

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Kompenzace zemních poruch pomocí zhášecí tlumivky
se spínaným zdrojem proudu**

Dodatek k zadání Diplomové práce

Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni v akademickém roce 2020/2021

V souvislosti s krizovým opatřením vyhlášeným dle krizového zákona a mimořádným opatřením vydaným podle zvláštního zákona, na základě kterých došlo k omezení osobní přítomnosti studentů v prostorách vysoké školy a s ohledem na nutnost využití infrastruktury FEL při vypracování kvalifikační práce v období tohoto omezení a v plné míře s přihlédnutím k realizovatelnosti práce po dobu trvání tohoto omezení se v intencích čl. 54 odst. 4 Studijního a zkušebního řádu Západočeské univerzity v Plzni upravuje zadání práce takto:

Název: Kompenzace zemních poruch pomocí zhášecí tlumivky se spínaným zdrojem proudu

Původní zadání:

1. Sestavte matematický model neúčinně uzemněné distribuční sítě se zhášecí tlumivkou.
2. Navrhněte topologii a sestavte matematický model výkonového měniče generující proud do pomocného vinutí zhášecí tlumivky.
3. Sestavte jednoduchý laboratorní prototyp distribuční sítě kompenzované zhášecí tlumivkou.
4. Proveďte měření na laboratorním prototypu se zdrojem proudu v pomocném vinutí zhášecí tlumivky.

Upravené zadání:

1. Sestavte matematický model neúčinně uzemněné distribuční sítě vn se zhášecí tlumivkou a min. třemi vývody.
2. Navrhněte topologii a sestavte matematický model výkonového měniče generující proud do pomocného vinutí zhášecí tlumivky.
3. Proveďte sérii simulací jednofázových zemních poruch (odporových, kovových a přerušovaných), kdy porucha je a. samostatně kompenzována zhášecí tlumivkou (ZT), b. z dominantní části kompenzována ZT (jalová složka) a z menší části výkonovým měničem (činná složka), c. z menší části kompenzována ZT (tlumivka je výrazně podladěna) a z dominantní části výkonovým měničem. Proveďte simulace všech těchto případů pro symetrickou i nesymetrickou soustavu.
4. Proveďte analýzu výsledků a sestavte fázorové diagramy pro jednotlivé případy. Proveďte zhodnocení kompenzace pomocí ZT a spínaného zdroje proudu.

Beru na vědomí a souhlasím.

V Plzni dne 31. 3. 2021

V Plzni dne 31.3.2021



Vedoucí práce: Tomáš KOMRŠKA



Student: Bc. Vojtěch Packan

V Plzni dne



prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

děkan Fakulty elektrotechnické
Západočeské univerzity v Plzni

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá kompenzací zemního spojení v sítích vysokého napětí. V první části je rozebrán provoz těchto sítí z hlediska systému uzemnění uzlu transformátoru. Ve stěžejní práci jsou uvedeny výsledky simulací jednotlivých typů kompenzace poruchového proudu.

Klíčová slova

Poruchový proud, kompenzace, distribuční síť, transformátor, tlumivka, fázový posuv, odpor, simulace.

Abstract

The present thesis deals with the compensation of earth fault in high voltage networks. In the first part, the operation of these networks is dismantled in terms of the transformer node earthing system. The results of simulations of individual types of fault current compensation are presented in the core work.

Key words

Fault current, compensation, distribution network, transformer, choke, phase shift, resistance, simulation.

Prohlášení

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

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



.....

podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Bc. Vojtěch Packan

Poděkování

Děkuji všem, kteří mě podporovali během mého studia, zvláště pak Ing. Tomášovi Komrskovi, Ph.D. za jeho cenné rady, připomínky a zvláště za čas, který mi věnoval při vedení diplomové práce.

OBSAH

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD.....	9
1 DISTRIBUČNÍ SOUSTAVA ČESKÉ REPUBLIKY	10
1.1 DISTRIBUČNÍ SÍŤ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	10
1.2 ZEMNÍ SPOJENÍ V SÍTI S IZOLOVANÝM NULOVÝM BODEM	13
1.2.1 Řešení zemního spojení metodou souměrných složkových soustav	14
1.2.2 Fázorové diagramy izolované sítě	15
1.3 KOMPENZACE ZEMNÍ PORUCHY POMOCÍ ZHÁŠECÍ TLUMIVKY	17
1.4 ZEMNÍ SPOJENÍ V SÍTI S PETERSENOVOU TLUMIVKOU.....	17
1.4.1 Fázorový diagram kompenzované sítě.....	20
1.5 REZONANČNÍ KŘIVKA ZHÁŠECÍ TLUMIVKY.....	21
1.6 JEDNOFÁZOVÝ STŘÍDAČ	22
1.6.1 Dvouhodnotové řízení jednofázového střídače	23
1.7 KOMPENZACE PORUCHY ZHÁŠECÍ TLUMIVKOU S POLOVODIČOVÝM MĚNIČEM	24
2 MATEMATICKÝ MODEL DISTRIBUČNÍ SÍŤE	25
2.1 PARAMETRY SÍŤE 22 KV	25
2.2 POPIS SIMULACE KOMPENZOVANÉ SÍŤE POMOCÍ PETERSENOVY TLUMIVKY	27
2.2.1 Matematický model sítě	27
2.2.2 Matematický model střídače	30
3 SIMULACE JEDNOFÁZOVÝCH PORUCH V SÍTI 22 KV	31
3.1 KOMPENZACE ZEMNÍ PORUCHY S PODLADĚNOU PETERSENOVOU TLUMIVKOU	31
3.1.1 Fázorové diagramy pro podkompenzovaný stav	35
3.2 KOMPENZACE ZEMNÍ PORUCHY S VYLADĚNOU PETERSENOVOU TLUMIVKOU.....	35
3.2.1 Fázorové diagramy pro vykompenzovaný stav	39
3.3 PŘEKOMPENZOVANÁ TLUMIVKA.....	39
3.3.1 Fázorové diagramy pro překompenzovaný stav	43
3.4 KOMPENZOVÁNÍ ČINNÉ SLOŽKY POLOVODIČOVÝM MĚNIČEM.....	43
3.4.1 Fázorové diagramy	47
3.5 KOMPENZACE JALOVÉ SLOŽKY POLOVODIČOVÝM MĚNIČEM.....	48
3.5.1 Fázorové diagramy	51
3.6 KOMPENZACE JALOVÉ I ČINNÉ SLOŽKY POLOVODIČOVÝM MĚNIČEM	51
3.6.1 Fázorové diagramy úplné kompenzace.....	55
4 ZÁVĚR	56
PŘÍLOHY	57
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	58

Seznam symbolů a zkratek

v_n	vysoké napětí	
v_{vn}	velmi vysoké napětí	
C_P	provozní kapacita	[nF/km]
R_P	provozní elektrický odpor	[Ω /km]
I_{tl}	proud generovaný tlumivkou	[A]
G_P	svod sítě	[nS/km]
L_P	provozní indukčnost	[mH/km]
U_n	jmenovité napětí	[V]
I_C	kapacitní proud sítě	[A]
U_U	napětí fáze U	[V]
U_V	napětí fáze V	[V]
U_W	napětí fáze W	[V]
I_P	poruchový proud	[A]
L	indukčnost	[H]
U_f	fázové napětí	[V]
R_F	odpor poruchy	[Ω]
ω	úhlová rychlost	[rad/s]
p	převod transformátoru	[-]
f_s	spínací frekvence	[Hz]
U_0	napětí uzlu transformátoru	[V]
i_w	požadovaný proud	[A]
i_{skut}	měřená hodnota proudu	[A]
I. K.Z.	první Kirchhoffuv zákon	
ŘO	řídící obvod	
I_v	proud vývodu	[A]
I_g	svodový proud	[A]

Úvod

Elektrizační soustava České republiky je tvořena z přenosové soustavy a distribuční soustavy. Každá z těchto soustav plní své dílčí úkoly tak, aby docházelo k náležitému chodu elektrizační soustavy. Hlavním úkolem distribuční soustavy je dodávka elektrické energie v požadované kvalitě, avšak distribuční soustava řeší další významný úkol, tím je nepřetržitost dodávky elektrické energie.

Tato práce se zabývá kompenzací zemních poruch v nepřímo uzemněné soustavě přes zhášecí tlumivku se spínaným zdrojem proudu. Text je rozdělen do tří hlavních částí, se zaměřením na poruchový stav, kdy dojde v této soustavě k vodivému spojení fázového vodiče se zemí. Systém spojení uzlu transformátoru má vliv na velikost poruchového proudu a na napěťové poměry mezi fázovými vodiči a zemí. V případě sítí neúčinně uzemněných se jedná o zemní spojení a hodnota poruchového proudu nedosahuje vysokých hodnot, nemusí tak docházet k okamžitému vypnutí postiženého vývodu. Cílem této práce je seznámení s poměrně novým systémem uzemnění, který je určen pro kompenzaci zemních poruch v distribučních sítích vysokého napětí.

V první části se práce zaměřuje na distribuční soustavu vysokého napětí z hlediska zapojení uzlu transformátoru. Je zde popsána metoda kompenzace zemní poruchy pomocí zhášecí tlumivky a následně spolupráce zhášecí tlumivky s polovodičovým měničem.

V druhé části je uvedený matematický model distribuční sítě se zhášecí tlumivkou, který je následně rozšířen o jednofázový řízený střídač. Jsou zde popsány simulace obou metod kompenzace zemní poruchy.

V třetí části jsou uvedeny výsledky jednotlivých kompenzačních metod. Z naměřených hodnot jsou sestrojeny fázorové diagramy a v závěru jsou zhodnoceny poznatky z jednotlivých druhů kompenzace.

1 Distribuční soustava České republiky

Distribuční sítě jsou především určeny k dodávce elektrické energie ke konečnému odběrateli. Pokud hovoříme o hladinách napětí, tak v České republice se můžeme setkat s hladinami 110 kV, 35 kV, 22 kV, 10kV, 6 kV, 3 kV nebo 0,4 kV. Distribuční sítě jsou rozděleny na regionální distribuční soustavy a lokální distribuční soustavy.[1]

Regionální distribuční soustavy se vyznačují tím, že jsou připojeny přímo k přenosové soustavě. Území České republiky je tedy rozděleno na několik regionálních, vzájemně se nepřekrývajících distribučních soustav. Aktuálně nalezneme na našem území zastoupeny tři regionální distribuční společnosti. První regionální distribuční společností je skupina ČEZ Distribuce, druhou společností E.ON Distribuce a třetí je PREDistribuce.[1]

Lokální distribuční soustavy jsou charakterizovány oproti regionálním distribučním soustavám tím, že jsou nepřímo připojeny k přenosové soustavě. Do lokálních soustav jsou řazeny areály velkých průmyslových aglomerací – doly, hutě.[1]

Hlavním úkolem distribuční soustavy je dodávka elektrické energie v požadované kvalitě. Do kvality napětí spadá například velikost odchylky napětí, stálost napětí, symetrie napětí. Je zde snaha o nepřetržitost dodávky elektrické energie, což je ve většině případů ovlivňované poruchami, které na elektrických sítích vznikají. V některých případech se tak může jednat o zemní spojení. Tato práce se zabývá kompenzací zemní poruchy pomocí spínaného zdroje proudu. Tento systém se řadí mezi novější systémy kompenzace a mohl by být nápomocen k řešení některých zemních poruch a tedy i zlepšení nepřetržitosti dodávky elektrické energie.[2]

1.1 Distribuční sítě vysokého napětí

V této práci se budu zabývat sítěmi na hladinách vysokého napětí, hovoříme tedy o sítích 10 kV, 22 kV, 35 kV. Tyto hladiny napětí jsou dle svého charakteru provozu považovány jako distribuční. Dále se na našem území vyskytují hladiny 6 kV a 10 kV, které jsou řazeny do elektrárenských, průmyslových, či důlních provozů. Důležitým technicko-ekonomickým parametrem distribuční soustavy vysokého napětí je způsob, jakým je uzel vinutí transformátoru vvn/vn spojen se zemí. Tyto uzly jsou též nazývány jako nulové body soustavy. Volba systému uzemnění hraje zásadní roli v možnostech provozu soustavy, a to především z hlediska chránění, bezpečnosti, dimenzování vodičů a nepřetržitosti dodávky elektrické energie. Za předpokladu, že síť se nachází v bezporuchovém symetrickém stavu, tak

na jejím provozu se způsob uzemnění nijak neprojeví. K velmi výraznému rozdílu dochází, pokud na vedení vznikne vodivé spojení jedné fáze se zemí. Pokud tato porucha nastane uvnitř sítě účinně uzemněné nebo uzemněné přes uzlový odporník, v takovém případě se jedná o jednofázový zkrat a hodnota poruchového proudu dosahuje takových úrovní, že provoz postižené sítě není možný. Při takovéto poruše musí dojít k okamžitému odpojení postiženého vedení, a to má za následek přerušeni dodávky elektrické energie. Odlišná situace nastává u sítí neúčinně uzemněných nebo izolovaných, zde se jedná o zemní spojení. Poruchový proud nedosahuje při zemním spojení tak vysoké úrovně, nemusí tak docházet k okamžitému vypnutí postiženého vývodu. Systém uzemnění zásadně ovlivňuje úroveň poruchového proudu. Od hodnoty poruchového proudu se odvíjí riziko úrazu elektrickým proudem, dimenzování vedení nebo možné mechanické následky způsobené poruchou.[3]

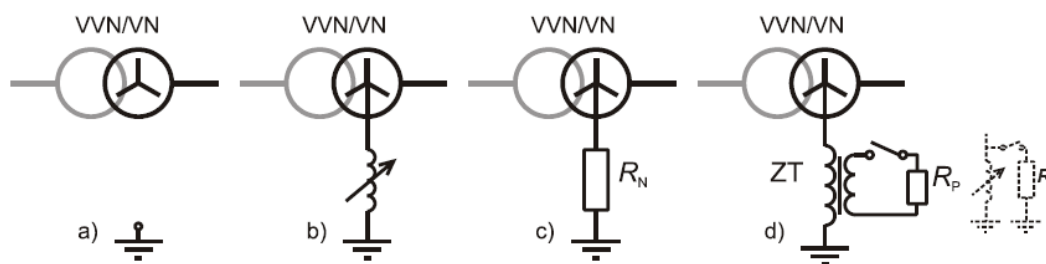
Velká rozloha a členitost soustav vysokého napětí má za následek to, že tyto sítě jsou vystavovány mnoha nepříznivým vlivům. Za tyto vlivy můžeme považovat atmosférické podmínky, které u venkovních vedení zapříčiní významný počet přechodných zemních spojení. Tato přechodná spojení jsou rychlá, a tak v krátkém čase odezní bez potřeby přerušeni dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu jsou prioritně distribuční soustavy vysokého napětí na našem území provozovány jako neúčinně uzemněné.[3]

Distribuční soustavy v České republice se v současnosti vyskytují se systémem uzemnění jako:

- izolované (Obr. 1.1 a),
- nepřímo uzemněné přes uzlový odporník (Obr. 1.1 c) a
- nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku (Obr. 1.1 b).

Pokud hovoříme o nepřímém uzemnění se zhášecí tlumivkou, tento systém můžeme dále rozdělit:

- laděná zhášecí tlumivka, k ní může být připínán pomocný odporník, který navýší činné složky poruchového proudu na sekundární straně (Obr. 1.1 d),
- zhášecí tlumivka s automatikou pro přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně,
- systém Swedish Neutral a
- 3 -fázovou kompenzací zemních proudů.[3]



Obr. 1.1: Systémy uzemnění v distribučních soustavách vn.[3]

Pro provoz distribučních sítí, popřípadě lokálních distribučních sítí jsou důležitá kritéria, podle kterých volíme systém uzemnění:

- celkový kapacitní proud soustavy,
- velikost poruchového proudu,
- ustálená poruchová napětí,
- přepětí při vzniku jednopólové poruchy (zemní spojení),
- přepětí při přerušení 1pólové poruchy
- ferorezonanční přepětí, přenesená napětí,
- způsob a rychlost likvidace poruchy,
- možnost dosažení a nastavení maximální citlivosti ochran,
- ovlivnění pomocných obvodů,
- porovnání investičních nákladů,
- provozní náklady

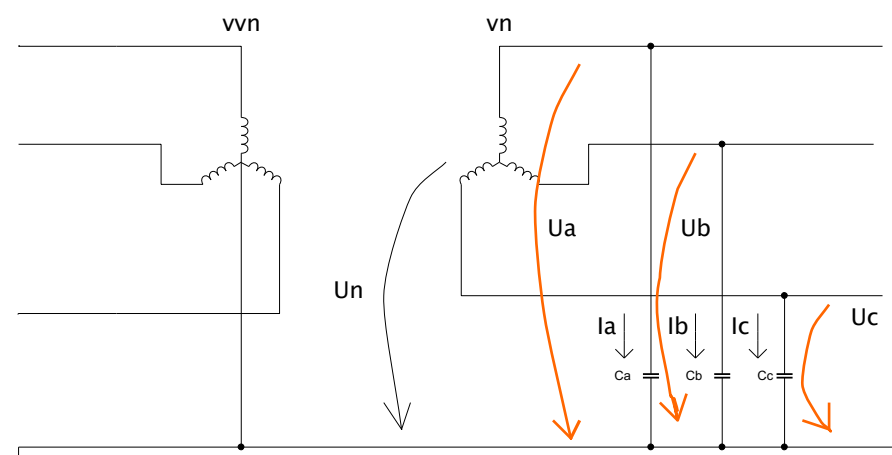
a především

- bezpečnost s ohledem na hodnoty dotykových a krokových napětí.

Nejčastěji využívanou variantou uzemnění uzlu transformátoru v distribučních soustavách České republiky je kompenzovaná soustava s variantou připínání odporníku na sekundární straně zhášecí tlumivky. Touto problematikou se zabývá navazující kapitola, kde bude podrobně popsán princip kompenzace zemní poruchy pomocí zhášecí tlumivky. [3]

1.2 Zemní spojení v síti s izolovaným nulovým bodem

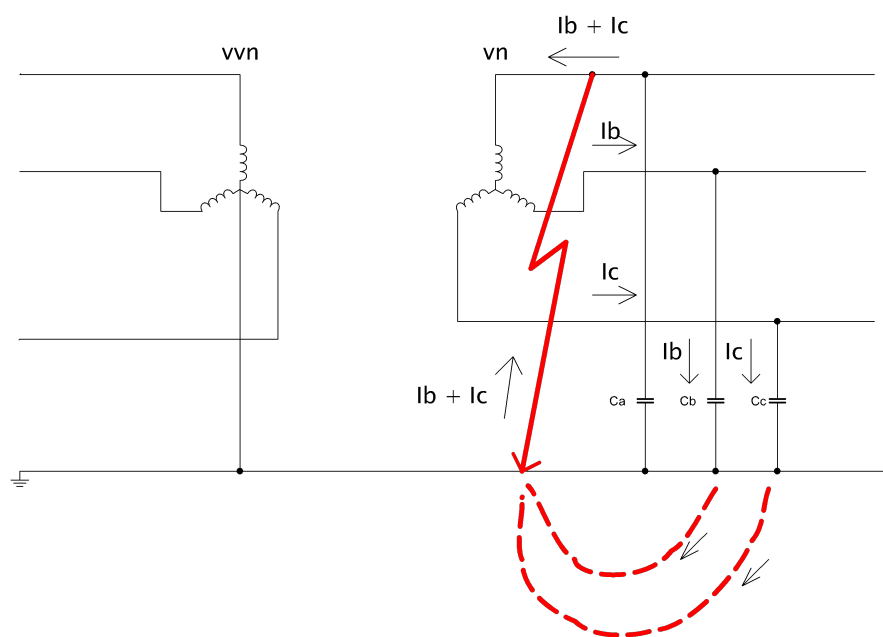
Tato kapitola se zabývá zemním spojením, které vzniklo u sítě s izolovaným nulovým bodem, jak je patrné z (Obr. 1.2). Provoz těchto sítí se vyskytuje především v průmyslových závodech a u vlastních spotřeb elektráren a tepláren. Kvůli malému rozsahu sítě obvykle poruchový (zemní) proud nepřesahuje hodnotu 10 A.



Obr. 1.2: Izolovaná síť v bezporuchovém stavu

Za předpokladu, že síť je v bezporuchovém stavu, napětí jednotlivých fází jsou symetrická a kapacity C_a , C_b a C_c jsou taktéž symetrické, tak těmito kapacitami neprotéká žádný proud, jelikož napětí mezi uzlem a zemí je nulové. Tato situace se změní, pokud dojde v síti k zemnímu spojení. Na (Obr. 1.3) nastane porucha pro fázi A, v síti dochází k rozvážení impedancí, na kterých jsou jednotlivá napětí závislá, tudíž dojde i ke změně potenciálu.

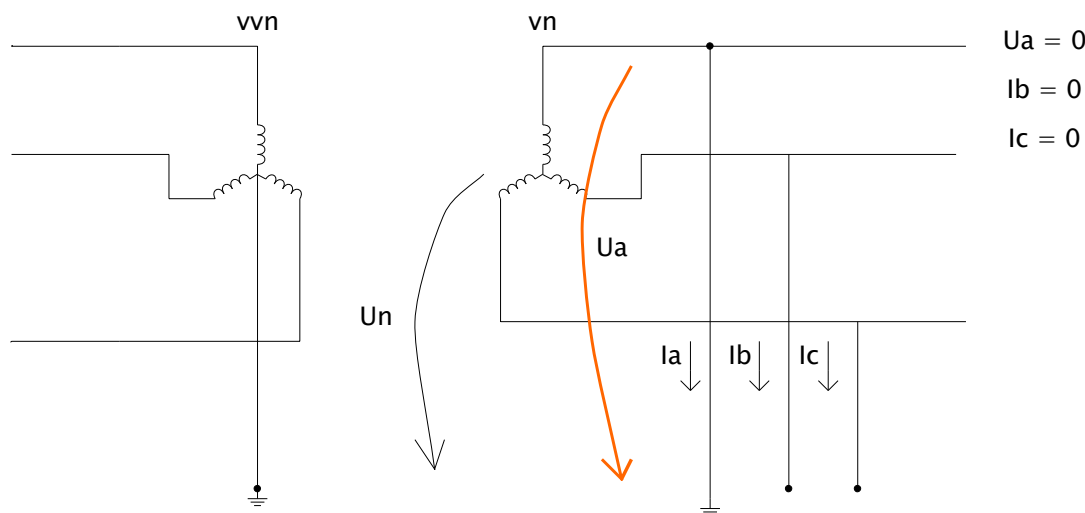
[4]



Obr. 1.3: Izolovaná síť v poruchovém stavu

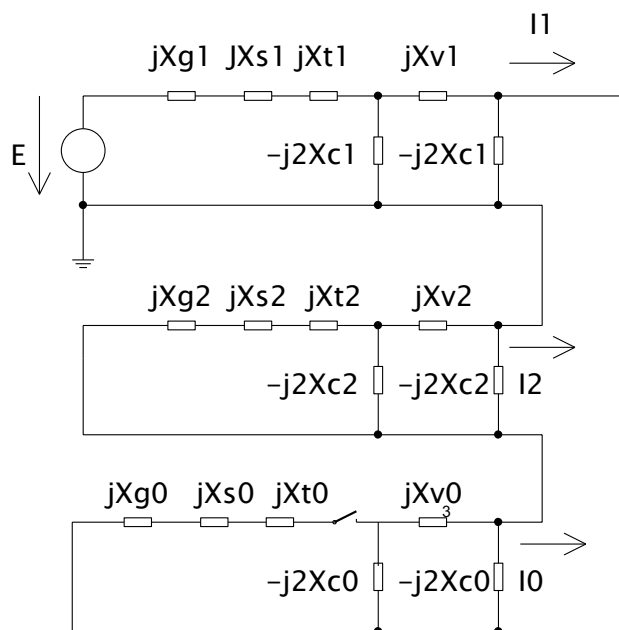
1.2.1 Řešení zemního spojení metodou souměrných složkových soustav

Při zemním spojení pro fázi A stanovíme podmínky, kdy fázový vodič A má stejný potenciál se zemí. Zbylé dva vodiče se poruchy netýkají a napětí fáze A je rovné nule.



Obr. 1.4: Podmínky pro metodu souměrných složkových soustav

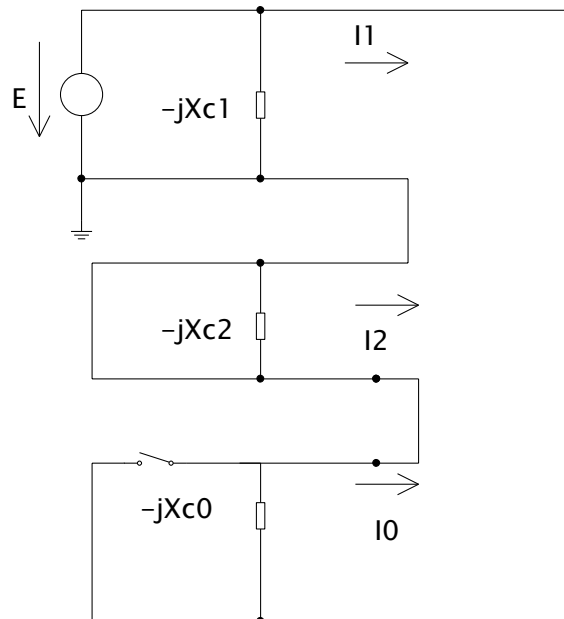
Po určení podmínek si můžeme zakreslit schéma jednofázové zemní poruchy pro souslednou, zpětnou a netočivou soustavu.



Obr. 1.5: Vyobrazení sousledné, zpětné a netočivé složky

Pokud budeme schématem (Obr. 1.5) procházet z levé strany, vidíme zde zapojenou reaktanci generátoru, značenou jX_g , za generátorem je zapojená krátká síť jX_s , následuje transformátor jX_t , zbylé reaktance jX_v a $j2X_c$ představují samotné vedení. Důležitou roli v tomto zapojení hraje transformátor, který je zapojený na sekundární straně do neuzemněné hvězdy, je vyobrazen na (obr. 1.2). Toto zapojení nám udává velikost nulové složkové

soustavy, ta je pro tento případ nekonečná. Dalším předpokladem pro toto zapojení je, že velikost podélných reaktancí je mnohem menší, než reaktance příčných kapacit. Z těchto poznatků můžeme odvodit nové zapojení, které je na (Obr. 1.6). [4]



Obr. 1.6: Zapojení složek po zjednodušení

Z daného zapojení nám vyplývá, že pouze reaktance X_{c0} , tedy příčná reaktance v netočivé složkové soustavě se v tomto případě uplatní a s kterou budeme dále počítat pro případ zemního spojení v distribučních sítích. Pro jednofázovou poruchu platí vztah:

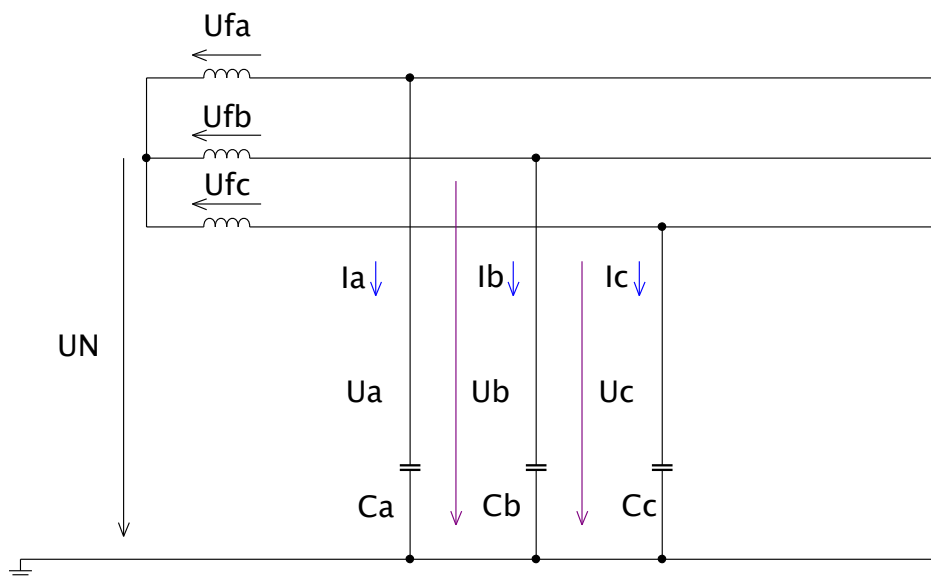
$$I^{(1)} = \frac{E}{Z_c^{(1)} + Z_c^{(2)} + Z_c^{(0)}} = \frac{E}{-jX_c} \quad (1.1)$$

$$I^{(1)} = I^{(2)} \quad (1.2)$$

$$I^{(0)} = I^{(1)} \quad (1.3)$$

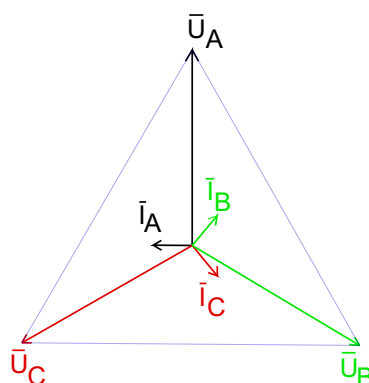
1.2.2 Fázorové diagramy izolované sítě

V bezporuchovém stavu vycházíme z předpokladů, že fázová napětí jsou symetrická, a kapacity jsou symetrické. Na (obr. 1.7) je vyobrazena síť s izolovaným uzlem transformátoru. Napětí uzlu transformátoru je v bezporuchovém stavu nulové. Ovšem ve skutečnosti bývá nižší než 0,5 % U_f , což je zapříčiněno kapacitní nesymetrií.



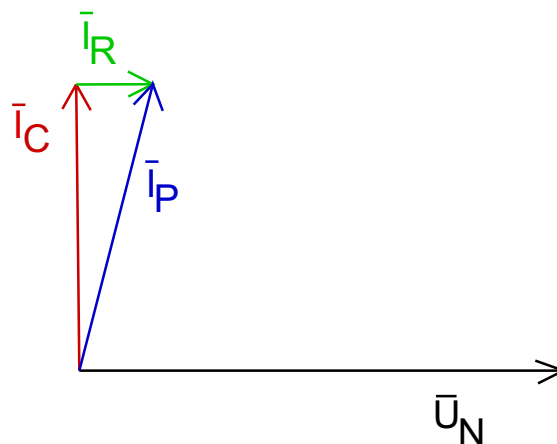
Obr. 1.7: Izolování sítě v bezporuchovém stavu

Průběhy proudu a napětí v symetrické síti jsou na (Obr. 1.8).



Obr. 1.8: Fázorový diagram napětí a proudu v bezporuchové symetrické síti

Velikosti fázových napětí jsou stejná a jsou od sebe posunuty o 120° . Pro poruchový stav, který je na (Obr. 1.3) je dán následující fázorový diagram.



Obr. 1.9: Fázorový diagram izolované sítě se zemním spojením

Z výše uvedeného fázorového diagramu je patrné, že poruchový proud I_P má složku ja-
lovou, zapříčiněnou příčnými kapacitami I_C , ale i složku činnou I_R , která je tvořena svody
sítě. Odvození vztahů bylo provedeno na idealizované síti. Avšak ve své simulaci jsem po-
čítal s reálnými parametry sítě 22 kV, lze tedy očekávat obdobný výsledek fázorového dia-
gramu.

1.3 Kompenzace zemní poruchy pomocí zhášecí tlumivky

Kompenzované sítě jsou charakterizovány spojením nulového bodu transformátoru se
zemnicí soustavou skrze zhášecí tlumivku. Tento systém uzemnění je zobrazen na (Obr. 1.1
b). Zhášecí tlumivka je určena pro kompenzaci poruchového proudu zemního spojení, který
je kapacitního charakteru. Místem poruchy tak prochází jen zbytkový proud, který obvykle
tvoří 3 % - 10 % celkového kapacitního proudu.

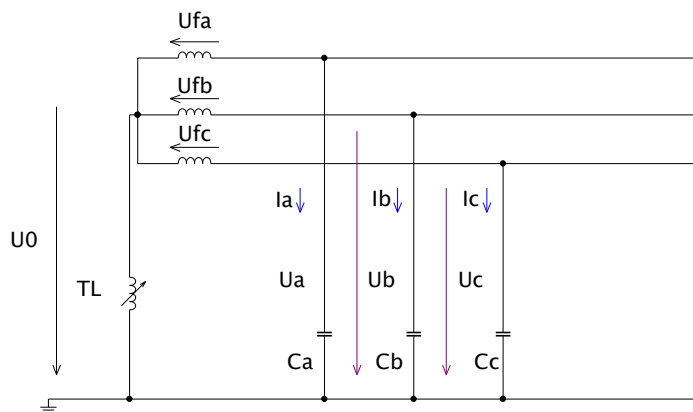
Tímto způsobem lze provozovat:

- síť s kapacitním proudem do 100 A v případě sítí venkovních, kdy tvoří ven-
kovní vedení minimálně 98 % celého rozsahu sítě,
- síť s kapacitním proudem do 300 A v případě sítí smíšených, kdy tvoří smí-
šené síť minimálně 10 % venkovního vedení a 2 % kabelového vedení,
- síť s kapacitním proudem do 450 A v případě sítí kabelových, kdy tvoří kabe-
lové síť nejméně 90 % celkové sítě.

Nemalou výhodou provozování kompenzovaných sítí je možnost provozu soustavy po
dobu výskytu poruchy zemního spojení, než dojde k vlastnímu vymezení, lokalizaci místa
poruchy. Provozování zemního spojení nemá zásadní vliv na koncové odběratele, existuje
však možnost a reálné riziko rozšíření zemního spojení na závažnější poruchu. V těchto pří-
padech už dochází k okamžitému odpojení postižené části vedení (vývodu).[3]

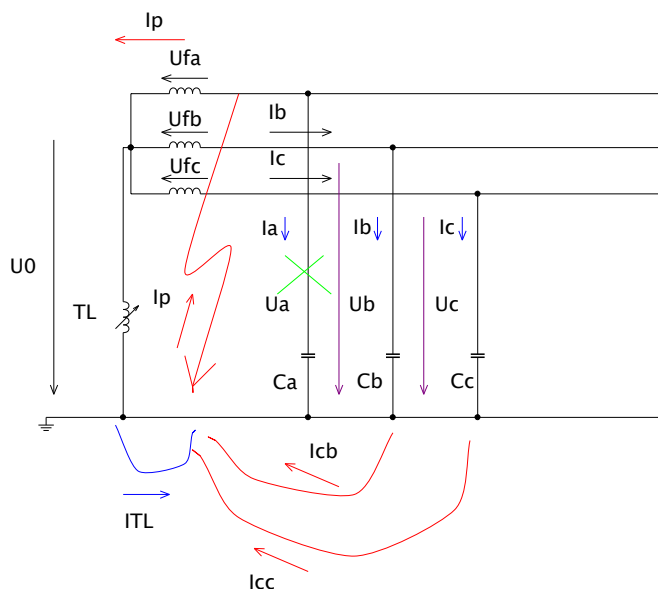
1.4 Zemní spojení v síti s Petersenovou tlumivkou

Pro odvození jednotlivých vztahů budeme vycházet z distribuční sítě uzemněné přes
Petersenovu tlumivku. Při odvozování vztahů bereme opět v úvahu, že jednotlivá fázová
napětí jsou symetrická a příčné kapacity jsou taktéž symetrické. V bezporuchovém stavu
vypadá síť následovně.



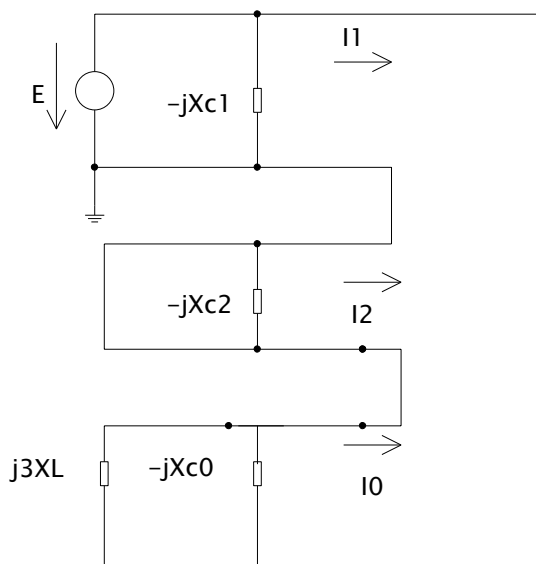
Obr. 1.10: Síť izolovaná přes Petersenovu tlumivku

U výše uvedené síť došlo k zemnímu spojení u fáze A. Poruchový proud je dán součtem kapacitních proudů I_b a I_c . Z předešlých odvození již víme, že tento proud bude kapacitního charakteru. Pomocí Petersenovy tlumivky dodáváme do místa poruchy proud I_{TL} , což nám kompenzuje výsledný poruchový proud. Kompenzujeme pouze jalovou složku tohoto poruchového proudu. Činnou složku, která je daná svodem sítě, zůstane stejně velká. Tuto složku lze kompenzovat spínaným zdrojem proudu, jenž lze umístit do pomocného vinutí tlumivky.



Obr. 1.11: Kompenzace zemního spojení Petersenovou tlumivkou

Odvození vztahů bude obdobné jako u izolované sítě. Budeme opět předpokládat, že podélné složky na (Obr. 1.5) jsou mnohem menší, než hodnoty příčných kapacit. Je zde však rozdíl v zapojení sekundární strany transformátoru. Proud netočivé složky v tomto případě prochází společně ve všech třech fázích přes Petersenovu tlumivku, což je ve schématu znázorněno jako $j3X_L$. [4]



Obr. 1.12: Zapojení jednotlivých složek po zjednodušení

Reaktance v netočivé složkové soustavě je dána paralelní kombinací jX_{c0} a $j3X_L$:

$$X_C^{(0)} = \frac{j3X_L * (-jX_C)}{j3X_L - jX_C} \quad (1.4)$$

Lze tento vztah zapsat jako:

$$X_C^{(0)} = \frac{j3X_L X_C}{X_C - 3X_L} \quad (1.5)$$

Pro souslednou soustavu platí, že:

$$I^{(1)} = \frac{E}{Z_c^{(1)} + Z_c^{(2)} + Z_c^{(0)}} \quad (1.6)$$

Z předchozích rovnic (1.2) a (1.3) vyplývá rovnost jednotlivých složek, tudíž můžeme psát:

$$I^{(1)} = \frac{E}{\frac{j3X_L X_C}{X_C - 3X_L}} \quad (1.7)$$

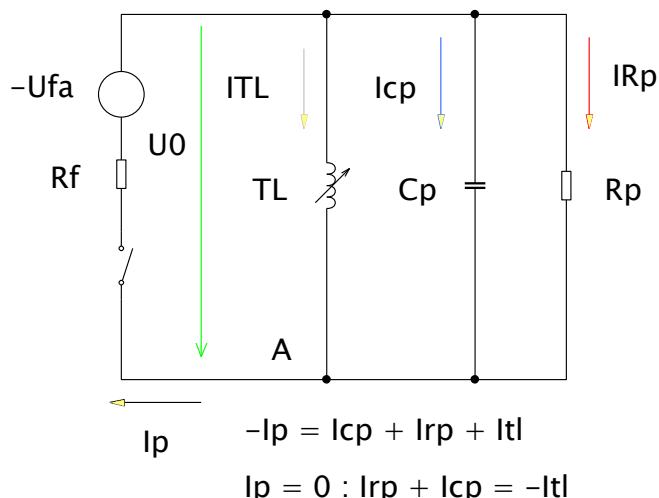
Pro jednofázovou poruchu bereme v úvahu:

$$I_A = 3I^{(1)} = -j \frac{(X_C - 3X_L)E}{X_L X_C} \quad (1.8)$$

Pokud se podíváme na rovnici (1.8), tedy konkrétně na čítenel v této rovnici, nalezneme zde podmínku vyladění. Pokud se reaktance X_C bude rovnat $3X_L$, celý zlomek bude roven nule a obvodem tak nebude procházet poruchový proud.

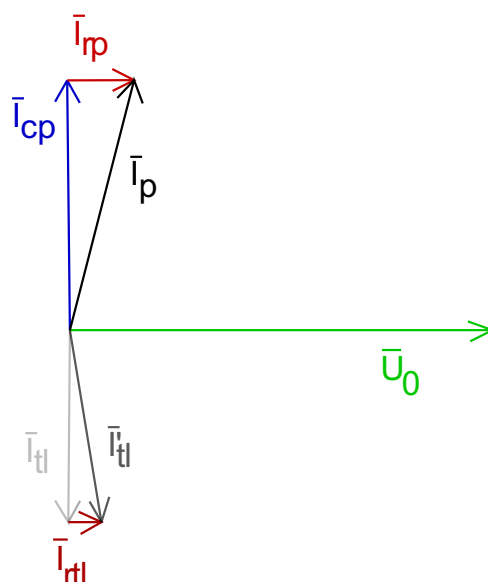
1.4.1 Fázorový diagram kompenzované sítě

Kompenzovanou síť lze překreslit do náhradního schématu viz (Obr. 1.13).



Obr. 1.13: Náhradní schéma zemního spojení

Náhradní obvod je sestaven z celkové příčné kapacity C_p dané sítě, což je součet veškerých kapacit jednotlivých vývodů dané sítě. Poruchový proud je závislý na rozsáhlosti distribuční sítě. Dále je v obvodu celkový svod sítě, označený R_p . Všimněme si, že součet proudů, které tečou přes tyto prvky, udává velikost poruchového proudu. Tyto proudy tečou do uzlu A, kam teče příspěvek Petersenovy tlumivky I_{tl} . Pokud zapíšeme rovnici pro uzel A podle I. K.Z., dostáváme podmínku, aby výsledný poruchový proud byl nulový, musí být I_{tl} rovno součtu I_{rp} a I_{cp} .



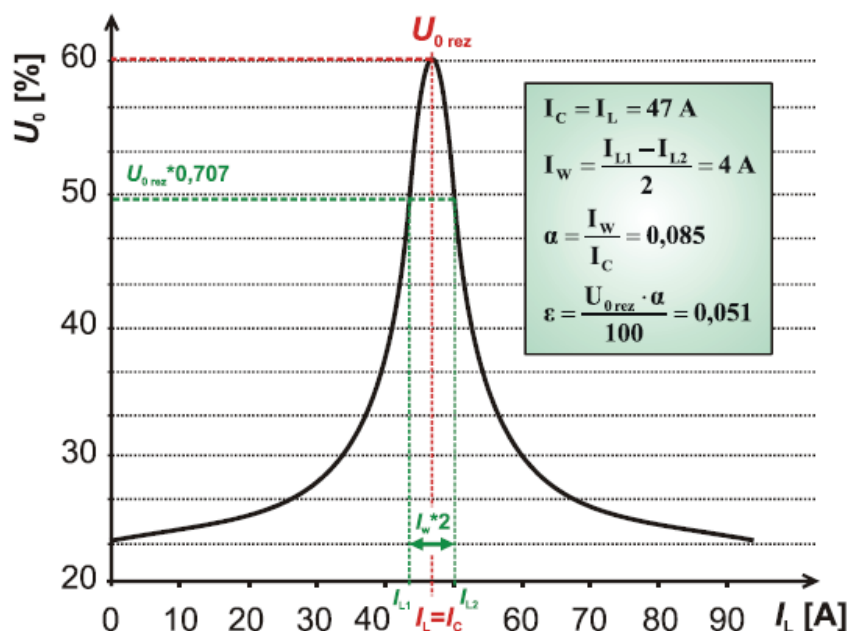
Obr. 1.14: Fázorový diagram kompenzace poruchového proudu

Na fázorovém diagramu (Obr. 1.14) si můžeme všimnout dvou fázorů proudu zhášecí tlumivky. První fázor značený I_{tl} je proud zhášecí tlumivky v ideálním případě, že by

tlumivka měla pouze jalový charakter. Ve skutečnosti má tlumivka nenulovou hodnotu svodu, tudíž celkový svodový proud ještě zesílí.

1.5 Rezonanční křivka zhášecí tlumivky

Pokud chceme docílit správné kompenzace dané soustavy, je zapotřebí znalost rezonanční křivky soustavy. Rezonanční křivka udává závislost uzlového napětí U_0 na kompenzačním proudem procházejícím tlumivkou I_L pro danou oblast distribuční sítě. Pomocí postupného ladění zhášecí tlumivky získáme rezonanční křivku. Tlumivka je během postupného ladění připojena k soustavě bez zemního spojení při průběžném odečítání hodnot U_0 a I_L . Největší kompenzace poruchového proudu by měla být v místě $U_{0 rez}$, v praxi se však tlumivka provozuje podladěná. V sítích vn jsou příčné kapacity nesymetrické, tudíž i v bezporuchovém stavu je hodnota U_0 nenulová. Podladěním se zmenší hodnota U_0 a tím i nesymetrie v síti. Podladěním tlumivky se pohybuje v rozmezí 6 – 8%. Z rezonanční křivky lze získat potřebné charakteristické hodnoty sítě. Za tyto hodnoty považujeme: velikost kapacitního proudu provozované sítě I_C , ten je roven kompenzačnímu proudu v místě rezonančního napětí $U_{0 rez}$, dále je možné určit velikost svodového proudu I_W , činitele útlumu sítě α a činitel nesymetrie sítě ε . [3]



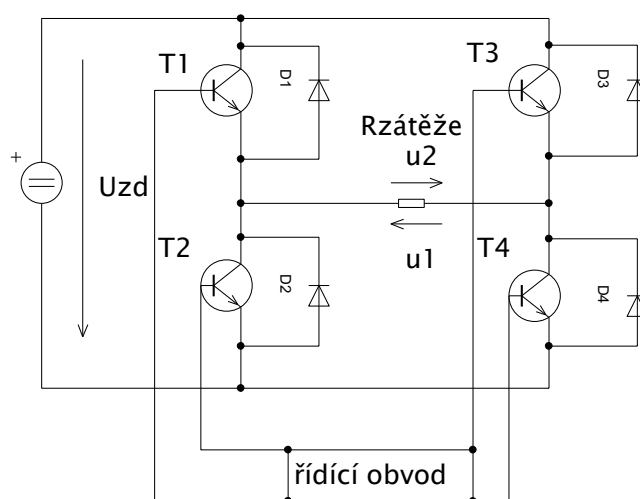
Obr. 1.15: Rezonanční křivka s určenými parametry [3]

Poměrně velkou nevýhodou u doposud používaných zhášecích tlumivek je možnost kompenzování kapacitního proudu pouze o frekvenci základní harmonické. To znamená, že u zbylých frekvencí nedochází ke kompenzaci. Nebezpečných úrovní může dosahovat

poruchový proud především v hustě obydlených či průmyslových oblastí, kdy tyto nevykompenzované složky vyššího řádu mohou převyšovat hodnotu zbytkového proudu základní harmonické.[3]

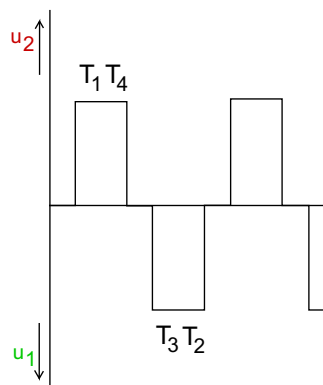
1.6 Jednofázový střídač

Na (Obr. 1.16) je zapojení jednofázového střídače do tzv. „H můstku“. Jedná se o dvojitý měnič. Tyto měniče jsou výhodné především pro výkonové aplikace. K přenosu energie dochází dvakrát za periodu. V obvodu jsou zapojeny 4 tranzistory, kdy první spínací takt tvoří tranzistory T1 a T4, druhý takt je spínán tranzistory T3 a T2. Obvod je napájený stejnosměrným zdrojem. Paralelně k tranzistorům jsou zapojeny zpětné diody. Ty jsou zde pro případ, kdyby byla zátěž tvořena indukčností. Při vypínání tranzistoru by mohlo dojít k jeho zničení, což je zapříčiněno vysokým naindukovaným napětím. [5]



Obr. 1.16: Jednofázový řízený střídač

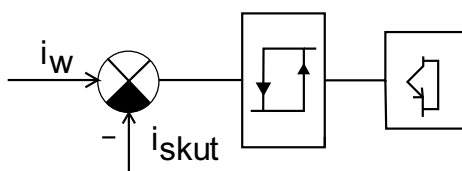
Průběh napětí je uveden na (Obr. 1.17). Růst proudu je závislý na zátěži. Vlivem indukčnosti bude jeho růst a pokles exponenciální. Při odporové zátěži je průběh proudu lineárnější. Důležitým parametrem u střídače je tzv. mrtvá doba. Je to čas potřebný k uzavření polovodičového prvku tak, aby nedošlo ke zkratu ve větvi.



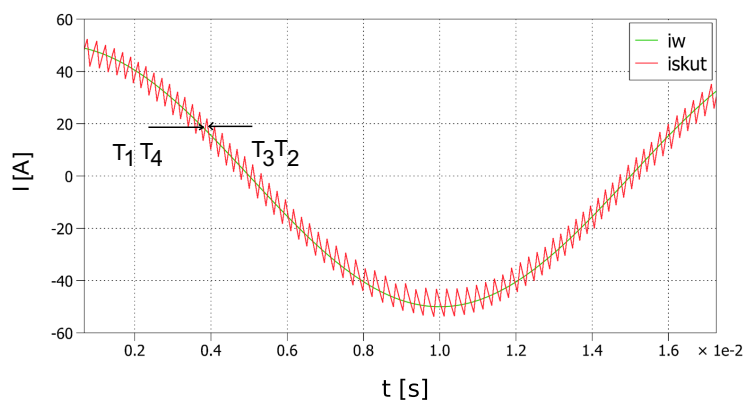
Obr. 1.17: Průběh napětí na zátěži řízeného střídače

1.6.1 Dvuhodnotové řízení jednofázového střídače

Dvuhodnotové řízení (Obr. 1.18) porovnává vstupní požadovaný signál i_w a skutečný měřený signál i_{skut} . Požadovaný signál i_w lze nastavit dle potřebných požadavků, pro názornou ukázkou je i_w proud cosinového průběhu o amplitudě 50 A. Skutečný proud je měřený ve větvi zátěže střídače. Hysterezním blokem je řízena spínací logika měniče. Kolem požadovaného průběhu je hysterezní pásmo o velikosti 5 A, ve kterém proud klesá, či roste v závislosti na definované spínací logice ve větvích střídače. Čím je vyšší hodnota hysterezního pásma, tím více roste Δi , tedy zvlnění proudu. Naopak pokud budeme snižovat hysterezní pásmo, tak zvlnění proudu bude menší, ale roste spínací frekvence f_s .



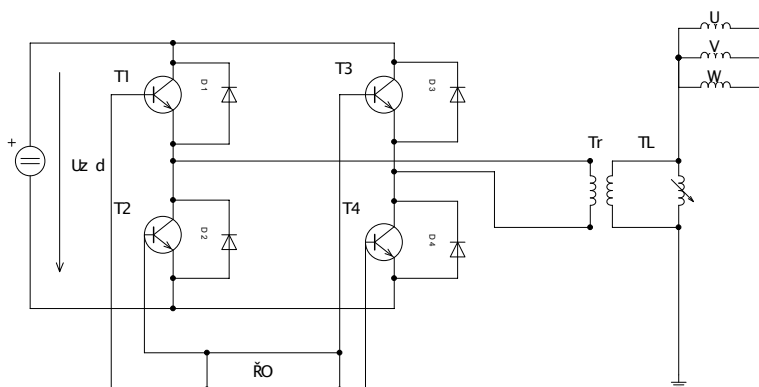
Obr. 1.18: Blokové uspořádání dvuhodnotové regulace



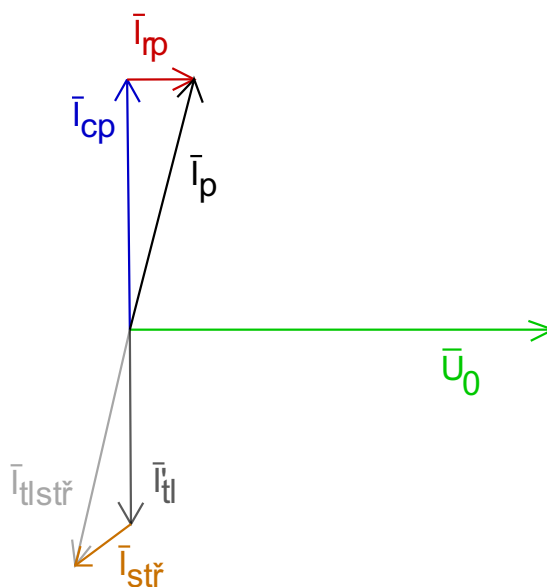
Obr. 1.19: Průběh proudu regulovaného střídače

1.7 Kompence poruchy zhášecí tlumivkou s polovodičovým měničem

Petersenovu tlumivku zapojenou mezi uzel transformátoru a zem můžeme doplnit o řízený zdroj proudu, který připojíme přes snížovací transformátor. V praxi se využívá převod o hodnotě $p = 25$. Výhodou této kompenzace je, že můžeme provozovat tlumivku částečně podladěnou, čímž zmenšíme nesymetrii sítě a zbylý poruchový proud vykompenzujeme řízeným polovodičovým měničem. Další výhodou je kompenzace svodového proudu, který zhášecí tlumivka nedokáže vykompenzovat, jelikož se jedná o činnou složku. Tento druh kompenzace je uveden ve fázorovém diagramu (Obr. 1.21).



Obr. 1.20: Zapojení střídače do pomocného vinutí tlumivky



Obr. 1.21: Fázorový diagram kompenzace se střídačem

2 Matematický model distribuční sítě

Pro simulace zemního spojení byla sestavena síť 22 kV s třemi vývody. Tato síť byla namodelována v programu Matlab s využitím PLECS, což je softwarový nástroj pro simulaci elektrických obvodů.

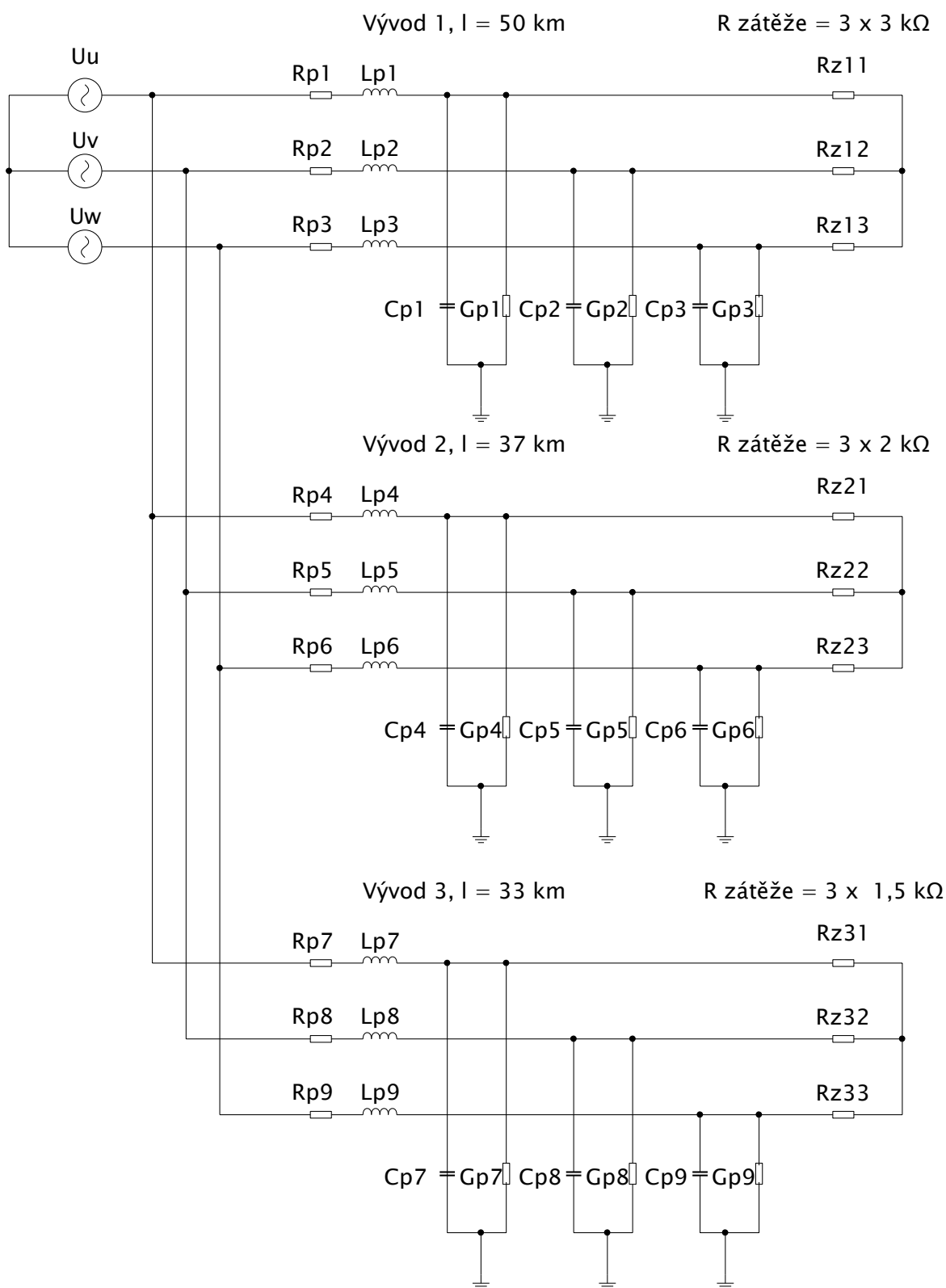
2.1 Parametry sítě 22 kV

Již bylo zmíněno, simulovaná síť se skládá ze tří vývodů. Páteřní větev vedení má délku 50 km, druhý vývod má délku 37 km a třetí vývod disponuje délkou 33 km. Podélnými provozními parametry jsou činný odpor vodiče R_p [Ω/km] a indukčnost L_p vodiče [mH/km]. Příčnými provozními parametry je kapacita C_p [nF/km] a svod sítě G_p [nS/km]. Svod sítě byl modelován odporem, tudíž je jeho hodnota udána v [Ω/km]. Pro názornější průběhy fázorových diagramů byla zvýšena hodnota svodového proudu. Celkový poruchový proud nekompensované sítě činí 23 A. Svodový proud se pohybuje v řádech procent. To by v tomto případě byly jednotky mA. Z toho důvodu je navýšena hodnota svodové proudu na přibližnou hodnotu 2 A. V níže uvedené tabulce jsou hodnoty provozních parametrů, které jsem v simulaci použil.

Tabulka 1: Hodnoty provozních parametrů sítě 22 kv

	U_n [kV]	R_p [Ω/km]	L_p [mH/km]	C_p [nF/km]	G_p [Ω/km]
Venkovní vedení	22	0,45	1,15	9,5	$4 \cdot 10^3$

Na začátku páteřní sítě je v každé fázi umístěn střídavý zdroj napětí nastavený na hodnotu 22 kV. Fázový posuv jednotlivých fází činí 120° . Z tohoto místa jsou napájeny zbylé dva vývody. Na konci každého vývodu je zapojena čistě odporová zátěž do hvězdy. Schéma popisované distribuční sítě je na (Obr. 2.1).



Obr. 2.1: Schéma sítě vn s třemi vývody

2.2 Popis simulace kompenzované sítě pomocí Petersenovy tlumivky

Sít' uvedenou na (Obr. 2.1) jejíž model je na (Obr. 2.2) jsem doplnil o Petersenovu tlumivku zapojenou mezi uzel vinutí transformátoru a zem. Do série k tlumivce je zapojený malý odpor, který simuluje odpor tlumivky a ampérmetr pro měření jalového proudu vygenerovaného tlumivkou. Na páteřní síti za uzlem transformátoru jsou měřeny fázové hodnoty napětí jednotlivých fází. Napětí mezi uzlem transformátoru a zemí, tedy U_0 je měřeno pomocí tří voltmetrů umístěných mezi každou fází a potenciál země. Tyto signály jsou sečteny přes sumátor a vyděleny jednou třetinou, což vychází ze vztahu:

$$U_0 = \frac{U_U + U_V + U_W}{3} \quad (2.1)$$

Na začátku každého vývodu jsou umístěny ampérmetry, jejichž signály jsou opět sečteny přes sumátor pro získání hodnoty proudu tekoucího každým vývodem. Měření nulové složky proudů je realizováno umístěním ampérmetru do každé příčné větve všech vývodů a následně jsou všechny tyto hodnoty sečteny, čímž získám celkový svodový a kapacitní proud. Simulace zemního spojení je provedena spínačem na první fázi páteřního vývodu. Se spínačem je v sérii odpor udávající charakter zemního spojení.

Velikost Petersenovy tlumivky jsem vypočetl z rovnosti poruchového proudu a proudu generovaného tlumivkou.

Odvození vztahu pro velikost Petersenovy tlumivky:

$$I_L = I_P \quad (2.2)$$

$$\frac{U_f}{X_L} = 3 I_P \quad (2.3)$$

$$\frac{U_0}{\omega \cdot L} = 3 \cdot U_f \cdot \omega \cdot C \quad (2.4)$$

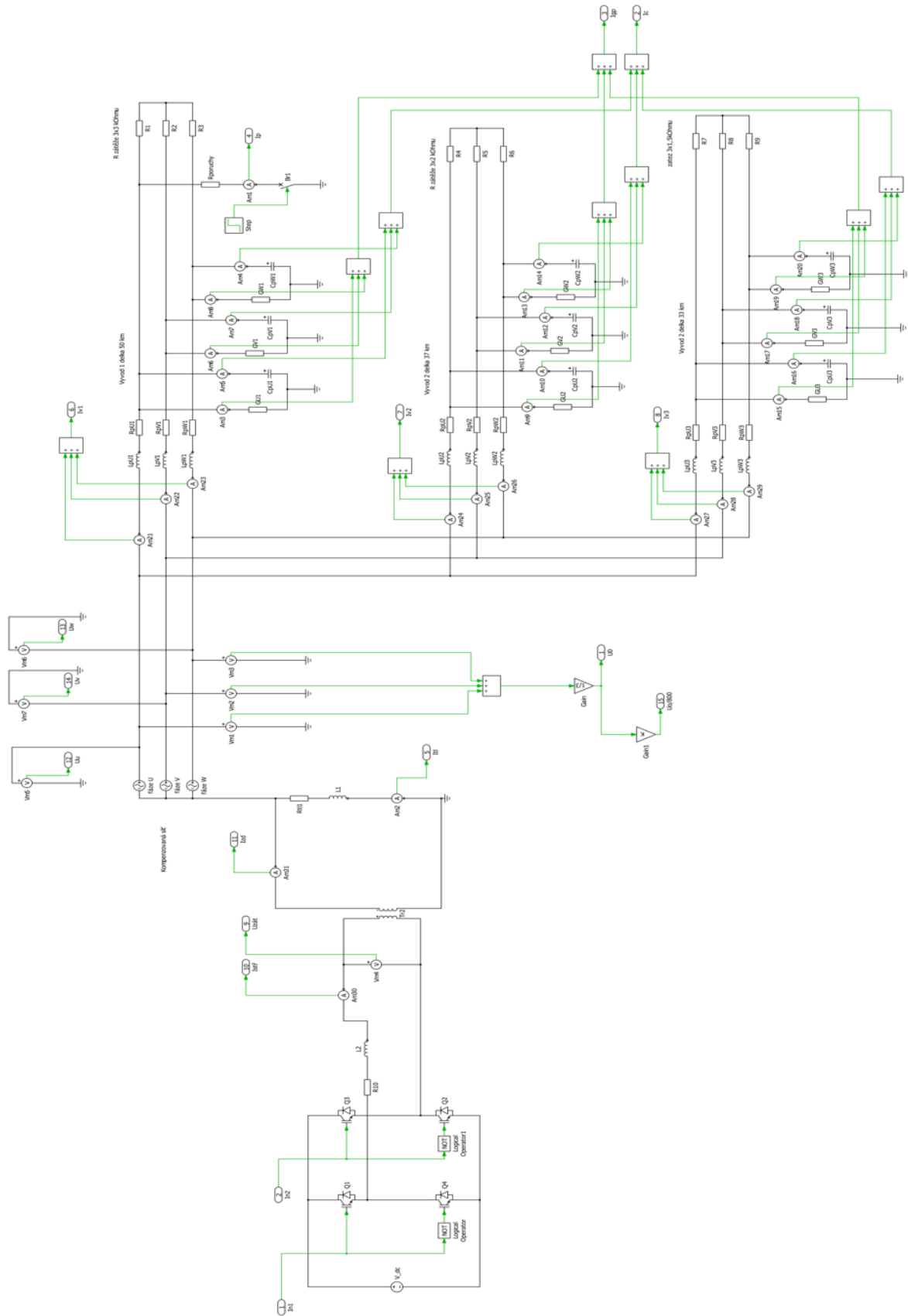
$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi \cdot 50)^2 \cdot 9,5 \cdot 10^{-9} \cdot 110} \quad (2.5)$$

$$L = 3,232 \text{ H}$$

Dle výše uvedeného orientačního výpočtu je pro kompenzaci poruchového proudu potřebná Petersenova tlumivka o velikosti 3,232 H.

2.2.1 Matematický model sítě

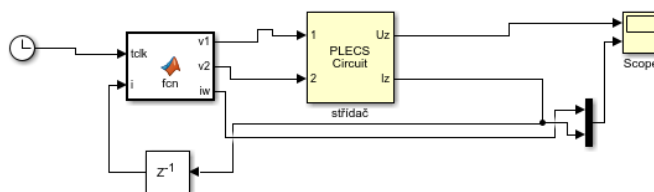
Matematický model je sestaven z blokového uspořádání v programu Simulink. Nastavenými parametry simulace je řešitel diferenciálních rovnic, který je v mé simulaci nastaven na discrete. Hodnota simulačního kroku činí $1e^{-5}$. Doba simulace je závislá na odeznění



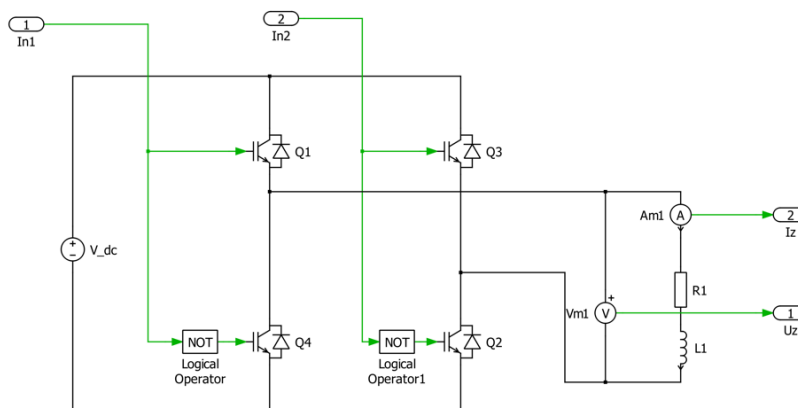
Obr. 2.3: Simulovaná síť v programu PLECS

2.2.2 Matematický model střídače

Blokové uspořádání střídače v programu Simulink je na (Obr. 2.4). Střídač je v provedení H můstku s dvouhodnotovým řízením. Řízení je provedeno pomocí skriptu v Matlabu. Zde je popsána logika spínání a pomocí vstupů 1, 2 jsou ovládané větve střídače. Nastavuje se zde průběh požadovaného proudu měniče. Tato funkce pracuje s časem čítače, tedy vstupem t_{clk} . Mrtvé doby polovodičového měniče není nutné uvažovat, protože jsou použity ideální součástky. Zkrat ve větvi je ošetřen logickou negací.



Obr. 2.4: Blokové uspořádání střídače s regulací



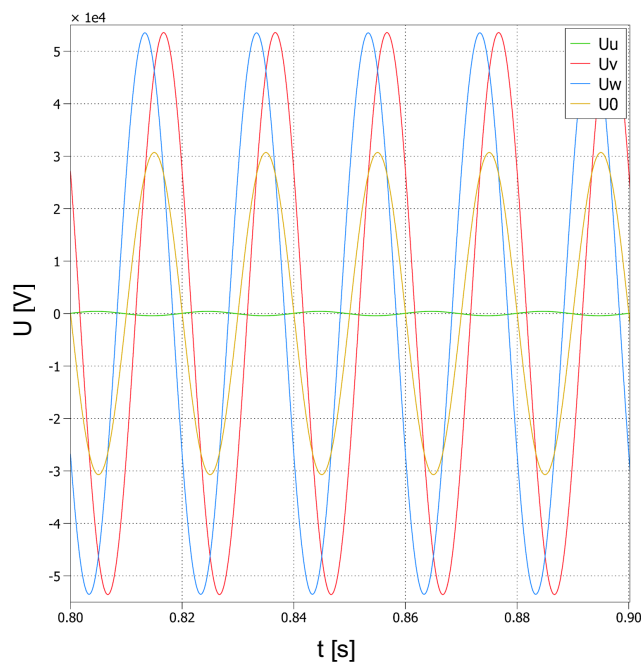
Obr. 2.5: Řízený jednofázový střídač v programu PLECS

3 Simulace jednofázových poruch v síti 22 kV

V této kapitole jsou uvedeny výsledky jednotlivých simulací kompenzace poruchového proudu. Nejprve jsem provedl kompenzaci poruchového proudu pomocí Petersenovy tlumivky. Následně jsem do pomocného vinutí připojil jednofázový střídač, abych provedl kompenzaci, jak jalové, tak i činné složky poruchového proudu. Simulace jsou provedeny pro kovové zemní spojení a následně odporové o hodnotě poruchy $R_F = 8\text{k}\Omega$.

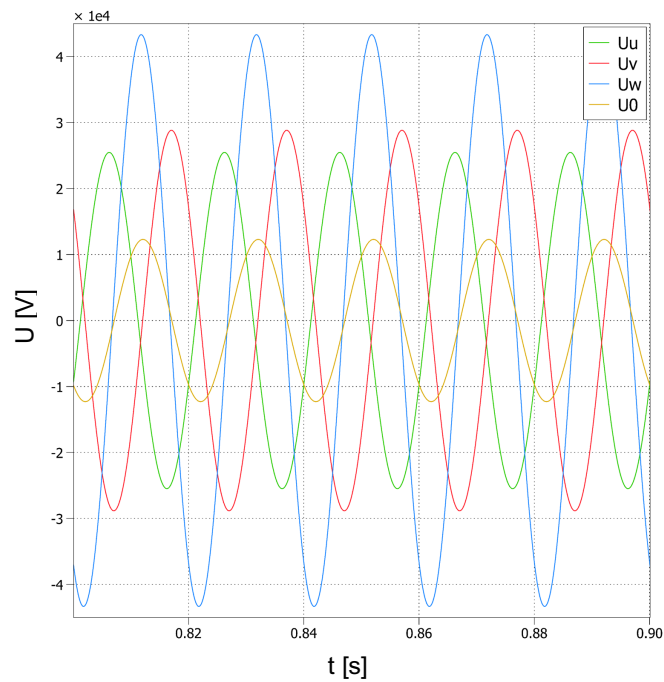
3.1 Kompenzace zemní poruchy s podladěnou Petersenovo tlumivkou

V této kapitole bylo provedeno podladění tlumivky. Jalová složka poruchového proudu je vykompenzována při nastavené hodnotě tlumivky $L_{TL} = 2,95\text{ H}$. Hodnota podladěné tlumivky činí $L_{TL} = 2,4\text{ H}$.



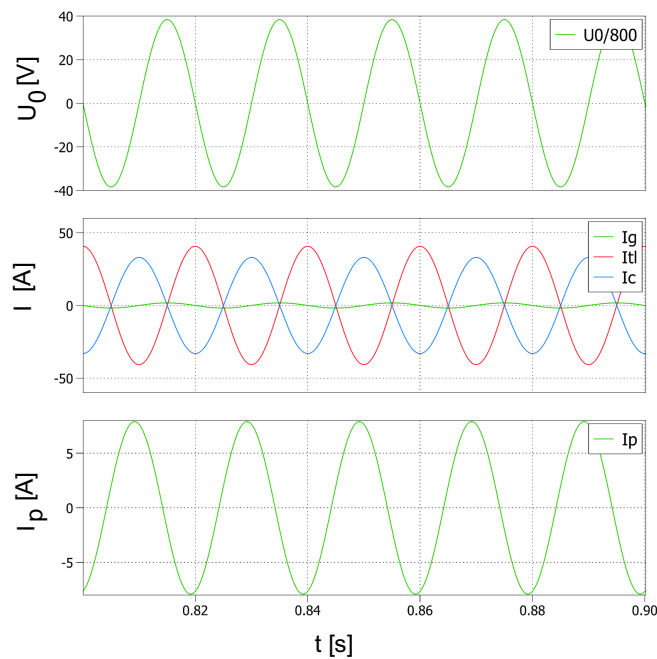
Obr. 3.1: Průběhy napětí při $R_F = 1\text{ m}\Omega$

Při kovovém zemním spojení (Obr. 3.1) na fázi U dochází k poklesu jejího napětí k nulové hodnotě. Zbylé dva fázové vodiče mají nyní sdružené hodnoty napětí, což je způsobené napětím uzlu transformátoru, který převzal potenciál porušené fáze. Tato situace se změní, pokud v síti nastane odporové zemní spojení.



Obr. 3.2: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

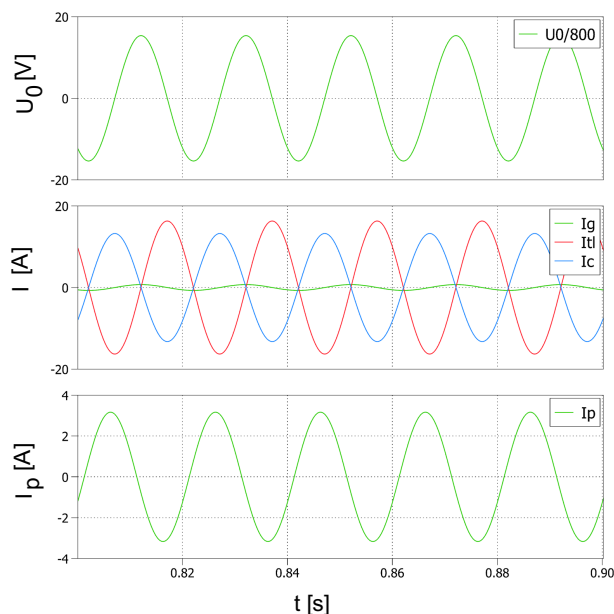
Vlivem úbytku napětí na odporu poruchy (Obr. 3.2) se sníží hodnota napětí uzlu transformátoru. Postižená fáze získá napětí, které je způsobené úbytkem napětí na odporu poruchy R_F . Zvyšujícím se odporem poruchy bude docházet ke snížení napětí U_0 . Vlivem vychýlení fázoru U_0 se změní velikosti fázových napětí. To je názorně vidět na fázích U_v a U_w .



Obr. 3.3: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

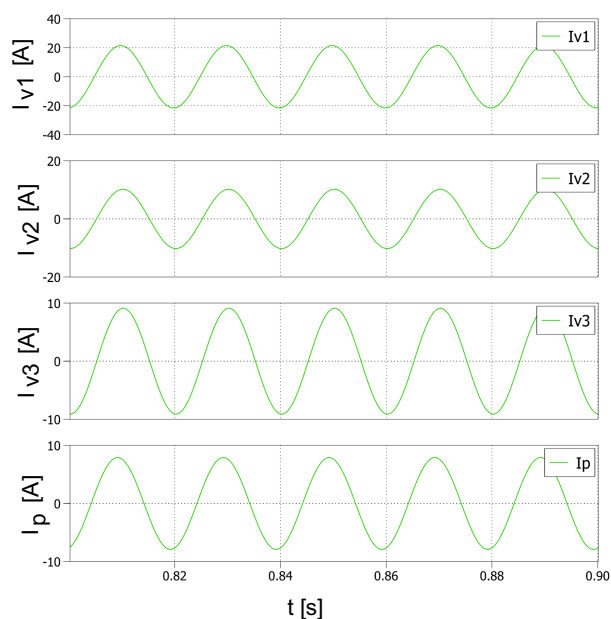
Napětí mezi uzlem transformátoru (Obr. 3.3) a zemí je upravené v měřítku $U_0/800$

V. Svodový proud je ve fázi s napětím, jelikož se jedná o činnou složku. Sít' je podkompenzována. Z toho důvodu protéká poruchou zbytkový proud, ten je dán součtem nulové složky příčných kapacit a svodů. Proud tlumivky vychází ze vztahu uvedeném v rovnici (2.4). Indukčnost zhášecí tlumivky je ve jmenovateli zlomku, z toho plyne, že při menší hodnotě indukčnosti tlumivky (podkompenzované) poteče větší proud. Opačná situace nastává u pře-kompenzované tlumivky.



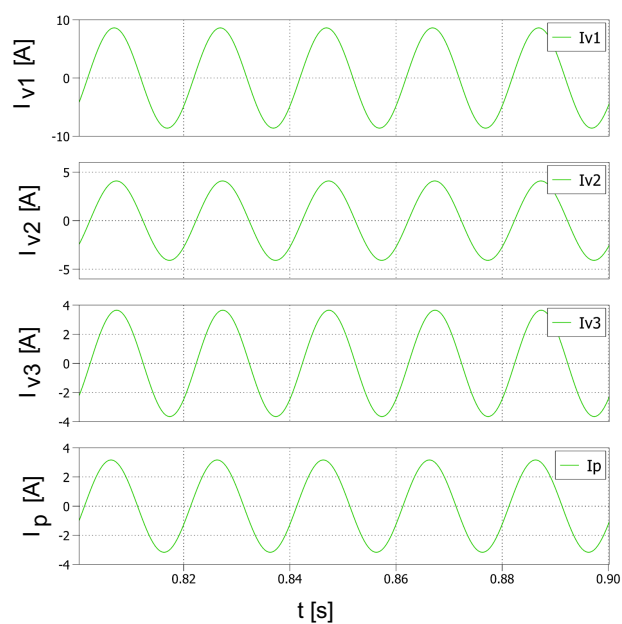
Obr. 3.4: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Zvýšením odporu poruchy (Obr 3.4) došlo ke snížení hodnoty napětí U_0 , čímž se sníží proud generovaný tlumivkou do místa poruchy a zároveň dochází k snížení kapacitní a činné složky poruchového proudu.



Obr. 3.5: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

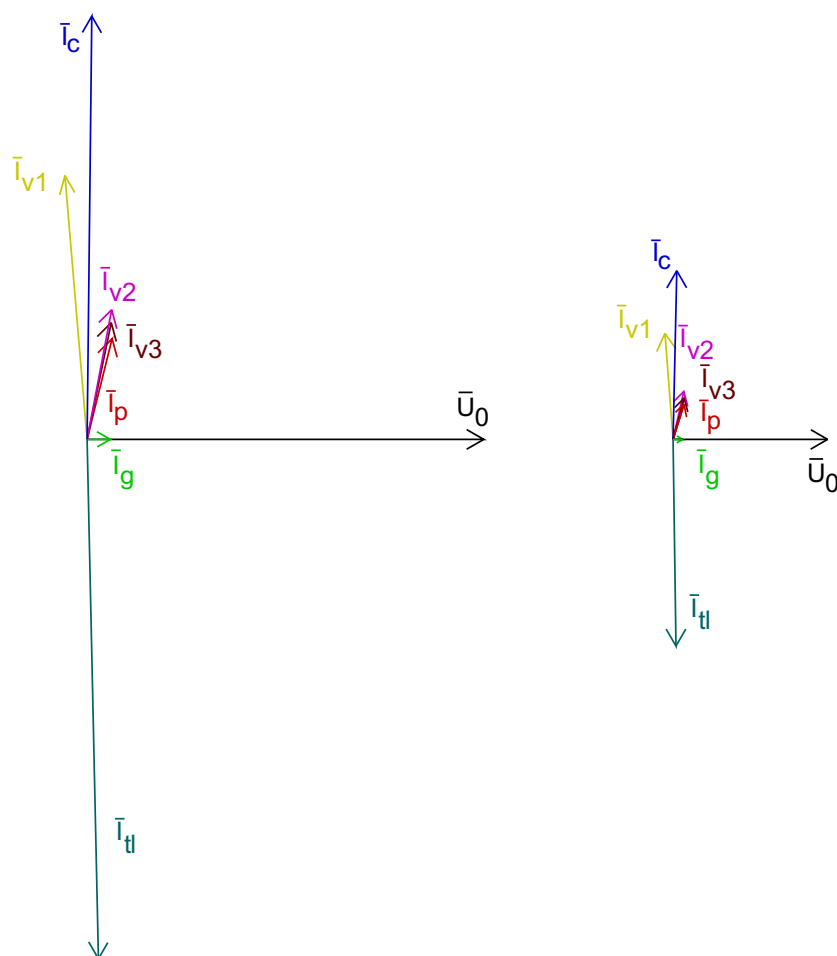
Proudy (Obr. 3.5), které protékají vývody sítě jsou kapacitního charakteru.



Obr. 3.6: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Při odporovém zemním spojení dochází i ke snížení velikosti proudů (Obr. 3.6), z důvodu zvětšení odporu v síti. Do místa poruchy přispívají všechny vývody sítě.

3.1.1 Fázorové diagramy pro podkompenzovaný stav

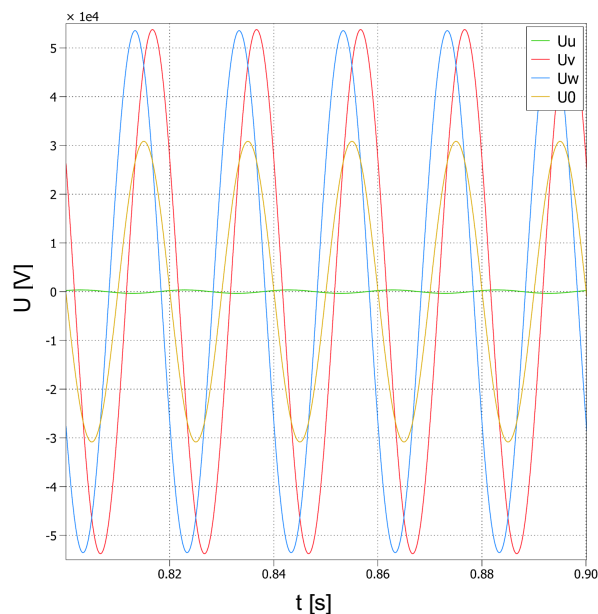


Obr. 3.7: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Z vykreslených fázorových diagramů (Obr. 3.7) je patrné, jaký vliv má velikost napětí U_0 na průběhy měřených veličin. Při odporové poruše dochází k zmenšení velikostí všech fázorů a to má vliv i na výslednou velikost poruchového proudu. Poruchový proud je vykreslen do prvního kvadrantu, protože podladěná tlumivka vykompenzovala jen část jalové složky tohoto proudu. Velké podkompenzování může být nebezpečné. V místě poruchy vzniká krokové napětí a hrozí tak úraz elektrickým proudem.

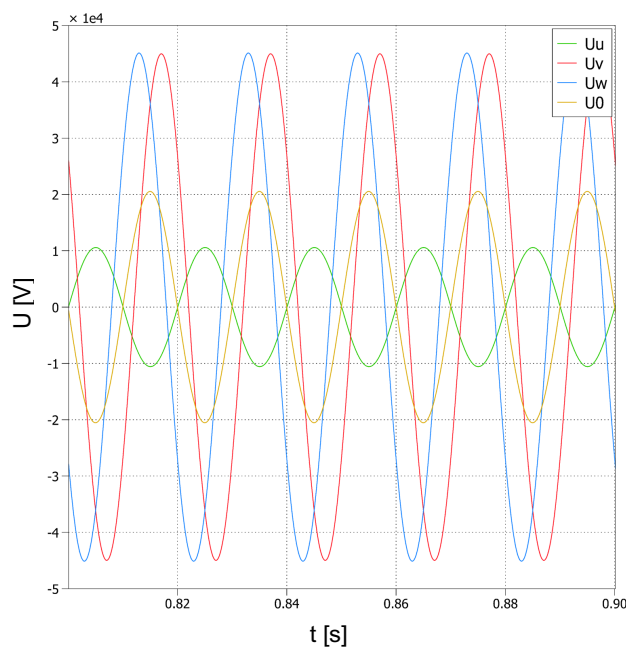
3.2 Kompence zemní poruchy s vyladěnou Petersenovo tlumivkou

Pro úplnou kompenzaci jalové složky poruchového proudu je nastavena hodnota tlumivky na $L_{TL} = 2,95 \text{ H}$. Při takovém nastavení tlumivky by poruchový proud měla tvořit pouze činná složka příčných svodů v síti. Při úplném vyladění tlumivky vzniká nesymetrie v síti. V praxi se tlumivka podladí zhruba o 6 až 8%.



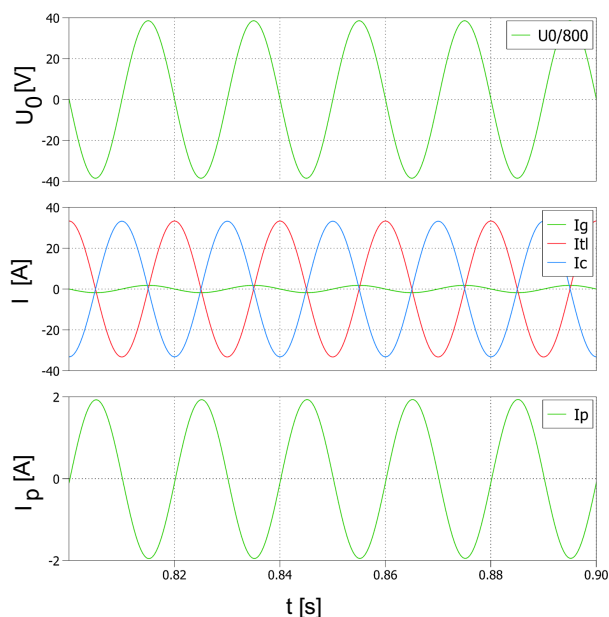
Obr. 3.8: Průběhy napětí při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Průběhy napětí (Obr. 3.8) při kovové poruše jsou totožné s průběhy napětí v podkompenzované, vykompenzované a překompenzované síti.



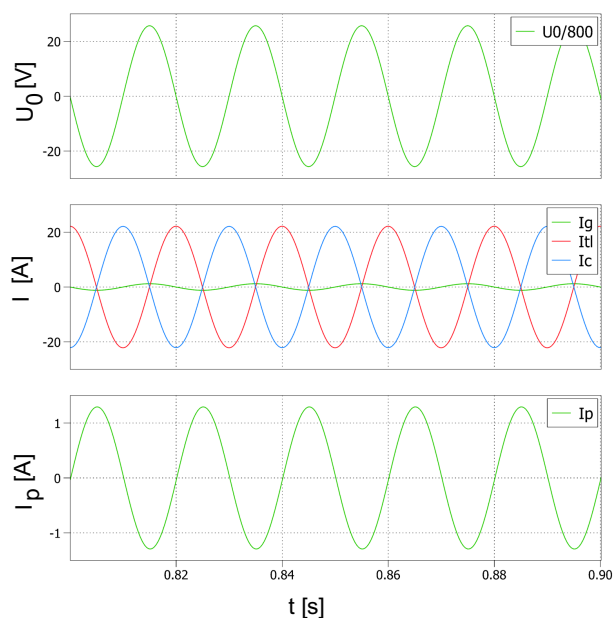
Obr. 3.9: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Na fázi U_u , kde došlo ke vzniku zemního spojení se opět vytvoří úbytek napětí vlivem odporu poruchy (Obr. 3.9). Velký úbytek zde zapříčinilo zvýšení svodového proudu. U reálné síti by se napětí U_0 blížilo fázové hodnotě napětí.



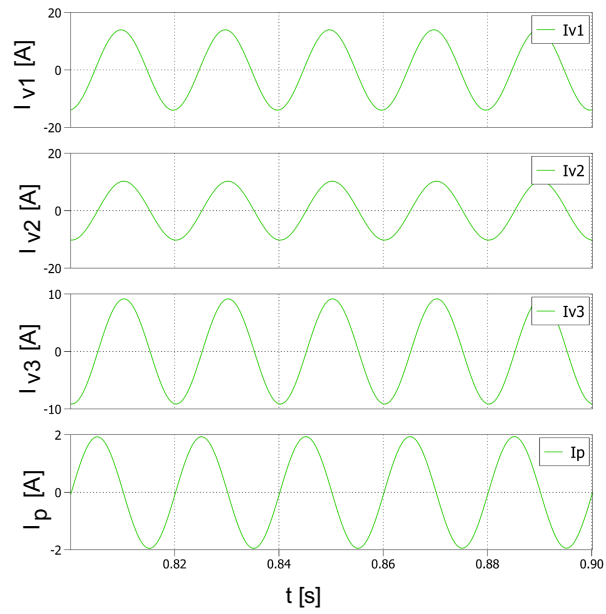
Obr. 3.10: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Generovaný proud tlumivkou induktivního charakteru (Obr. 3.10) je stejně velký jako jalová část poruchového proudu zapříčiněná příčnými kapacitami. Místem poruchy tak protéká jen zbytkový proud, který je tvořen součtem nulové složky svodů sítě. Velikost svodového proudu byla upravena pro lepší vizualizaci fázorových diagramů. V provozovaných sítích hladiny vn dosahuje řádů mA.

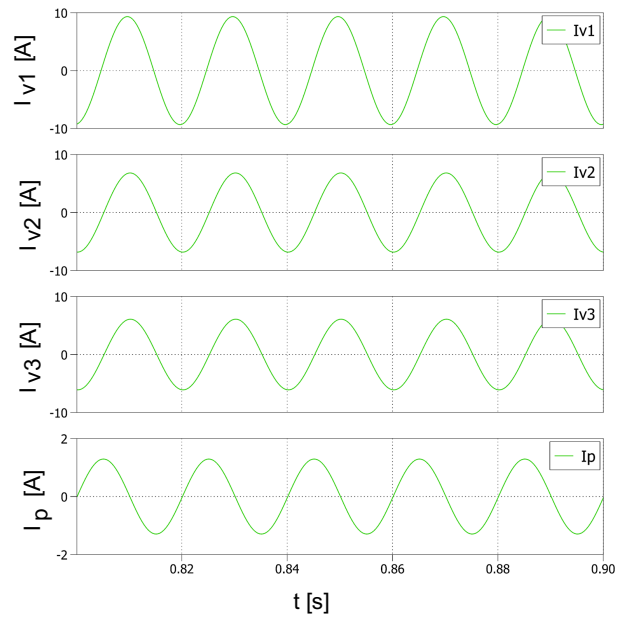


Obr. 3.11: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Úbytek tvořený na odporu poruchy zapříčinil pokles hodnoty U_0 , které je upraveno do měřítka $U_0/800 \text{ V}$. Poklesem tohoto napětí se snížila hodnota veškerých naměřených veličin (Obr. 3.11).



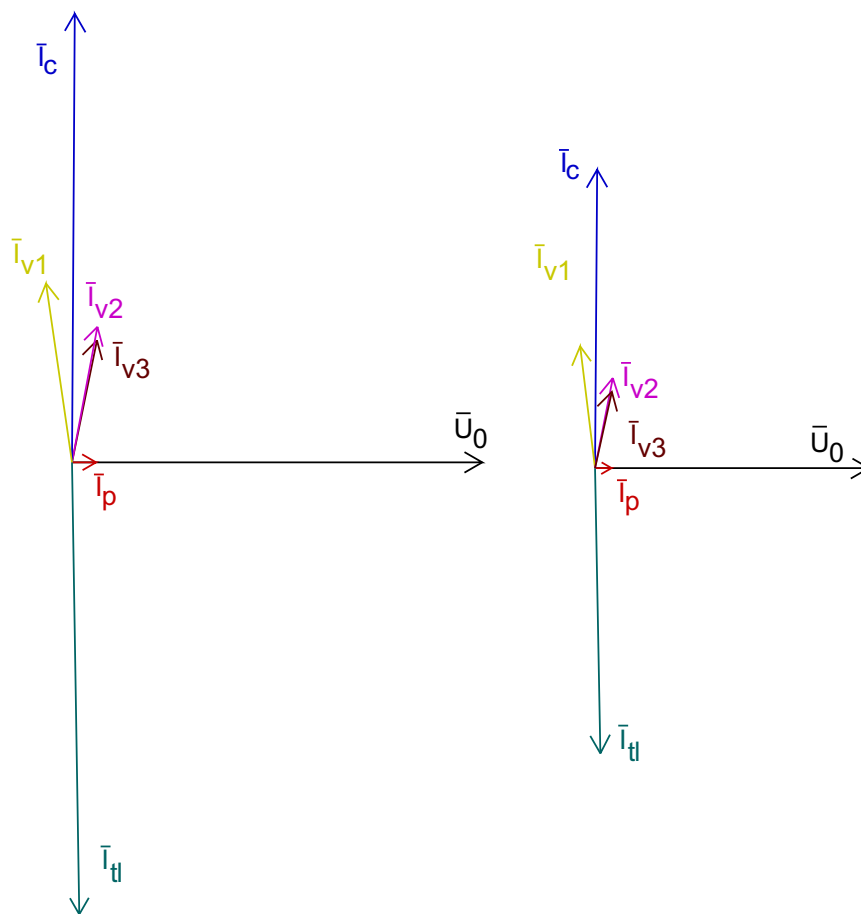
Obr. 3.12: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$



Obr. 3.13: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Při odporové poruše dochází k poklesu velikostí proudů vývodů (Obr. 3.13).

3.2.1 Fázorové diagramy pro vykompenzovaný stav

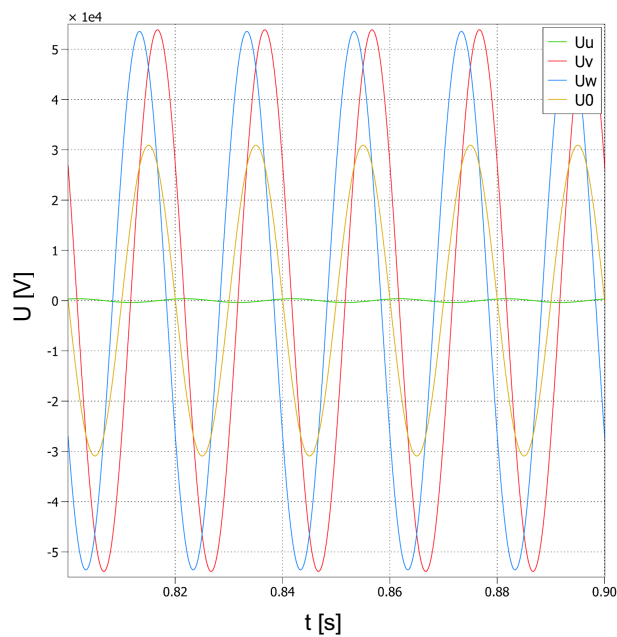


Obr. 3.14: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Z výše uvedených poznatků vidíme (Obr. 3.14), že poruchový proud leží na reálné ose, jedná se pouze o jeho činnou složku. Kapacitní charakter vykompenzovala tlumivka. Fázory proudů I_C a I_L jsou stejně velké. Po odporové poruše se zmenšila velikost U_0 a tento pokles zapříčinil i zmenšení hodnot proudů v síti.

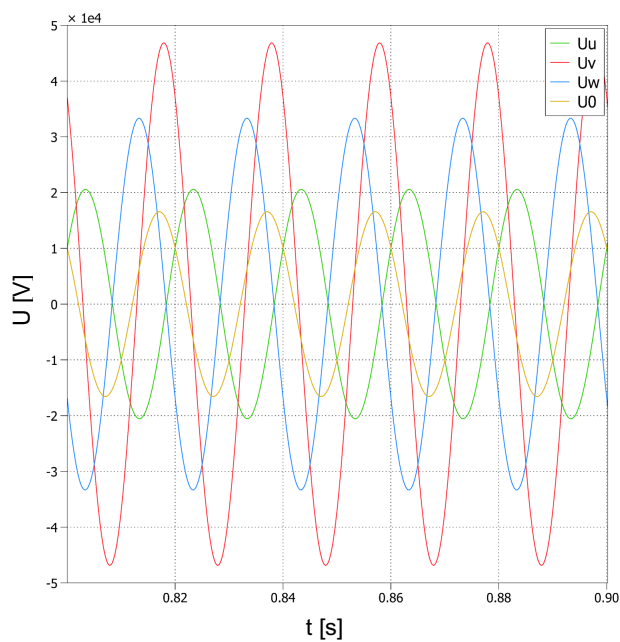
3.3 Překompenzovaná tlumivka

Pro překompenzování simulované sítě jsem nastavil indukčnost tlumivky na $L_{TL} = 3.4 \text{ H}$. Síť v překompenzovaném provozu je nežádoucí stav. V takovém případě dodává tlumivka do sítě jalový výkon. Ten má negativní vliv na účinník provozované sítě. Dodržení předepsaných parametrů sítě je požadavek na každého provozovatele distribuční soustavy. Při jejich kolísání pod stanovené meze jsou provozovatelé DS pokutováni.



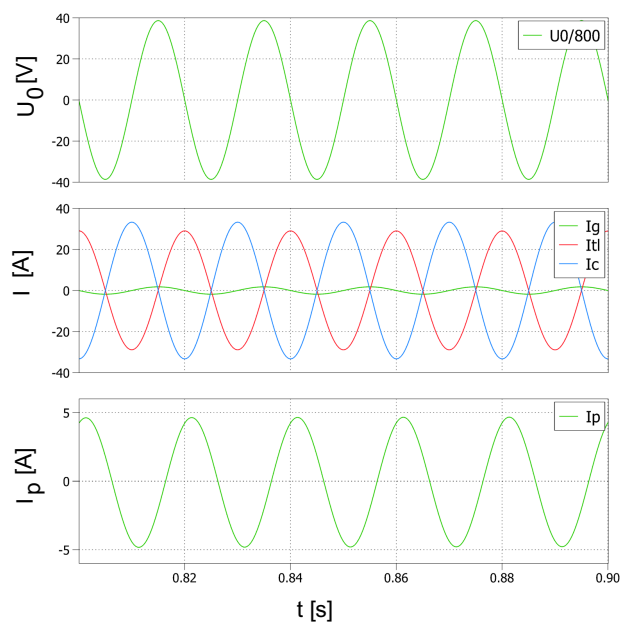
Obr. 3.15: Průběhy napětí při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Průběh napětí u kovového zemního spojení je totožný jako v předchozích případech (Obr. 3.15).



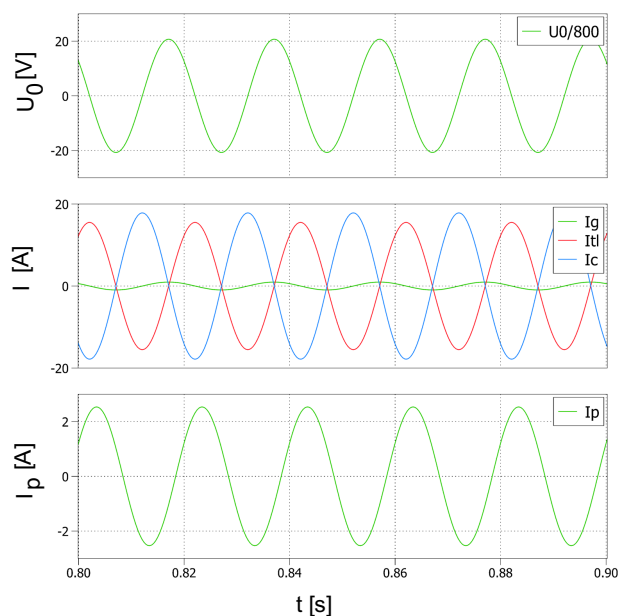
Obr. 3.16: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Vlivem úbytku na R_F dochází k poklesu hodnoty U_0 .



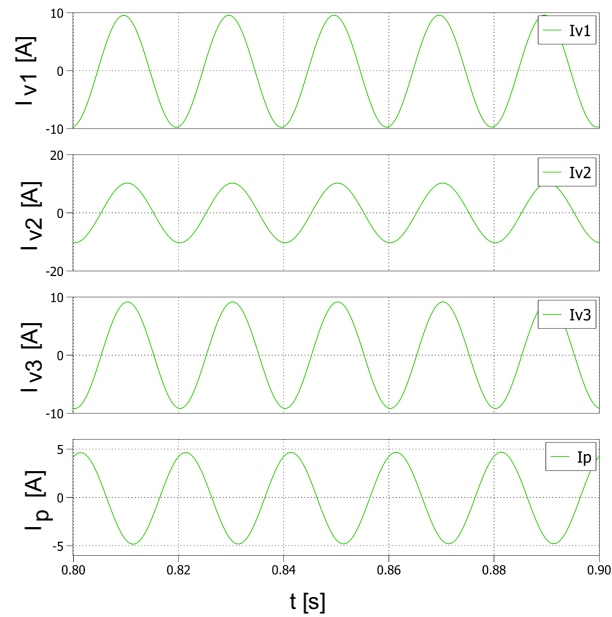
Obr. 3.17: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Vlivem velké indukčnosti se snížila hodnota generovaného proudu. Tlumivka se nyní chová jako zdroj, poruchový proud kapacitního charakteru vykompenzovala a do sítě generuje již velký induktivní proud. To je zřetelné z (Obr. 3.18), kdy poruchový proud je ve fázi s proudem generovaným tlumivkou.



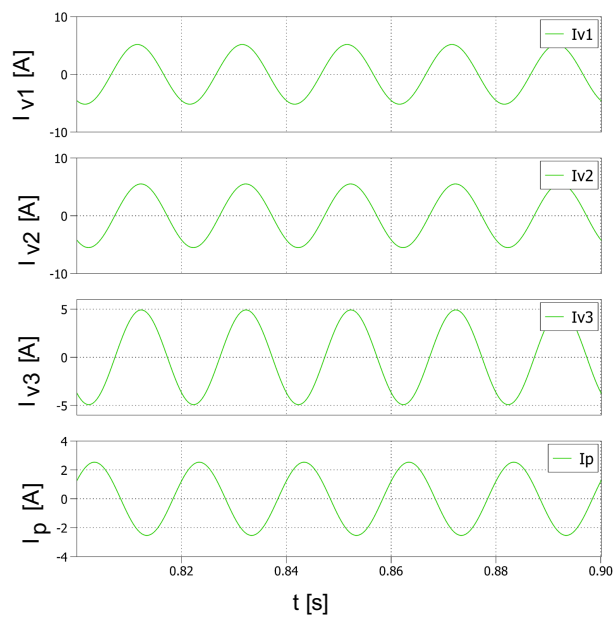
Obr. 3.18: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Poklesem hodnoty U_0 při odporovém spojení opět dochází k snížení velikostí proudů v síti (Obr. 3.19).



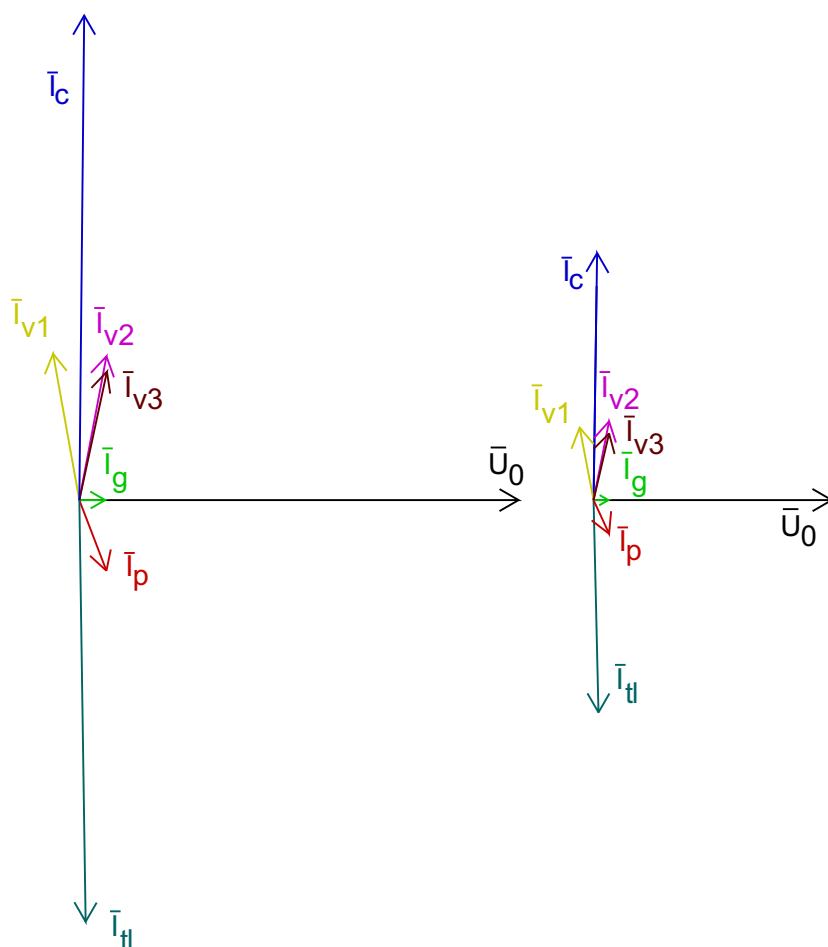
Obr. 3.19: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Proudy vývodů jsou v protifázi s poruchovým proudem (Obr. 3.19). To je dáno jejich kapacitním charakterem vůči poruchovému induktivnímu proudu.



Obr. 3.20: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

3.3.1 Fázorové diagramy pro překompenzovaný stav

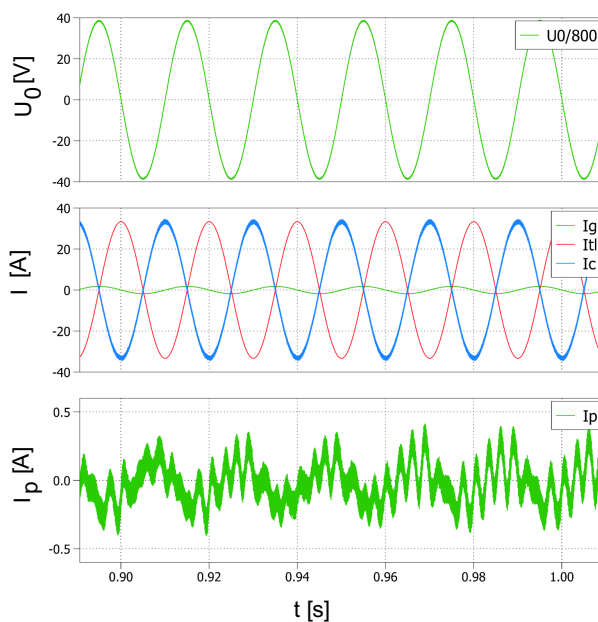


Obr. 3.21: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Fázor poruchového proudu (Obr. 3.21) nyní leží ve čtvrtém kvadrantu. Jeho poloha je dána jeho induktivním charakterem. Jak už bylo zmíněno, tento způsob kompenzace poruchového proudu je nežádoucí. Při vzniku odporového zemního spojení dochází jako v předešlých případech k snížení hodnoty U_0 , tím se sníží velikost proudů tekoucích poruchou.

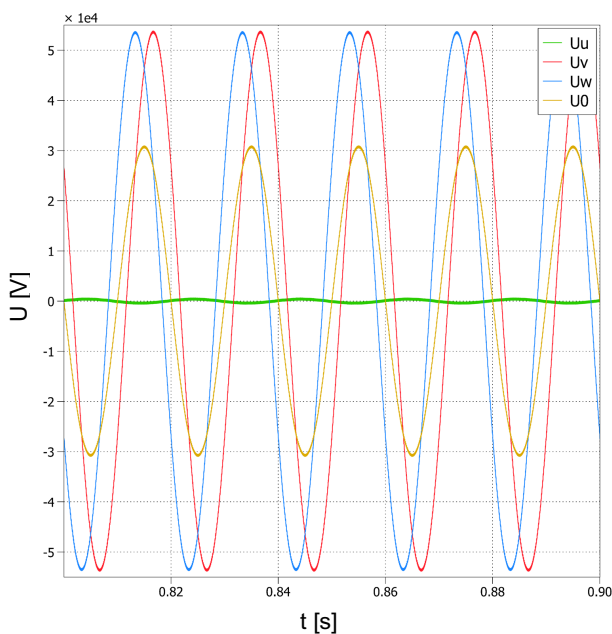
3.4 Kompenzování činné složky polovodičovým měničem

Jednofázový řízený střídač jsem zapojil přes snižovací transformátor k tlumivce. Jalová složka poruchového proudu bude kompenzována proudem generovaným tlumivkou. Tlumivka je podladěná. Pro ověření kompenzace činné složky poruchového proudu jsem tlumivku nejprve vyladil, abych vykompenzoval jalové složky proudů. Tyto průběhy jsou uvedeny na (Obr. 3.10). Hodnota činné složky při kovovém zemním spojení je přibližně 2 A. Pro odporové zemní spojení je 400 mA. Průběh požadovaného proudu střídače s příslušným fázovým posuvem byl nastaven přes skript v Simulinku.



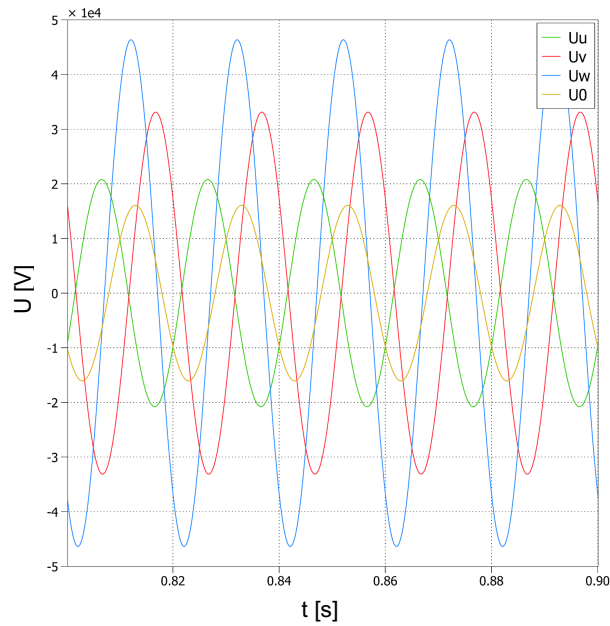
Obr. 3.22: Kompence činné složky poruchového proudu

Činná složka (Obr. 3.22) poruchového proudu je z velké části vykompenzována. Poruchový proud bude téměř kapacitního charakteru.



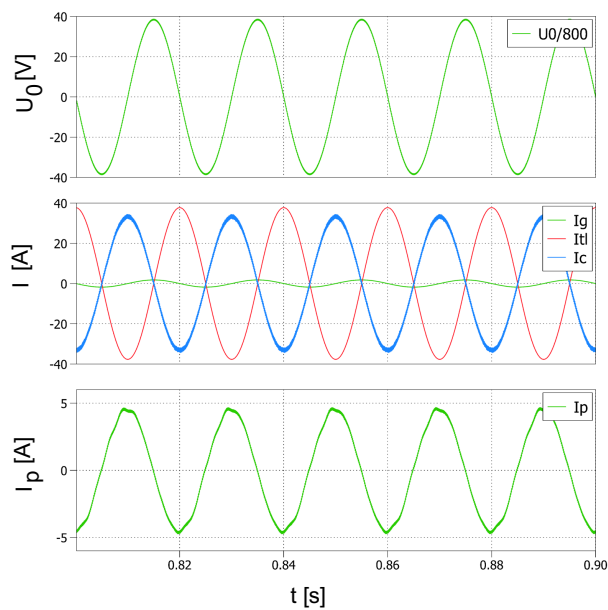
Obr. 3.23: Průběhy napětí při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Průběhy napětí jsou u kovového zemního spojení totožné s průběhy uvedenými v předcházejících kapitolách.

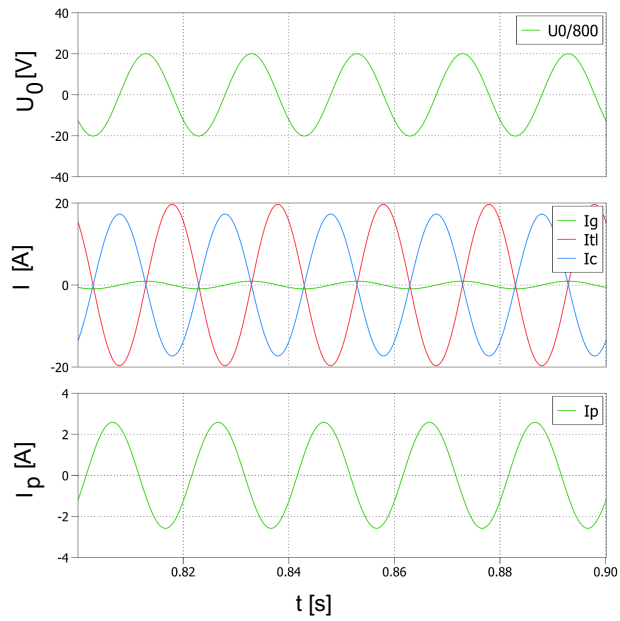


Obr. 3.24: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

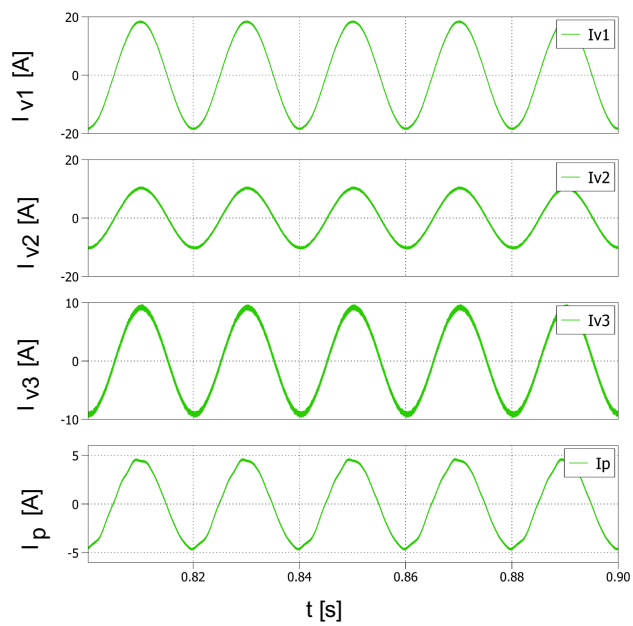
Vlivem zbytkového nevykompenzovaného poruchového proudu stoupl napětí postižené fáze přes 15 kV. Pro lepší zobrazení kompenzace činné složky jsem podkompenzoval tlumivku. Na (Obr. 3.25) je průběh I_p téměř kapacitní.



Obr. 3.25: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

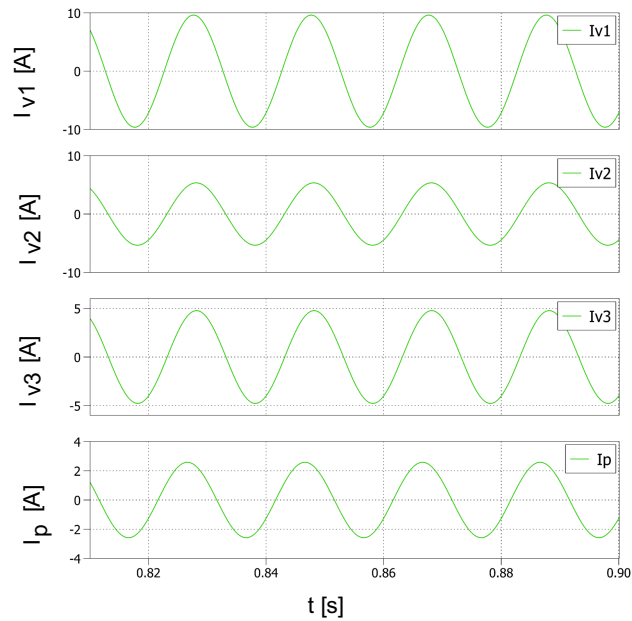


Obr. 3.26: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$



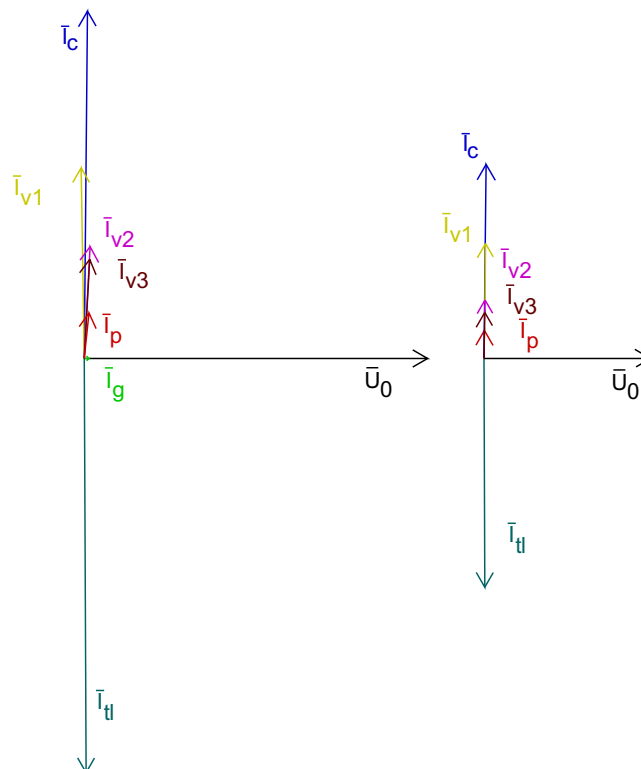
Obr. 3.27: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Poruchový proud je ve fázi s proudy vývody, které přispívají do místa poruchy.



Obr. 3.28: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

3.4.1 Fázorové diagramy

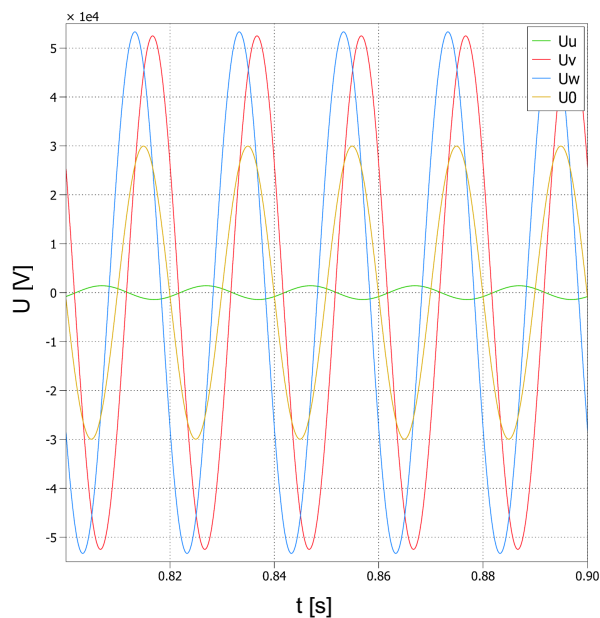


Obr. 3.29: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

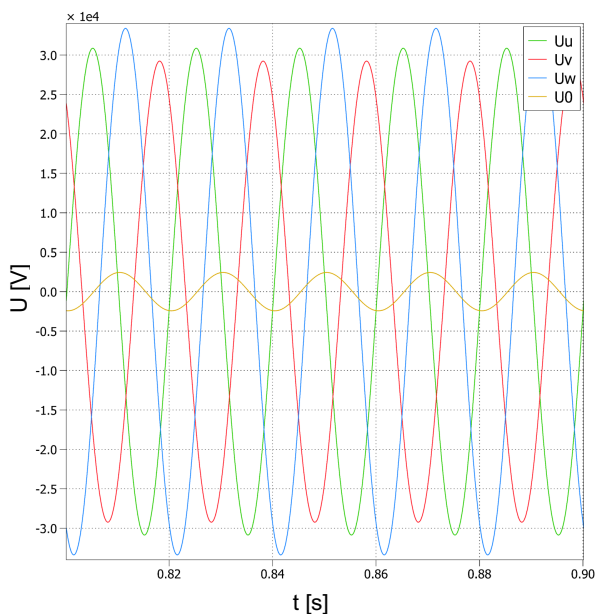
Při kovovém zemním spojení je činná složka téměř vykompenzována. Z původní hodnoty 2 A má nyní hodnotu pod 0,5 A. Vytváří tak velmi malý fázový posuv poruchového proudu a proudů vývodů. Po odporovém zemním spojení, činná složka svodů zcela vymizí. Poruchový proud má čistě kapacitní charakter. Stejná situace platí pro proudy vývodů.

3.5 Kompenzace jalové složky polovodičovým měničem

Tlumivka je v tomto případě provozována v silném podladění. Hodnota indukčnosti tlumivky $L_{TL} = 1,2$ H. Jalová složka poruchového proudu bude z dominantní části kompenzována střídačem. Lze očekávat vysokou hodnotu generovaného proudu tlumivkou.

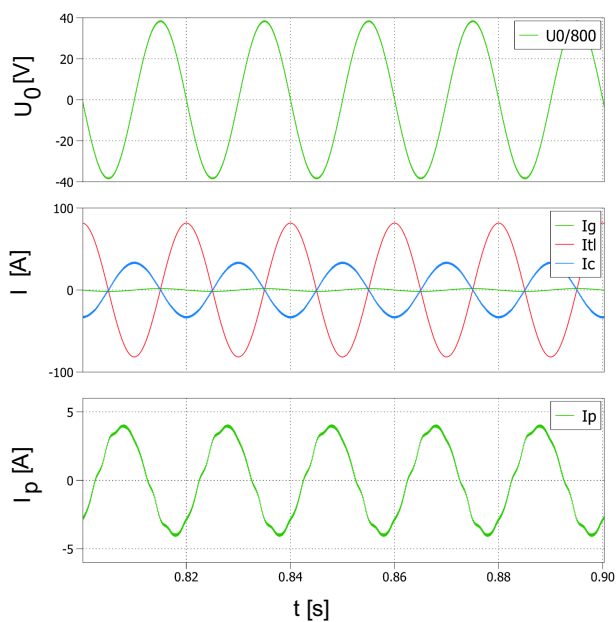


Obr. 3.30: Průběhy napětí při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

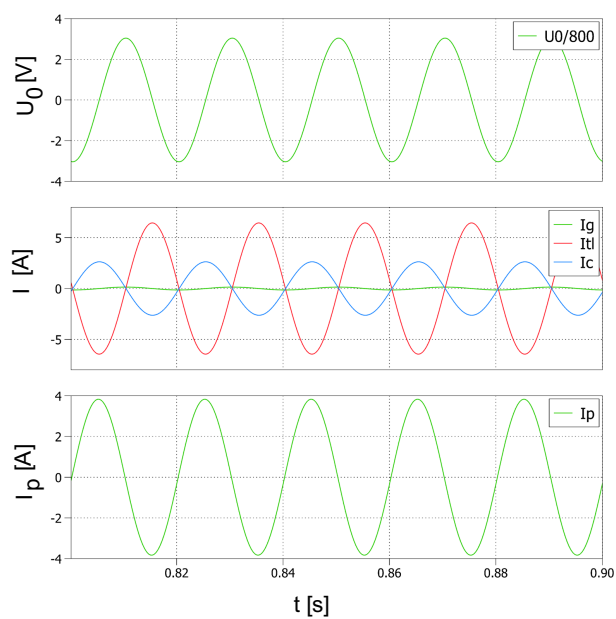


Obr. 3.31: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Hodnota poruchového proudu je tak velká, že úbytek na porouchané fázi má téměř fázovou hodnotu.

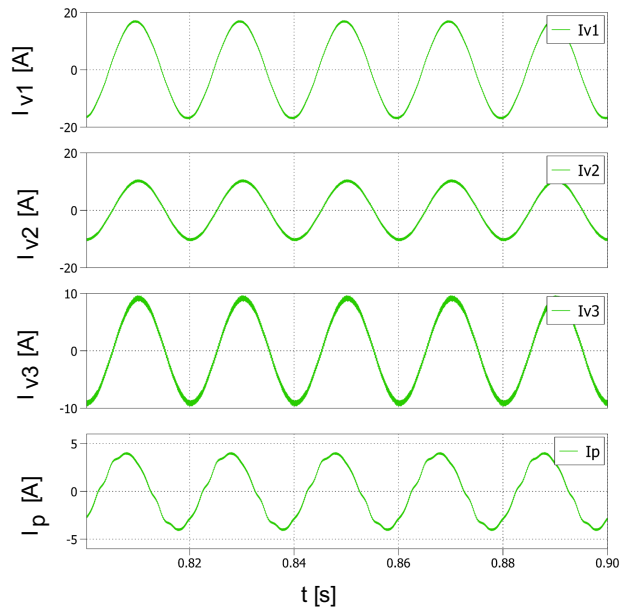


Obr. 3.32: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

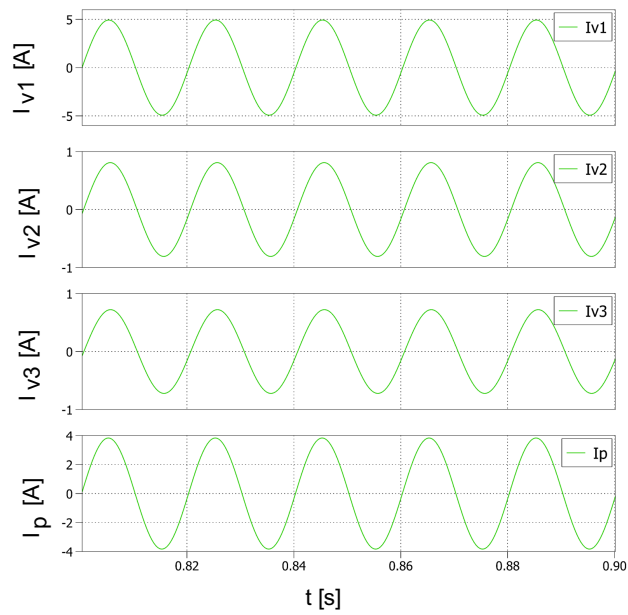


Obr. 3.33: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

V případě odporové poruchy (Obr. 3.33) došlo k velkému poklesu U_0 , kapacitní proud sítě i proud generovaný tlumivkou dosahují velmi nízkých hodnot společně s proudy vývodů.

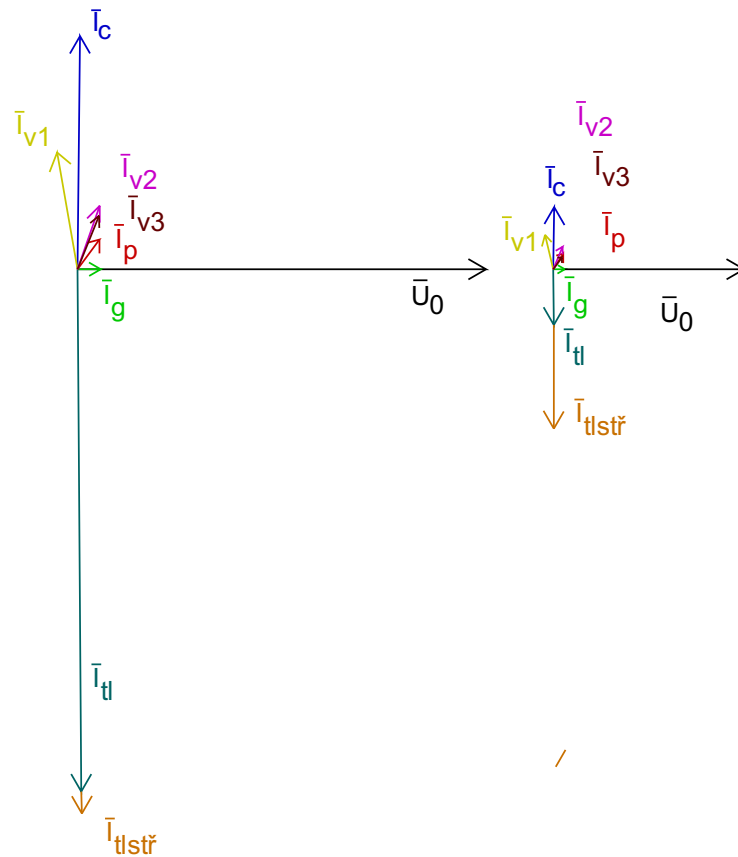


Obr. 3.34: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$



Obr. 3.35: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

3.5.1 Fázorové diagramy

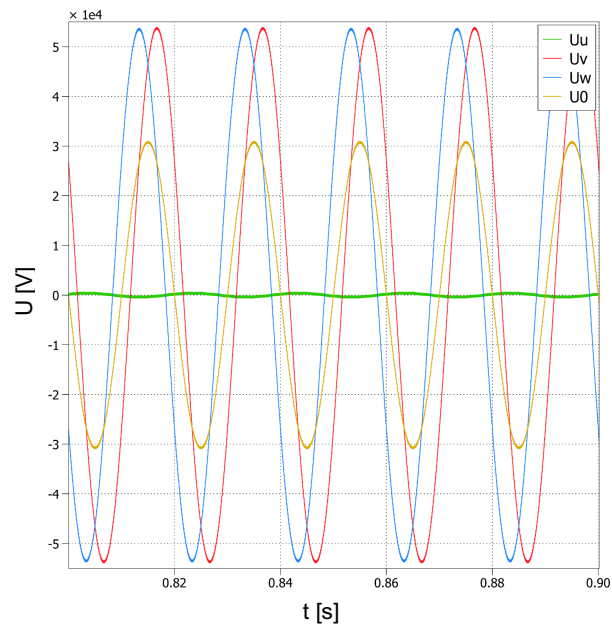


Obr. 3.36: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

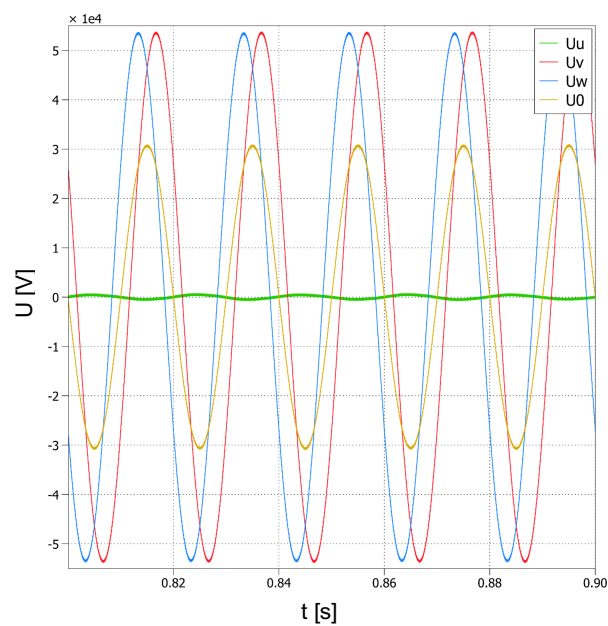
Při kovové poruše má U_0 napětí porušené fáze. Vysoký proud tlumivky je zapříčiněn malou hodnotou indukčnosti a zároveň fázovým napětím, které na ni při kovové poruše vzniká. Poměry se změny se snížením U_0 . Velká část poruchového proudu je kompenzována střídačem zapojeným v pomocném vinutí tlumivky. Díky polovodičovému měničci lze tlumivku z velké části podladit. Lze tak vykompenzovat úplně kapacitní charakter poruchového proudu.

3.6 Kompence jalové i činné složky polovodičovým měničem

V předešlých kapitolách kompenzací poruchového proudu pomocí polovodičového měniče jsem vždy záměrně nevykompenzoval celý poruchový proud. Cílem bylo ukázat, která ze složek poruchového proudu se odkompenzovala. V této kapitole provedu podkompenzování zhášecí tlumivky na hodnotu $L_{TL} = 1,5 \text{ H}$. Zbýlý poruchový proud bude eliminován proudem střídače.

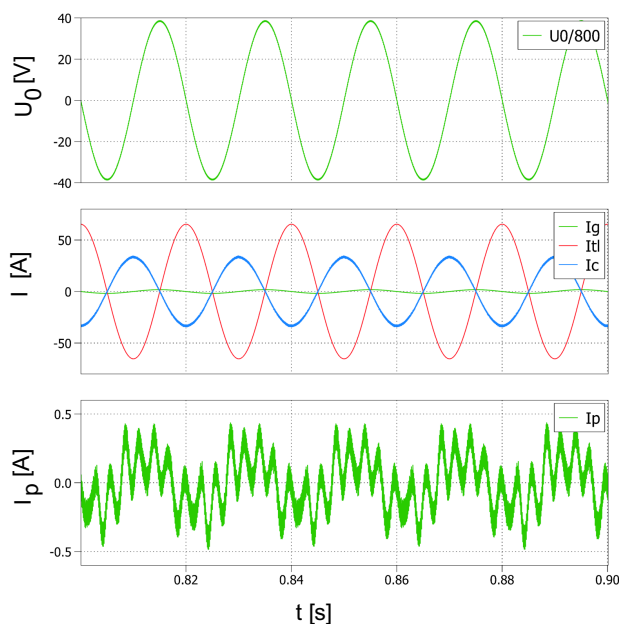


Obr. 3.37: Průběhy napětí při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$



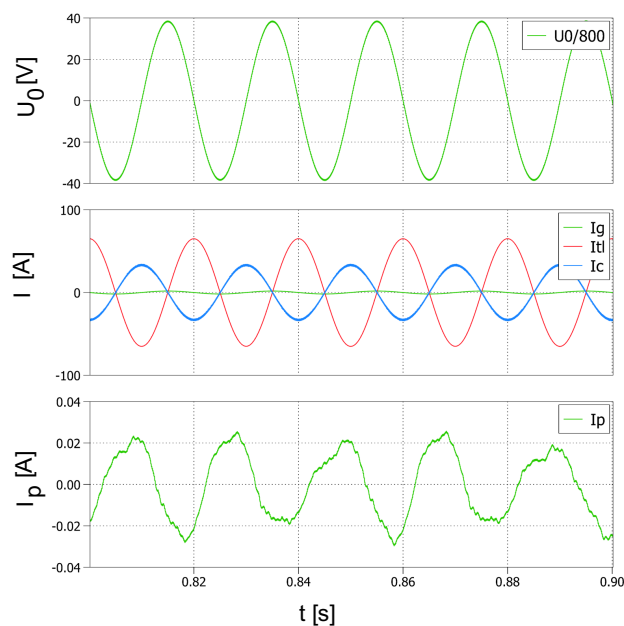
Obr. 3.38: Průběhy napětí při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Pokud srovnáme velikost U_0 pro kovové a odporové zemní spojení, tak pro tento druh kompenzace jsou téměř totožné. Napětí fáze U_u se pohybuje v řádu stovek voltů.



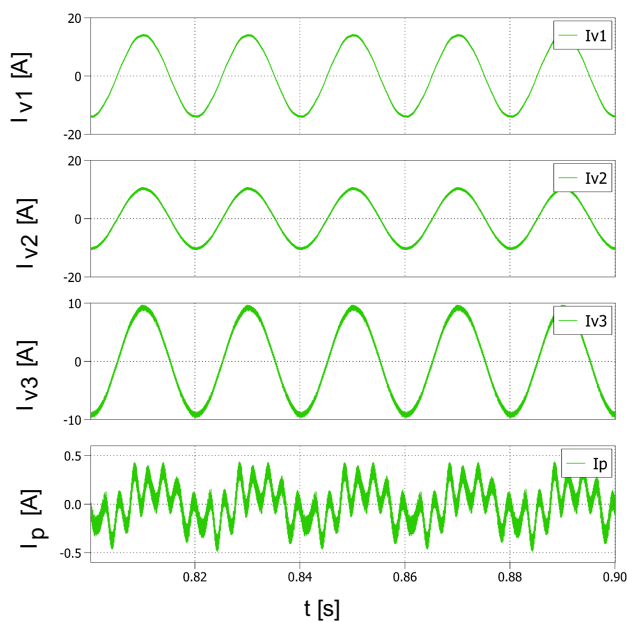
Obr. 3.39: Průběhy složek proudů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$

Pomocí střídače byl vykompenzován téměř celý poruchový proud. Jeho hodnota se nyní pohybuje v řádech mA. V průběhu zbyly vyšší harmonické, které se o frekvenci 50 Hz nevykompenzují. Po odporové poruše se poruchový proud ještě více sníží.

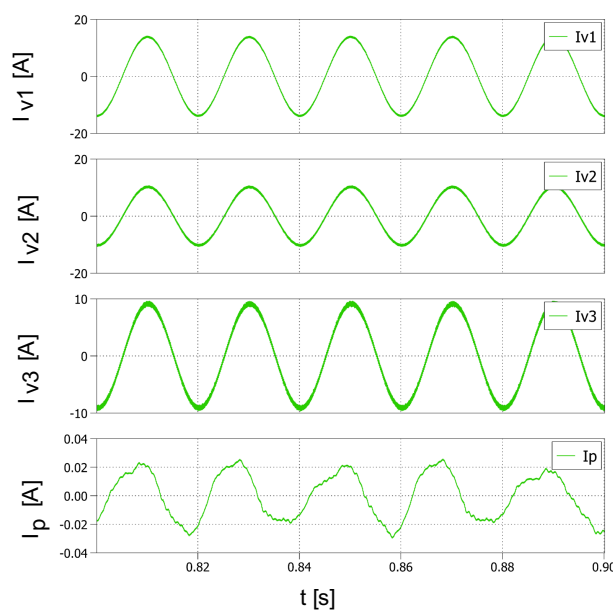


Obr. 3.40: Průběhy složek proudů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Proud poruchou je téměř nulový. Výhodou je možnost regulace střídače, díky které můžeme střídač aplikovat na jednotlivé složky poruchového proudu.



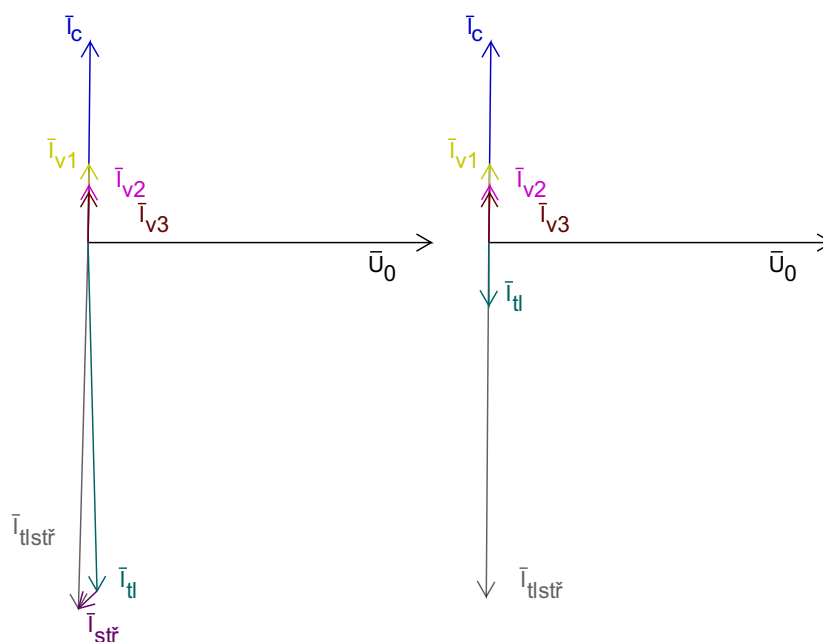
Obr. 3.41: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 1 \text{ m}\Omega$



Obr. 3.42: Průběhy proudů vývodů při $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Ani v průbězích proudů vývodů není téměř rozdíl. Při obou variantách zemního spojení přispívají stejně do místa poruchy.

3.6.1 Fázorové diagramy úplné kompenzace



Obr. 3.43: Fázorové diagramy: a) levý pro $R_F = 1 \text{ m}\Omega$ b) pravý $R_F = 8 \text{ k}\Omega$

Z fázorových diagramů je patrné, že poruchový i svodový proud jsou zcela vykompenzovány. Proudy vývodů mají kapacitní charakter. Pro kovovou poruchu je střídačem odstraněna celá velikost svodové složky. Část kapacitního proudu vykompenzovala tlumivka a zbytek byl vykompenzován střídačem. U odporové poruchy byla část svodového proudu snížena zvýšením R_F . Zbylý poruchový proud byl vykompenzován střídačem. V obou stavech jsou napětí U_0 téměř stejně velké, to je zapříčiněno malým úbytkem napětí na postižené fázi.

4 Závěr

Úkolem provozovatelů distribučních sítí je dodávka elektrické energie v požadované kvalitě k odběrateli. Avšak provozovatel musí zajistit ještě jeden důležitý úkol, tím je nepřetržitost dodávky elektrické energie. Z hlediska topologie sítí vysokého napětí hovoříme o venkovních vedeních. Ty jsou kvůli své rozloze často vystavovány zemním spojením. Ať už mám na mysli přechodné zemní spojení způsobené atmosférickými podmínkami nebo trvalé. I přesto, že v těchto sítích, tedy neúčinně uzemněných a izolovaných, nedosahuje hodnota poruchového proudu vysokých hodnot, je třeba klást důraz na bezpečnost. V místech zemní poruchy mohou vznikat nebezpečná kroková napětí a hrozí tak úraz elektrickým proudem. Z tohoto a také z několika dalších technických důvodů dochází ke kompenzaci proudu místa poruchy.

V této diplomové práci jsem provedl řadu simulací, abych ověřil metody kompenzace poruchového proudu. První simulací byla kompenzace poruchového proudu pomocí Petersenovy tlumivky. Zde jsem porovnával eliminaci při podkompenzování, vykompenzování a překompenzování jalové složky. Tlumivka se provozuje podladěná z důvodů nesymetrie při jejím úplném naladění. Po kompenzaci tak místem poruchy protéká zbytkový proud. Při úplné kompenzaci docílíme vykompenzování celé jalové složky, ale zároveň se dostáváme k maximální hodnotě U_0 . Vzhledem k tomu, že poruchový proud je tvořen jen činnou složkou svodů, jejíž hodnota je v řádech mA, může docházet k ztížené detekci zemního spojení. Stav překompenzování je nejvíce nežádoucí. Cívka je zdrojem jalové složky induktivního charakteru a tu dodává do sítě.

Do pomocného vinutí tlumivky lze připojit polovodičový měnič. Nastavením fázového posuvu a regulací velikosti generovaného proudu můžeme kompenzovat jak jalovou, tak i činnou část poruchového proudu. V této spolupráci dochází k téměř úplnému odstranění poruchového proudu. Nabízí se tak možnost provozu tlumivky s větší podkompenzací, čímž snížíme nesymetrii sítě. Na druhou stranu je třeba brát v úvahu složitost provedení těchto měničů, a to z hlediska poruchovosti. Pokud větší část jalové složky proudu odkompenzujeme tlumivkou tak, že poruchový proud nebude dosahovat velkých úrovní při poruše měniče, je tato spolupráce velmi s výhodná a účinná.

Přílohy

Příloha 1 – skript pro dvouhodnotové řízení v programu Simulink

```
function [v1,v2,iw] = fcn(tclk,i)

iw =Im*cos(2*pi*50*tclk);

hystereze = 5;

persistent vetev1;
if isempty (vetev1)
    vetev1=false;
end

persistent vetev2;
if isempty (vetev2)
    vetev2=false;
end

if (i>=0)

    if (i>iw+hystereze/2)
        vetev1=false;
        vetev2=true;

    elseif (i<iw-hystereze/2)
        vetev1=true;
        vetev2=false;
    end
else
    if (i<iw-hystereze/2)
        vetev1=true;
        vetev2=false;
    elseif (i>iw+hystereze/2)
        vetev1=false;
        vetev2=true;
    end
end

v1=vetev1;
v2=vetev2;
end
```

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] CHEMIČINEC IGOR, MARVAN MIROSLAV, NEČESANÝ JAKUB, SÝKORA TOMÁŠ, TŮMA Jiří. Obchod s elektřinou. In: . B.m.: CONTE spol. s r.o., 2010, s. 201. ISBN 978-80-254-6695-7.
- [2] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Elektrizační soustava ČR* [online]. 2017 [vid. 2019-04-14]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18339524-Elektrizacni-soustava-cr.html>
- [3] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav* [online]. 2011. ISBN 978-80-01-04935-8. Dostupné z: <https://docplayer.cz/5613732-Provoz-distribu-nich-soustav-petr-toman-ji-i-drapela-stanislav-misak-jaroslava-orsagova-mar-n-paar-david-topolanek-a-kol.html>
- [4] NOHÁČ, Karel. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách* [online]. 2018. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/Prednasky/PJS-Pr-06.pdf>
- [5] ŠVAJNER, Michal. *Jednofázový střídač 12VDC/230VAC, 50Hz* [online]. B.m., 2017. Západočeská univerzita v Plzni. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/28586/1/Jednofazovy_stridac_12VDC-230VAC.pdf

