

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Estimátor vývodu vn se zemní poruchou

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr KOTEK**
Osobní číslo: **E13B0123P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Estimátor vývodu vn se zemní poruchou**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Nastudujte metodu diskrétní Fourierovy transformace (DFT) a metodu vážených nejmenších čtverců (WLSE).
2. Sestavte matematický model jednoduché distribuční sítě se dvěma vývody pro simulace zemních poruch.
3. Naprogramujte estimátor založený na DFT nebo WLSE provádějící odhad velikosti a úhlu natočení nulové složky proudu.
4. Na základě odhadované polohy vektoru určete vývod postižený zemní poruchou.

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

1. Určí vedoucí práce nebo konzultant.

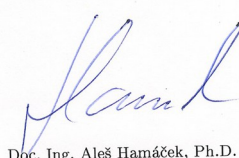
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na identifikaci poruchy zemním spojením v distribučních sítích vn. Jsou zde teoreticky popsány vlastnosti jednotlivých typů distribučních sítí a principy, podle nichž se u jednotlivých typů sítí identifikují místa poruchy. V další části je navržen algoritmus pro identifikaci vývodu s poruchou, založený na diskrétní Fourierově analýze měření součtových měřících transformátorů proudu v reálném čase. Navržený algoritmus byl ověřen pomocí sestaveného matematického modelu distribuční sítě.

Klíčová slova

Distribuční síť vn, izolovaná síť, kompenzovaná síť, porucha zemním spojením, DFT, porušená část vedení, kompenzační tlumivka

Abstract

This bachelor thesis is focused on the identification of the ground wire failure in the HV distribution networks. There are theoretically described characteristics of the individual types of distribution networks and the principles which identify the location of the failure in the individual types of distribution networks. In the next section is proposed algorithm for identification of fault power line, based on discrete Fourier analysis of the measurement of real-time current measuring on current transformers. The proposed algorithm was verified using the mathematical model of the distribution network.

Key words

HV distribution network, isolated network, compensated network, ground wire failure, DFT, broken wiring, compensaion choke

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto 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 bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Petr Kotek

Poděkování

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

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	11
1 DĚLENÍ DISTRIBUČNÍ SÍTÍ VN.....	12
1.1 SÍTĚ S IZOLOVANÝM UZLEM VŮČI ZEMI.....	13
1.1.1 <i>Netočivá složka napětí a proudů u izolovaných distribučních soustav.....</i>	<i>13</i>
1.1.2 <i>Identifikace místa vzniku kovové zemní poruchy v izolované síti.....</i>	<i>15</i>
1.2 KOMPENZOVANÉ SÍTĚ.....	16
1.2.1 <i>Netočivé složky v kompenzovaných sítích.....</i>	<i>17</i>
1.2.2 <i>Identifikace místa vzniku kovové zemní poruchy v kompenzované síti.....</i>	<i>18</i>
2 MATEMATICKÝ MODEL DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ.....	19
2.1 MATEMATICKÝ MODEL IZOLOVANÉ SÍTĚ.....	19
2.2 MATEMATICKÝ MODEL KOMPENZOVANÉ SÍTĚ.....	20
3 IDENTIFIKACE PORUŠENÉ FÁZE POMOCÍ DFT.....	21
3.1 DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	21
3.2 DFT S POSUVNÝM OKNEM.....	22
3.3 URČENÍ PORUŠENÉHO VEDENÍ IZOLOVANÉ SÍTĚ POMOCÍ DFT.....	24
3.4 IDENTIFIKACE PORUŠENÉ FÁZE KOMPENZOVANÉ SÍTĚ POMOCÍ DFT.....	29
ZÁVĚR.....	33
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	34

Seznam symbolů a zkratek

C_1, C_2, C_3	Kapacity vůči zemi
C_{SOU}	Kapacita soustavy
C'	Kapacita vůči nulovému bodu v modelu sítě
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
f	frekvence sítě
FI_I	fázový úhel proudu
FI_U	fázový úhel napětí
G_0	konduktance netočivé složky
G_{SOU}	svod soustavy
G_{TL}	svod tlumivky
G'	vodivost bočníku vůči nulovému bodu
I_0	netočivá složka proudu
I_{f_C}	kapacitní proud
I_{f_G}	svodový proud
I_p	proud poruchou zemním spojením
I_{N_C}	kapacitní proud neporušeným vedením
I_{N_G}	svodový proud neporušeným vedením
I_{P_C}	kapacitní proud porušeným vedením
I_{P_G}	svodový proud porušeným vedením
k	index frekvenčního spektra
L_1, L_2, L_3	Jednotlivé fáze vedení
L_{TL}	vlastní indukčnost tlumivky
L'	indukčnost vedení v sérii
n	jednotlivé čísla vzorků diskretní Fourierovi transformace
N	celkový počet vzorků
PTP	měřicí transformátor proudu
PTN	měřicí transformátor napětí
R_p	odpor zemního spojení
R'	odpor vedení v sérii
SDFT	Posuvná diskretní Fourierova transformace
t	čas

T..... délka periody signálu
U₀..... napětí uzlu soustavy vůči zemi soustavě
U₁,U₂,U₃..... napětí na příčné admitanci
U_{L1},U_{L2},U_{L3}..... fázové napětí
vn..... vysoké napětí
Z₀..... Impedance netočivé složky
Z_N..... Impedance nulového bodu sítě vůči zemi
φ..... fázový úhel
ω..... úhlová frekvence

Úvod

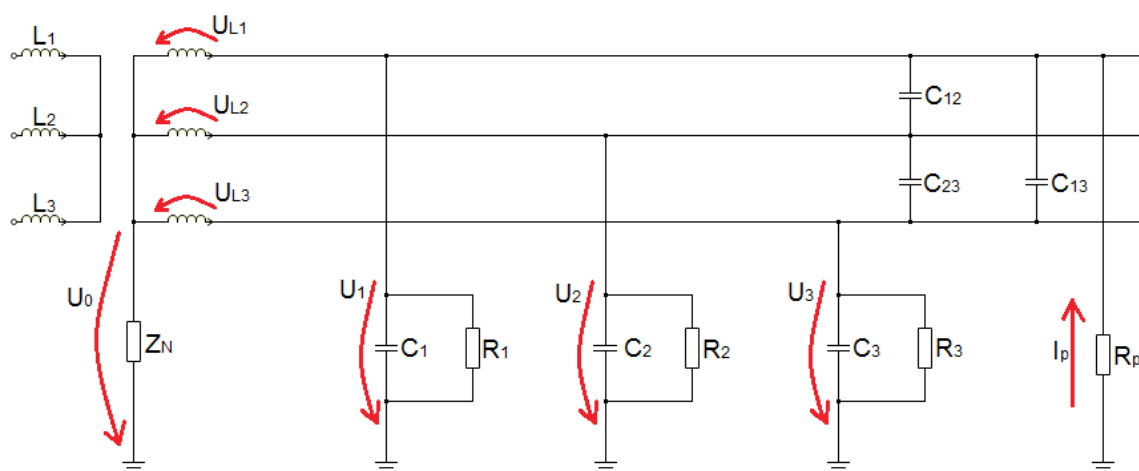
Předkládaná práce je zaměřena na odhad fázového posuvu proudu u porušené fáze způsobené zemním spojením u 3f vedení a následné určení místa poruchy.

Text bakalářské práce je rozdělen do tří fází, v první fázi je čtenář seznámen s teoretickými vlastnostmi jednotlivých typů distribučních sítí a principy podle nichž se u těchto sítí identifikují místa poruchy, v druhé části jsou sestaveny matematické modely distribučních sítí a ve třetí je navržen algoritmus pro identifikaci vývodu s poruchou pomocí diskrétní Fourierovi transformace.

1 Dělení distribuční sítě vn

Pro přenos elektrické energie ať už z důvodů distribučních a nebo průmyslových, elektrárenských či důlního provozu se využívá sítě vn, načež napětí těchto sítí bývá dle druhu dodávky elektrické energie nejčastěji používáno 6 a 10 kV u elektrárenských nebo jinak průmyslově založených a 10, 22 či 35 kV u sítí distribučních [1].

Všechny tyto sítě vn mají však stejný princip přenosu elektrické energie pomocí třífázové soustavy vodičů, jenž jsou na straně napájecího transformátoru spojeny do jednoho nulového bodu, který je určitým způsobem uzemněn vůči nulovému potenciálu. Toto však neplatí pro sítě izolované, jejichž nulový bod transformátoru není spojen se zemí. Obecně podle druhu zapojení nulového vodiče vůči zemi můžeme sítě vn dělit na izolované (obr.3a) a nepřímo uzemněné, které mohou být ve formě uzemnění přes zhašecí tlumivku (obr.3b), uzlový odporník (obr.3c) a nebo kombinací zhašecí tlumivky s pomocným připínacím odporem (obr.3d) [1]. Sítě, které jsou provozovány izolovaně v takovém případě vedou přes místo poruchy mnohem vyšší poruchový proud I_p a je nutné u takovýchto sítí provést co nejrychlejší odpojení od zdroje energie, aby nedocházelo k nebezpečným stavům a jiným mechanickým poškozením, oproti tomu sítě provozovány nepřímo uzemněně nevedou přes místo zkratu tak veliký poruchový proud a tudíž není nutné odpojit síť od zdroje okamžitě [2]. Pokud-li bychom uvažovali obecně impedanci nulového bodu rozvodného transformátoru vůči zemi, dostali bychom následující schéma:



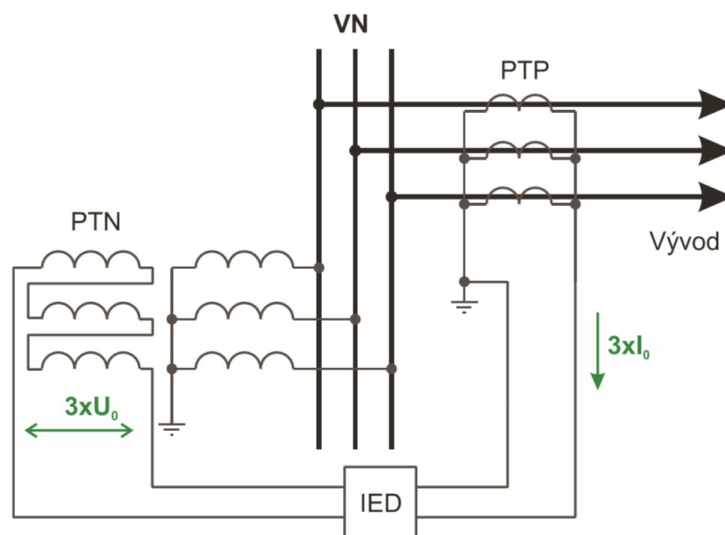
Obr. 1: Schéma distribuční sítě se zemní poruchou [3]

1.1 Sítě s izolovaným uzlem vůči zemi

Jak už bylo řečeno v předchozí kapitole, jedná se o typ distribučních sítí vn, u nichž je společný nulový bod transformátoru oddělen izolovaně od země, tudíž můžeme říci, že impedance nulového bodu vůči zemi $Z_N \rightarrow \infty$ [1,3,4]. Takovýto druh sítí se používá nejčastěji v průmyslových distribucích, kde se nachází malé sítě s nízkou parazitní kapacitou u nichž nepřesahuje poruchový proud hodnoty 20A [1]. Tento proud, který je zejména kapacitního charakteru, se uzavírá přes místo poruchy a je dán vektorovým součtem kapacitních a svodových proudů přes zbylé neporušené fáze [4].

1.1.1 Netočivá složka napětí a proudů u izolovaných distribučních soustav

Pro měření netočivých složek se využívají měřicí transformátory, které bývají zapojené v místě napájecí rozvodny a to buď pro měření proudů a nebo pro měření napětí [2]. Jak proudové, tak i napěťové transformátory se skládají ze tří součtových transformátorů, pro každou fázi jedno, avšak finální hodnota tohoto transformátoru vykazuje ze stejného hlediska trojnásobnou hodnotu [1].



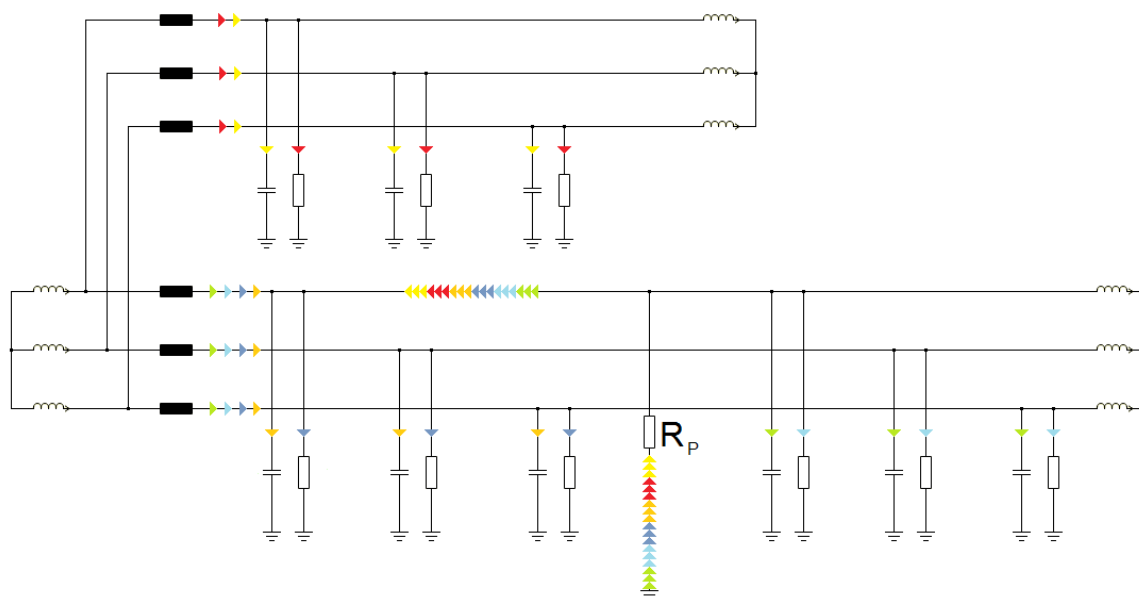
Obr. 2: Měření netočivé složky napětí a proudů [1]

Při určování netočivých složek napětí a proudů můžeme vzít v potaz distribuční síť vn rozdělenou do dvou částí a to na 3f, která není postižena zemní poruchou a jest vyvedena paralelně z postiženého vedení a 3f téhož vedení, postižené zemním spojením kovového typu [1-5]. Proudů tohoto vedení budeme měřit ve třech místech vedení a to na 3f vedení

paralelně k postižené síti, na vedení postiženém zemní poruchou a to ještě před místem vzniku poruchy a na postiženém vedení zemní poruchou za místem vzniklého zemního spojení.

Celkový proud 3f vedení je zde složen ze dvou složek a to proudů I_{f_G} , který představuje celkovou velikost svodového proudu, tedy reálné složky a I_{f_C} , jenž je tvořen vektorovým součtem jednotlivých položek kapacitního proudu, tedy složky jalové [4,5]. Pokud bychom takovýto proud změřili a provedli bychom pro něj společně s U_0 fázorový diagram v místě nepostiženého vedení a nebo za místem poruchy u vedení se zemní poruchou a dále bychom předpokládali, že netočivá složka napětí U_0 by měla úhlové otočení 0° , pak by se tato netočivá složka proudu složená z proudů I_{f_G} a I_{f_C} vektorově sečetla a výsledná složka netočivého proudu by se nacházela v I. kvadrantu. Kdybychom však uvažovali měření 3f sítě před místem poruchy na porušeném vedení, jednotlivé složky kapacitního a svodového proudu porušenou fází by se navzájem odečetli, neboť jejich složka by se vracela v protifázi zpět vedením přes místo zemní poruchy a proud touto porušenou fází by byl tvořen poruchovým proudem tvořeným všemi svody a kapacitami v síti a tudíž jeho složka by se v místě měřícího transformátoru jevila jako opačná než v místě neporušeném, tedy v protifázi k fázoru, který je součtem všech nulových složek proudu nepoškozených vývodů.

Pokud bychom tedy pro takovéto porušené 3f vedení provedli měření a fázorový diagram, dostali bychom celkovou složku $-I_{P_G}$ tvořenou všemi svodovými proudy, krom proudu právě porušené fáze a složku $-I_{P_C}$ tvořenou všemi kapacitami kromě proudu přes kapacitu na porušené fází [1,4]. Tyto proudy bychom dále vektorově sečetli a výsledná složka by se nám jevila jako $3xI_0$, avšak s minusovým znaménkem, tudíž ve III. kvadrantu. Rozdílu mezi porušeným a neporušeným vedením je tudíž celková velikost proudu a umístění v I. nebo III.kvadrantu, čehož se právě využívá pro identifikaci místa zemní poruchy distribučního vedení [1].

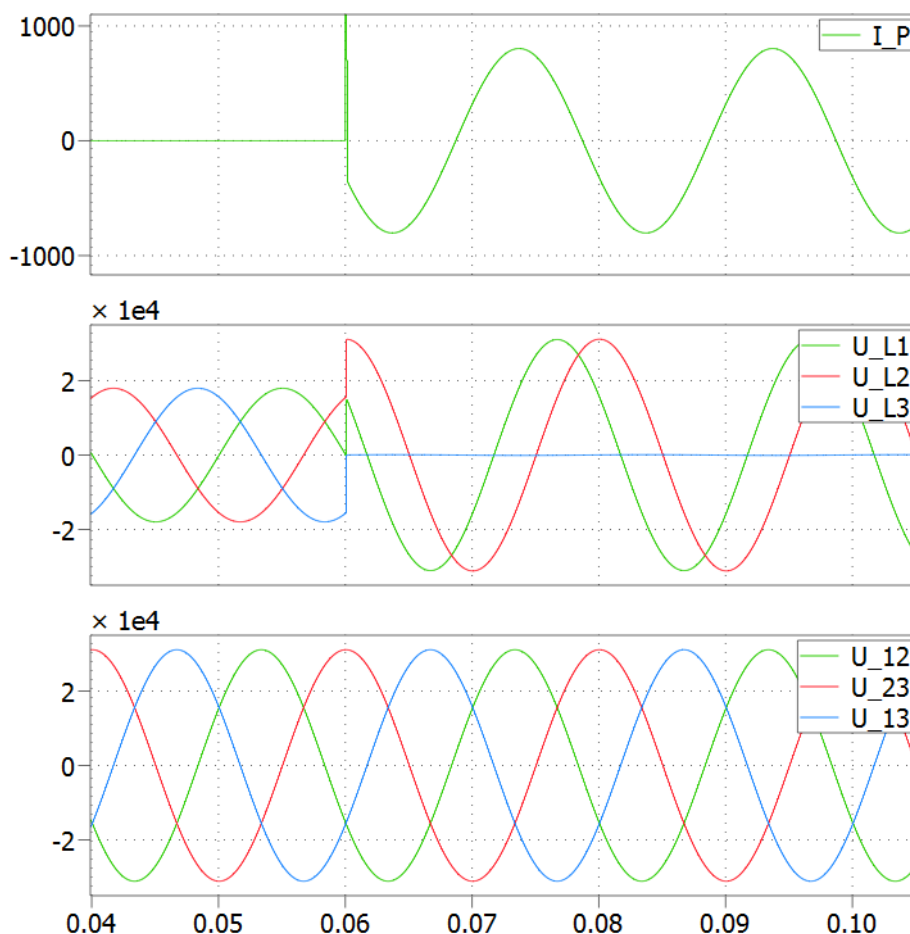


Obr. 3: Směry toku proudů v izolované soustavě [1,4]

1.1.2 Identifikace místa vzniku kovové zemní poruchy v izolované síti

Síť s poruchou lze dále provozovat, ale není to bez omezení, neboť porušení vede k nebezpečným stavům a namáhání izolace instalovaných zařízení. Pro analýzu poměrů při zemním spojení se často uvažuje tzv. kovové zemní spojení, jako extrémní případ. Jednofázové zemní spojení způsobí vzrůst napětí nepoškozených fází vůči zemnímu potenciálu na hodnotu sdruženého napětí. Sdružené napětí sítě není zemním spojením nijak deformováno. Jak už z předchozích úvah vyplývá, velikou výhodou těchto sítí je možnost využití primární části vedení zapojené do trojúhelníku bez narušení symetrie při jednofázové zemní poruše a také se u těchto sítí dá velmi snadno vyhodnotit místo zemní poruchy [1,4].

Na následujícím obrázku je znázorněn poruchový proud, vzniklý v čase $t=0,06s$ a pod ním průběh jednotlivých fázových napětí vůči zemi a sdružených proudů. Z této charakteristiky je zřejmé, že porucha nemá žádný vliv na napětí sdružená a ovlivňuje pouze napětí fázová vůči zemi.



Obr. 4: Průběh poruchového proudu I_P a fázových napětí vůči zemnímu potenciálu a napětí sdružených při vzniku jednopólové zemní poruchy

Následná identifikace poruchy probíhá pomocí zjišťování amplitudy a fáze netočivé složky proudu. Fáze, která je v síti vyhodnocena jako opačná je označena jako porušená. Protože však může docházet u této metody k problémům při identifikaci, je k této metodě ještě přiřazena metoda porovnání amplitudy. Systém nejdříve hledá dvě nejvyšší amplitudy netočivé složky proudu, u nich se porovná fáze a ta, která je otočena opačně je vyhodnocena jako porušená [1,3,4]. Pokud-li bychom tedy uvažovali, že netočivá složka proudu neporušené fáze se v daný moment nachází v I. kvadrantu, tak pro fázi porušenou by byla netočivá složka proudu ve III. kvadrantu.

1.2 Kompenzované sítě

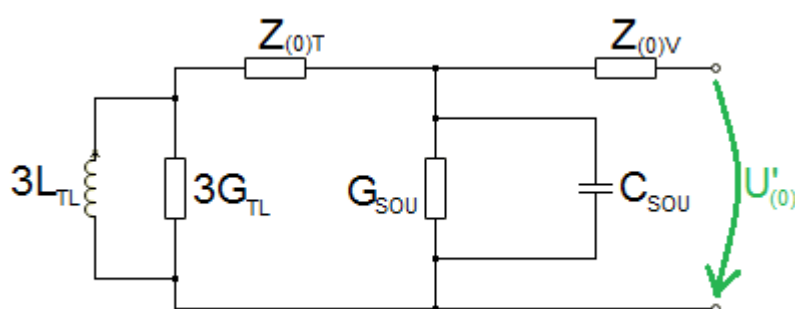
Na rozdíl od sítí izolovaných jsou sítě kompenzované spojeny přes nulový bod transformátoru se zemí pomocí rezonanční cívky, jinak také zvané jako Petersenova cívka [1-5]. Zemní proud způsobený parazitními kapacitami sítě se uzavírá přes zhášecí

tlumivku, pokud je hodnota indukčnosti správně naladěna, tj. nachází se v rezonanci s parazitními kapacitami sítě. Místem zemního spojení pak teče mnohem nižší poruchový proud I_p [6]. Moderní zhášecí tlumivky jsou vybaveny funkcí automatického ladění, díky kterému dokáží vždy obvod dostat do paralelní rezonance.

Avšak z důvodů, že lze nastavit rezonanci pro pouze jednu hodnotu frekvence, ale kapacitní proudy mohou být složeny z více frekvencí, tedy vyšších harmonických, lze tedy kompenzovat pouze impedance způsobené základní harmonickou, avšak zbylé nikoliv [1].

1.2.1 Netočivé složky v kompenzovaných sítích

Při správně naladěné zhášecí tlumivce se místem zemní poruchy uzavírá pouze proud způsobený svodovými odpory, tedy činný, který je několikanásobně nižší než proud kapacitní. Avšak i tato kompenzační cívka je tvořena určitou velikostí svodového odporu a vykazuje tak malé množství činného proudu, který se bohužel též uzavírá přes místo poruchy zemním spojením [3,4].



Obr. 5: Schéma kompenzované soustavy s netočivými složkami [5]

Oproti poměrům v síti izolované musíme v síti kompenzované uvažovat při výpočtech a úvahách též parametry rezonanční tlumivky a to hlavně proud přes ní dodávaný I_L a její odpor, popřípadě elektrickou vodivost G_{TL} [1,3].

Výsledný proud všemi příčnými admitancemi se rovná nule, ale pouze jen při bezporuchovém stavu. Jakmile dojde k poruše na jedné fázi, proud tekoucí přes příčné admitance přestává být nulový a rovná se proudu poruchovému. Tento poruchový proud

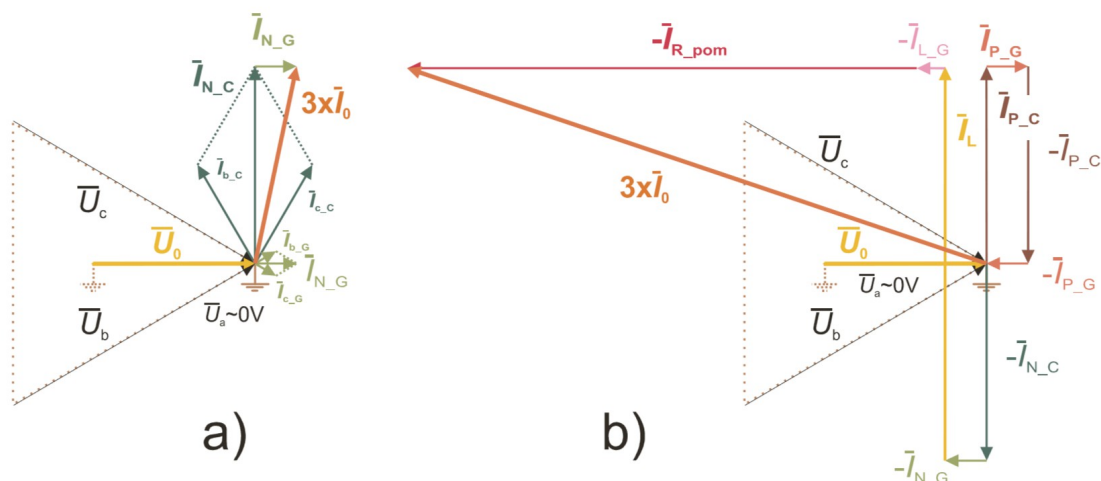
složený z proudů svodů a proudů kapacitních je právě kompenzován proudem dodávaným rezonanční tlumivkou I_L , pro který platí v ideálním případě, že $I_L = I_{f.C}$.

1.2.2 Identifikace místa vzniku kovové zemní poruchy v kompenzované síti

U kompenzovaných distribučních sítí se využívá principu připojené indukčnosti vůči zemi na nulovém bodu transformátoru. Tato indukčnost zajišťuje kompenzaci kapacitních proudů z místa zemního spojení a tím pádem místem poruchy protéká pouze činný proud daný svody jednotlivých fází a činnou složku proudu tlumivky [1,3-5].

Místem poruchy nám tedy protéká proud činný, který se vrací do porušené fáze s opačným smyslem, než proud, který do fáze vtéká ze zdroje. Dále opět budeme uvažovat netočivou složku napětí s úhlovým natočením 0° . Když budeme brát v úvahu kapacitní proud, který vtéká jen jedním směrem, a to od zdroje přes zem, kde se uzavírá s proudem vyvolaným kompenzační cívkou, jako ostatní kapacitní proudy a tudíž výsledný kapacitní proud lze uvažovat na porušeném vedení před místem poruchy zemním spojením ve fázi s netočivou složkou napětí U_0 . Výsledný proud, který je naměřen pomocí měřících transformátorů se bude nacházet pro neporušené fáze v I. kvadrantu, ale pro porušené fáze v II. kvadrantu, jako je zobrazeno níže na obr.6.

Jak už bylo dříve řečeno, svodový proud fází dosahuje mnohem nižší hodnoty než proud kapacitní a z tohoto důvodu by bylo velmi obtížné dohledat místo poruchy vývodu [1]. Proto se využívá metody automatického připojení odporníku paralelně k rezonanční cívice vůči zemi [1,3]. Tento odporník uměle krátkodobě navýší složku činného proudu porušenou fází, tím pádem se zvýrazní výchylka činné složky proudu u vývodu s poruchou. Jakmile dojde k poruše zemním spojením, automatika vyčká na moment, kdy se proudy blíží špičkovým hodnotám a po dobu I_s navýší uměle činný proud poruchou. Jedná-li se o dlouhodobější poruchu, lze už snadno identifikovat, ve kterém místě došlo k zemnímu spojení a lze takto dále řešit [4].



Obr. 6: Fázorový diagram napětí a proudů při kovovém zemním spojení [1]:

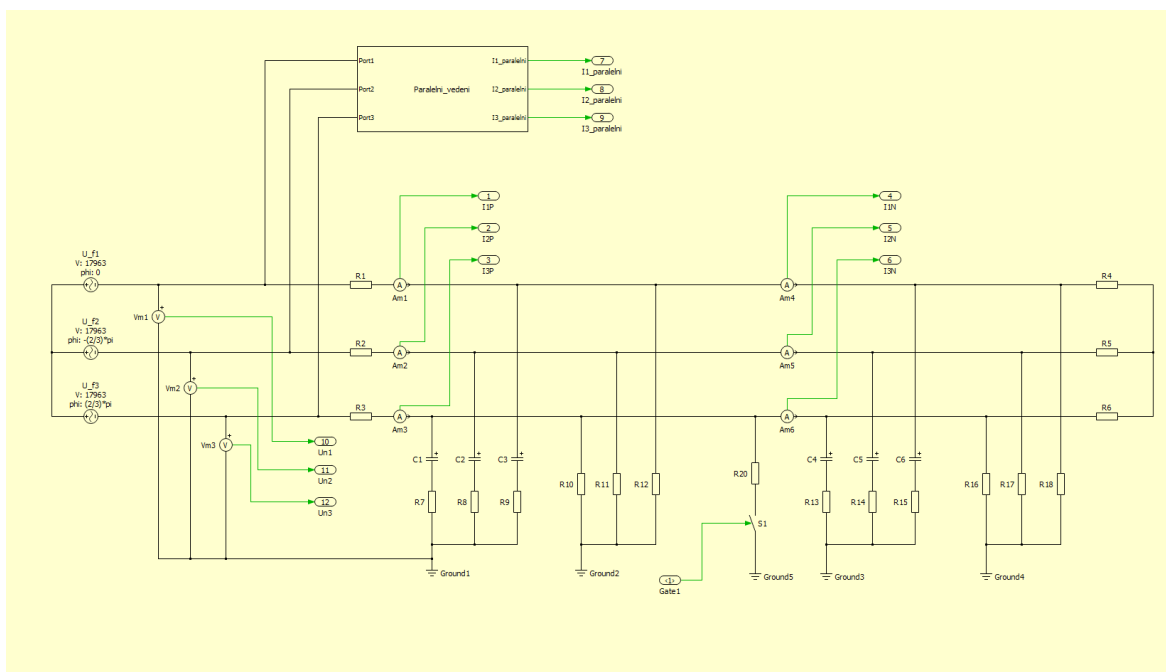
a) neporušeném b) porušeném s přizemňováním pomocí odporu na ZT

2 Matematický model distribučních sítí

2.1 Matematický model izolované sítě

V případě izolované sítě se bere v potaz, že nulový bod rozvodného transformátoru má impedanci vůči zemi $Z_N \rightarrow \infty$ a je tedy izolovaný vůči zemi. Dále bude brán v potaz odpor vedení, ale v takové míře, aby byl zanedbatelný, avšak pro správnou funkci simulačního programu nezbytný. Dále se nastaví parametry kapacit vůči zemi s parametry svodů tak, aby při vzniklé poruše tekly poruchový proud v poměru kapacitního vůči svodovému proudu 10:1 [1].

Dále byl sestaven matematický model v prostředí Matlab Simulink/PLECS, kde byl distribuční transformátor nahrazen třemi zdroji střídavého napětí 17 963V fázově otočeny o 120° . V modelu byly respektovány zejména parazitní kapacity sítě a svodové odpory.



Obr. 7: Matematický model izolované sítě vn

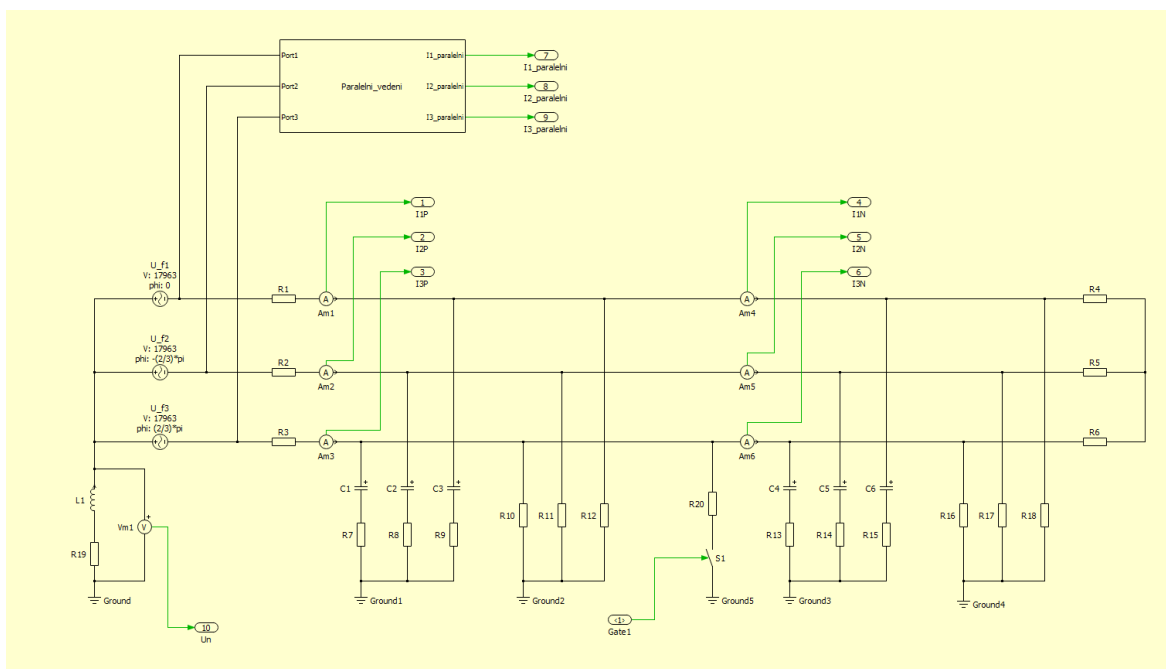
Na obr.7 výše je sestavený matematický model izolované distribuční sítě vn. Jednotlivé voltmetry připojené mezi fází a nulou představují fázové napětí vůči zemi. Ampérmetry na jednotlivých fázích měří proudy před a za místem poruchy zemním spojením. Proud je též měřen na paralelním vedení, jenž představuje větvení obvodu a je brán jako soustava všech paralelních rozvětvení sítě z tohoto místa distribuční sítě. Porucha je nasimulována pomocí spínače vůči zemi, který je sepnut pomocí náběžné hrany a představuje kovovou zemní poruchu se zanedbatelným odporem.

2.2 Matematický model kompenzované sítě

Obdobných úvah bude využito u sítí kompenzovaných. Stejně jako v modelu výše se nahradí rozvodný transformátor zdrojem elektrického napětí o totožných parametrech. Uvažuje se určitá velikost podélného odporu vedení a jednotlivých svodů vůči zemi. Odpor vedení představují odpor který je dán na jednotku délky sítě. Z velikostí kapacit, které byly voleny v izolované soustavě se následně dopočte velikost indukčnosti zhášecí tlumivky.

Tato zhášecí tlumivka má takovou hodnotu indukčnosti, aby při poruchovém stavu došlo k rezonanci s kapacitami, které jsou spojeny mezi fází a zemním bodem [3]. Toho je dosaženo sečtením jednotlivých kapacit a následným dopočtem, načež frekvence sítě je

stabilních 50Hz. Pro správnou funkci simulace byl do série s kompenzační cívkou připojen odpor o velmi nízké hodnotě, který představuje odpor reálné zhášecí tlumivky.



Obr. 8: Matematický model kompenzované sítě vn

Na obr.8 je výsledný matematický model kompenzované sítě. Popis jednotlivých částí obvodu se shoduje s izolovanou sítí. Voltmetr připojený na zhášecí tlumivce představuje netočivou složku napětí, kterou lze měřit buď na této tlumivce a nebo mezi fázemi a zemí.

V této práci se analyzují poměry při zemním spojení pomocí natočení vektorů proudu porušeného a neporušeného 3f vedení, které budou spojené paralelně na místě napájecích zdrojů a obě dvě vedení mají totožné parametry a společný zdroj představující distribuční transformátor.

3 Identifikace porušené fáze pomocí DFT

3.1 Diskrétní Fourierova transformace

Každý periodický signál lze rozložit na harmonické frekvenční složky. Abychom právě sledovaný signál dokázali analyzovat a zjistit tak frekvenční odezvu daného systému, využíváme k tomu matematickou metodu známou jako Fourierova transformace [6]. Pro analýzu diskretních signálů je definovaná diskretní Fourierova transformace (DFT). Ta na rozdíl od spojitě Fourierovi transformace pracuje se vzorky v časové oblasti k určení

jednotlivých spekter. Vzorky jsou od sebe vzdáleny o stejný časový úsek. Diskrétní Fourierova transformace je definována jako:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x_n [\cos(2\pi kn/N) - i \sin(2\pi kn/N)] \quad (3.1)$$

Kde k udává index frekvenčního spektra a X_k je spektrální složka v komplexní rovině. Kosinus udává reálnou složku a sinus složku imaginární. Celkový počet vzorků analyzovaného signálu je N , x_n je n -tý vzorek vstupního signálu v časové oblasti. Někdy se v literaturách též uvádí vztah pro diskrétní Fourierovu transformaci vyjádřenou s velikostí periody T [10-14]:

$$X[k/NT] = T \sum_{n=0}^{N-1} x[nT] e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.2)$$

Když je signál periodický, tudíž stále se opakující, můžeme periodu T zanedbat a píšeme tedy, že $T=1$ a tudíž se nám o ní vztahy zjednoduší na rovnici (3.1) [10,12].

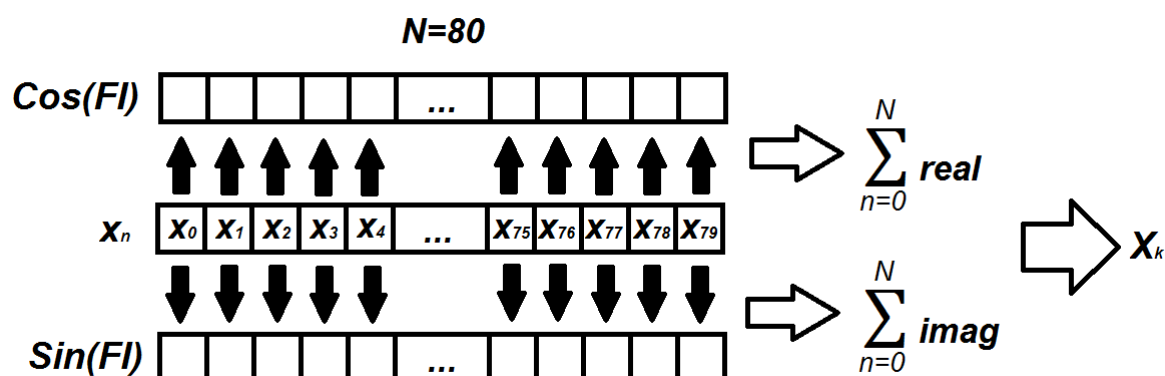
I přes tyto úpravy však spojitá a diskrétní Fourierova transformace má stejné vlastnosti symetrie. Tudíž pokud například byla funkce před diskretizací sudá, sudou zůstává i po navzorkování [11,14].

3.2 DFT s posuvným oknem

Základem principu je vytvoření posuvného okna přes, které provádí N -bodovou DFT na časových vzorcích v rámci těchto posuvných oken. Okno je násobeno s každým novým vzorkem s pevně danými kosinovými a sinovými průběhy, které mají stejný počet vzorků jako dané okno.

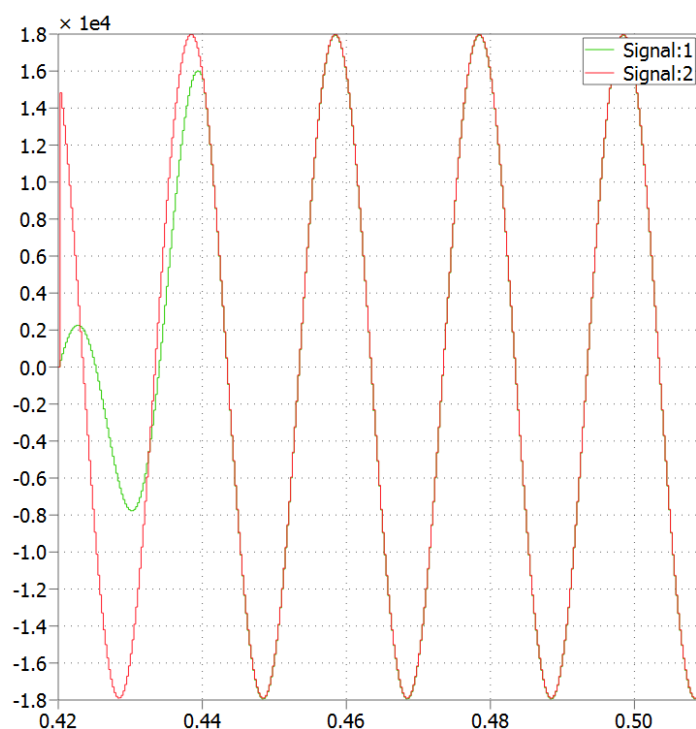
Níže na obr.9 je naznačen princip funkce algoritmu pro výpočet DFT s posuvným oknem. V každém kroku algoritmu se vyhodnotí výsledek a posune okno o jeden vzorek dále, jeden vzorek přibude ale zároveň poslední vzorek je vždy zahozen. Posuvné okno se vzorky se vždy vynásobí s n -tým prvkem harmonického signálu a následně provede sumu všech výsledků těchto součinů. Kosinus představuje složku reálnou a sinus složku imaginární. Dostaneme tak komplexní číslo, z něž lze pomocí algoritmu pro výpočet absolutní hodnoty získat velikost a taktéž lze dopočítat úhel otočení. Index frekvenčního

spektra $k=1$, protože se bere v potaz pouze frekvence 50Hz a tak signál obsahuje pouze jednu spektrální složku signálu.



Obr. 9: Princip funkce násobení oken a získání spektrální složky

Tyto vzorky se pak pomocí metody FIFO obměňují, avšak vždy zůstává původních N vzorků v daném okně. Pro správnou funkci algoritmu je nutné, aby okno se vstupními vzorky bylo zaplněné a tudíž i když se provádí algoritmus v každém kroku, jeho správné vyhodnocování začíná až po zapsání posledního vzorku. Po naplnění okna se napojí rekonstruovaný průběh na původní signál, stejně tak jak je zobrazeno na obr.10.



Obr. 10: Napojení DFT na původní signál

Jak je vidět na obrázku, zelený signál je výstup algoritmu DFT pro netočivou složku napětí U_0 , oproti tomu červeně je signál měřený přímo na zhášecí tlumivce, taktéž U_0 , při zemní poruše. K plnému napojení dojde přesně po době jedné periody, kdy se okno naplní vzorky.

Alternativou k použitému algoritmu je tzv. “sliding“ DFT (SDFT), která je méně výpočetně náročná, má problémy s numerickou stabilitou [10-15].

3.3 Určení porušeného vedení izolované sítě pomocí DFT

Aplikujeme-li doposud známé vlastnosti DFT, pro identifikaci velikostí a úhlů natočení vektoru proudů netočivé složky jednotlivých vývodů je nezbytné počítat DFT pouze jediné frekvenční složky odpovídající frekvenci 50Hz. Velikost periody tohoto signálu odpovídá $0,02s$. Aby bylo možné dále signál zpracovávat jako diskrétní, je nutné si zvolit určitou vzorkovací frekvenci f_{vz} , která nám udává s jakou frekvencí jsou odebírány vzorky ze signálu. Stejně tak, jako byly vypočítány amplitudy samotného signálu, lze tak i spočítat periodu vzorkování, což je doba, po kterou se budou odebírat vzorky z jedné periody. Velikost proměnné N , což je počet vzorků v signálu jedné periody, lze získat podílem periody signálu a periody vzorkování a tento podíl musí být celočíselný. Zde byla zvolena perioda vzorkování $T_{vz} = 250\mu s$ a tudíž výsledný počet vzorků jedné periody vychází na celočíselný výsledek $N = 80$ vzorků. Jednotlivé vzorky n jsou počítány v rozsahu $(0, N-1)$.

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_1 + i_2 + i_3) \quad (3.3)$$

$$u_0 = \frac{1}{3}(u_1 + u_2 + u_3) \quad (3.4)$$

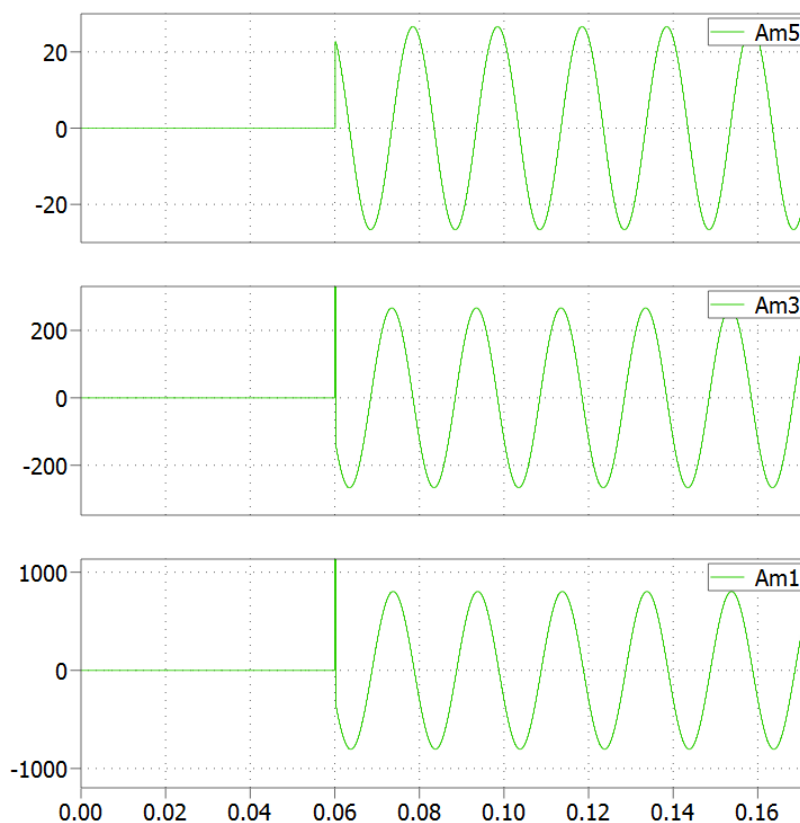
Proud i_0 představuje součet okamžitých hodnot proudů všemi fázemi, oproti tomu u_0 je součet všech fázových napětí vůči zemi. Součtové měřicí transformátory měří právě tuto složku proudu i_0 a u každého vývodu na ně se aplikují navržené algoritmy DFT. DFT pak vyhodnocuje fázor každého vývodu vůči fázoru U_0 , který je brán jako referenční a tudíž výsledný proud n -tého vzorku I_0 a napětí n -tého vzorku U_0 (v případě neodebírání U_0 z kompenzační cívky) bude dán vztahem:

Dále je vytvořen buffer, který bude mít délku N vzorků, s tím, že každý nový vzorek pomocí metody FIFO vkládá na první pozici vzorek a první vzorek z konce bufferu odebere pryč. Na tyto jednotlivé vzorky se pak dále aplikuje metodika DFT, jenž vypočte komplexní číslo pro daný index frekvenčního spektra. Z těchto čísel je tak následně získána velikost a úhel otočení I_0 a U_0 pro aktuální čas. Toto je provedeno pro tři možné stavy v síti a to pro místo porušené fáze, tedy před a za poruchou, a pro paralelní 3f větev k porušenému vedení.

Aplikace DFT na napětí U_0 je nezbytné, neboť díky točícím se složkám napětí a proudů se úhel těchto dvou složek v čase mění a tudíž se i mění úhel otočení proudu I_0 a nelze tak přesně definovat místo poruchy pouze za pomoci úhlového natočení složky proudu. Je tedy potřebné, aby byli vypočítány okamžité velikosti úhlového natočení I_0 a U_0 a tyto dvě složky od sebe odečetli. Výsledný fázový posuv mezi těmito složkami je dán vztahem:

$$FI = FI_I - FI_U \quad (3.5)$$

Pokud je daný vývod izolované sítě porušené, pak součtová složka proudu porušeného vývodu vykazuje fázor opačného směru oproti fázoru netočivé složky proudu ve fázi neporušené a v místě za zemním spojením. Nyní je třeba tuto úvahu potvrdit. Za předpokladů z předchozí kapitoly jsou vybrány vzorky proudů jednotlivých fází L_1, L_2, L_3 a tyto proudy sečteme součtovým transformátorem PTP. Pokud se jedná o neporušený stav bez nesymetrie sítě, výsledný proud daný součtovým transformátorem $i_0 = 0$ je přítomen pouze v sousledné složce, součet okamžitých hodnot fázových proudů se rovná nule. Taktéž jednotlivá napětí mají stejnou velikost a jsou vzájemně fázově otočena o úhel 120° a tedy pokud by bylo měřeno celkové napětí u_0 , taktéž by bylo rovno nule. Tudíž výsledný proud i_0 při neporušeném stavu je ve všech místech vedení roven nule. Stejně úvaha platí i pro výslednou velikost napětí u_0 .



Obr. 11: Netočivé složky svodových a kapacitních proudů před a po vzniku poruchy zemním spojením, dole proud zemním spojením

Jakmile dojde na vedení k zemní poruše, z napětí fázových vůči zemi se stanou napětí sdružená fázově otočená o 60° , protože potenciál porušené fáze se galvanicky spojí se zemním potenciálem, orientace jednoho z napětí změní svůj směr a tudíž pokud původně úhel otočení dvou fází byl 120° , tak nyní je právě daných 60° a napětí na porušené fázi je malé nebo blízké nule. Součtové transformátory napětí pak vyhodnocují celkové napětí jako součet napětí zbylých dvou fází [1]. Velikost průběhu napětí u_0 pak dále analyzujeme pomocí DFT.

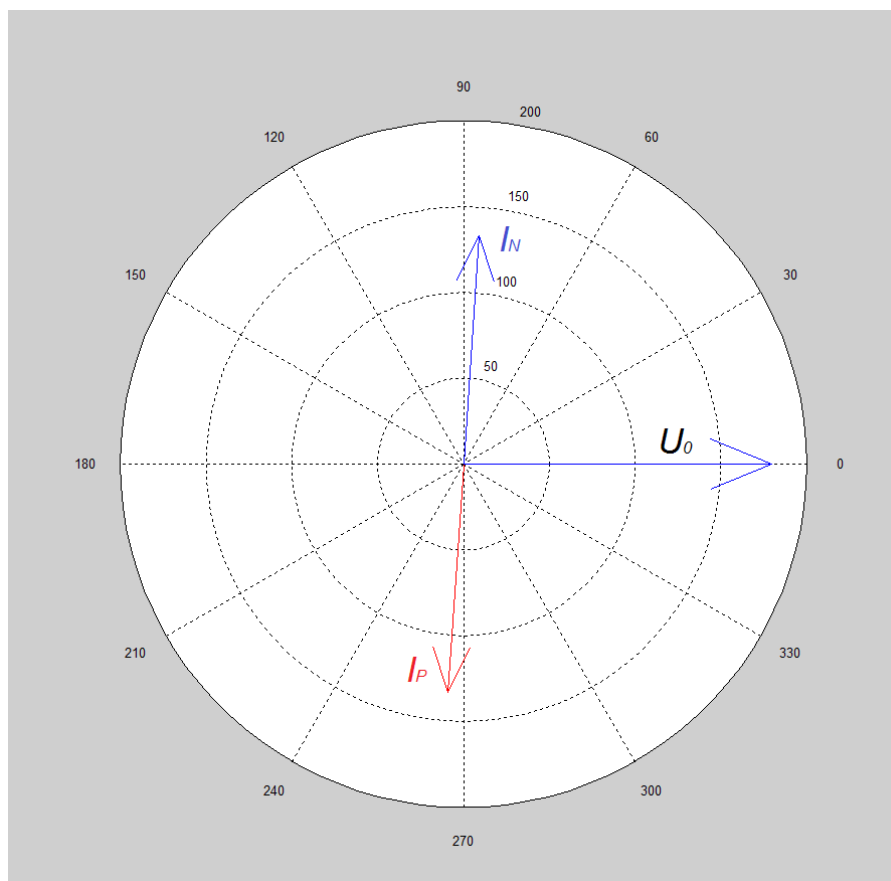
Taktéž se změní velikost průběhu proudu i_0 , která změní svou hodnotu a bude se skládat ze všech proudů svodů a kapacit vůči zemi, krom proudů kapacitních a svodů právě této fáze v místě porušeného vedení před místem poruchy. Za místem zemního spojení a paralelní 3f větev k porušené fázi bude dosahovat pouze proudů složených z kapacit a proudů svody tohoto vedení.

Zde uvažujeme zemní poruchu s co možná nejnižším odporem tak, aby se principem co nejvíce podobala poruše kovové. Tudíž odpor porušené fáze se přibližně rovná nule, avšak skutečná hodnota $R_p = 0,1\Omega$ kvůli správné funkci simulačního programu. V takovém případě lze brát v potaz úvahy ideálního zemního spojení, které nijak nebrání a neovlivňuje proud poruchou při námi zvolených hodnotách.

Z takto určených parametrů je pak možné vypočítat jednotlivé výsledné napětí U_0 a výsledný proud I_0 , které je počítáno za pomoci DFT a součtu vzorků napětí u_1, u_2, u_3 a proudu i_1, i_2, i_3 ze všech tří fází vedení. To je provedeno tak, že tyto vzorky ze všech tří fází jsou posílány do bloku, v němž je uložený soubor Matlabovské funkce, ten je volán pomocí zdroje obdélníkového signálu a to tak, aby po dobu každé periody provedl N-krát výpočet, který je uložený v Matlabovské funkci.

V Matlabovské funkci se tedy předem nadefinuje buffer pro napětí a proud o $N=80$ vzorcích, jak už bylo dříve spočteno. Tyto buffery jsou brány jako matice o rozměrech 1×80 a v každém kroku se posunou o jeden vzorek doprava s tím, že poslední vzorek smažou a na pozici prvního zapíší nový vzorek. Pomocí DFT pak jednotlivé vzorky vynásobí s kosinovými a sinovými průběhy a sečtou je. Výsledkem je komplexní číslo, kde kosinus popisuje reálnou složku a sinus složku imaginární. Z tohoto komplexního čísla lze provést absolutní hodnotu, čímž vyjde velikost amplitudy napětí U_0 a proudu I_0 a pomocí funkce *angle()* pak dostáváme fázové posunutí jednotlivých veličin [16].

Finálního pootočení proudu I_0 vůči napětí U_0 lze dosáhnout odečtením fázového posuvu netočivé složky napětí a proudu a tím lze dostat následující komplexní rovinu jenž je následně z výsledných hodnot vykreslena přes funkci compass (Obr.12) [16]. V této rovině je modře zobrazeno vedení, které je paralelně k vedení porušenému a červeně je zobrazeno vedení, ve kterém došlo ke kovové zemní poruše a proud je měřen ještě před místem této poruchy, ale za větvením sítě. Dále je zde zobrazeno U_0 , které je stokrát zmenšeno pro lepší zvýraznění proudů.



Obr. 12: Komplexní rovina netočivých složek proudů a napětí v izolované síti

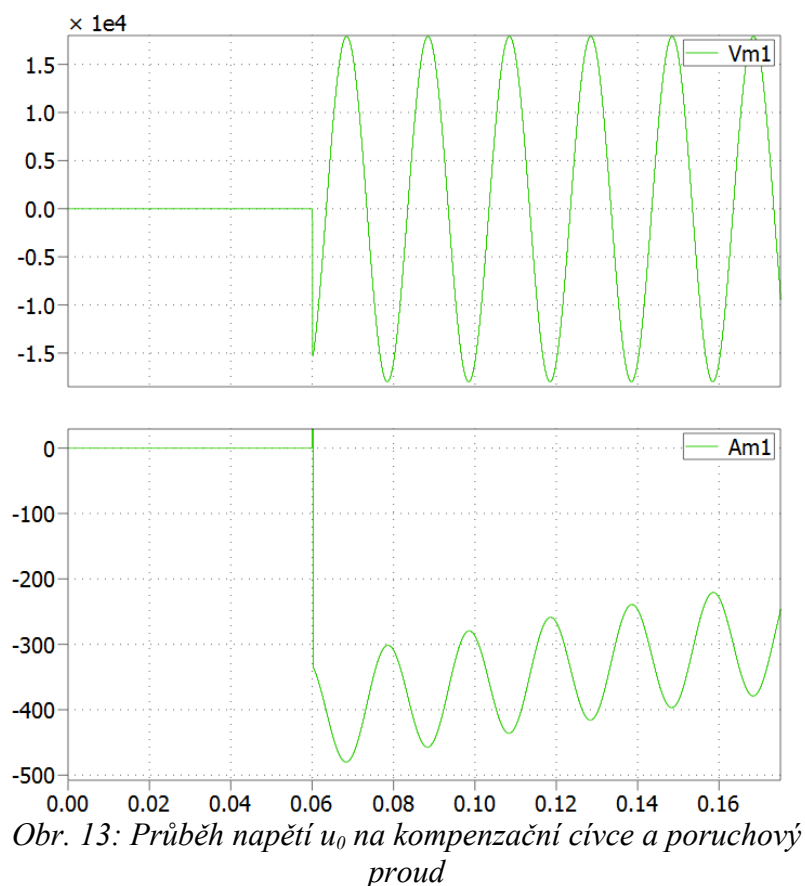
Jak je na obr.12 výše vidět, pokud je napětí U_0 úhlově otočené o 0° , pak na vedení paralelně k poruše teče celkový proud I_{0N} (modře), který je otočen v našem případě o $86,180^\circ$ vůči napětí U_0 . Tato složka proudu I_{0N} se skládá z proudu svodů a kapacitních proudů na neporušené fázi, které tečou směrem do uzemnění a vrací se zpět přes místo poruchy. Oba tedy tečou ve fázi s netočivou složkou napětí. Když se začne brát v potaz vedení porušené před místem poruchy a opět se ponechá stav, kdy napětí U_0 je úhlově otočené o 0° , pak celkový proud který teče před místem kovového zemního spojení I_{0P} (červeně) je roven součtu všech kapacitních proudů a proudů svody ostatních neporušených částí vedení, tudíž proud se uzavírá opačným směrem než I_{0N} a je taktéž složen z proudu svodů a kapacitních proudů, obou s opačným znaménkem. Pokud-li vypočteme úhel fázového pootočení vůči U_0 , dostaneme $-93,816^\circ$ nebo také jinak $266,184^\circ$. Pro kontrolu lze úhlové otočení I_{0P} odečíst od I_{0N} a je vidět, že oba dva proudy jsou opravdu otočeny o 180° . Pokud-li provedeme druhou kontrolu, kdy odečteme $90^\circ - 86,180^\circ$ a dostaneme tak úhel $3,82^\circ$, tak je to přibližně ten úhel, o který je proud I_{0P}

pootočen od osy -90° a tudíž se fázové posuvy proudů při úhlovém otočení napětí U_0 shodují s předpoklady.

3.4 Identifikace porušené fáze kompenzované sítě pomocí DFT

Pro určení porušené fáze v kompenzovaných sítích lze využít podobných principů, jako tomu bylo u sítí izolovaných. Tedy budou se brát v potaz počáteční podmínky, při kterém je obvod v neporušeném stavu. Tudíž výsledný součet všech tří napětí pomocí měřících transformátorů PTN a výsledný proud měřený pomocí transformátorů PTP je roven nule. Jakmile dojde k poruše, tato napětí opět nabudou sdružených hodnot a opět budou vůči sobě posunuty o 60° , kromě napětí fáze postižené zemní poruchou, na níž bude napětí nulové [1,3].

Oproti sítím izolovaným je však v sítích kompenzovaných připojen na místě nulového bodu vůči zemi rozvodného transformátoru kompenzační cívka, taktéž zvaná po svém objeviteli jako Petersenova tlumivka. Tato cívka v neporušeném stavu nevede žádný proud a není na ní žádné napětí. Pokud-li však dojde k zemní poruše, tato kompenzační tlumivka má za úkol vykompenzovat veškerý proud způsobený kapacitními proudy a nechat tak vést přes místo poruchy pouze proud činný. Taktéž se v porušeném stavu objeví na této kompenzační cívce napětí U_0 , což je součet napětí všech tří fází vůči zemi [4,5]. Jak je tedy zřejmé, v tomto druhu sítí lze odebírat vzorky u_0 ze dvou možných částí a to buď přímo z kompenzační tlumivky a nebo z jednotlivých fází vůči zemi a tyto napětí sečíst a podělit třemi. Obě metody byly vyzkoušeny, ale pro změnu jsem zde ponechal napětí z kompenzační tlumivky. Níže na obr.13 je zobrazen průběh napětí na zhášecí tlumivce v porovnání s poruchovým proudem. Tento poruchový proud má určitou formu přechodového jevu způsobených pasivními součástkami, avšak po určité době odezní.



Obr. 13: Průběh napětí u_0 na kompenzační cívce a poruchový proud

Stejně jako tomu bylo u sítí izolovaných, tak i u sítí kompenzovaných při porušeném stavu začne protékat místem poruchy proud. V místě paralelní neporušené větve a za místem poruchy teče proud, který je dán velikostí proudu svody a kapacitními proudy vedení v tomto místě. Tento proud neporušenými částmi vedení se uzavírá přes zemní spojení, tam je však kapacitní část proudu kompenzována pomocí Petersenovi tlumivky a to tak, že je uvedena s kapacitními proudy do rezonance. Tudíž tato část proudu je ze zemního spojení odfiltrována a místem poruchy se uzavírá pouze proud svodů.

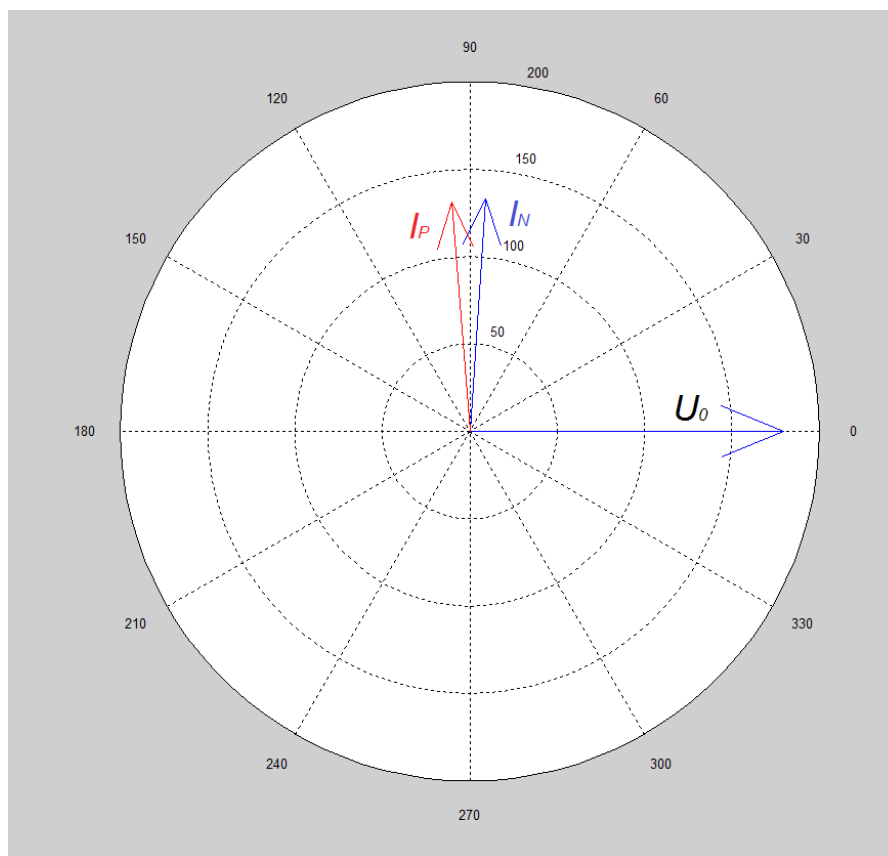
Na vedení, jenž má zemní spojení a je na něm měřen proud i_0 před místem poruchy je dán velikostně jako proud všech svodů v síti krom svodu tohoto vedení v místě poruchy a kapacitního proudu, který protéká přes toto místo poruchy a uzavírá se přes zem na kompenzační cívce. Proud svodů se zde tedy uzavírá s opačným smyslem a vtéká do místa poruchy. Kapacitní proudy jak v místě poruchy, tak paralelně k porušené fázi by se normálně uzavírali zpět, avšak zde jsou odfiltrovány cívkou a tudíž se neuzavírají zpět přes zemní spojení.

Z těchto úvah lze říci, že proud kapacitní by se měl na měřícím transformátoru jevit jako ve fázi s U_0 , neboť vtéká do obvodu, avšak proud této kapacity i ostatních kapacit se tudý nevrací, neboť je uveden do rezonance s kompenzační tlumivkou. Oproti tomu svodový proud se v místě poruchy uzavírá ze všech ostatních částí vedení a nutno tedy říci, že tento proud by na měřícím transformátoru proudem měl dosahovat opačného smyslu než fáze U_0 .

Byl vytvořen matematický model sítě a pomocí simulačního programu Matlab/Simulink byli ověřeny jeho funkce. Na výstup nulového bodu transformátoru byla připojena kompenzační tlumivka a taktéž se spočetla indukčnost L tak, aby se obvod dostal do rezonance s kapacitami při zemním spojení. Díky zaokrouhlování nebyla tato indukčnost zvolena úplně přesně a tak minimální proud, který je zanedbatelný protéká stále místem poruchy. Dále kvůli správné funkci simulace je nutno připojit velmi malý odpor na cívku a to $R=0,1\Omega$. Tudíž místem kompenzační tlumivky protéká velmi malý činný proud, který se bude také uzavírat přes místo poruchy. Obvod jsme nastavili tak, že do času $t=0,06$ je obvod v neporušeném stavu a v čase $t=0,06$ na obvodu vznikne porucha.

Po tomto čase vzniku poruchy začne stejně tak, jako tomu bylo u sítě izolované, Matlabovská funkce zaznamenávat vzorky do bufferu o šířce $N=80$ vzorků. Oproti izolované síti je na místo prvního vzorku napětí v tomto bufferu ukládáno napětí přímo z kompenzační tlumivky. Proud je opět stejně zaznamenáván z jednotlivých fází a je v této Matlabovské funkci sčítán a podělen třemi. Tyto vzorky i_0 a u_0 jsou roznásobeny s kosinovými a sinovými průběhy a následně sečteny přesně jak je dáno podle DFT.

Po provedení algoritmu DFT vyjde velikost amplitudy a fázového natočení proudu a napětí na porušeném vedení a na vedení paralelně k poruše. Když se nastaví fázové posunutí napětí U_0 tak, aby úhel jeho posunutí byl roven 0° , pak lze dopočítat snadno úhel jak proudu neporušeným 3f paralelním vývodem I_{0N} , tak fázové posunutí fáze s poruchou zemním spojením I_{0P} . Kdyby se tyto dva vzorky nechali vykreslit v komplexní rovině a řeklo by se, že proud neporušeným 3f paralelním vedením bude označen v této rovině modře a proud 3f větví, který je porušen zemní poruchou a proud na ní měříme před místem vzniku této poruchy, vyšla by následující komplexní rovina z obr.14.



Obr. 14: Komplexní rovina netočivých složek proudů a napětí v kompenzované síti

Při nastavení U_0 do úhlového natočení 0° lze dostat fázové pootočení proudu neporušenou větví $86,183^\circ$. Proud větví porušenou má fázové pootočení vůči nulovému otočení proudu velikost $94,484^\circ$. V tomto případě tedy fázové pootočení obou dvou proudů I_{0N} a I_{0P} nevyšlo přesně zrcadlově otočené na ose otočení 90° . To může být způsobeno přechodovým jevem, který nám vznikl na místě proudu porušenou fází v simulačním programu, který způsobily pasivní součástky, neboť rozdíl otočení je minimální a to $0,67^\circ$. Pokud-li by se toto otočení ještě rozdělilo do obou proudů, vycházela by chyba otočení na jednom proudu o $0,335^\circ$. Výsledný fázový posuv mezi proudem porušeného 3f vedení a vedení paralelního k tomuto porušenému vedení je $8,301^\circ$. Kdybychom měřili proud v tomto simulačním programu v delším čase, kdy ustává nechtěný přechodový jev, výsledné pootočení mezi těmito proudy by rostlo a chyba by se ještě snížila. Lze tedy říci, že pomocí této metody bychom dokázali určit místo zemní poruchy u kompenzované sítě vn a ověřili jsme tak teoretické předpoklady.

Závěr

Za pomocí aplikací výpočtů DFT jsme si zjistili, že je velmi efektivní pro výpočet fázového posuvu proudu a odhadu porušené fáze jak pro síť izolovanou, tak pro síť kompenzovanou. Díky moderním technologiím lze i snadno vytvořit systém, který by dokázal takovéto výpočty provádět u distribučních sítí s vysokou rychlostí a efektivností. Aby algoritmus dokázal provést výpočet odhadu porušenou fází, potřebuje pro správnou funkci vypočítávat aspoň po dobu jedné periody, což odpovídá době 20ms.

Výhoda této metody je určení místa poruchy zemním spojením u kompenzačních sítí bez nutnosti připojování pomocného odporu na místě kompenzační tlumivky. Odpadá nám tak část umělého navyšování činné složky proudu v místě poruchy a tím i namáhání samotného vedení při identifikaci poruchy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] TOMAN, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jaroslava ORGÁSOVÁ, Martin PAAR a David TOPOLÁNEK. *Provoz distribučních sítí* [online]. Praha: EUROPRINT, 2011 [cit. 2017-05-29]. ISBN 978-80-01-0935-8. Dostupné z: http://k315.feld.cvut.cz/CD_MPO/CVUT-7-Provoz.pdf
- [2] ORGÁSOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení* [online]. , 151 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~tesarova/PEC/Soubory/RZ_2007.pdf
- [3] HÄNNIEN, Seppo. *Single phase earth faults in high impedance grounded networks* [online]. Espoo, Finsko, 2001 [cit. 2017-05-29]. Dostupné z: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P453.pdf>. Disertační práce.
- [4] TESAŘOVÁ, Miroslava. *Průmyslová elektroenergetika* [online]. Plzeň: ZČU, 2000 [cit. 2017-05-30]. ISBN 80-7082-703-3. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap6.pdf>
- [5] TOMAN, Petr. *Lokalizace místa zemního spojení v sítích vn* [online]. Brno, 2002 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2245-9.pdf>
- [6] HÄBERLE, Heinz a kol. *Průmyslová elektronika a informační technologie*. 4. Praha: Europa-Sobotáles cz., 2003. ISBN 80-86706-04-4.
- [7] MLYNEK, Petr, Jiri MISUREC a Martin KOUTNY. Modeling and evaluation of power line for Smart grid communication. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review)* [online]. 2011, 87(8), 5 [cit. 2017-05-30]. ISSN 0033-2097. Dostupné z: <http://red.pe.org.pl/articles/2011/8/45.pdf>
- [8] MLYNEK, Petr, Jiri MISUREC, Martin KOUTNY, Radek FUJDIÁK a Tomáš JEDLIČKA. Analysis and Experimental Evaluation of Power Line Transmission Parameters for Power Line Communication. *Measurement science review* [online]. 2015, 15(2), 8 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.measurement.sk/2015/Mlynek.pdf>
- [9] FUJDIÁK, Radek a Lukáš BERNARD. Ochrany vedení v sítích IT. *Elektro* [online]. 2008, (3), 7 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36857.pdf
- [10] DAVÍDEK, Vrstilav a Pavel SOVKA. *Číslicové zpracování signálů a implementace*. Praha: ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01530-0.
- [12] HOLČÍK, Jiří. *Signály, časové řady a lineární systémy* [online]. Brno: Akademické nakladatelství cerm, s.r.o. Brno, 2012 [cit. 2017-05-30]. ISBN 978-80-7204-792-5. Dostupné z: <https://www.iba.muni.cz/res/file/ucebnice/holcik-signal-y-casove-rady-linearni-systemy.pdf>
- [11] *Fourierova transformace* [online]. , 53 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://nora.fpf.slu.cz/~hledik/pub/teach/classes/sigan/resources/BryjovaI-AppsDEFG.pdf>

- [13] *Analýza a zpracování signálů* [online]. , 55 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: http://www.kiv.zcu.cz/~mautner/Azs/Azs2_Spojite_systemy_Vzorkovani.pdf
- [14] JACOBSEN, Eric a Richard LYONS. The sliding DFT. *IEEE Signal processing magazine* [online]. 2003, (3), 7 [cit. 2017-05-30]. ISSN 1053-5888. Dostupné z: <http://www.cmlab.csie.ntu.edu.tw/DSPCourse/reference/Sliding%20DFT.pdf>
- [15] *The Sliding DFT* [online]. , 4 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://www.comm.toronto.edu/~dimitris/ece431/slidingdft.pdf>
- [16] KOLÁČEK, Jan a Kateřina KONEČNÁ. *Jak pracovat s Matlabem* [online]., 96 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <https://www.math.muni.cz/~kolacek/vyuka/vypsyst/navod.pdf>