

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ  
ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Aktivní identifikace admitanční křivky  
v kompenzovaných sítích**

**Tomáš Valta**

**2019**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš VALTA**  
Osobní číslo: **E16B0068P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Aktivní identifikace admitanční křivky v kompenzovaných sítích**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Tato práce se zabývá aktivní identifikací netočivé admitanční křivky kompenzované sítě pomocí injecktáže signálu do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky.

1. Uveďte princip kompenzovaných sítí a Petersenovy tlumivky.
2. Uveďte základní metody ladění Petersenovy tlumivky.
3. Popište a odsimulujte metodu ladění Petersenovy tlumivky pomocí vyhodnocování netočivé složky admitance sítě aktivní injecktáží signálu do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

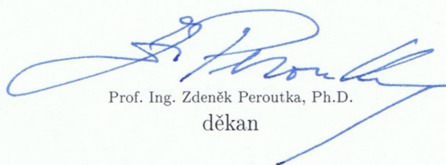
1. IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines.
2. IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jakub Talla, Ph.D.

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 13. června 2019



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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Předložená bakalářská práce se zabývá zjišťováním naladění Petersenovy tlumivky pomocí proudové injektáže, kdy je injektován signál s různými frekvencemi do pomocného vinutí. Dále je zde představena teorie kompenzovaných sítí a dalších možných způsobu provozování uzlů transformátorů. V práci jsou popsány různé metody ladění, které se používají pro správné nastavení indukčnosti Petersenovy tlumivky. Simulace proudové injektáže je prováděna pomocí programu PLECS. Díky simulaci proudové injektáže jsme schopni zjistit napěťovou odezvu sítě. Pomocí napěťové odezvy zjistíme admitanční křivku sítě, ze které vychází následné ladění Petersenovy tlumivky.

## **Klíčová slova**

Petersenova tlumivka, proudová injektáž, kompenzovaná síť, ladění tlumivky, napěťová odezva, admitanční křivka, kompenzační proud, kapacitní svodový proud, napěťová nesymetrie, zemní spojení

## **Abstract**

The presented bachelor thesis deals with the detection of the tuning of the Petersen coil by means of current injection, when a signal with different frequencies is injected into the auxiliary winding. Furthermore, the theory of compensated networks and other possible ways of operating transformer nodes is presented. There are described different tuning methods, which are used for correct tuning of Petersen coil inductance. Current injection simulation is performed using PLECS. By simulating current injection, we are able to detect the voltage response of the network. Using the voltage response, we find the admittance curve of the network from which the subsequent tuning of the Petersen coil is based.

## **Key words**

Petersen coil, current injection, compensated network, coil tuning, voltage response, admittance curve, compensation current, capacitive leakage current, voltage unbalance, earth fault

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Tomáš Valta

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jakobovi Tallovi, Ph.D, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

ÚVOD .....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	10
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	10
<b>1 KOMPENZOVANÁ SÍŤ .....</b>	<b>11</b>
1.1 KOMPENZOVANÁ SÍŤ .....	11
1.1.1 <i>Bezporuchový stav</i> .....	12
1.1.2 <i>Poruchový stav</i> .....	14
1.1.3 <i>Zemní spojení</i> .....	17
1.1.4 <i>Detekce zemního spojení</i> .....	20
1.1.5 <i>Nesymetrie sítě</i> .....	20
1.1.6 <i>Určení velikosti kapacitního proudu</i> .....	21
1.1.7 <i>Další možné způsoby provozování sítí</i> .....	21
1.2 PETERSENOVA TLUMIVKA .....	23
1.2.1 <i>Činnost Petersenovy tlumivky</i> .....	23
1.2.2 <i>Kompenzování zbytkového činného proudu</i> .....	25
1.3 REZONANČNÍ KŘIVKA .....	26
<b>2 ZÁKLADNÍ METODY LADĚNÍ PETERSENOVY TLUMIVKY .....</b>	<b>28</b>
2.1 METODA VYTVOŘENÍ UMĚLÉHO ZEMNÍHO SPOJENÍ .....	28
2.2 METODA MAXIMÁLNÍ VELIKOSTI NETOČIVÉ SLOŽKY .....	28
2.3 METODA ROZLADĚNÍ POMOCÍ KONDENZÁTORU .....	28
2.4 METODA PROUDOVÉ INJEKTÁŽE $F = 50$ Hz .....	29
2.5 METODA PROUDOVÉ INJEKTÁŽE $F \neq 50$ Hz .....	29
<b>3 AKTIVNÍ IDENTIFIKACE ADMITANČNÍ KŘIVKY .....</b>	<b>30</b>
3.1 PROUDOVÁ INJEKTÁŽ DO POMOCNÉHO VINUTÍ PETERSENOVY TLUMIVKY .....	30
3.1.1 <i>Volba frekvencí</i> .....	31
3.1.2 <i>Náhradní schéma sítě s proudovým injektorem</i> .....	32
3.2 SIMULACE S PROUDOVOU INJEKTÁŽÍ .....	33
3.2.1 <i>Stav vyladění</i> .....	35
3.2.2 <i>Přeladěná Petersenova tlumivka</i> .....	37
3.2.3 <i>Podladěná Petersenova tlumivka</i> .....	39
3.2.4 <i>Změna sítě</i> .....	41
3.2.5 <i>Proudová injecktáž při zemním spojení</i> .....	43
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>47</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>



## Úvod

Úkolem této bakalářské práce je odsimulovat identifikaci admitanční křivky kompenzované sítě pomocí proudové injekce. Simulace je prováděna na zjednodušeném schéma kompenzované sítě pro bezporuchový stav. Zjednodušené schéma je tvořeno paralelní kombinací svodové kapacity sítě společně s indukčností Petersenovy tlumivky a činného svodu sítě. Pro zjištění admitanční charakteristiky je ke zjednodušenému schématu sítě ještě připojen proudový zdroj, který je generuje proud podle námi předem daného proudového signálu. Generovaný proudový signál neobsahuje složku 50 Hz. Tuto metodu nazýváme proudová injekce. Díky tzv. “procinkávání“ sítě proudovou injekcí, dostáváme napěťovou odezvu, s jejíž pomocí jsme schopni zjistit admitanční charakteristiku sítě. Proudová injekce patří mezi nejmodernější metody pro ladění Petersenovy tlumivky. V první části bakalářské práce je zmíněn princip činnosti kompenzovaných sítí v bezporuchovém stavu, ale i v poruchovém stavu. Dále zde nalezneme princip činnosti Petersenovy tlumivky a její zjednodušené schéma. V práci jsou popsány pojmy jako nesymetrie sítě, zemní spojení nebo zjišťování velikosti kapacitního proudu. V druhé části bakalářské práce jsou zmíněny metody pro naladění Petersenovy tlumivky. Jedná se o nejznámější metody ladění. Některé jsou již zastaralé a téměř se nepoužívají. Třetí část obsahuje samotnou aktivní identifikaci admitanční křivky, je zde zmíněno pár stavů, které mohou během provozu sítě nastat.

## Seznam symbolů a zkratk

$I_c$	Svodový kapacitní proud	(A)
$I_p$	Poruchový kapacitní proud	(A)
$U_f$	Fázové napětí vedení	(V)
$U_0$	Netočivá složka napětí	(V)
$U_L$	Napětí na Petersenově tlumivce	(V)
$U_n$	Sdružené jmenovité napětí sítě	(V)
$C$	Svodová kapacita vedení	(F)
$C_k$	Svodová kapacita vedení	(F/km)
$I_L$	Kompenzační proud	(A)
$L$	Indukčnost	(H)
$S_{PT}$	Zdánlivý výkon Petersenovy tlumivky	(VA)
$f$	Frekvence	(Hz)
VVN	Velmi vysoké napětí	
VN	Vysoké napětí	
NN	Nízké napětí	
PT	Petersenova tlumivka	
INJ	Proudová injektáž	

## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Kompenzovaná síť v bezporuchovém stavu	13
Obr. 2: Napěťové a proudové poměry v bezporuchovém stavu [7]	14
Obr. 3: Kompenzovaná síť při zemním spojení	15
Obr. 4: Časový průběh fázových napětí kompenzované sítě	15
Obr. 5: Časový průběh sdružených napětí kompenzované sítě	16
Obr. 6: Napěťové a proudové poměry při zemním spojení (ideální případ) [7]	17
Obr. 7: Časový průběh netočivé složky napětí při kovovém zemním spojení	19
Obr. 8: Časový průběh netočivé složky napětí při odporovém zemním spojení $1000\Omega$	20
Obr. 9: Časový průběh netočivé složky napětí při odporovém zemním spojení $8000\Omega$	20
Obr. 10: Schéma Petersenovy tlumivky [5]	26
Obr. 11: Rezonanční křivka [3]	28
Obr. 12: Náhradní schéma s proudovou injektáží	33
Obr. 13: Časový průběh injektovaného proudového signálu	35
Obr. 14: Spektrální analýza injektovaného proudového signálu	35
Obr. 15: Spektrální analýza sítě při vyladěné tlumivce	36
Obr. 16: Průběh proudů při zemním spojení – správné naladění Petersenovy tlumivky	37
Obr. 17: Průběh proudů při zemním spojení – přeladěný stav	38
Obr. 18: Spektrální analýza sítě při přeladěné tlumivce	39
Obr. 19: Spektrální analýza sítě při podladěné tlumivce	40
Obr. 20: Průběh proudů při zemní spojení – podladěný stav	41
Obr. 21: Spektrální analýza sítě při odpojení vývodu	42
Obr. 22: Spektrální analýza sítě při hledání nového minima admitanční křivky	43
Obr. 23: Spektrální analýza sítě při novém vyladěné tlumivky	43
Obr. 24: Náhradní schéma sítě při zemním spojení s proudovou injektáží	44
Obr. 25: Spektrální analýza sítě při zemním spojení	44
Tabulka 1: Přehled hodnot prvků použitých v simulaci	33
Tabulka 2: Přehled injektovaných frekvencí	34

## Kompenzovaná síť

### 1.1 Kompenzovaná síť

Kompenzované sítě se v České republice používají na hladině vysokého napětí (35 kV, 22 kV). Tyto sítě vylepšují nevýhody izolovaných sítí, jako je například potlačení přepětí při zhášení zemního spojení a menší dotykové napětí, které není po kompenzaci nebezpečné v místě poruchy. Kompenzace se provádí pomocí Petersenovy (zhášecí) tlumivky (bude dále popsána), tlumivka se připojuje mezi nulový bod transformátoru a zem. Při poruše v síti vzniká zemní spojení, kdy proud tekoucí místem zemního spojení je díky kompenzaci malý a kapacitního charakteru. Naopak v síti účinně uzemněných (střed transformátoru je přímo spojen se zemí) vzniká jednofázový zkrat, poruchový proud je zde mnohem větší a má indukční charakter. Díky kompenzaci je možné síť provozovat i během poruchy, tím se zajistí kvalita dodávky energie. Pro provozování sítě během poruchy je třeba, aby Petersenova tlumivka byla co nejlépe naladěna. Petersenova tlumivka je rezonančně vyladěna, na základní frekvenci sítě 50 Hz, s celkovou svodovou kapacitou všech fází. Tyto fáze musejí být připojeny na stejný transformátor, jako je připojena Petersenova tlumivka. Mezi výhody kompenzované sítě můžeme zařadit [1, 7]:

- malý poruchový proud tekoucí zemí
- k uhašení oblouku dochází samočinně
- dotykové a krokové napětí je malé
- ekonomický dopad, uzemnění stožáru se může dimenzovat jen na hodnotu zbytkového proudu a je tedy levnější

Nevýhodou kompenzované sítě je:

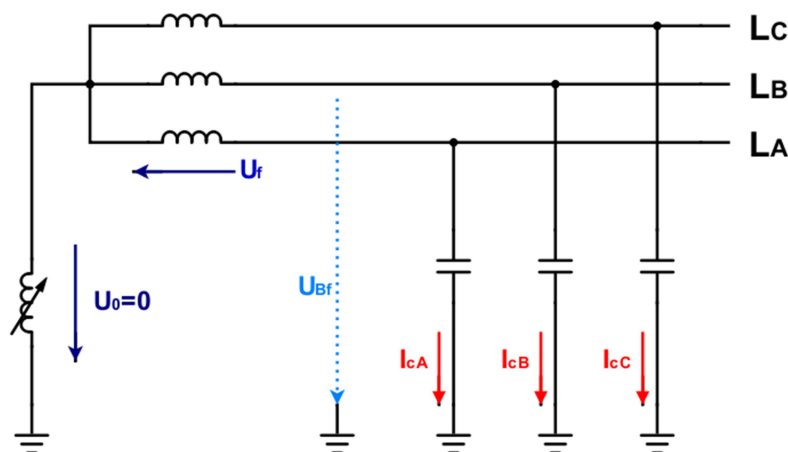
- napětí mezi fází a zemí může být větší kvůli rezonanci
- není účinná v kabelovém vedení.

Mezi nejmodernější metody ladění Petersenovy tlumivky patří metoda proudové injektáže.

Můžeme provést i kompenzaci kabelového vedení, ovšem zde nastává problém při hodnotě poruchového proudu  $I_p > 5$  A. Dochází k zapálení oblouku a jednofázová porucha přechází na vícefázovou poruchu, proto zde neuplatníme funkci Petersenovy tlumivky, a to zhášení oblouku. Vyladění tlumivky je zde náročné, proto se mezi nulový bod transformátoru a zem zapojuje odpor. Použitím odporu dosáhneme omezení velikosti poruchového proudu. Kabely se méně tepelně namáhají. Zapojení odporu má význam při tlumení přepětí a zajistí správné fungování ochran [5, 7].

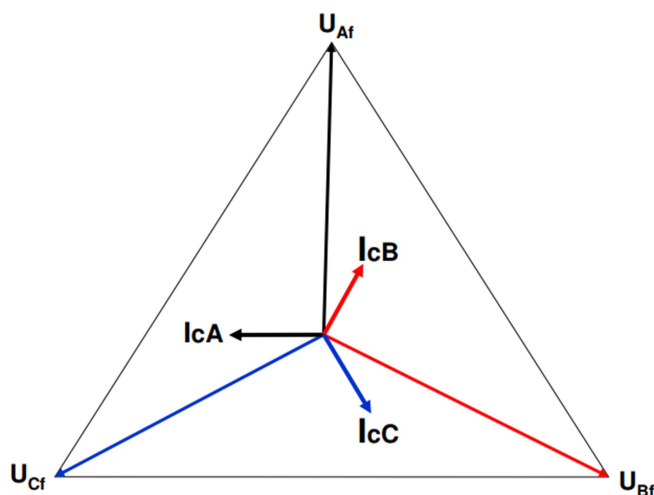
### 1.1.1 Bezporuchový stav

Obecné schéma kompenzované sítě v bezporuchovém stavu ukazuje *obr. 1*.



*Obr. 1* Kompenzovaná síť v bezporuchovém stavu

V ideálním bezporuchovém stavu je velikost napětí fáze-zem rovna fázové hodnotě, na *obr. 1* je takto naznačeno napětí  $U_{Bf}$ . Napětí mezi fázemi má hodnotu sdruženého napětí. Jednotlivá fázová napětí jsou vůči sobě posunuta o  $120^\circ$ . Uzlové napětí  $U_0$  na Petersenově tlumivce je rovno nule (uvažujeme stav, kdy se v soustavě nevyskytuje nesymetrie), tlumivka nevytváří žádný kompenzační proud  $I_L$ . Svodové kapacitní proudy jsou fázově posunuty o  $90^\circ$  oproti fázovým napětím jednotlivých fází viz *obr. 2*. V praxi je situace jiná a v síti vzniká nesymetrie, napětí fází nejsou stejně velká, fázový posun není  $120^\circ$ . To zapříčiní výskyt nulové složky napětí  $U_0$  i v bezporuchovém stavu.



Obr. 2 Napěťové a proudové poměry v bezporuchovém stavu[7]

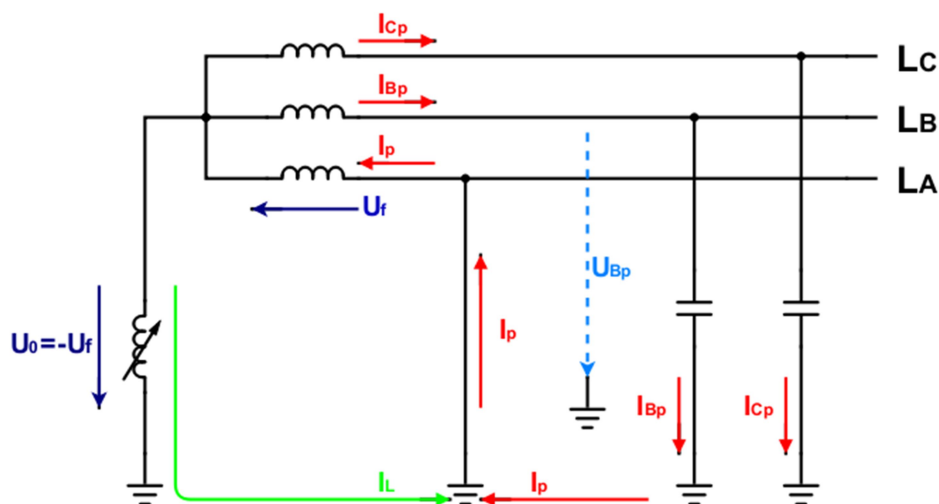
Vedení a zem tvoří elektrody svodových kondenzátorů, přes které tečou svodové kapacitní proudy  $I_c$ . Tyto kapacitní proudy jsou v bezporuchovém stavu rovny velikosti vycházející z rovnice 1.1 (uvažujeme stav, kdy se v soustavě neobjevuje nesymetrie), vzájemně jsou posunuty o  $120^\circ$  jak naznačuje obr. 2. Při vektorovém součtu je jejich výsledná hodnota právě rovna nule. Proto se v ideálním bezporuchovém stavu tyto proudy navzájem vruší. Velikost ideálního svodového proudu  $I_c$  je dána vztahem [7]:

$$\bar{I}_{cA} = \bar{I}_{cB} = \bar{I}_{cC} = \frac{\bar{U}_{Bf}}{-jX_c} = j\omega C \cdot \bar{U}_{Bf} = j\omega C \cdot \bar{U}_f = j\omega C_k \cdot \Sigma l \cdot \bar{U}_f \quad (1.1)$$

V reálném případě nejsou svodové kapacitní proudy stejně velké, vzájemný posun mezi nimi nebude  $120^\circ$ . Z toho plyne, že při vektorovém součtu, těchto tří kapacitních proudů, bude do země téct svodový kapacitní proud, řádově asi stovky mA. Velikost svodového proudu není určena místem vzniku poruchy, jako je tomu u sítě účinně uzemněné, ale je závislá na rozsahu celé sítě. Na velikost proud přispívají i svodové kapacity sousedních vývodů. Svodová kapacita jednoho vodiče venkovního vedení 22 kV je přibližně  $C_k = 10$  nF/km [1, 7].

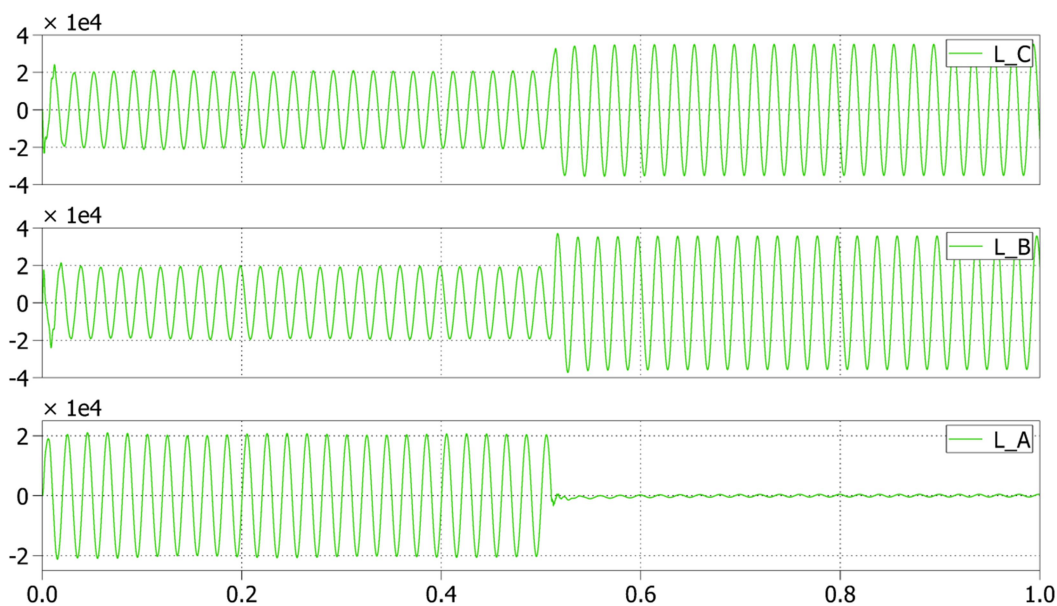
### 1.1.2 Poruchový stav

Kompenzovaná síť při zemním spojení, uvažováno kovové spojení, je naznačena na obr. 3.



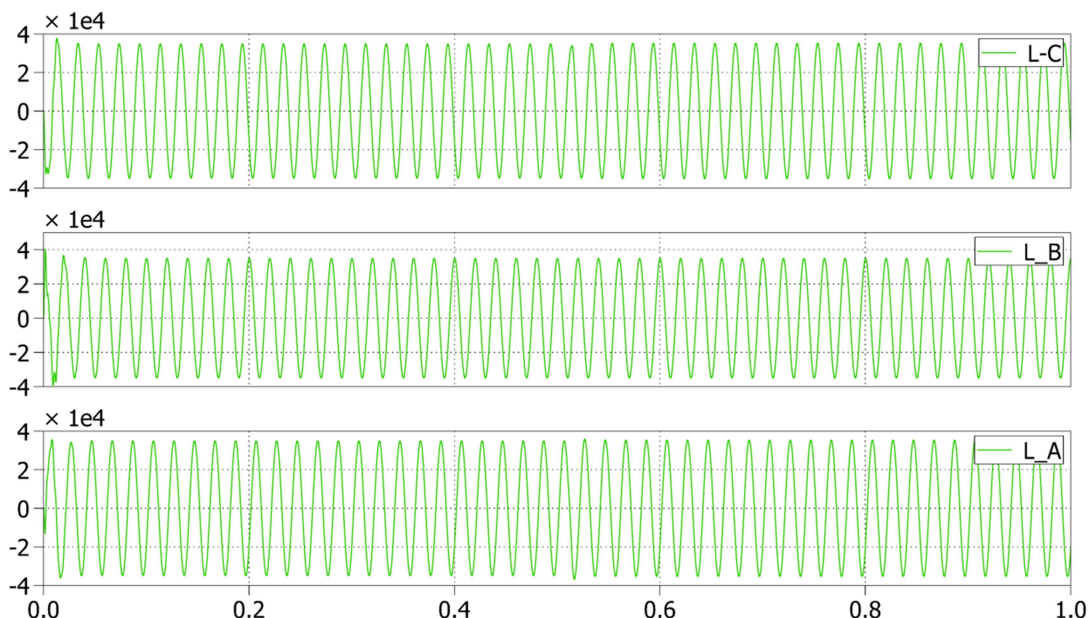
Obr. 3 Kompenzovaná síť při zemním spojení

Mezi nejčastější poruchu kompenzované sítě můžeme zařadit zemní spojení, dochází dotyku fáze se zemí. Při poruše nastává deformace hvězdy fázových napětí, viz obr. 6. Napětí mezi neporušenými fázemi a zemí nabývá hodnotu sdruženého napětí. Časový průběh jednotlivých napětí fází můžeme vidět na obr. 4, kde je pomocí simulace znázorněn tento přechod z fázové hodnoty na sdruženou, protože země získává potenciál vadné fáze. Napětí neporušených fází, při zemním spojení, svírají úhel  $60^\circ$ .



Obr. 4 Časový průběh fázových napětí kompenzované sítě

K zemnímu spojení zde došlo v čase 0,5 s. Sdružená napětí sítě se nemění, to lze vidět na *obr. 5*, kde k zemnímu spojení také došlo v čase 0,5 s. Průběhy zobrazené na *obr. 4* a *5*, jsou simulovány ve vytvořené kompenzační síti v programu PLECS, schéma sítě je uvedeno v příloze.



*Obr. 5 Časový průběh sdružených napětí kompenzované sítě*

Poruchové kapacitní proudy  $I_{Bp}$  a  $I_{Cp}$  zvětší svojí hodnotu o  $\sqrt{3}$ , neboť hodnota napětí  $U_f$  (1.1) přechází z hodnoty fázové na hodnotu sdruženého napětí. Dochází k vektorovému součtu těchto dvou proudů a výsledná hodnota poruchové proudů  $I_p$  tekoucího zemním spojením potom je [7]:

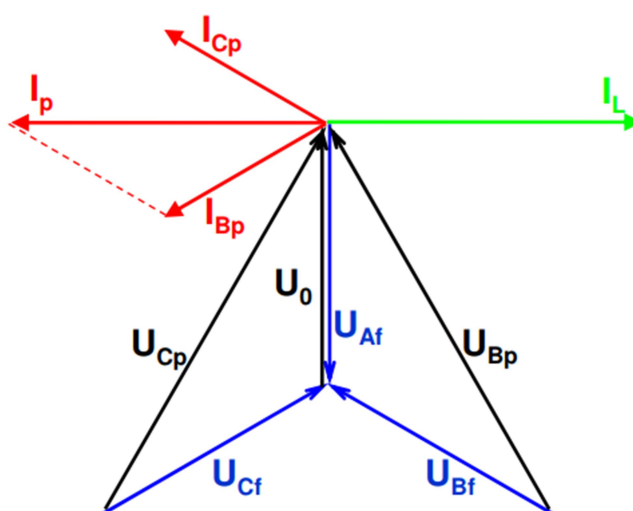
$$\bar{I}_p = \sqrt{3} \cdot \bar{I}_{Bp} = \sqrt{3} \cdot j\omega C \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{U}_f = 3 \cdot j\omega C \cdot \bar{U}_f = 3 \cdot j\omega C_k \cdot \Sigma l \cdot \bar{U}_f \quad (1.2)$$

Na Petersenově tlumivce se objevuje netočivá složka napětí  $U_0$  a velikosti fázové hodnoty. Díky napětí  $U_0$  na Petersenově tlumivce začne tlumivka vytvářet proud indukčního charakteru. Jeho velikost bude v ideálním případě rovna velikosti proudů  $I_p$ , ale s proudem  $I_p$  bude svírat úhel  $180^\circ$ . Bude se uzavírat místem zemního spojení. Vektorovým součtem proudů  $I_L$  a  $I_p$  docílíme vzájemnému vyrušení proudů, tedy dojde ke kompenzaci proudů  $I_p$  díky kompenzačnímu proudů  $I_L$ . Proudové poměry jsou vidět na *obr. 6*, jedná se o ideální stav, kdy dochází k úplné kompenzaci kapacitního proudů  $I_C$  a jsou zde zanedbány činné svody a odpor tlumivky. Při dokonalé kompenzaci je impedance sítě nekonečně velká, proto poruchový proud je nulový a fáze je považována za neporušenou.

Kompenzace je doporučována, pokud poruchový kapacitní proud při zemním spojení je větší než 5 A, následně při této hodnotě dochází ke vzniku elektrického oblouku. Elektrický oblouk se velmi často pohybuje a může zasáhnout vedlejší fázi, tím může dojít k dvoufázovému nebo trojfázovému zkratu. Při hořícím elektrickém oblouku dochází k přepalování vodičů, stožárů nebo izolátorů. Může nastat i případ, kdy elektrický oblouk hoří nestabilně. Tím dochází k přepětím v síti, na neporušených fázích se objevuje napětí až  $4 U_f$ . Pokud velikost poruchového kapacitního proudu dosáhne hodnoty 10 A je kompenzace nutnost. Výhodou této sítě je, že se i při zemním spojení může do jisté míry nadále provozovat. Díky kompenzaci kapacitních zemních proudů docílíme [1, 7]:

- malého zbytkového proudu protékajícího zemním spojením
- v místě zemního spojení nedochází k destrukcím zařízení
- přepětí není tak velké jako u izolované sítě
- v místě zemního spojení není dotykové napětí nebezpečné

Doba provozu je ovlivněna zhášecí tlumivkou, která se při kompenzaci zahřívá. Obvyklá doba provozu sítě při zemním spojení jsou asi 2 hodiny nebo do vyhledání poruchy [2].



Obr. 6 Napěťové a proudové poměry při zemním spojení (ideální případ)[7]



### 1.1.3 Zemní spojení

Jednofázové poruše, fáze se dotýká země, v kompenzovaných, izolovaných nebo neúčinně uzemněných sítích říkáme zemní spojení. Jedná se o extrémní případ nesymetrie sítě. Charakteristikou zemního spojení je, že místem poruchy protéká proud kapacitního charakteru. Velikost tohoto proudu je závislá na celém rozsahu sítě. Pokud je proud větší než 5A dochází k zapálení oblouku, který přepaluje izolátory, stožáry a vodiče. Poškozením zbylých dvou fází se zemní spojení mění na dvoufázový či třífázový zkrat, to se hlavně objevuje u kabelového vedení. Základní identifikátor zemního spojení je, pokud hodnota netočivé složky napětí  $U_0$  je větší než 30% fázové velikosti napětí dané soustavy. Při překročení této velikosti je vyhodnocena porucha jedné fáze. Ke zjištění vadné fáze může posloužit připojení odporníku. Odporník nám uměle zvýší hodnotu poruchového proudu, hlavně jeho činnou složku, která je už snadno detekovatelná [7].

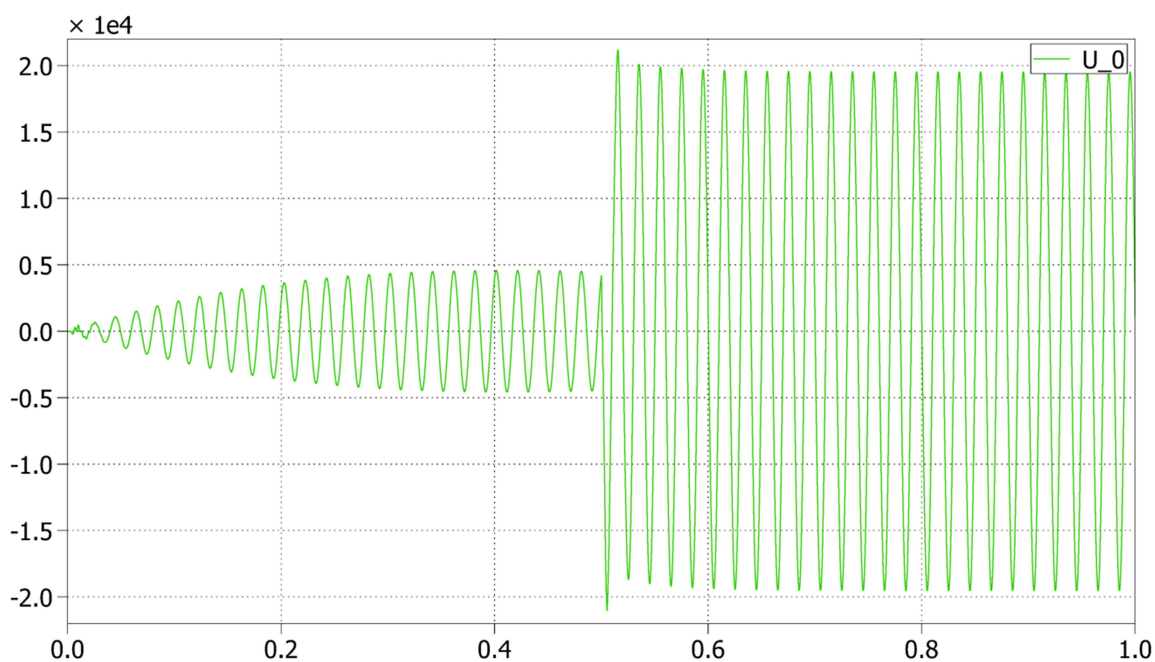
Druhy zemních spojení rozdělujeme podle hodnoty odporu v místě poruchy [1]:

- kovová zemní spojení – kde odpor poruchy je velmi malý, řádově jednotky  $\Omega$ . Díky malému tlumení přechodových jevů a velkému poruchovému proudu, je identifikace vadné fáze snáze zjištělná. Jeho výskyt je minimální.
- oblouková zemní spojení – odpor poruchy je tvořen odporem oblouku, který je řádově stovky  $\Omega$  velký. Dochází zde k velkým přepětím z důvodu přerušovaného hoření oblouku.
- odporová zemní spojení – kde odpor poruchy jsou stovky  $\Omega$  (železobetonové sloupy) až jednotky  $M\Omega$  (dřevěné sloupy). Díky velkému odporu zemního spojení je poruchový proud omezován, přechodné jevy jsou tlumeny. Nalezení porušené fáze je složité. Nejčastější druh zemního spojení.

A podle doby trvání zemního spojení [1]:

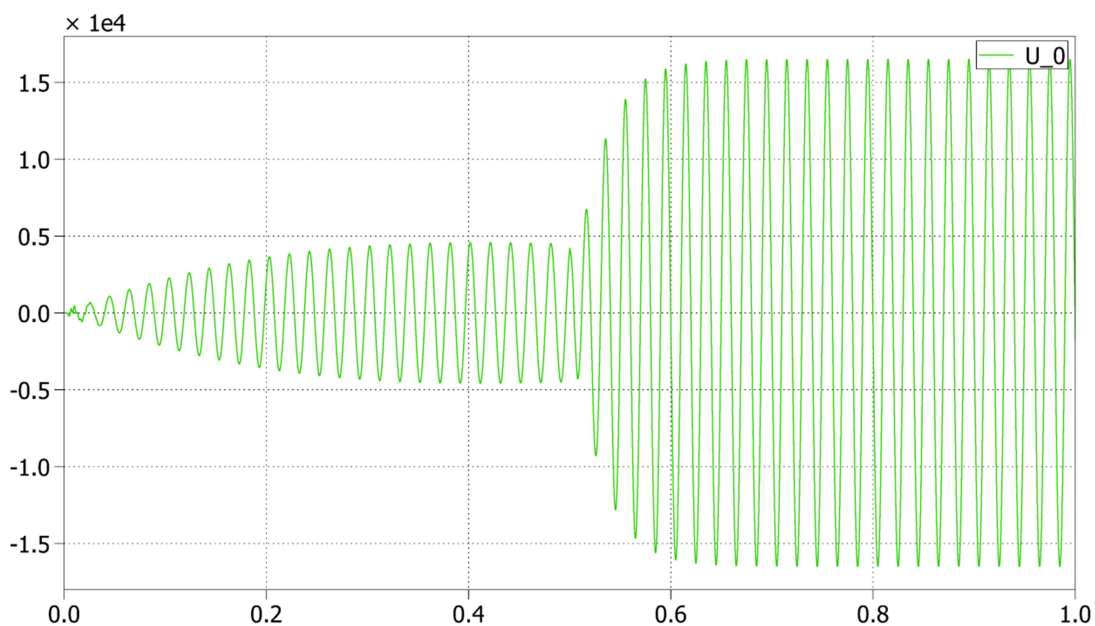
- nepřerušované (trvalé) – od 10 min až do několika hodin
- krátkodobá – do 5 minut
- mžiková – do 0,5 s
- přerušovaná – krátkodobá a mžiková, dochází k opakovanému zapalování oblouku

Na obr. 7 je zobrazen časový průběh netočivé složky napětí  $U_0$  při kovovém zemním spojení. Velikost odporu zemního spojení je při simulaci rovna  $10 \Omega$ . Díky malému odporu zemního spojení, je napětí  $U_0$  velké a lze snadno vyhodnotit, že došlo k poruše. Při této poruše je tedy splněna podmínka, že hodnota netočivé složky napětí  $U_0$  je větší než 30 % fázové hodnoty napětí sítě. Při zemním spojení dohází v síti k přechodným dějům. Během přechodných dějů dochází k nabíjení resp. vybíjení svodových kapacit a indukčnosti vedení. Přechodné děje mohou způsobit vysoká přepětí. Poměrně velkou hodnotu netočivé složky napětí, ve stavu sítě bez zemního spojení  $t < 0,5s$ , způsobuje nesymetrie svodových kapacit.



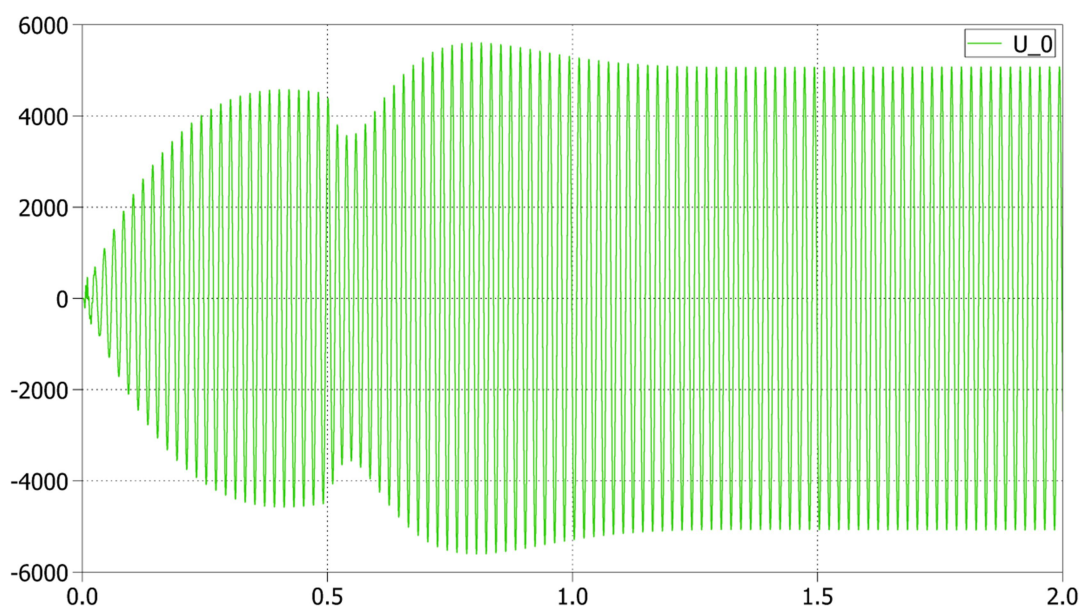
Obr. 7 Časový průběh netočivé složky napětí při kovovém zemním spojení

Jako druhý příklad je zde uvedeno zemní spojení, kdy je velikost odporu tohoto zemního spojení rovna  $1000 \Omega$ . Jedná se tedy o odporové zemní spojení. Časový průběh je zobrazen na obr. 8. Velikost netočivé složky napětí je menší než při kovovém zemním spojení.



Obr. 8 Časový průběh netočivé složky napětí při odporovém zemním spojení  $1000\Omega$

Pokud je hodnota odporového zemního spojení velká, ve třetím případě je jeho hodnota rovna  $8000 \Omega$ , může být velikost netočivé složky napětí v případě poruchy malá, téměř stejná jako běžně se vyskytující nesymetrie napětí. Vyhodnocení poruchy není již tak jednoduché a ochrana nemusí toto zemní spojení vyhodnotit jako poruchu. Tento průběh je zobrazen na obr. 9. Průběhy jsou simulovány v modelu uvedeného v příloze.



Obr. 9 Časový průběh netočivé složky napětí při odporovém zemním spojení  $8000\Omega$

#### 1.1.4 Detekce zemního spojení

V kompenzované síti bývá detekce zemního spojení obtížnější než v ostatních způsobech uzemnění a to z důvodu nízkého poruchového proudu. Ochranná zařízení v kompenzovaných sítích používají přechodové děje (transienty), které vznikají během vzniku zemního spojení. Přechodné děje se objevují kvůli nabíjení neporušených fází v závislosti na zvýšení napětí během poruchy a na vybíjení postižené fáze. Podobné přechodné děje se vyskytují i v izolovaných sítích, protože mají podobné napěťové poměry jako kompenzovaná síť. Ochrany založené na sledování transientů navržené pro kompenzovanou síť, mohou být použity i v síti izolované. Pokud není síť dokonale vykompenzovaná, zemním spojením nám protéká zbytkový proud, ten nám může sloužit také k detekci poruchy [9].

#### 1.1.5 Nesymetrie sítě

Napěťová nesymetrie se projevuje v každé soustavě. Je způsobena nesymetrií svodových kapacit vůči zemi. Je také způsobena svodovými odpory, ty vznikají nedokonalou izolací a korunou. Svod nemá na nesymetrii takový vliv jako právě kapacita. Rozdílné velikosti svodových kapacit fází jsou závislé na vzájemném umístění fází mezi sebou. Elektrická pole vodičů fází se vzájemně ovlivňují. Hodnotu svodové kapacity může ovlivnit například výška vodiče nad zemí, vzdálenost mezi vodiči a délka vodičů. Běžně dochází k situaci, kdy je jedna fáze ovlivňována více než zbylé fáze, proto bude hodnota této kapacity jiná. Větší nesymetrie se projevuje u venkovního vedení. U kabelového vedení jsou svodové kapacity vodičů téměř stejné, proto se zde objevuje pouze malá nesymetrie. Nesymetrie sítě je třeba k určení parametrů sítě, a proto je její výskyt v síti pro ladění Petersenovy tlumivky nezbytný. Právě u kabelového vedení, díky malé nesymetrii, je ladění obtížné a místo použití Petersenovy tlumivky se spíše používá rezistor. [3, 7]

### 1.1.6 Určení velikosti kapacitního proudu

Znalost velikosti kapacitního proudu je důležitá pro provoz sítě. Pro určení kapacitních proudů existují tři metody. Celá tato podkapitola vychází ze zdroje [1].

Experimentální měření proudu místem zemního spojení je jedna z metod. Kapacitní proud se měří při kovovém zemním spojení, soustava musí být provozována jako izolovaná. Jedná se o přímou metodu měření kapacitního proudu. Důležité je, aby byly zajištěny všechny vývody pod napětím, které mohou přispět na velikosti kapacitního proudu. Měření je prováděno většinou během doby, kdy je síť mimo provoz.

Dalším způsobem zjištění velikosti kapacitního proudu je nepřímá metoda. Lze provádět v kompenzované síti, kde se objevuje Petersenova tlumivka. Změnou polohy jádra tlumivky, tedy změnou indukčnost je hledán bod paralelní rezonance Petersenovy tlumivky s kapacitou soustavy. Pomocí této metody je určována netočivá složka napětí  $U_0$ , a díky proudu procházející Petersenovou tlumivkou je sestavována rezonanční křivka.

Pokud nejde kapacitní proud určit přímou ani nepřímou metodou je možné použít analytického odvození kapacitního proudu. Tato metoda počítá se zjednodušováním a daty od provozovatele soustavy. Hodnotu kapacitního proudu pomocí této metody lze pouze odvodit a z tohoto důvodu nebude výsledek tak přesný, jako u předchozích dvou metod

### 1.1.7 Další možné způsoby provozování sítí

**Přímo uzemněná síť** má nulový bod transformátoru spojený přímo se zemí. Nejčastěji se vyskytuje na hladině VVN a NN. Při poruše jedné fáze vzniká jednofázový zkrat, porušenou fází začnou téct obrovské zkratové proudy. Velikost tohoto proudu není závislá na rozloze sítě, jako tomu bylo u sítí kompenzovaných, ale na místě poruchy. Tedy čím je porucha dále od transformátoru, je velikost zkratového proudu menší, neboť podélné parametry vedení nám zvětšují odpor sítě. Vadnou fází je tedy třeba ihned odpojit. Díky velkému zkratovému proudu je nalezení porušené fáze velmi jednoduché a lze použít jednoduché ochrany. Náklady na vybudování sítě jsou malé. Síť VVN mají většinou indukční charakter, síť NN převažují činným charakterem.

Nevýhodou této sítě je, že se během poruchy tato síť nedá provozovat. V místě poruchy by tekla velký zkratový proud, který by mohl způsobit požár, ale i velké krokové napětí [7]. Další výhodou je velká admitance sítě pro všechny frekvence, to znamená, že v případě poruchy nedochází k přepětím a všechny proudové složky signálu jsou ihned svedeny.

V **izolované síti** není střed transformátoru spojen se zemí. Síť lze tedy provozovat i během poruchy, do doby vyhledání místa zemního spojení. Napěťové a proudové poměry jsou obdobné jako síti kompenzované, jen zde nedochází ke kompenzaci kapacitních zemních proudů pomocí Petersenovy tlumivky. Proto je její použití omezeno jen na malé sítě, většinou se jedná o průmyslové sítě, kde hodnota kapacitního proudu  $I_C$  nepřesahuje velikost 20 A. A tedy i v případě poruchy jsou poruchové proudy malé. Tento typ sítě se vyskytuje na hladině VN a NN [1, 7]. Tato síť má pro frekvenční složky malou admitanci, to způsobuje velké přepětí v síti. V izolovaných sítích vznikají největší přepětí ze všech možných zapojení uzlů transformátorů.

**Síť neúčinně uzemněná přes odpor**, střed transformátoru je přes odpor (stovky ohmů) spojen se zemí. Uplatňuje se zejména v kabelovém vedení, kde je naladění tlumivky velmi náročné a ekonomicky nevýhodné. Kabelové vedení má oproti venkovnímu vedení cca 30x větší hodnoty kapacitních proudů. Pro vykompenzování tohoto kapacitního proudu by byla třeba Petersenova tlumivka s velkým výkonem. Odpor v síti zajistí omezení proudu, procházející zemním spojením, a to příznivě pomůže při tlumení přepětí. Z neúčinně uzemněných sítí má uzemnění přes odpor nejnižší velikosti přepětí. Také je zde možné použít jednoduché číslicové ochrany. Jmenovitý proud odporu se při návrhu sítě volí vyšší než kapacitní proud. V případě poruchy dochází k vektorovému součtu kapacitního proudu a činného proudu procházejícího odporem. Celkový poruchový proud je poté z větší části činným proudem, který je snadno detekovatelný ochranami [2, 7].

## 1.2 Petersenova tlumivka

Petersenova tlumivka neboli zhášecí tlumivka je zařízení určené ke kompenzaci poruchových kapacitních proudů. V minulosti se ladění provádělo manuálně přes odbočky. Přepínáním těchto odboček docházelo ke změně počtu závitů cívky a tím se měnila indukčnost Petersenovy tlumivky. Ke změně docházelo skokově. Mohlo se stát, že se Petersenova tlumivka nenaladila na rezonanční hodnotu, neboť jemnost kroku nebyla dostatečně velká [3].

### 1.2.1 Činnost Petersenovy tlumivky

Dnešní Petersenovy tlumivky jsou samoladitelné pomocí automatické řídicí jednotky a ladění probíhá plynule. Ladění tlumivky se provádí zvětšováním resp. zmenšováním vzduchové mezery zasouváním resp. vysouváním feritového jádra. Tím dochází k plynulému nastavení indukčnosti tlumivky. Indukčnost tlumivky se ladí na takovou hodnotu, aby tvořila paralelní rezonanci s celkovou kapacitou sítě. Rezonanční hodnotu indukčnosti PT lze odvodit [7]:

$$\bar{I}_L = \bar{I}_p \rightarrow \frac{\bar{U}_f}{\omega L} = 3 \cdot \omega C \cdot \bar{U}_f \rightarrow L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C} \quad (1.3)$$

V ideálním případě vytváří Petersenova tlumivka proud o stejné velikosti jako je hodnota poruchového kapacitního proudu. Proud je indukčního charakteru a má opačný směr než poruchový proud. Proud se v místě zemního spojení vektorově sečtou, v ideálním případě dojde k úplné kompenzaci a místem zemního spojení nepoteče žádný proud, viz *obr. 6*. Ve skutečnosti to tak ovšem není, Petersenova tlumivka není ideální a na snížení kompenzačního proudu se budou podílet tyto jevy [7]:

- činný odpor vinutí cívky
- nepřesné nastavení indukčnosti PT
- činný svod vedení
- vyšší harmonické

Tím dojde k neúplné kompenzaci a místem zemního spojení bude protékat zbytkový proud. Tento zbytkový proud bude mít hodnotu kolem 3 % - 10 % poruchového kapacitního proudu a je převážně činného charakteru. Znalost poruchové proudu je také nezbytné pro návrh výkonu Petersenovy tlumivky. Je tedy důležité, aby tlumivka vytvořila proud o stejné velikosti jako je poruchový proud. Pokud by výkon tlumivky byl nedostatečný, nedokázala by vytvořit dostatečně velký kompenzační proud. Výkon tlumivky se vypočítá [1, 7]:

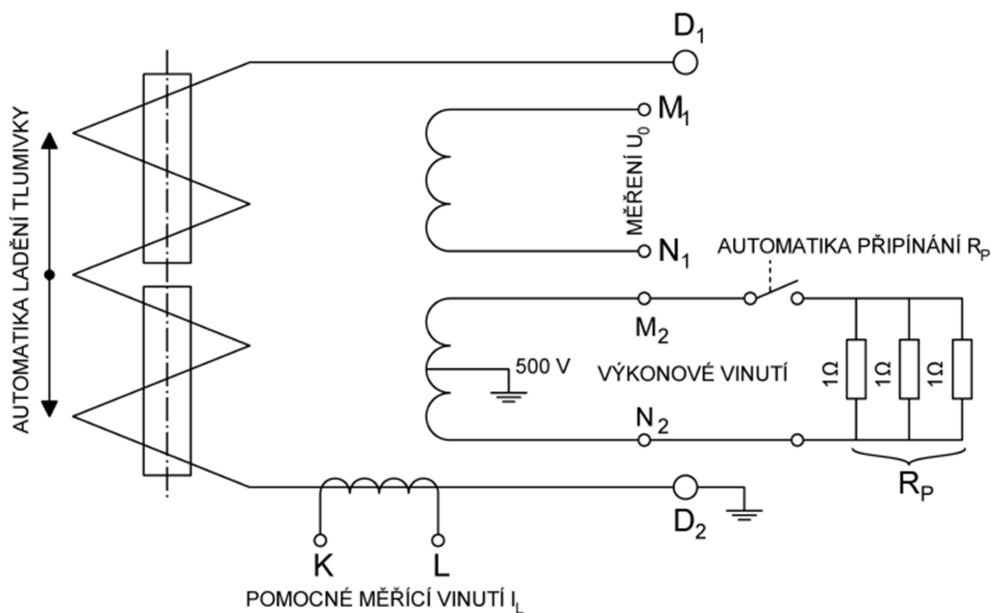
$$S_{PT} = \bar{U}_L \cdot \bar{I}_L = \bar{U}_L \cdot \bar{I}_p = \bar{U}_f \cdot 3 \cdot \omega C \cdot \bar{U}_f = \omega C \cdot \bar{U}_n^2 \quad (1.4)$$

Reálný výkon PT, který se instaluje v rozvodně, je ještě o 50% větší. Je to z důvodu rezervy, aby byla možnost připojit další vývody [7].

Zjednodušené schéma Petersenovy tlumivky můžeme vidět na *obr. 10*. Na obrázku je znázorněno [1]:

- $D_1, D_2$  – primární vinutí Petersenovy tlumivky, jeho indukčnost je pomocí feromagnetického jádra nastavováno na požadovanou hodnotu
- $M1, N_1$  – první pomocné vinutí, je k němu připojován přístroj na měření netočivé složky napětí  $U_0$
- $M_2, N_2$  – druhé pomocné vinutí, je určeno k připojování odporů. Ten slouží ke zvýšení hodnoty činného proudu, díky němuž můžeme detekovat v jaké fázi došlo k poruše. Také slouží k připojení přístroje pro proudovou injektáž, pomocí které ladíme Petersenovu tlumivku.
- $K, L$  – třetí pomocné vinutí, je určeno k měření kompenzačního proudu  $I_L$ .





Obr. 10 Schéma Petersenovy tlumivky[5]

### 1.2.2 Kompenzování zbytkového činného proudu

V případě zemního spojení nám Petersenova tlumivka kompenzuje poruchový kapacitní proud. V místě zemního spojení tedy teoreticky neteče žádný proud. Ovšem v praxi tomu tak není a místem zemního spojení protéká zbytkový proud činného charakteru. Jak již bylo zmíněno, tento zbytkový proud se objevuje díky činným svodům sítě nebo díky činnému odporu vinutí Petersenovy tlumivky. Vzniklý zbytkový proud může být nebezpečný (krokové napětí, ničení stožárů). Proto existují metody jak snížit tento zbytkový proud na co nejmenší hodnotu. Zde jsou uvedeny dvě nejpoužívanější:

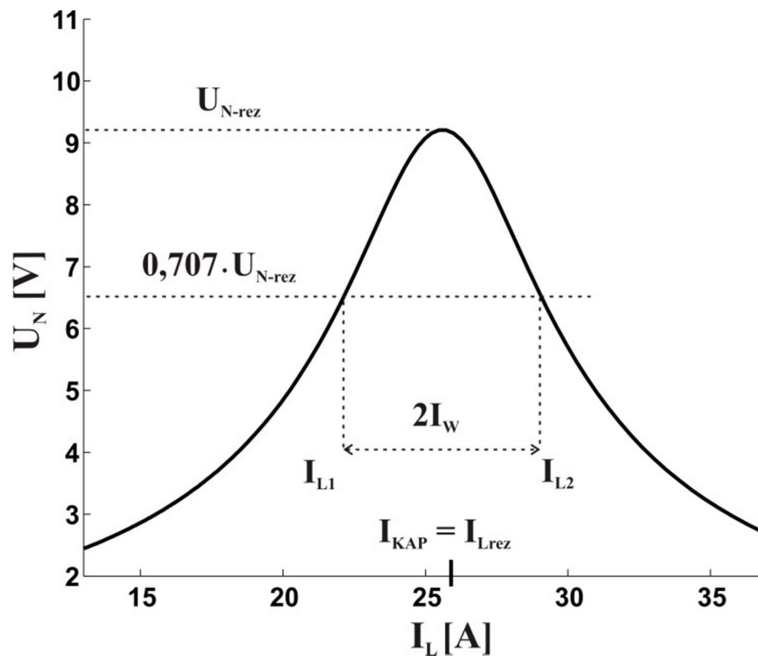
Jako první možné snížení zbytkové proudu je přizemnění postižené fáze, známé jako shunting. Tento typ kompenzace funguje na principu rozdělení poruchového proudu. Spínač je připojen mezi fází a přes odpor na zem. Po vzniku zemního spojení dochází v rozvodně k sepnutí spínače, ten nespíná okamžitě, ale až po předem dané době. Spínač nám přizemnění fázi a vzniká paralelní cesta pro poruchový proud. Odpor poruchy bývá větší než odpor přizemňování. Následně nastane situace, že zbytkový proud začne procházet v rozvodně do místa přizemnění, kde nedojde ke vzniku nebezpečí. Jedná se o levnou metodu na kompenzování zbytkových proudů [1].

Další metodou pro kompenzování zbytkové proudu je RCC Ground Fault Neutralizer vyvinutý firmou Swedish Neutral. Metoda spočívá v měření poruchového proudu a následné injektáží kompenzačního proudu, který je v protifázi ke zbytkovému proudu. Injektáž se provádí do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky. Tento systém poskytuje rychlé a úplné vykompenzování zbytkového zemního proudu. Systém od firmy Swedish Neutral dokáže, kromě kompenzace zbytkových proudů, navíc i spolehlivě vyhledat místo poruchy [6].

### 1.3 Rezonanční křivka

Pro správnou kompenzaci poruchových kapacitních proudů, je třeba znát rezonanční křivku námi řízené sítě. Rezonanční křivka je závislost mezi netočivou složkou napětí  $U_0$  a kompenzačním proudem protékajícím Petersenovou tlumivkou  $I_L$ . Průběh rezonanční křivky zajistíme odečítáním hodnot  $U_0$  a  $I_L$ , při kterém přeladíme Petersenovu tlumivku. Je nutné, aby byla síť v bezporuchovém stavu, tedy nedocházelo k zemnímu spojení. U dokonale symetrické sítě je téměř nemožné rezonanční křivku zaznamenat. Nulovým bodem transformátoru neprotéká žádný proud, a není zde ani žádné napětí  $U_0$ . Je tedy žádoucí, aby se v soustavě vyskytovala přirozená nesymetrie. U venkovního vedení je tato nesymetrie vcelku velká, a rezonanční křivka je strmá. Rezonanční křivka, v ideálním případě, má své maximum v nekonečnu, ovšem vlivem činného svodu má maximum konečnou hodnotu. Pokud je maximum rezonanční křivky velké, Petersenova tlumivka se úmyslně lehce rozladí, aby nebyl střed transformátoru při rezonanci namáhán. Toto se objevuje například u sítí s nízkými odpory. Kabelové vedení je velmi symetrické, tedy jeho kapacitní nesymetrie je velmi malá (svodová kapacita kabelového vedení je cca 30x větší než u venkovního vedení). Rezonanční křivka je plochá a naladění tlumivky je proto velmi obtížné. Je důležité zde vytvořit umělou nesymetrii pro správné zjištění rezonanční křivky [1, 7].

Ze znalosti rezonanční křivky sítě, kterou vidíme na *obr. 11*, lze určit důležité parametry sítě.



*Obr. 11* Rezonanční křivka [3]

Mezi tyto parametry sítě patří kapacitní proud  $I_C$  a proud tekoucí Petersenovou tlumivkou  $I_L$ . V případě paralelní rezonance soustavy jsou proudy  $I_C$  a  $I_L$  svou velikostí sobě rovny. Dalšími parametry jsou svodový proud  $I_W$ , činitel útlumu  $\alpha$  a činitel nesymetrie  $\varepsilon$ . Tyto parametry je možno vypočítat pomocí rezonanční křivky a těchto vzorců [1]:

$$I_W = \frac{I_{L1} - I_{L2}}{2}, \quad \alpha = \frac{I_W}{I_C}, \quad \varepsilon = \frac{U_{n-rez} \cdot \alpha}{100}$$

## 2 Základní metody ladění Petersenovy tlumivky

V následující kapitole je popsáno pět metod pro ladění Petersenovy tlumivky. První čtyři metody je možné použít při výskytu netočivé složky napětí. To se v síti objevuje díky běžné nesymetrii sítě nebo pomocí uměle vytvořenému proudu o frekvenci 50 Hz. Tyto metody ladění předpokládají, že v síti nedochází ke změnám parametrů, během ladění. Pátá metoda je ladění pomocí proudové injektáže. Tento proud neobsahuje frekvenci 50 Hz, neboť by tato hodnota nebyla rozeznatelná od nesymetrie sítě.

### 2.1 Metoda vytvoření umělého zemního spojení

Tato metoda spočívá ve vytvoření umělého zemního spojení. Vytvořeným zemním spojením začne protékat proud. Nastavováním indukčnosti Petersenovy tlumivky budeme hledat minimální hodnotu proudu. Při nalezení minimální hodnoty proudu, by měly být parametry Petersenovy tlumivky nastaveny na parametry sítě[4].

### 2.2 Metoda maximální velikosti netočivé složky

Úkolem ladící automatiky je zjistit změny konfigurace kompenzované sítě. Při změně je třeba, aby ladící automatika naladila Petersenovu tlumivku na nový bod rezonance. Při rezonanci je hodnota netočivé složky napětí  $U_0$  největší. Změna  $U_0$  slouží tedy jako indikace, že došlo ke změně parametrům sítě a je třeba nastavit indukčnost Petersenovy tlumivky. Pokud se indukčnost nastaví na správnou hodnotu, síť bude v rezonanci a hodnota netočivé složky  $U_0$  bude největší. Tato metoda vyžaduje nesymetrii sítě, aby bylo možné získat měřitelnou hodnotu  $U_0$ . Použití této metody v síti se značným podílem kabelového vedení může být problém. Rezonanční křivka v síti s kabelovým vedením je velmi plochá a nesymetrie velmi malá [1, 4].

### 2.3 Metoda rozladění pomocí kondenzátoru

Pokročilejší metoda pro naladění Petersenovy tlumivky je rozladěním polohové křivky. Polohová křivka  $U_0$  je v komplexní rovině kružnice. Tato kružnice se dá sestavit pouze pomocí tří bodů. Prvním bodem je počátek souřadnic komplexní roviny, druhý bod nám určí fázor napětí  $U_0$ . Třetího bodu docílíme krátkým rozladěním, které nám může zajistit např. kondenzátor.

Kapacitní reaktanci na malou chvíli připojíme paralelně k Petersenově tlumivce. Při malém napětí  $U_0$ , se v blízkosti rezonančního bodu, dá dobře měřit uhlová změna  $u_0$  [1, 4].

## 2.4 Metoda proudové injektáže $f = 50$ Hz

Při použití této metody je třeba, aby nulovým bodem protékal proud. Ten se v síti objeví díky přirozené nesymetrii sítě, ale v této metodě je právě do místa nulového bodu uměle injektován. Jedná se o proudový impuls a jeho velikost bývá v řádech jednotek ampér. Tento injektovaný proud musí mít frekvenci rovnou 50 Hz. Proud  $I_{INJ}$  je zároveň měřen s netočivou složkou napětí  $U_0$ .

$$Y_0 = \frac{I_{INJ}}{U_0} \approx G + j(B_C - B_{L_{PT}}) \quad (2.1)$$

$Y_0$  je admitance netočivé soustavy,  $I_{INJ}$  je injektovaný proud s frekvencí 50 Hz,  $U_0$  netočivá složka napětí,  $G$  je konduktance představující činný svod sítě a parametry  $B_C$  a  $B_{L_{PT}}$  jsou susceptance reprezentující svodovou kapacitu a Petersenovu tlumivku. Pomocí rovnice (2.1) a informací o poloze jádra Petersenovy tlumivky, můžeme vypočítat parametry sítě. Velkou výhodou této metody je, že ji lze použít v sítích s vysokou symetrií. Někdy může nastat i situace, kdy dochází k velkému rušení  $U_0$ , a nelze pomocí této metody zjistit parametry sítě a tedy ani naladit Petersenovu tlumivku na rezonanční hodnotu [3, 4].

## 2.5 Metoda proudové injektáže $f \neq 50$ Hz

Funkcí této metody je, že neinjektujeme proud o síťové frekvenci 50 Hz, ale injektujeme proudový signál o známých frekvencích. To nám zajistí potlačení napěťové odezvy frekvenční složky 50 Hz. V případě injektování složky 50 Hz by napěťová odezva nebyla rozeznatelná od přirozené nesymetrie. Tento signál se injektuje do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky. Proudový signál nám vytváří napětí na Petersenově tlumivce, kterou my použijeme jako napěťovou odezvu. Pomocí této napěťové odezvy a spektrální analýzy dokážeme zjistit parametry soustavy. Tímto parametrem je admitanční křivka sítě, která má v bodě paralelní rezonance, mezi indukčností Petersenovy tlumivky a celkové svodové kapacity sítě, své minimum.

## 3 Aktivní identifikace admitanční křivky

### 3.1 Proudová injektáž do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky

Proudový injektor se připojuje k pomocnému vinutí Petersenovy tlumivky. Proudový injektor generuje námi požadovaný proudový signál. Tento proudový signál obsahuje známé frekvenční složky, též známe i amplitudu těchto složek. Proudový signál nám na Petersenově tlumivce vytváří napětí, které nám slouží jako napěťová odezva na náš injektovaný proudový signál. Pomocí spektrální analýzy zjistíme naladění Petersenovy tlumivky. Výhodou použití proudové injektáže je především rychlé měření, vhodné použití i pro symetrické sítě, potlačení rušení složky 50 Hz. V praxi je dále třeba brát ohled na tyto požadavky proudového signálu [4]:

- **Proměnná amplituda složek**, z důvodu přizpůsobení se ztrátám, které vznikly spínacími stavy sítě. Jedno z nejpoužívanějších kritérií pro detekci zemního spojení je netočivá složka napětí  $U_0$ . V malých sítích jsou ztráty při spínání menší, proto bychom měli omezit i velikost vstříkovaného proudu. Tento proud by neměl překročit prahovou hranici detekčního systému pro zemní spojení, a to především v rezonančním bodě. Na druhé straně v případě, kdy je rozladění velké, nám malý vstříkovaný proud neposkytne spolehlivé měření netočivé složky napětí  $U_0$ . Zde je větší amplituda vstříkovaného signálu užitečná.
- Injektovaný signál by neměl obsahovat **frekvenční složku 50 Hz**. Při injektování složky 50 Hz, bychom nebyli schopni rozeznat napěťovou odezvu od nesymetrie sítě.
- Pomocí proudové injektáže s proměnnými frekvencemi je možné volit injektované frekvence tak, aby byly některé tyto **frekvence blízko rezonance sítě**. Díky tomu můžeme vstříkovat proud o malé hodnotě, ale bude to mít za následek velkou hodnotu netočivé složky napětí  $U_0$ .

Proudová injektáž se připíná pouze na krátký časový úsek. Připíná se při detekci změny netočivé složky napětí  $U_0$ . Tím probíhá kontrola, zda je soustava stále vyladěna, anebo je třeba provést přeladění Petersenovy tlumivky na novou rezonanční hodnotu. V symetrických sítích může být proudová injektáž zapnuta trvale, aby mohla ihned detekovat, všechny spínací operace v soustavě. Kombinace těchto dvou metod připínání proudové injektáže je možné a proudová injektáž se připíná například každých 10 minut [4].

### 3.1.1 Volba frekvencí

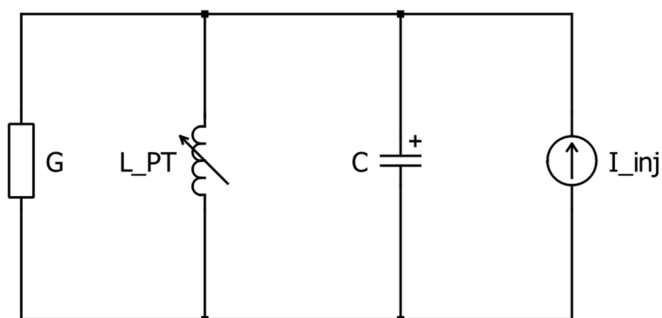
Správná volba frekvenčních složek je důležitá, kvůli napěťové odezvě. Frekvenci 50 Hz neinjektujeme, nebyla by rozeznatelná od nesymetrie sítě. Dále je dobré zvolit alespoň 2 frekvence, které budou blízko 50 Hz a to z důvodu odstranění vlivu sériových rezonancí. Vhodné také je, pokud námi zvolené frekvence splňují tento vzorec:

$$2500 \cong f_n \cdot f_{(2 \cdot n_{max}) - n + 1} \quad (3.1)$$

,kde  $n$  je námi zvolený počet injektovaných frekvencí. Při správném naladění Petersenovy tlumivky jsou napěťové odezvy symetrické. Na nalezení admitanční křivky by stačily pouze dvě frekvence, ovšem při použití více frekvenčních složek docílíme přesnější identifikace admitanční křivky. Námi volené frekvence nesmí obsahovat frekvenční složky signálu HDO, aby nedocházelo k jeho ovlivňování. Nevhodné je také injektovat frekvence, které jsou vyššími harmonickými, základní frekvence 50 Hz, jako 100 Hz nebo 150 Hz [8].

### 3.1.2 Náhradní schéma sítě s proudovým injektorem

Zjednodušené schéma kompenzované sítě je zobrazeno na *obr. 12*, je tvořeno celkovou svodovou kapacitou sítě  $C$ , indukčností Petersenovy tlumivky  $L_{PT}$ , celkovým činným svodem  $G$  a proudovým injektorem  $I_{inj}$ . Vytvořené zjednodušené schéma je platné pro bezporuchový stav, v síti nedochází k zemnímu spojení.



*Obr. 12 Náhradní schéma s proudovou injektáží*

Činný svod v sobě zahrnuje: činný svod sítě a činný svod vinutí Petersenovy tlumivky. Použité hodnoty prvků v náhradním schématu jsou vypsány v *tab.1*. Uvedená hodnota indukčnosti Petersenovy tlumivky  $L_{PT}$  je pro paralelní rezonanční stav s uvedenou svodovou kapacitou  $C$  při 50 Hz.

**Tabulka 1: Přehled hodnot prvků použitých v simulaci**

Název	Velikost	Jednotky
C	10	( $\mu\text{F}$ )
$L_{PT}$	1,0175	(H)
G	1000	( $\text{k}\Omega$ )



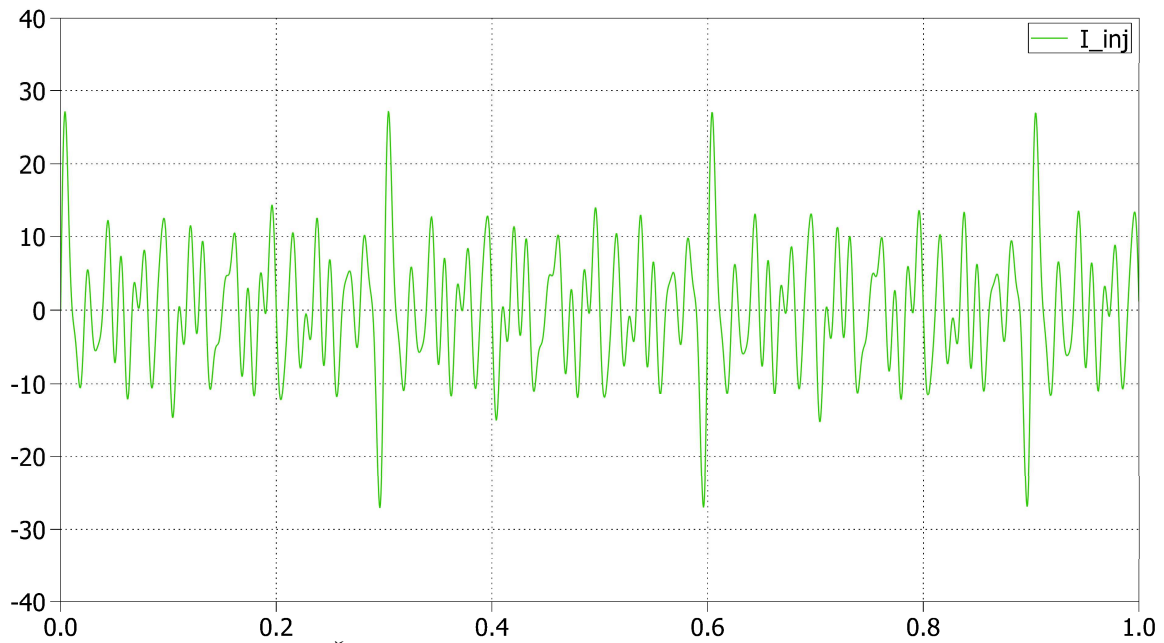
### 3.2 Simulace s proudovou injektáží

Simulace jsou provedeny v programu PLECS. Při těchto simulacích budeme do pomocného vinutí vstříkovat proudový signál. Proudový signál obsahuje známé frekvence. Volené frekvence jsou vypsány v *tab. 1*. Napěťová odezva je měřena voltmetrem a pomocí spektrální analýzy převáděna na spektrum, funkce spektrální analýzy je v programu PLECS implementována. Pro naše potřeby je důležité sledovat admitanční křivku sítě. Pokud spojíme vrcholy jednotlivých frekvenčních složek námi získané napěťové odezvy, dostáváme impedanční křivku. Admitanční křivka je poté pouze inverzní funkcí k námi získané impedanční křivce. Petersenovu tlumivku budeme nastavovat na různou hodnotu indukčnosti, abychom docílili různých stavů, které mohou nastat. V první části simulace je sledována napěťová odezva při správném naladění Petersenovy tlumivky pro frekvenci 50 Hz. Dále jsou zde uvedené případy, jako je podladěná nebo přeladěná Petersenova tlumivka. Předposlední simulace znázorňuje změnu sítě, v tomto případě odpojení jednoho z vývodů, a následné přeladění tlumivka. Poslední simulace slouží pouze k ukázce, že při zemním spojení, je použití proudové injektáže nevhodné.

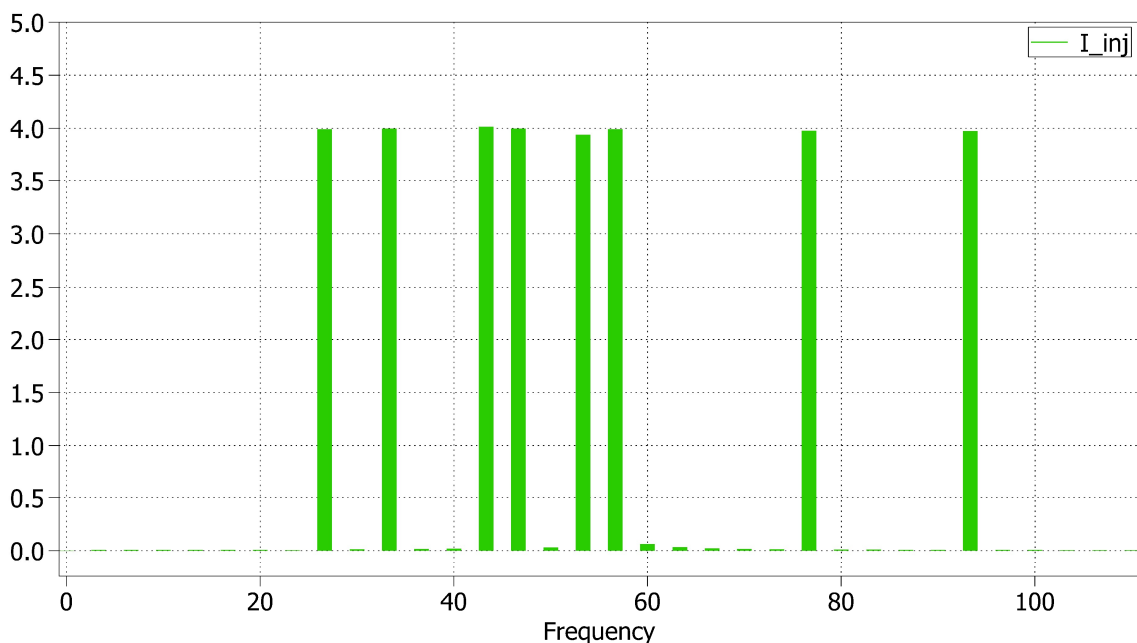
**Tabulka 2 : Přehled injektovaných frekvencí:**

$f_1(\text{Hz})$	26,667
$f_2(\text{Hz})$	33,333
$f_3(\text{Hz})$	43,333
$f_4(\text{Hz})$	46,667
$f_5(\text{Hz})$	53,328
$f_6(\text{Hz})$	56,610
$f_7(\text{Hz})$	76,659
$f_8(\text{Hz})$	93,324

Časový průběh a spektrální analýzu námi vstříkovaného proudového signálu můžeme vidět na obrázcích *obr. 13* a *obr. 14*. Vstříkovaný proud je generován pomocí funkce v programu PLECS a vytvořený signál je přiváděn do řízeného proudové zdroje.



Obr. 13 Časový průběh injektovaného proudového signálu



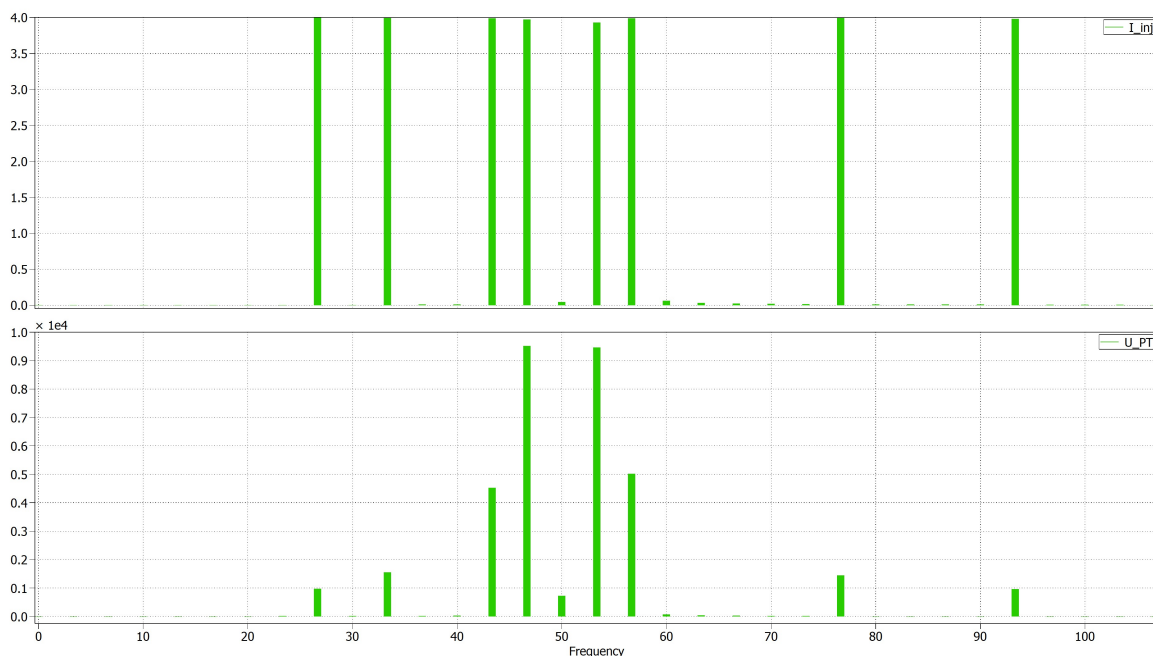
Obr. 14 Spektrální analýza injektovaného proudového signálu

Každá frekvenční složka injektovaného proudového signálu má amplitudu o hodnotě 4 A. Jako fundamentální frekvence byla zvolena frekvence o hodnotě 3,333 Hz, časové okno pro řešení spektrální analýzy má hodnotu 300 ms. Volba fundamentální frekvence a tedy i časového okna je důležitá pro rychlost určení napěťové odezvy. Pokud by časové okno bylo malé, injektovaný signál by nebyl v napěťové odezvě obsažený celý. To by vedlo k nepřesnému určení parametrů sítě a naladění Petersenovy tlumivky na správnou hodnotu by bylo obtížné.

Naopak pokud by časové okno bylo velké, injektovaný signál by v časovém okně obsahoval několik period signálu, které by již nebyly potřebné pro napěťovou odezvu, respektive pro určení parametrů sítě. Doba pro vyhodnocení napěťové odezvy a určení parametrů sítě by tedy byla dlouhá a to je v praxi nepřijatelné. Je nutné, aby při změně parametrů sítě, došlo k okamžitému přeladění Petersenovy tlumivky.

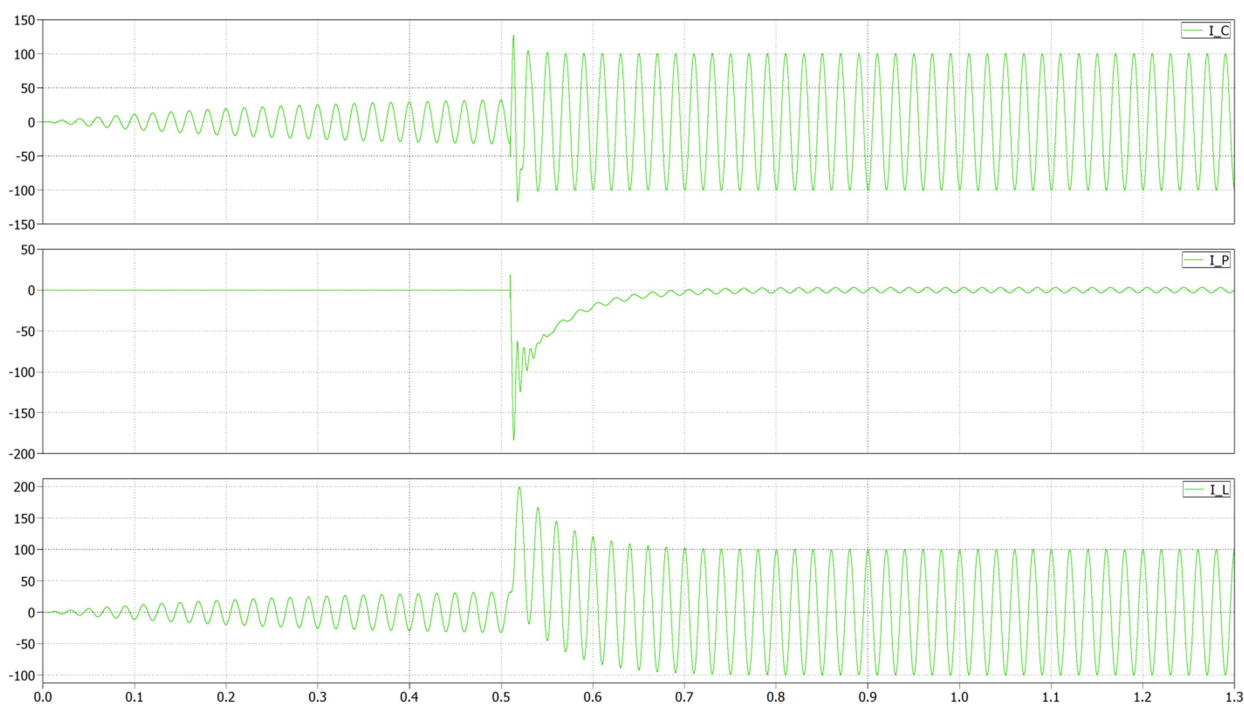
### 3.2.1 Stav vyladění

Petersenova tlumivka je naladěna na paralelní rezonanci se svodovou kapacitou sítě. Svodová kapacita sítě  $C$  je  $10 \mu\text{F}$ , hodnota indukčnosti  $L_{PT}$  je  $1,0175 \text{ H}$ . To znamená, že aby byl v případě zemního spojení byl poruchový proud vykompenzován, potřebujeme, aby měla Petersenova tlumivka právě hodnotu  $1,0175 \text{ H}$ . Napěťovou odezvu, při správně naladěné Petersenově tlumivce můžeme vidět na *obr. 15*. Z napěťové odezvy dostáváme impedanční křivku sítě při správném naladění. V místě kmitočtu  $50 \text{ Hz}$ , se nachází vrchol impedanční křivky a tedy i její maximální hodnota. Pro admitanční křivku by to byl přesný opak a v místě kmitočtu  $50 \text{ Hz}$  by měla admitanční křivka své minimum. Vychází to již ze zmíněné definice, že admitanční křivka je inverzní funkcí impedanční křivce.



Obr. 15 Spektrální analýza sítě při vyladěné tlumivce

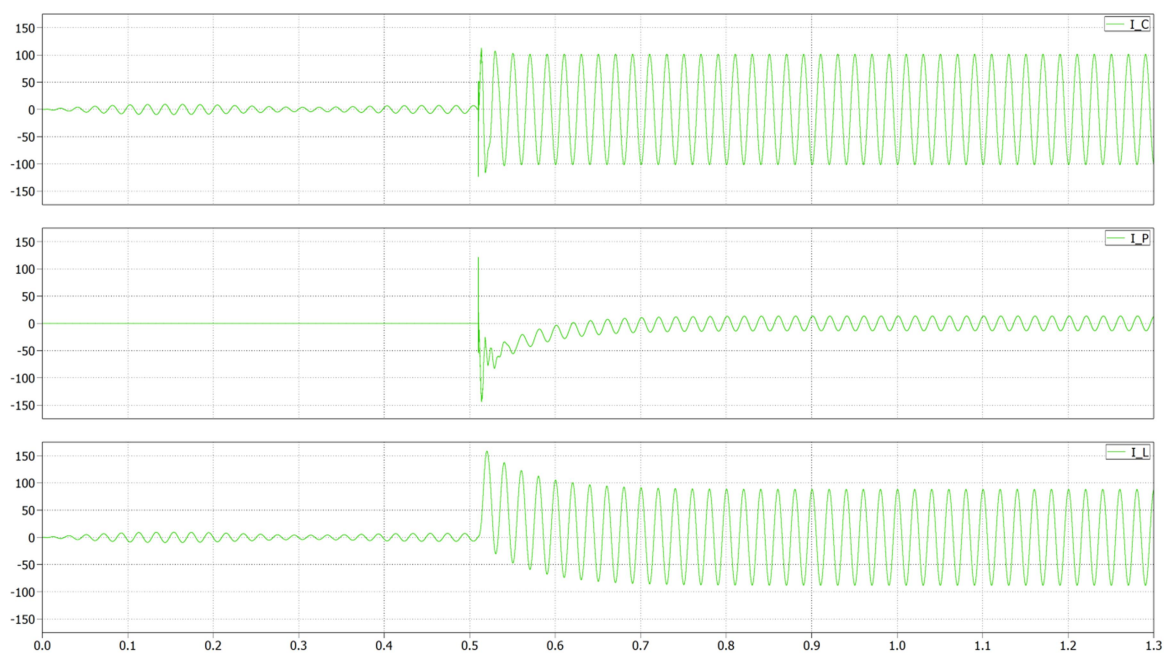
Na *obr. 16* vidíme průběhy proudů v případě, že dojde k zemnímu spojení při správném naladění Petersenovy tlumivky. K zemnímu spojení dochází v čas 0,5s. První průběh zobrazuje kapacitní proud  $I_C$ , ten je tvořen celkovým kapacitním proudem sítě. Druhý průběh je zbytkový poruchový proud  $I_P$ , tedy proud procházející místem zemního spojení při kompenzaci. Třetí proud je kompenzační proud  $I_L$  vytvořený Petersenovou tlumivkou. V případě této modelu sítě, uvedeného v příloze, je amplituda zbytkového proudu přibližně 3 A. Tento zbytkový proud nelze pomocí Petersenovy tlumivky vykompenzovat, je tvořen činným svodem sítě a činným odporem vinutí Petersenovy tlumivky. Velikost tohoto proudu je natolik malá, že dochází k samozhašení elektrického oblouku. Před ustálením poruchového proudu, dochází v síti k přechodovému jevu.



*Obr. 16 Průběh proudů při zemním spojení – správné naladění Petersenovy tlumivky*

### 3.2.2 Přeladěná Petersenova tlumivka

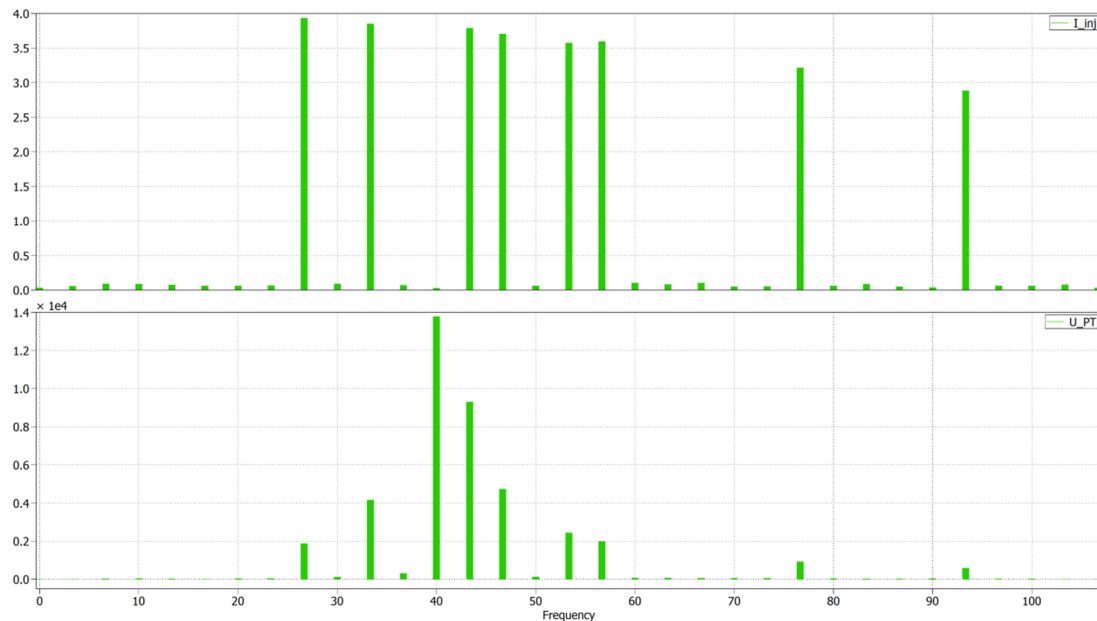
Přeladěná Petersenova tlumivka je jedním z nepříznivých stavů pro provozování sítě. Petersenova tlumivka tvoří paralelní rezonanci se svodovou kapacitou na frekvenci nižší než 50 Hz. Při tomto stavu přeladění, v případě zemního spojení, Petersenova tlumivka nevytváří dostatečně velký kompenzační proud. Časový průběh proudů můžeme sledovat na *obr. 17*.



*Obr. 17 Průběh proudů při zemním spojení – přeladěný stav*

Zbytkový proud je opět tvořen činnou složkou a zde ještě navíc nevykompenzovanou částí kapacitního proudu, zbytkový proud bude tedy větší, než v předchozím případě.

Indukčnost Petersenovy tlumivky tvoří se svodovou kapacitou  $C$  na kmitočtu 40 Hz paralelní rezonanci, to lze poznat díky napěťové odezvě na obr. 18.

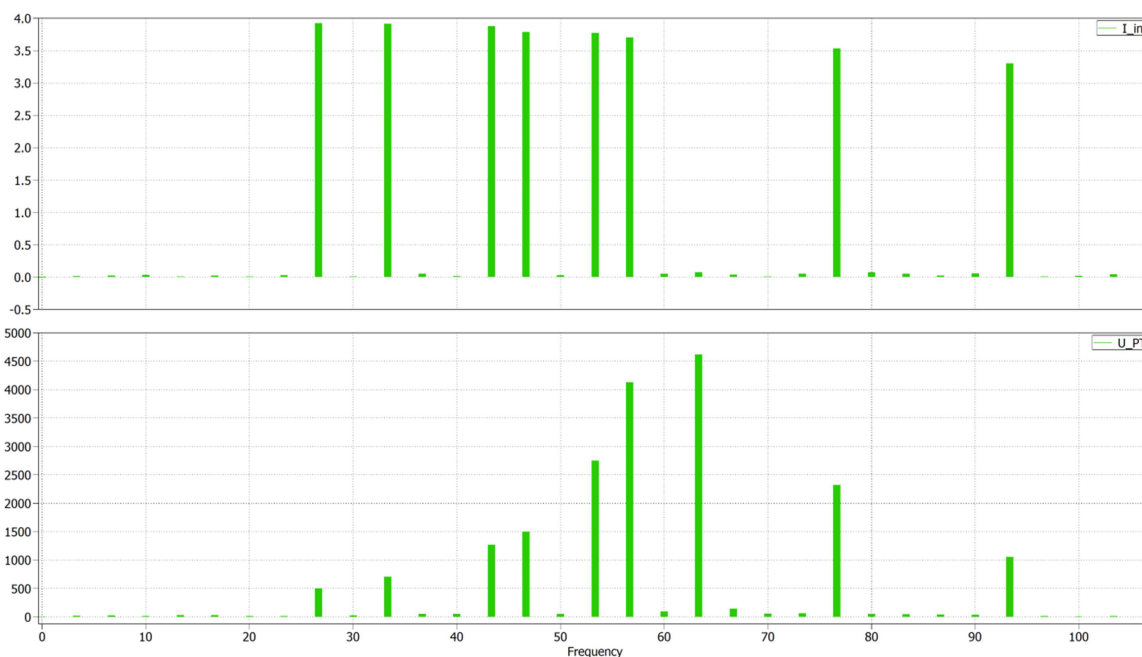


Obr. 18 Spektrální analýza sítě při přeladěné tlumivce

Vrchol impedanční křivky, se posunul na místo kmitočtu 40 Hz, napěťová odezva je právě největší na frekvenci 40 Hz. Pro admitanční křivku platí opět to samé, a to znamená, že je inverzní funkcí impedanční křivky, a proto by měla v místě kmitočtu 40 Hz své minimum. Petersenova tlumivka je tedy přeladěná. Pro správnou činnost v 50 Hz soustavě by bylo třeba její indukčnost snížit. Velikost indukčnosti  $L_{PT}$  je pro rezonanční stav na 40 Hz rovna 1,583 H, velikost svodové kapacity  $C$  zůstává rovna  $10\mu\text{F}$ . Sít' se v provozu občas provozuje s přeladěnou Petersenovou tlumivkou, je tím více odolná při jednofázových zkratech v nadřazené soustavě. Nepříznivý stav by mohl znamenat připojení jednoho z vývodů, a tím by došlo k velké změně parametrů sítě, tedy Petersenova tlumivka by byla přeladěná.

### 3.2.3 Podladěná Petersenova tlumivka

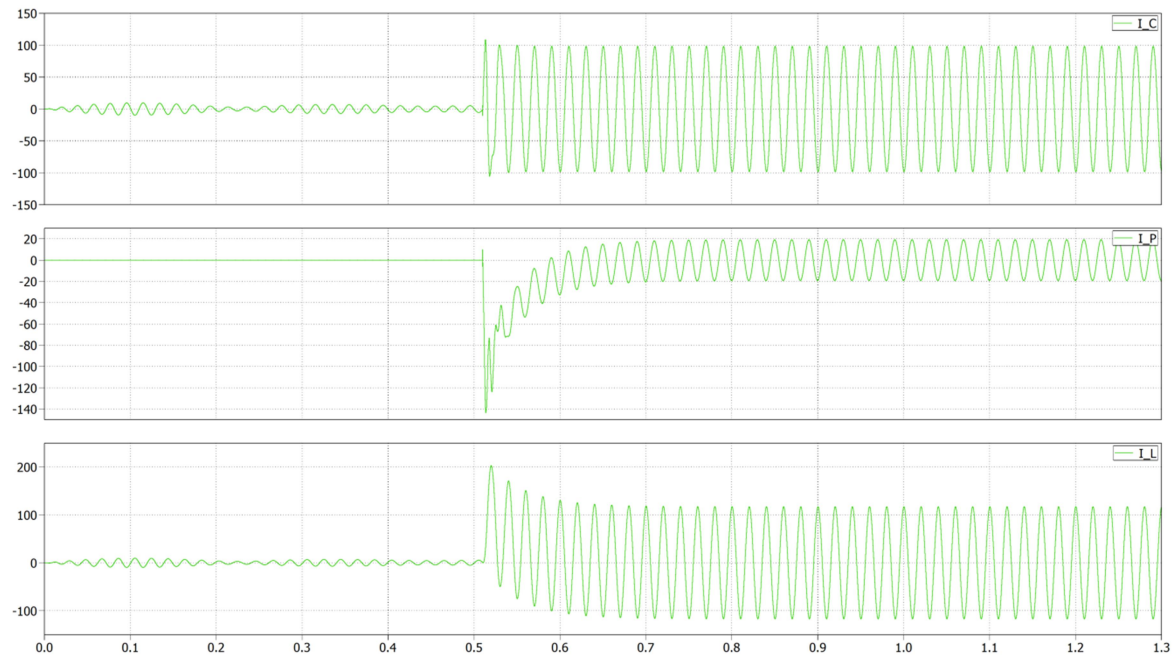
Dalším nepříznivým stavem naladění Petersenovy tlumivky je její podladění.  $L_{PT}$  a  $C$  tvoří paralelní rezonanci na kmitočtu vyšším než síťovým. Nyní tvoří indukčnost  $L_{PT}$  paralelní rezonanci s svodovou kapacitou na kmitočtu 63 Hz, viz *obr. 19*.



*Obr. 19 Spektrální analýza sítě při podladěné tlumivce*

Hodnota indukčnosti  $L_{PT}$  je pro tento stav 0,631 H, svodová kapacita sítě  $C$  má velikost 10  $\mu\text{F}$ . Pro správné naladění na 50 Hz, by bylo třeba velikost indukčnosti  $L_{PT}$  zvýšit. Z napěťové odezvy na proudovou injektáž je tedy opět zřejmé, že vrchol impedanční křivky se bude nacházet na kmitočtu 63 Hz. Z předchozí definice tedy vyplývá, že námi hledaná admitanční křivka má své minimum na frekvenci 63 Hz. Podladění Petersenovy tlumivky jako nepříznivý stav je myšleno, pokud by například došlo k odpojení jednoho z vývodů, tedy dojde k velké změně parametrů sítě. Běžně se v praxi setkáme, že se tlumivka lehce podladí pro lepší odolnost proti rušení.

Na časový průběh proudů, v případě vzniku zemního spojení se můžeme podívat na *obr. 20*.



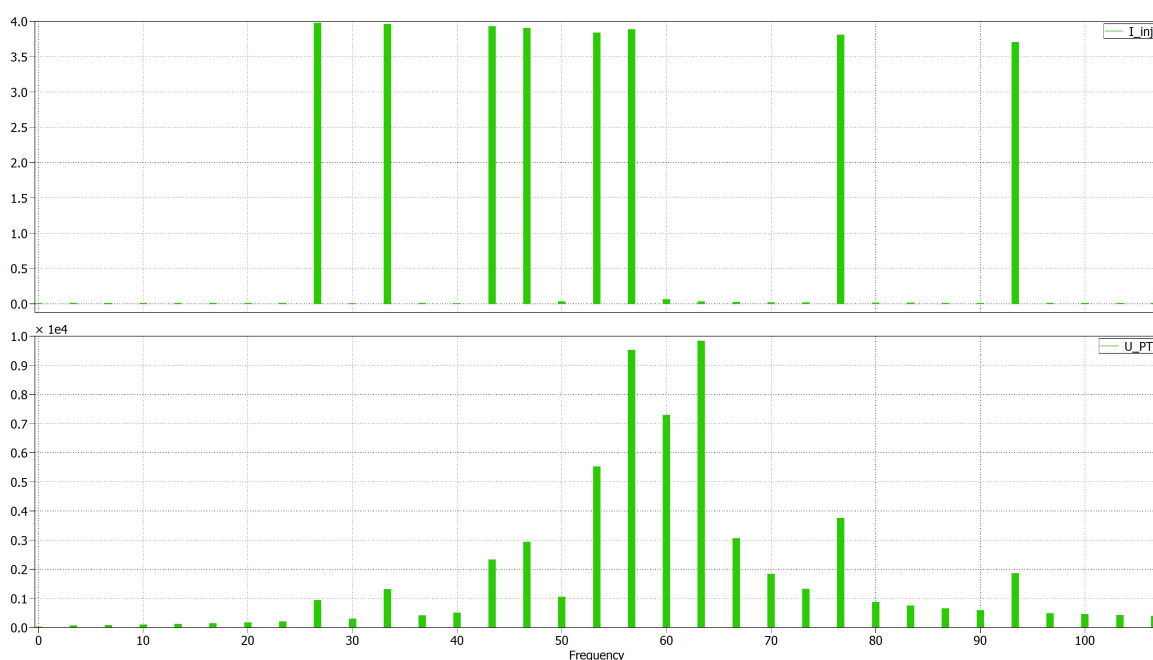
*Obr. 20 Průběh proudů při zemní spojení – podladěný stav*

Při podladěné Petersenově tlumivce bude platit přesný opak jak při přeladěné a tedy to, že Petersenova tlumivka vytváří větší kompenzační proud  $I_L$ , než je zapotřebí pro vykompenzování kapacitního proudu  $I_C$ . Zbytkový proud bude tvořen opět činnou složkou a zbytkem kompenzačního proudu  $I_L$ .



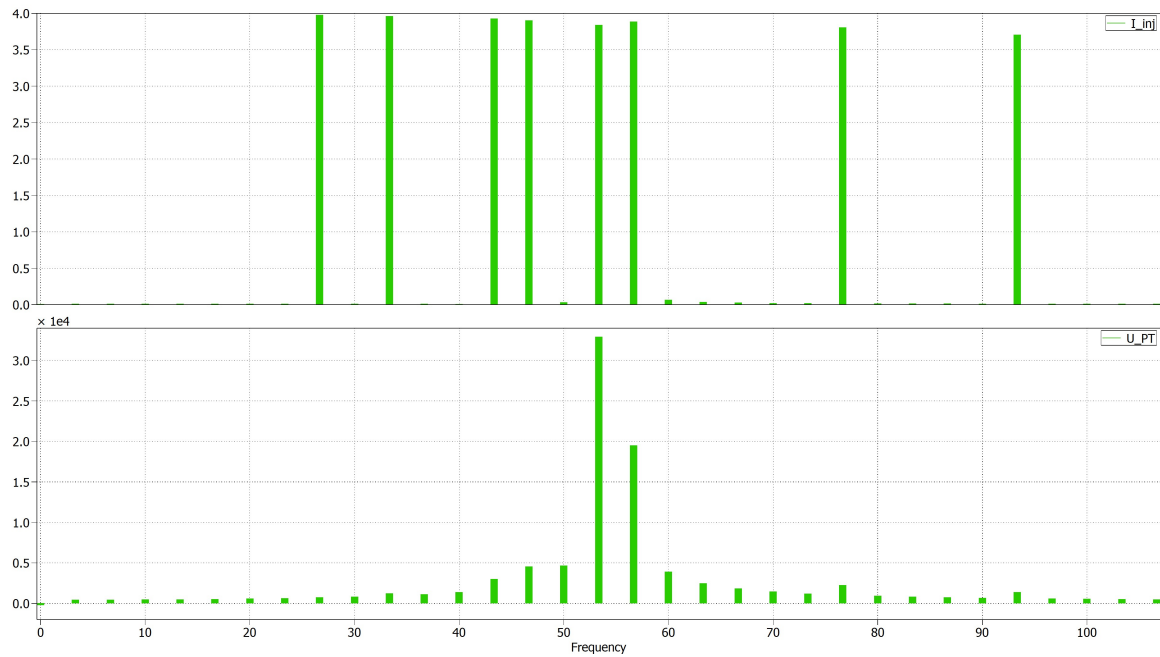
### 3.2.4 Změna sítě

Při tomto experimentu došlo ke změně parametrů sítě a jeden z vývodů byl odpojen. Tím se snížila hodnota svodové kapacity  $C$ . Původní hodnota  $C$  byla  $10 \mu\text{F}$ , nová hodnota svodové kapacity sítě  $C$  je nyní  $6,5 \mu\text{F}$ . Hodnota indukčnosti Petersenovy tlumivky  $L_{PT}$  zůstala naladěná na předchozí stav sítě, její hodnota je nyní  $L_{PT} = 1,0175 \text{ H}$ . Při nové konfiguraci sítě, nám  $C$  společně s  $L_{PT}$  rezonuje na frekvenci přibližně  $62 \text{ Hz}$ . Vrchol impedanční křivky pro aktuální stav sítě je v  $62 \text{ Hz}$ , na této frekvenci se nachází minimum námi hledané admitanční křivky. Napěťová odezva je vidět na *obr. 21*.



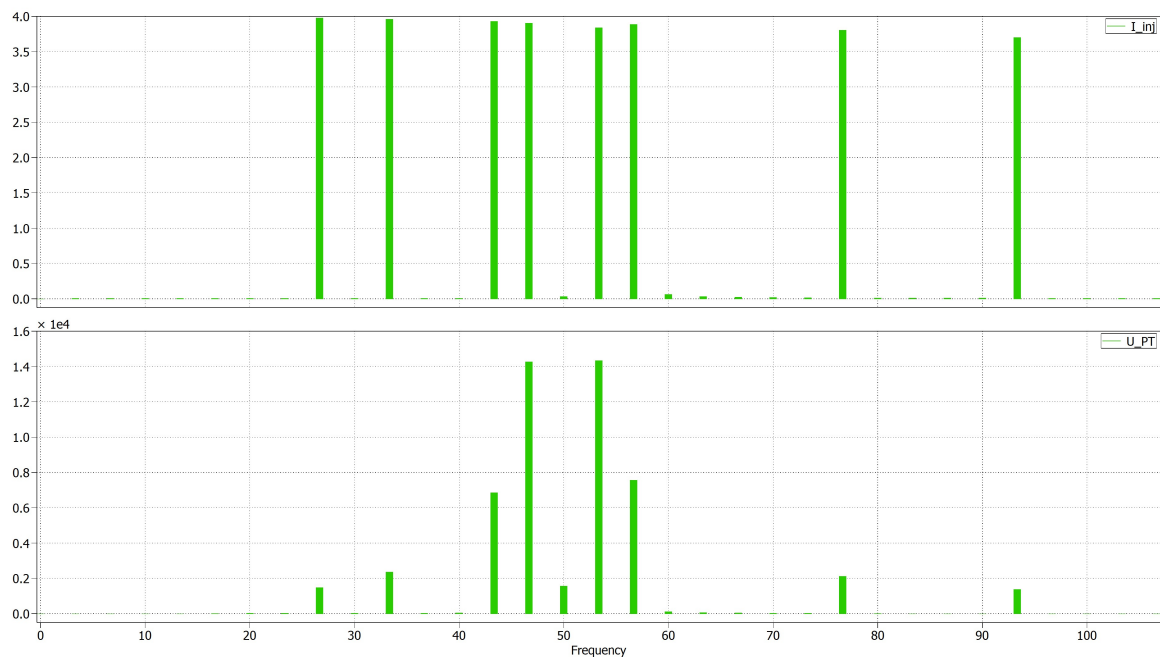
*Obr. 21* Spektrální analýza sítě při odpojení vývodu

Aby  $C$  s  $L_{PT}$  opět rezonovali na frekvenci  $50 \text{ Hz}$ , je třeba hodnotu  $L_{PT}$  zvýšit. Velikost indukčnosti Petersenovy tlumivky  $L_{PT}$  zvětšíme na hodnotu  $1,312 \text{ H}$ . Na výsledku napěťové odezvy můžeme vidět, že se vrchol impedanční křivky posunul na frekvenci přibližně  $54 \text{ Hz}$ , jak ukazuje *obr. 22*. Naše sledované minimum admitanční křivky je nyní na kmitočtu  $54 \text{ Hz}$ .



Obr. 22 Spektrální analýza sítě při hledání nového minima admitanční křivky

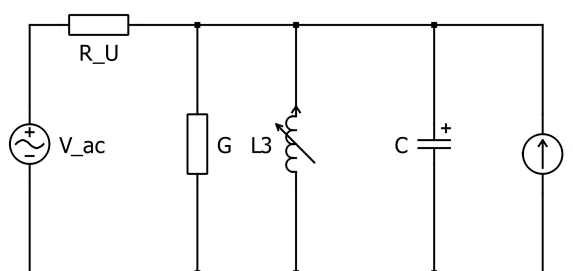
Hodnotu  $L_{PT}$  nastavíme na 1,564 H. Svodová kapacita sítě  $C$  a indukčnost  $L_{PT}$  nám nyní tvoří paralelní rezonanci na 50 Hz, pro novou konfiguraci sítě. Impedanční křivka má své maximum právě na kmitočtu 50 Hz. Petersenova tlumivka  $L_{PT}$  je tedy opět naladěna, aby dokázala kompenzovat poruchový proud při vzniku zemního spojení. Napěťovou odezvu vidíme na *obr. 23*.



Obr. 23 Spektrální analýza sítě při novém vyladění tlumivky

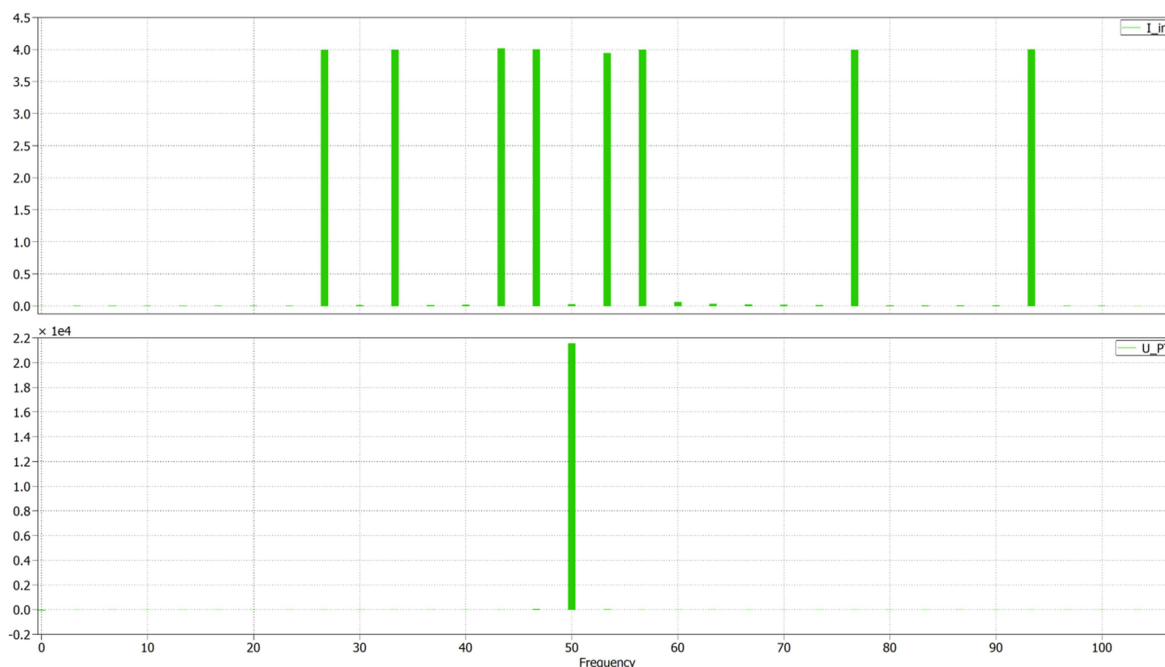
### 3.2.5 Proudová injektáž při zemním spojení

Na obr. 24 můžeme vidět zjednodušené schéma soustavy při zemním spojení. Přibyl zde náhradní zdroj napětí, reprezentující vadnou fázi.  $R_U$  je odpor poruchy. Při zemním spojení nám hodnota činného svodu klesla na hodnotu  $20 \Omega$ . Hodnota indukčnosti  $L_{PT}$  je  $1,0175 \text{ H}$  a svodová kapacita sítě  $C$  je  $10 \mu\text{F}$ .  $L_{PT}$  a  $C$  tvoří paralelní rezonanci na kmitočtu  $50 \text{ Hz}$ .



Obr. 24 Náhradní schéma sítě při zemním spojení s proudovou injektáží

V soustavě je zařazena i proudová injektáž a její napěťovou odezvu můžeme vidět na obr. 25.



Obr. 25 Spektrální analýza sítě při zemním spojení

Díky napěťové odezvě můžeme vidět, že při zemním spojení dominuje frekvenční složka  $50 \text{ Hz}$ . Injektovaný proudový signál se uzavírá přes poruchu.

Z toho vyplývá, že provádění proudové injekece, během zemního spojení, nemá cenu. Z tohoto důvodu se proudová injekece provádí vždy před vznikem zemního spojení. A to i proto, aby byla Petersenova tlumivka správně naladěna před zemním spojením a dokázala ihned kompenzovat poruchový proud.

## Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo zpracování aktivní identifikace admitanční křivky v kompenzovaných sítích. Zjištění admitanční křivky sítě je důležité pro zjištění parametrů sítě a následné naladění Petersenovy tlumivky. Identifikace se provádí pomocí proudové injektáže, kdy se do pomocného vinutí Petersenovy tlumivky injektuje proudový signál. Proudový signál obsahuje dané frekvenční složky, které nám vytvoří napěťovou odezvu. Pomocí spektrální analýzy je napěťová odezva rozložena do frekvenčního spektra, kde na kmitočtech, které jsme injektovali v proudovém signálu, můžeme vidět jednotlivé velikosti amplitud daných frekvenčních složek. Čím více se blížíme ke kmitočtu, na kterém je Petersenova tlumivka paralelně naladěna k celkové svodové kapacitě sítě, tím je velikost amplitudy větší. Díky tomu dostaneme impedanční křivku naší sítě. Zjištění admitanční křivky je potom již jednoduché, neboť admitanční křivka je inverzní funkcí k impedanční křivce.

První část bakalářské práce se zaměřuje na teoretický popis činnosti kompenzované sítě a Petersenovy tlumivky. Je zde popsán stav sítě bez poruchy a stav při poruše, tedy když došlo k zemnímu spojení. Pro tyto stavy jsou popsány napěťové a proudové poměry. Dále je zde vysvětlen princip činnosti Petersenovy tlumivky a zobrazen zjednodušený model, kde jsou jednotlivé části podrobněji popsány, aby bylo zřejmé, k čemu slouží. Je zde vysvětleno co je to zemní spojení, jaké může být a kdy se vyhodnocuje v rozvodně, jestli k zemnímu spojení došlo. Jsou zde zmíněny další možné způsoby provozování uzlů, jako je přímo uzemněný, izolovaný nebo neúčinně uzemněný uzel pomocí odporu. Při popisu Petersenovy tlumivky nemohou zapomenout na rezonanční křivku, která je důležitá pro vyhodnocování parametrů sítě. Při kompenzaci kapacitních proudů nám i přes dokonalou kompenzaci stále poruchou teče zbytkový proud, který je způsoben zejména činnými svody sítě a činným svodem vinutí tlumivky, pro kompenzaci zbytkového proudu jsou zde zmíněny dvě metody Shunting a Swedish Neutral.

V druhé části bakalářské práce jsou popsány nejznámější metody ladění Petersenovy tlumivky. První čtyři metody jsou založeny na výskytu přírodní nesymetrie sítě anebo na injektáži proudového signálu s frekvenční složkou 50 Hz. Pátá metoda je proudová injektáž, kde proudový signál obsahuje námi zvolené frekvenční složky.

První metoda spočívá na vytvoření umělého zemního spojení a následného hledání minimálního procházejícího proudu přes místo poruchy, kdy při minimální hodnotě je vyhodnoceno správné naladění Petersenovy tlumivky. Druhá metoda hledá maximální hodnotu netočivé složky, je tedy hledán vrchol rezonanční křivky. Třetí metoda používá rozladění pomocí kondenzátoru, který se připojuje k Petersenově tlumivce. Tento kondenzátor nám vychýlí fázor netočivé složky napětí. Díky tomu lze vyhodnotit parametry sítě. Čtvrtá metoda je injektáž proudové signálu obsahující pouze frekvenci 50 Hz, metoda se často nepoužívá, neboť je nutné, aby byla síť co nejvíce symetrická a nedocházelo tak k rušení od přirozené nesymetrie. Pátá metoda, která je použita ve třetí části bakalářské práce, je důležitá pro simulaci zjišťování admitanční křivky.

Třetí část zahrnuje popis metody ladění pomocí proudové injektáže, volbu frekvenčních složek, popis náhradního schématu kompenzované sítě a samotnou simulaci identifikace admitanční charakteristiky. Simulace byly prováděny v programu PLECS. První tři simulace jsou zaměřeny na určitém naladění Petersenovy tlumivky. Jako první je simulováno, když Petersenova tlumivka tvoří paralelní rezonanci s kapacitou sítě na frekvenci 50 Hz. To je stav, kdy je Petersenova tlumivka správně naladěná a kompenzuje celý kapacitní proud během zemního spojení. Přeladěný stav nastane, tvoří-li tlumivka paralelní rezonanci s kapacitou sítě na frekvenci nižší než 50 Hz a při zemním spojení nedochází k úplné kompenzaci kapacitního proudu. Při podladěné tlumivce je paralelní rezonance tvořena na kmitočtech vyšší než 50 Hz. Vytvářený proud Petersenovou tlumivkou je větší, než proud kapacitní. Čtvrtá simulace zobrazuje případ, kdy došlo k odpojení jednoho z vývodů, a muselo se zjišťovat nové minimum admitanční charakteristiky. Bylo tedy třeba zvyšovat hodnotu indukčnosti Petersenovy tlumivky. Poslední simulace se zabývá použitím proudové injektáže během zemního spojení, kde je z napěťové odezvy zjevné, že nelze tuhle metodu použít.

Všechny části bakalářské práce byly splněny. Bylo zde odsimulováno použití proudové injektáže pro hledání admitančních křivek.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [2] JÍLEK, David. *Způsoby provozování uzlů elektrických sítí* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/7446>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [3] HADÁČEK, Zdeněk. *Analýza provozu uzlu sítě 22 kV vzhledem k jednofázovým zemním poruchám* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/3944>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] DRUML, G., A. KUGI a O. SEIFERT. New method to control Petersen coils by injection of two frequencies. In: *18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2005)*[online]. IEE, 2005, 2005, v3-65-v3-65 [cit. 2019-05-28]. DOI: 10.1049/cp:20051161. ISBN 0863415296. Dostupné z: [https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_20051161](https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_20051161)
- [5] VOZKA, Aleš. *Zemní ochrany v distribuční síti* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/14929>. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [6] *Swedish Neutral* [online]. KUNGSÄNGEN: Swedish Neutral, 2018 [cit. 2019-05-28]. Dostupné z: <http://www.swedishneutral.se/main.php?name=start>
- [7] TESAŘOVÁ, Miloslava. *Zemní spojení*. Plzeň, 2019. Přednáška z předmětu EE2. Západočeská univerzita v Plzni.
- [8] TALLA, Jakub, Vojtech BLAHNIK a Tomas KOSAN. Grid impedance identification by current harmonics signal injection. In: *2016 ELEKTRO*[online]. IEEE, 2016, 2016, s. 387-390 [cit. 2019-05-30]. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512103. ISBN 978-1-4673-8698-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7512103/>
- [9] LOOS, Matthieu. *Single Phase to Ground Fault Detection and Location in Compensated Network* [online]. Brusel, 2014 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: <https://dipot.ulb.ac.be/dspace/bitstream/2013/209544/1/008934c7-71a2-400c-b5d5-78fb9e848eac.txt>. Dissertation thesis. Université Libre de Bruxelles.

# Přílohy

## Příloha A – Vytvořený model kompenzované sítě v programu PLECS:

