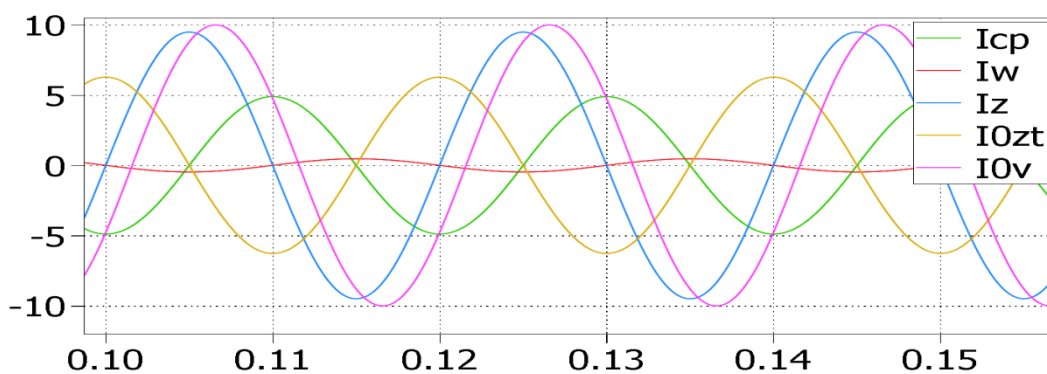
Obr.96: zemní spojení v síti dvěma vývody s připojeným odporníkem



Obr.97: Průběh nulové složky napětí na postiženém vývodu

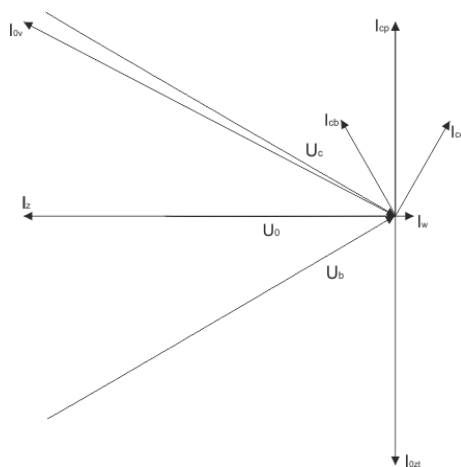


Obr.98: Průběh napětí na postiženém vývodu



Obr.99: Průběh proudů na postiženém vývodu

Jak lze vidět na výše uvedeném grafu, tak po připojení odporů dojde ke značnému navýšení nulové složky proudu I_{0v} . Velikost tohoto proudu je závislá na velikosti hodnoty odporů. Právě toto navýšení je klíčové pro vyhodnocení poruchy zemními ochranami



Obr.100: Fázorový diagram napětí a proudů na postiženém vývodu

Na výše uvedeném fázorovém diagramu je krásně jak se změní velikost a úhel natočení nulové složky proudu.

Závěr

Cílem zadané diplomové práce bylo simulovat jednofázové zemní spojení v sítích vysokého napětí 22 kV s izolovaným uzlem sítě a neúčinně uzemněným uzlem sítě a provést analýzu poruchového proudu.

Nejdříve byla simulována jednofázová zemní spojení v síti 22 kV s izolovaným středem. V této části bylo simulováno, kovové zemní spojení, vliv odporu poruchy a vliv změny výkonu na průběhy napětí a proudů v síti. Při simulaci kovového zemního spojení bylo zjištěno, že fázová napětí ve zdravých fázích U_b a U_c dosáhly sdružených hodnot a napětí U_a v postižené fázi nám kleslo téměř na nulu. Dále byl postupně zvyšován odpor zemní poruchy od 250Ω až do 5000Ω a zaznamenávané hodnoty napětí a proudů a zakresleny fázové diagramy. Z těchto simulací vyplynulo, že s rostoucím odporem zemního spojení, klesá hodnota proudu tekoucím zemním spojením, dále také klesá hodnota napětí mezi uzlem sítě a zemí. A mění se celkové poměry napětí a proudů v síti. Při měření změny výkonu bylo zjištěno, že při nízkém odběru se hodnoty napětí v jednotlivých fázích proti zemi téměř nezmění, dochází akorát ke změně proudů v jednotlivých fázích. Při značném zvýšení výkonu už byly změny napětí patrné. Následovala simulace kompenzované sítě se zhášecí tlumivkou. Zhášecí tlumivka byla nastavena tak aby vykompenzovala veškerou kapacitní složku svodového proudu. V tomto případě, tekla zemní spojení akorát činná složka svodového proudu, tuto složku tlumivka nedokáže kompenzovat.

Nakonec byl analyzován postižený a nepostižený vývod v sítích izolovaných a kompenzovaných přes zhášecí tlumivku. Zde bylo zjištěno, jak se mění nulová složka proudu na postižených a nepostižených vývodech. Bylo zjištěno, že na postižených vývodech se nulová složka napětí téměř nemění, kdežto na postižených se mění značně. A této změny je využito při identifikaci postiženého vývodu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina, Pavla HEJTMÁNKOVÁ a Tomáš TAJTL. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004, 189 s. ISBN9788070433072
- [2] Zemní spojení v trojfázových soustavách. Powerwiki [online]. [cit. 2016-04-30]. Dostupné z : <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [3] ŽÁK, František. Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí vn a jejich vliv na provoz a chránění. Plzeň, 2014. 214 s. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-175-6.
- [5] TOMAN, Petr. Provoz distribučních soustav. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [6] www.ege.cz [online]. 2009 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z <http://www.ege.cz/>
- [7] LÁLA, Jan Způsob provedení přechodu izolované sítě na uzemněnou s uzlem sítě přes plynule nastavitelnou tlumivku
- [8] TESAŘOVÁ, Miloslava a Milada ŠTROBLOVÁ. Průmyslová elektroenergetika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-703