

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**SIMULACE PŘETRŽENÉHO VODIČE
V DISTRIBUČNÍ SÍTI ZA POUŽITÍ PROGRAMU
ATP-EMTP**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

VÁCLAV PACULA

BRNO 2012



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Václav Pacula

ID: 125170

Ročník: 3

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Simulace zlomeného vodiče v distribuční síti za použití programu ATP-EMTP

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Používané metody k detekci zlomených vodičů
2. Metoda činitele nesymetrie proudu
3. Metoda časového posunu
4. Pomocí programu ATP-EMTP provést porovnání obou metod

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Martin Paar, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

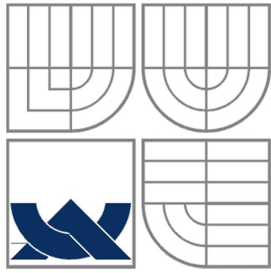
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

PACULA, V. *Simulace zlomeného vodiče v distribuční síti za použití programu ATP-EMTP*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 60 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Paar, Ph.D..

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.....



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

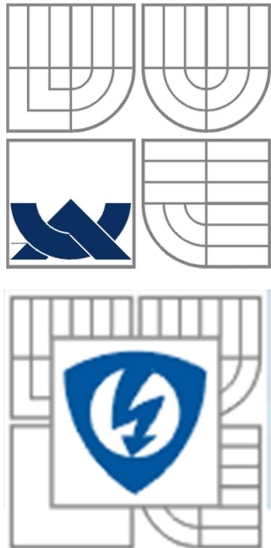
**Simulace zlomeného vodiče
v distribuční síti za použití programu
ATP-EMTP**

Václav Pacula

vedoucí: Ing. Martin Paar, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**Faculty of Electrical Engineering and Communication
Department of Electrical Power Engineering**

Bachelor's Thesis

Simulation of Broken Conductor in Distribution Network by ATP-EMTP Program

by

Václav Pacula

**Supervisor: Ing. Martin Paar, Ph.D.
Brno University of Technology, 2012**

Brno

ABSTRAKT

Při zlomení nebo přetržení vodiče dojde k dopadu vodiče na zem. V izolovaných sítích dochází k zemnímu spojení. Pro detekci zemního spojení je nejčastěji používána metoda netočivé složky napětí. Principem metody je součet napětí ve všech fázích, v symetrické soustavě je součet roven nule. Cílem práce je tuto metodu porovnat s metodou souměrných složek a s metodou časového posunu. Metoda souměrných složek srovnává souslednou a zpětnou složkou proudů. Při změně stavu soustavy dochází ke změně periody, z tohoto vychází metoda časového posunu. Pro srovnání je použit program ATP-EMTP, který simuluje elektrické přechodné děje. V tomto programu jsou vytvořeny modely sítí, v kterých jsou tyto metody zkoumány. Jedná o idealizovaný model jednoduché vedení a model části distribuční sítě. Po provedení simulace jsou průběhy dějů zpracovány a z výsledků zjištěna schopnost detekce zemního spojení. Dnes používané ochrany jsou založeny na měření netočivé složky napětí. Novější ochrany tuto metodu rozšiřují o další možnosti detekce a lokalizace.

KLÍČOVÁ SLOVA: ATP-EMTP; zemní spojení; souměrné složky; zemní ochrany; netočivá složka napětí; perioda

ABSTRACT

When broken conductor will impact on the ground. In isolated networks to ground fault occurs. For fault detection is the most commonly used method of zero-sequence voltage. The principle of the method is the sum of the voltage in all phases in the symmetric system is the sum zero. The aim is to compare this method with the method of symmetrical sequence method and timeshiftomg. The method of symmetrical sequences compares sequence currents. To change the status of the system is changed period, this method is based on the time shift. For comparison is used the ATP-EMTP program, that simulates the electrical transients. In this program are designed network model in which, these methods are investigated. It is a simple model of an idealized model and part of distribution network. After the simulation waveforms of events are processed and the results found fault detection. Protection used today are based on measurements of zero-sequence voltage. A newer method of protection that extends further the possibility of detection and localization.

KEY WORDS: ATP-EMTP; ground-fault; symmetrical sequences; fault protection; zero-sequence voltage; period

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 10 |
| SEZNAM TABULEK | 11 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 12 |
| ÚVOD | 13 |
| 1 METODY DETEKCE ZEMNÍHO SPOJENÍ..... | 14 |
| 1.1 METODA SOUMĚRNÝCH SLOŽEK..... | 14 |
| 1.2 PŘÍKLAD TRANSFORMACE SOUMĚRNÝCH SLOŽEK..... | 15 |
| 1.3 DETEKCE PŘETRŽENÉHO VODIČE POMOCÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK | 17 |
| 1.4 DETEKCE PŘETRŽENÉHO VODIČE MĚŘENÍM NETOČIVÉ SLOŽKY NAPĚTÍ..... | 17 |
| 1.5 METODA ČASOVÉHO POSUNU | 18 |
| 2 ATP-EMTP | 19 |
| 2.1 ATPDRAW | 19 |
| 2.1.1 PRVKY ATPDRAW | 20 |
| 2.1.2 SPOJOVÁNÍ PRVKŮ | 21 |
| 2.2 GTPPLOT..... | 21 |
| 2.3 PLOTXY..... | 22 |
| 3 MODEL JEDNODUCHÉ SÍTĚ..... | 23 |
| 3.1 NASTAVENÍ MODELU..... | 25 |
| 4 MODEL ČÁSTI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ..... | 26 |
| 4.1 PRVKY ELEKTRIZAČNÍ SÍTĚ | 26 |
| 4.2 MODEL V ATP – EMTP..... | 26 |
| 4.2.1 MODEL Y VEDENÍ..... | 26 |
| 4.2.2 MODEL KABELU | 27 |
| 4.2.3 MODEL SÍŤOVÉHO NAPAJEČE..... | 27 |
| 4.2.4 MODEL ZÁTĚŽE..... | 27 |
| 4.2.5 MODEL Y TRANSFORMÁTORŮ..... | 28 |
| 4.2.6 SIMULACE ZLOMENÍ VODIČE | 28 |
| 5 ZPRACOVÁNÍ VÝSTUPŮ Z PROGRAMU | 29 |
| 5.1 ZOBRAZENÍ PRŮBĚHŮ | 29 |
| 5.2 VÝPOČET PERIODY..... | 29 |
| 5.2.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU | 29 |
| 5.3 VÝPOČET AMPLITUDY A POSUNU | 29 |
| 5.3.1 PŘÍKLAD VÝPOČTU | 30 |
| 5.4 NETOČIVÁ SLOŽKA PROUDU A NAPĚTÍ | 31 |
| 5.4.1 PŘÍKLAD NALEZENÍ MAXIMÁLNÍ HODNOTY..... | 31 |
| 6 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY | 32 |

| | |
|--|-----------|
| 6.1 MĚŘENÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK..... | 32 |
| 6.1.1 MODEL JEDNODUCHÉHO VEDENÍ..... | 32 |
| 6.1.2 MODEL ČÁSTI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ..... | 32 |
| 6.2 METODA NETOČIVÉ SLOŽKY NAPĚTÍ..... | 34 |
| 6.2.1 MODEL JEDNODUCHÉHO VEDENÍ..... | 34 |
| 6.2.2 MODEL ČÁSTI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ..... | 35 |
| 6.3 METODA ČASOVÉHO POSUNU..... | 37 |
| 6.3.1 MODEL JEDNODUCHÉHO VEDENÍ..... | 37 |
| 6.3.2 MODEL ČÁSTI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ..... | 38 |
| 7 SHRNU TÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ..... | 39 |
| 8 OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍ..... | 40 |
| 8.1 OCHRANY JEDNOÚČELOVÉ..... | 40 |
| 8.1.1 OCHRANA GSC12, GSS12..... | 40 |
| 8.1.2 INDIKÁTOR ZEMNÍCH SPOJENÍ A ZKRATŮ MEG60..... | 40 |
| 8.1.3 RELÉ PRO LOKALIZACI ZEMNÍCH SPOJENÍ EOR-D..... | 40 |
| 8.2 POKROČILÉ DISTRANČNÍ OCHRANY..... | 42 |
| 8.2.1 ABB IED RE615..... | 42 |
| 9 ZÁVĚR..... | 43 |
| 10 PŘÍLOHA A..... | 43 |
| 11 PŘÍLOHA B..... | 43 |
| POUŽITÁ LITERATURA..... | 44 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 1: Rozložení do souměrných složek</i> | <i>16</i> |
| <i>Obrázek 2: Složení souměrných složek do nesympetrické soustavy.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Obrázek 3: Nastavení parametrů simulace</i> | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 4: Výběr prvků</i> | <i>20</i> |
| <i>Obrázek 5: Realizace modelu sítě</i> | <i>24</i> |
| <i>Obrázek 6: Část distribuční sítě.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Obrázek 7: Realizace části distribuční sítě v modelu.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Obrázek 8: Průběh proudů v jednoduchém modelu.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Obrázek 9: Harmonické zkreslení proudů při dopadu vodiče</i> | <i>34</i> |
| <i>Obrázek 10: Napěťová špička netočivé složky napětí</i> | <i>35</i> |
| <i>Obrázek 11: Závislost netočivé složky napětí na zemním odporu.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 12: Průběh netočivé složky napětí u kovového spojení.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Obrázek 13: Závislost harmonického zkreslení proudů.....</i> | <i>42</i> |

SEZNAM TABULEK

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabulka 1: Výsledky simulace metody souměrných složek u modelu jednoduchého vedení.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Tabulka 2: Výsledky simulace metody souměrných složek u modelu části distribuční sítě.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabulka 3: Výsledky simulace metody netočivé složky napětí u modelu jednoduchého vedení.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Tabulka 4: Výsledky simulace metody netočivé složky napětí u modelu části distribuční sítě.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabulka 5: Výsledky simulace metody časového posunu u modelu jednoduchého vedení.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Tabulka 6: Výsledky simulace metody časového posunu u modelu části distribuční sítě.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Tabulka 7: Celkové harmonické zkreslení v jednotlivých fázích.....</i> | <i>41</i> |

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------|------------------------------|
| I_A | proud ve fázi A |
| I_B | proud ve fázi B |
| I_C | proud ve fázi C |
| I_0 | netočivá složka proudu |
| $I_{(1)}$ | sousledná složka proudu |
| $I_{(2)}$ | zpětná složka proudu |
| $I_{(0)}$ | netočivá složka proudu |
| ρ_i | činitel nesymetrie |
| U_0 | netočivá složka napětí |
| U_{MAX} | amplituda napětí |
| U_S | sdružené napětí |
| U_A | napětí fáze A |
| U_B | napětí fáze B |
| U_C | napětí fáze C |
| a | operátor natočení |
| T | perioda |
| s | dráha |
| t | čas |
| g | tíhové zrychlení Země |
| THD | celkové harmonické zkreslení |

ÚVOD

Elektrická síť je soubor elektrických stanic a elektrických vedení zajišťující přenos a rozvod elektrické energie. Jedná o spojovací článek mezi výrobou a spotřebou elektrické energie. Kvalitu a spolehlivost dodávky elektrické energie nepříznivě ovlivňují poruchy v elektrických sítích. Zlomení nebo přetržení vodiče s následným pádem patří mezi tyto jevy. Mohou být zapříčiněny povětrnostními podmínkami, únavou materiálu nebo množícími se pokusy o krádež kovových materiálů.[13]

Podle účelu elektrických sítí se rozdělují na přenosové a distribuční sítě. Přenosové sítě jsou určeny pro přenos velkých výkonů na velké vzdálenosti. V České republice jsou to sítě o napětí 400 kV nebo 220 kV. Tyto sítě jsou účinně zemněné a při přetržení vodiče dojde k jednofázovému zkratu, proudy jsou několika násobně vyšší oproti ustálenému stavu a mají indukční charakter.

Distribuční sítě spojují přenosovou soustavu s koncovými uživateli. Jsou sítě o napětí 110 kV a 22 kV. Sítě 22 kV bývají izolované nebo kompenzované. V těchto sítích při přetržení a následném pádu lze mluvit o zemním spojení. Proudů zemního spojení jsou malé a mají kapacitní charakter. Tyto proudy se uzavírají pouze přes kapacity fází a jejich svodové odpory. Napětí zdravých fází mohou převýšit hodnotu sdruženého napětí. Provoz sítě izolované je možný i se zemním spojením do 10 A[12] kapacitního proud u nových sítí. V takto provozované síti je však nutné poruchu co nejdříve odhalit a odstranit. Dále se práce bude zabývat detekcí tohoto jevu. Cílem je porovnat metody detekce zemního spojení. K tomuto srovnání bude použit program ATP-EMTP. [6]

1 METODY DETEKCE ZEMNÍHO SPOJENÍ

1.1 Metoda souměrných složek

Pro souměrný trojfázový systém platí, že amplitudy proudů a napětí mají stejnou velikost a jsou fázové posunuty o 120° . Pokud dojde ke změně fázového posunu nebo ke změně velikosti amplitudy jedná již o soustavu nesouměrnou. K matematickému popisu nesouměrné soustavy lze použít metodu souměrných složek.

Metoda souměrných složek je lineární transformace při níž nesouměrnou soustavu nahrazujeme trojicí souměrných soustav. Jedná o soustavu souslednou, zpětnou a netočivou.

Sousledná soustava se skládá ze tří fázorů stejné velikosti posunutých o 120° , má stejný sled fází jako nahrazovaná soustava. Sousledná soustava se vypočte:

$$\mathbf{I}_{A(1)} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{a}\mathbf{I}_B + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_C) \quad (1.1)$$

Kde \mathbf{a} je operátor natočení a platí pro něj:

$$\mathbf{a} = e^{j120} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (1.2)$$

Z toho lze snadno určit:

$$\mathbf{a}^2 = e^{j240} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Další fáze se určí:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{B(1)} &= \mathbf{a}^2\mathbf{I}_{A(1)} \\ \mathbf{I}_{C(1)} &= \mathbf{a}\mathbf{I}_{A(1)} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Zpětná soustava obsahuje také tři fázory stejné velikosti posunutých o 120° , má ale opačný sled fází než nahrazovaná soustava. Zpětná soustava se vypočte:

$$\mathbf{I}_{A(2)} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_a + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_B + \mathbf{a}\mathbf{I}_c) \quad (1.4)$$

Pro další fáze platí:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{B(2)} &= \mathbf{a}\mathbf{I}_{A(2)} \\ \mathbf{I}_{C(2)} &= \mathbf{a}^2\mathbf{I}_{A(2)} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Netočivá soustava se skládá ze tří fázorů stejné velikosti a stejné fáze. Pro výpočet zpětné soustavy platí: [1]

$$\mathbf{I}_{A(0)} = \mathbf{I}_{B(0)} = \mathbf{I}_{C(0)} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C) \quad (1.6)$$

Fázory nesymetrické soustavy ze souměrných složek získáme podle těchto rovnic:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{(1)} + \mathbf{I}_{(2)} + \mathbf{I}_{(0)} \quad (1.7)$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{(1)} + \mathbf{a} \mathbf{I}_{(2)} + \mathbf{I}_{(0)} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{a} \mathbf{I}_{(1)} + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{(2)} + \mathbf{I}_{(0)} \quad (1.9)$$

1.2 Příklad transformace souměrných složek

Názorné grafické zobrazení demonstrujeme následujícím příkladem. Je dána nesymetrická soustava proudů:

$$\mathbf{I}_A = 116,08 \angle -109,04^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_B = 141,42 \angle -201,17^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_C = 144,21 \angle 1,60^\circ \text{ A}$$

Složky sousledné soustavy vypočteme z rovnic 1.2a 1.3:

$$\mathbf{I}_{A(1)} = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_A + \mathbf{a} \mathbf{I}_B + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_C) = \frac{1}{3} (116,08 \angle -109,04^\circ + \mathbf{a} 141,42 \angle -201,17^\circ + \mathbf{a}^2 144,21 \angle 1,60^\circ)$$

$$\mathbf{I}_{A(1)} = 128,58 \angle -102,69^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{B(1)} = \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{A(1)} = 128,58 \angle 137,31^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{C(1)} = \mathbf{a} \mathbf{I}_{A(1)} = 128,58 \angle 17,31^\circ \text{ A}$$

Složky zpětné soustavy vypočteme z rovnic 1.4 a 1.5:

$$\mathbf{I}_{A(2)} = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_A + \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_B + \mathbf{a} \mathbf{I}_C) = \frac{1}{3} (116,08 \angle -109,04^\circ + \mathbf{a}^2 141,42 \angle -201,17^\circ + \mathbf{a} 144,21 \angle 1,60^\circ)$$

$$\mathbf{I}_{A(2)} = 33,94 \angle 91,84^\circ \text{ A}$$

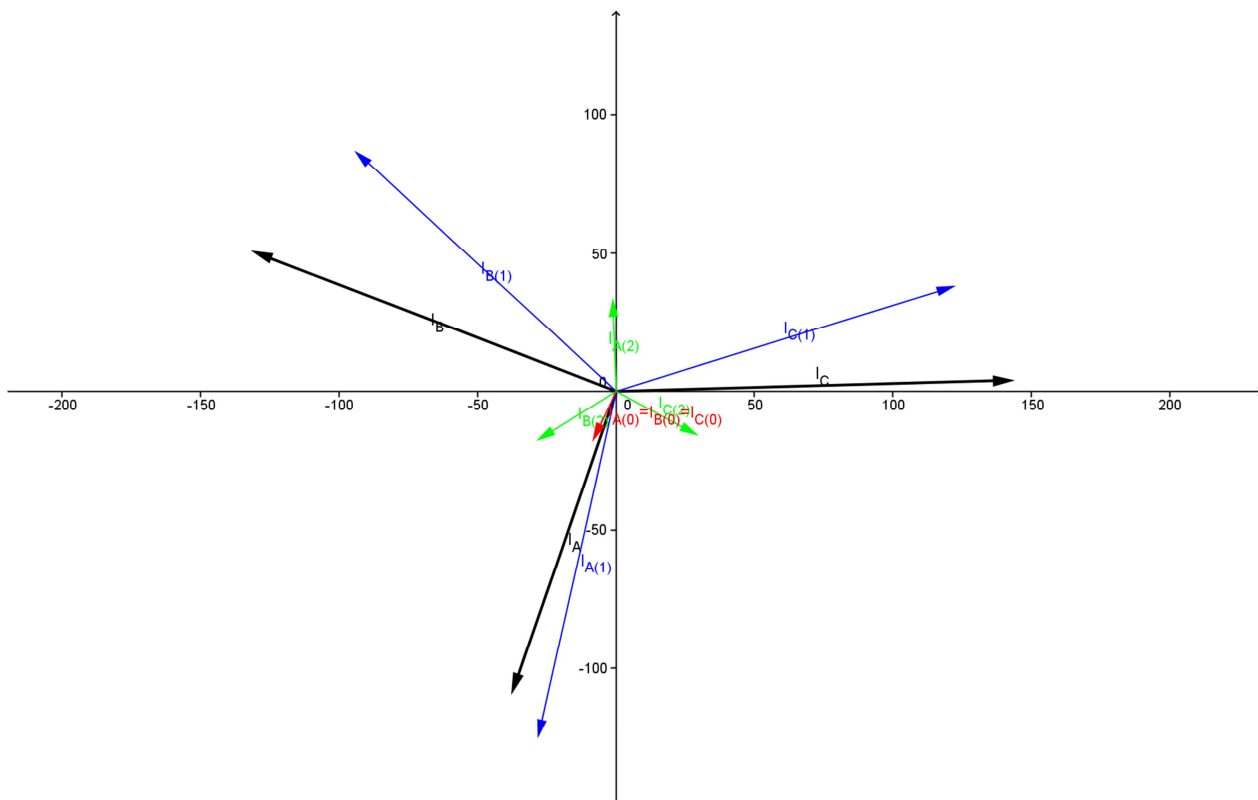
$$\mathbf{I}_{B(2)} = \mathbf{a} \mathbf{I}_{A(2)} = 33,94 \angle -148,16^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{C(2)} = \mathbf{a}^2 \mathbf{I}_{A(2)} = 33,94 \angle -28,16^\circ \text{ A}$$

Složky zpětné soustavy vypočteme z rovnice 1.6:

$$\mathbf{I}_{A(0)} = \frac{1}{3} (\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C) = \frac{1}{3} (116,08 \angle -109,04^\circ + 141,42 \angle -201,17^\circ + 144,21 \angle 1,60^\circ)$$

$$\mathbf{I}_{A(0)} = \mathbf{I}_{B(0)} = \mathbf{I}_{C(0)} = 20,11 \angle -115,10^\circ \text{ A}$$



Obrázek 1: Rozložení do souměrných složek

Zpětný výpočet složek provedeme podle rovnic 1.7 až 1.9:

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}_{A(1)} + \mathbf{I}_{A(2)} + \mathbf{I}_{A(0)} = 128,58 \angle -102,69^\circ + 33,94 \angle 91,84^\circ + 20,11 \angle -115,10^\circ$$

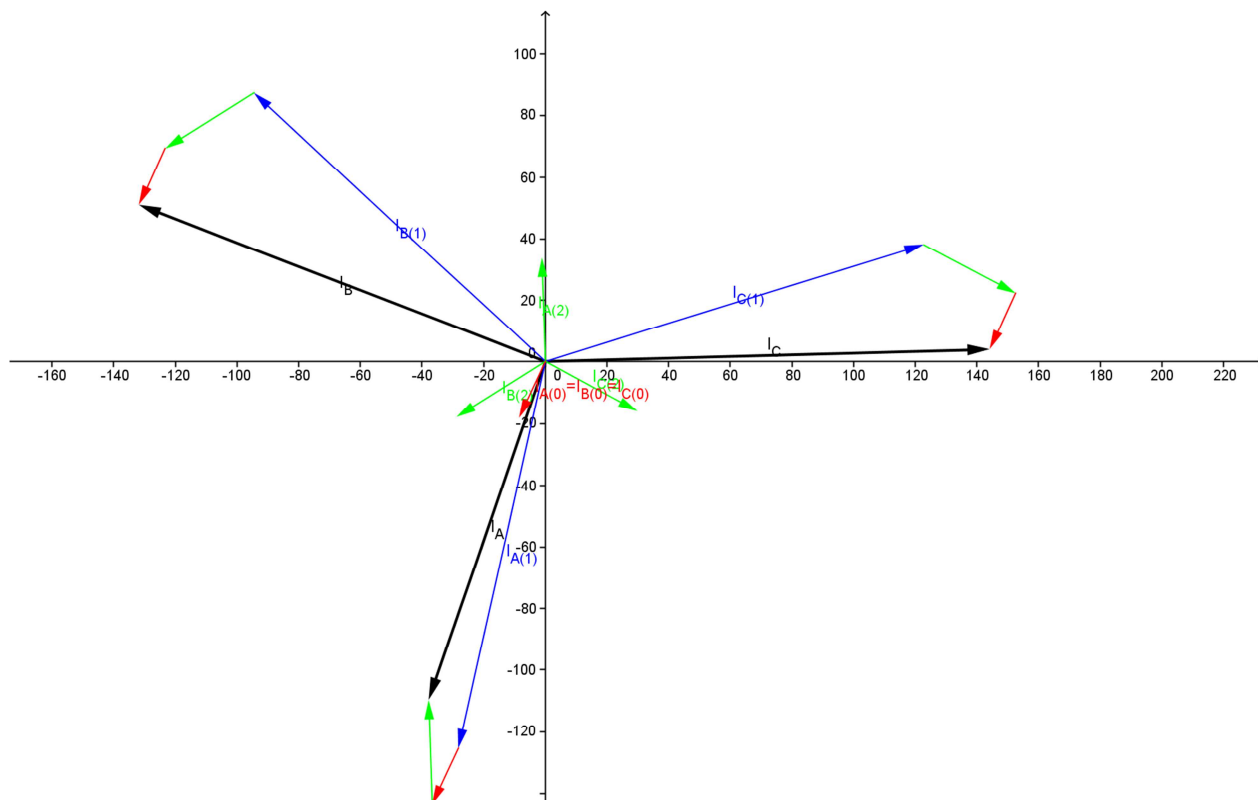
$$\mathbf{I}_A = 116,08 \angle -109,04^\circ$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{B(1)} + \mathbf{I}_{B(2)} + \mathbf{I}_{B(0)} = 128,58 \angle 137,31^\circ + 33,94 \angle -148,16^\circ + 20,11 \angle -115,10^\circ$$

$$\mathbf{I}_B = 141,42 \angle 158,83^\circ$$

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_{C(1)} + \mathbf{I}_{C(2)} + \mathbf{I}_{C(0)} = 128,58 \angle 17,31^\circ + 33,94 \angle -28,16^\circ + 20,11 \angle -115,10^\circ$$

$$\mathbf{I}_C = 144,20 \angle 1,60^\circ$$



Obrázek 2: Složení souměrných složek do nesymetrické soustavy

1.3 Detekce přetrženého vodiče pomocí souměrných složek

Transformace do souměrných složek lze využít při detekci přetržení vodiče v distribuční síti. Zařízení hlídající stav sítě porovnávají mezi sebou souslednou a zpětnou složku. Dle nastaveného poměru složek sousledné a zpětné soustavy zařízení vyhodnotí zařízení stav poruchy. Tento poměr bývá označován také jako činitel nesouměrnosti sítě, platí pro něj:

$$\rho_i = \frac{|I_{(2)}|}{|I_{(1)}|} \cdot 100 \quad (1.10)$$

Při nastavení je počítáno s určitou nesymetrií, mezní hodnota, kdy vyhodnocena porucha, bývá 20%. [3]

1.4 Detekce přetrženého vodiče měřením netočivé složky napětí

Netočivou složku proudu určíme vektorový součet proudů všech fází:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C$$

Obdobně se určí netočivé napětí součtem napětí všech fází:

$$U_0 = U_A + U_B + U_C$$

Pro souměrnou síť bez poruchy je netočivá složka proudu i napětí rovna nule. Při nastavení ochran se počítá s určitou nesymetrií sítě, proto zařízení vyhodnocuje poruchu, podle nastavení netočivé složky.

1.5 Metoda časového posunu

Elektrizační soustava má za normálních podmínek periodu 20 ms při 50 Hz. V případě jakékoli chyby třífázový systém automaticky změní stav. Dojde k časovému posunu a změní se doba periody. [2]

Zařízení měří pouze dobu periody každé fáze, nedochází v podstatě k žádné složité výpočetní funkci. Při přetržení nebo i jiném přechodném jevu dojde k změně periody všech fází. Zařízení zjistí odchylnou dobu periody a vyhodnotí poruchový stav.

2 ATP-EMTP

ATP-EMTP je univerzální systém pro simulaci přechodných dějů se zaměřením na elektromagnetické a elektromechanické děje. Lze řešit i komplikované a rozsáhlé elektrické sítě a řídicí systémy. ATP-EMTP má pokročilé modelovací schopnosti a další vlastnosti, které rozšiřují jeho záběr i mimo oblast přechodných dějů.[4]

2.1 ATPDraw

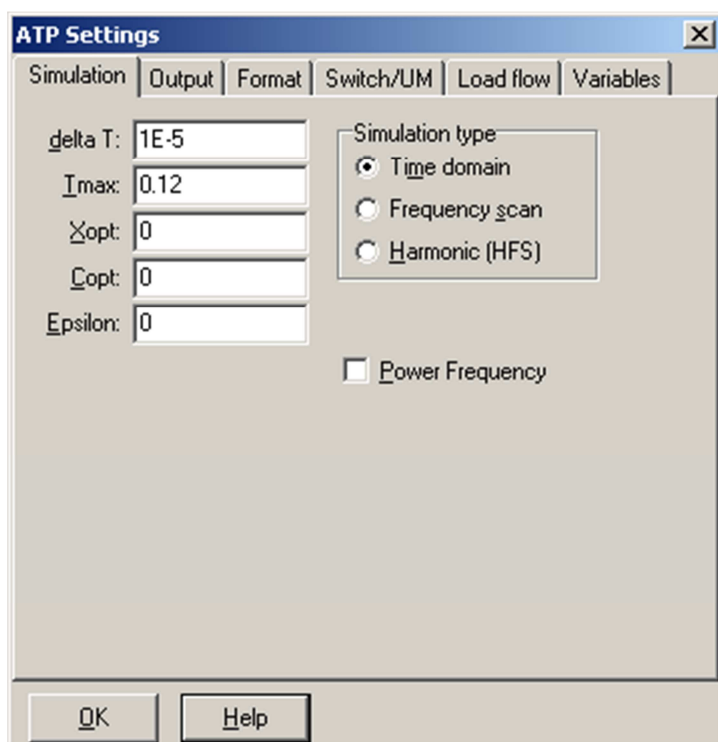
Pro plnohodnotnou práci je nutné použít grafický preprocesor ATPDraw. Tato nadstavba slouží pro tvorbu modelů simulovaných sítí.

ATPDraw pracuje s *.acp soubory. Po spuštění lze vytvořit nový soubor položkou NEW z nabídky FILE nebo otevřít již existující soubor položkou OPEN také z nabídky FILE. Vytvořený soubor ukládáme výběrem položek SAVE nebo SAVE AS.

Menu EDIT obsahuje klasické nástroje pro manipulaci s jednotlivými nebo skupinou prvků. Kromě klasického kopírování a vkládání lze prvky otáčet, převracet a vytvářet skupiny.

Menu VIEW se používá pro nastavení zobrazení, především pro přibližování, oddalování a posun zobrazované části sítě.

Samotné parametry simulace se nastavují v menu ATP výběrem položky SETTINGS nebo klávesou F3.



Obrázek 3: Nastavení parametrů simulace

V poli delta T se nastavuje časový krok simulace, délku simulace nastavíme parametrem Tmax. Dále je možnost nastavit typ simulace na výběr je časová TIME DOMAIN nebo frekvenční analýza FREQUENCY SCAN.

Na záložce OUTPUT se nastavují výstupní parametry simulace, důležité je mít zatrhnutou volbu PLOTTED OUTPUT, aby možné zobrazit průběhy sledovaných veličin.

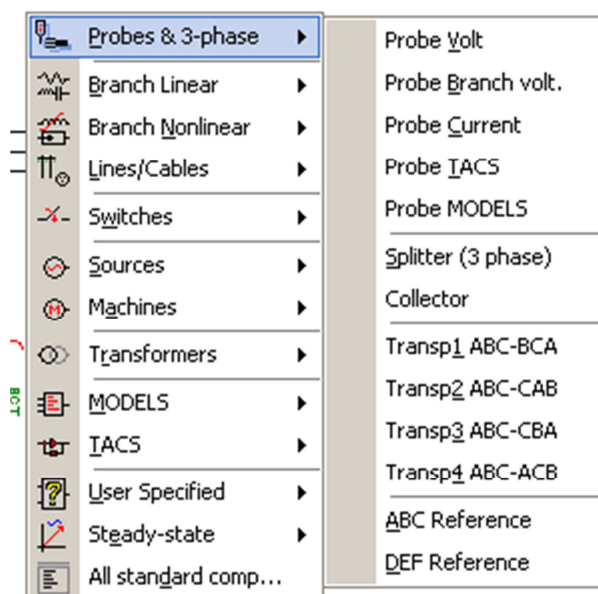
V dalších záložkách lze nastavit doplňující parametry pro simulaci, ale pro většinu simulací lze ponechat výchozí nastavení.

Kompilaci souboru *.atp, který je vstupní pro ATP-EMTP spustíme položkou MAKE ATP. Takto vytvoření soubor lze ještě ručně upravit výběrem položky EDIT ATP FILE. Samotný výpočet simulace spouštíme klávesou F2 nebo položkou RUN ATP. Po skončení výpočtu simulace je možné zobrazit výstupní *.lis soubor, položkou VIEW LIS FILE. Při běhu programu je také vytvářen soubor *.pl4, který obsahuje data k vykreslení průběhů. Spuštění grafického postprocesoru je možné klávesou F8 nebo položkou RUN PLOT. Cesta k souborům grafického postprocesoru se nastavuje v menu TOOLS na kartě PREFERENCES v ATPDraw OPTIONS.

Nápověda se vyvolává klávesou F1, popřípadě použitím nabídky HELP.

2.1.1 Prvky ATPDraw

Modelu sítě se skládá z jednotlivých prvků, kontextová nabídka s prvky se vyvolává pravým tlačítkem myši v libovolném místě pracovní plochy programu ATPDraw. Po vybrání lze prvkem libovolně manipulovat, tzn. lze jím otáčet nebo ho přesunovat.



Obrázek 4: Výběr prvků

2.1.1.1 Sondy

Pro měření veličiny v modelu sítě jsou používány sondy PROBES. Napěťová sonda PROBE VOLT měří napětí proti zemi, v případě použití v třífázovém obvodu se vybírá fáze, která bude měřena. V případě potřeby měření napětí mezi dvěma uzly se použije napěťová sonda PROBE BRANCH VOLT. Pro měření protékajícího proudu se umísťuje proudová sonda PROBE CURRENT, v trojfázovém obvodu lze vybrat fáze, které budou měřeny.

Prvek SPLITTER umí sloučit tři vodiče trojfázové soustavy v jeden nebo naopak rozdělit. Prvky TRANSP1-TRANSP4 umožňují provést v trojfázové soustavě transpozici fází.

2.1.1.2 Lineární větve

Vkládání lineárních prvků se provádí prostřednictvím skupiny BRANCH LINEAR. Třemi základními prvky jsou: RESISTOR, CAPACITOR a INDUCTOR. Pro vložení obecné zátěže

místo těchto tří prvků použít prvek jeden RLC. Při jednopólovém kreslení zátěž vložíme prvkem RLC 3-ph. Zátěž zapojená do hvězdy se vloží prvkem RLC-Y 3-ph, zátěži zapojené do trojúhelníka odpovídá prvek. RLC-D 3-ph.

Kondenzátor s počátečním nenulovým napětím se vloží prvkem C:U(0). Obdobně indukčnost s nenulovým počátečním proudem vložíme prvkem L:I(0).

2.1.1.3 Spínače

Pro spínání a vypínání obvodů je k dispozici řada spínačů SWITCHES. Základním časově řízeným spínačem je SWICH TIME CONTROLLED, u toho spínače je možné nastavit čas rozeznutí a čas sepnutí. Pro trojfázovou soustavu se použije spínač SWITCH TIME 3-ph. Napětím řízený spínač se vloží prvkem SWITCH VOLTAGE CONTR.

2.1.1.4 Zdroje

Vložení střídavého napěťového i proudového zdroje se provádí společným prvkem ACSOURCE, teprve v dialogovém okně se nastavuje, o jaký typ zdroje se má jednat. V tomto okně se nastavují další parametry zdroje: počet fází, velikost amplitudy, frekvence a doba činnosti zdroje. Zdroj DCPH1 vloží stejnosměrný zdroj napětí nebo proudu.

2.1.1.5 Transformátory

Ideální transformátory lze vložit prvky TRAFO_I a TRAFO_I3 podle počtu požadovaných fází. Model transformátoru s uvažovanou saturací obsahují prvky TRAFO_S a SATTRAFO, v tomto modelu se zadávají prvky náhradního schématu transformátoru. Další možností, jak vložit transformátor s uvažováním saturace, je prvkem BCTRAN. V dialogovém okně tohoto prvku jsou vkládány štítkové hodnoty, ze kterých se následně vypočtou prvky náhradního schématu.

2.1.2 Spojování prvků

Pro dokončení modelu sítě je nutné umístěné prvky vodičivě spojit. Kreslení vodiče začíná kliknutím na vývody prvku, následující kliknutí vodič ukončí. Uzly na vodičích jsou vytvářeny zcela automaticky. Tyto vodiče jsou modelovány jako vodiče ideální, nemají tedy žádnou impedanci a nevzniká na nich žádný úbytek napětí. Pro přehlednost je možné pojmenovat nebo barevně odlišit.

2.2 GTPPLOT

Po výpočtu přechodného děje vznikne soubor *.PL4. Tento soubor obsahuje grafy průběhů veličin. Zobrazení obstarává externí program – grafický postprocesor. Jedním z těchto programů je GTPPLOT, který je multiplatformní, pracuje tedy v různých operačních systémech, konkrétně MS-DOS, WINDOWS a LINUX. GTPPLOT umožňuje zpracovat až 1000000 bodů v 1000 proměnných. Ovládání programu je čistě textové prostřednictvím příkazů zadávaných do konzole. Zobrazené průběhy je možné exportovat do různých formátů a dále s nimi pracovat. Program není nutné instalovat, pro použití ho stačí pouze zkopírovat.[5]

2.3 PlotXY

Další program pro zobrazování souborů *.PL4 je program PlotXY. Tento program má na rozdíl od GTPPLOT grafické uživatelské rozhraní, práce s ním je jednodušší, ale neobsahuje téměř žádné další funkce pro zpracování dat.

3 MODEL JEDNODUCHÉ SÍTĚ

První vytvořený model pro srovnání metod detekcí je síť 22 kV o délce 39,5 km se šesti distribučními transformátory.

Při vytváření modelu se používá grafický preprocesor ATPDraw, v kterém lze snadno umísťovat a propojovat prvky programu EMTP-ATP.

Sekundární stranu 22 kV transformátoru v rozvodně představuje napěťový zdroj ACSOURCE s nastavenou amplitudou 17963 V a frekvencí 50 Hz. Pro výpočet amplitudy z hodnoty sdruženého napětí platí:

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

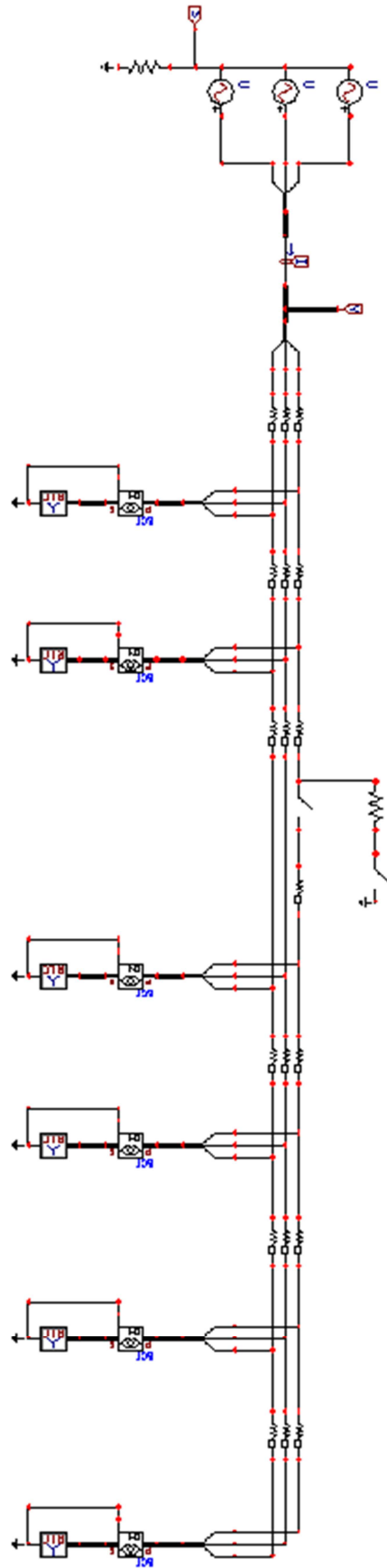
Dosažením do vztahu 3.1 byla vypočtena amplituda:

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \frac{22000}{\sqrt{3}} = 17963 \text{ V}$$

Program ATP-EMTP neumožňuje zadat izolovaný trojfázový zdroj, proto je nahrazen třemi jednofázovými vzájemně posunutými o 120°.

Vodiče jsou nahrazeny RL zátěží s hodnotami indukčnosti 0,50 mH/km a odporu 0,207 Ω/km, v EMTP-ATP jsou reprezentovány prvkem LINERL. Odběrná místa jsou provedena šesticí transformátorů o výkonu 50 kVA a 160 kVA. Hodnoty transformátorů jsou generovány automaticky procedurou BCTRAN ze zadaných štítkových hodnot. Na sekundární straně těchto transformátorů je připojena RL zátěž zapojená do hvězdy prvkem RLY3.

Pro simulaci závady – zemního spojení byly použity dva časem řízené spínače TSWITCH a odpor zemního spojení RESISTOR. Hodnoty byly zvoleny z rozsahu 50 Ω - 1000 Ω, tak aby výsledky byly porovnatelné s externím zdrojem[2]. Zemní spojení je umístěno ve vzdálenosti 5 km od zdroje. Čas přetržení vodiče je nastaven na 0,05 s, čas dopadu vodiče je nastaven 0,07 s. Pro možnost sledování proudu protékajícího sítí je připojena proudová sonda PROBE CURRENT, pro sledování napěťových poměrů je také připojena sonda PROBE VOLT. Z těchto dvou sond budeme dále zjišťovat průběhy veličin. Netočivou složku napětí a proudu zjistíme měřením uzlu zdroje.



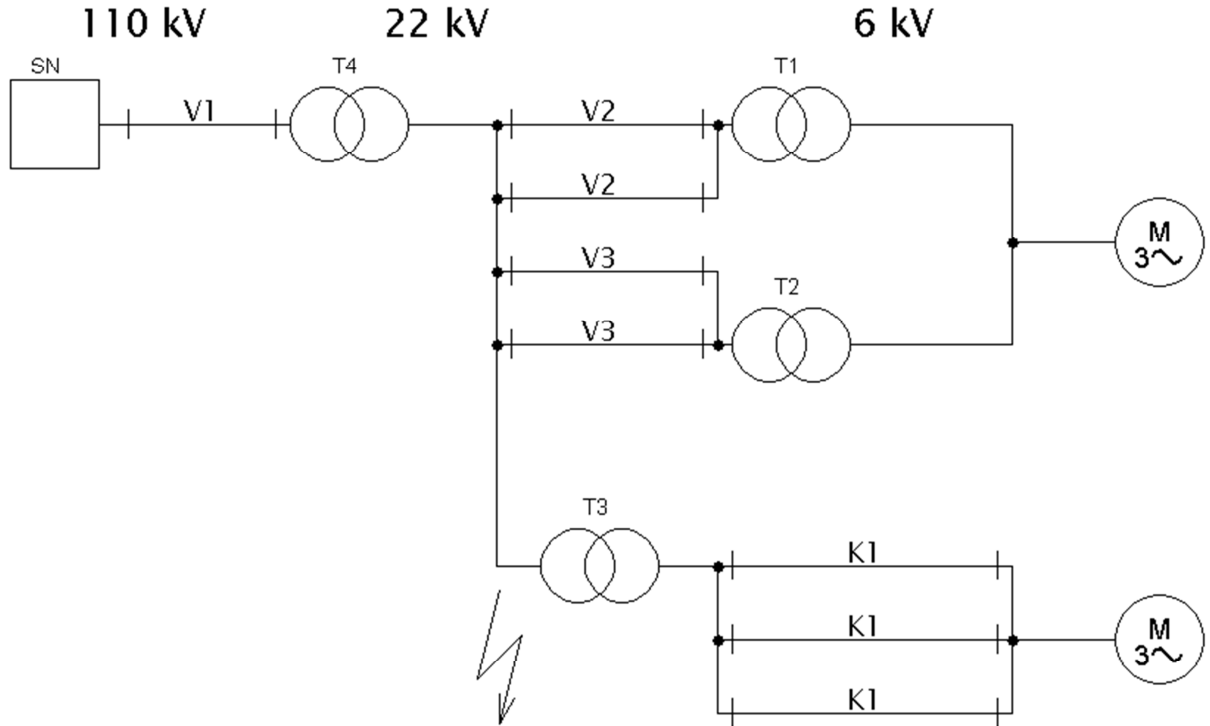
Obrázek 5: Realizace modelu sítě

3.1 Nastavení modelu

Před spuštěním výpočtu byl nastaven časový krok na $1 \cdot 10^{-5}$ s a doba simulace na 0,12 s. Dále se nastaví typ simulace na časovou TIME DOMAIN. Samotný výpočet se spustí klávesou F2. Výpočet bude opakován pro různé hodnoty zemního odporu

4 MODEL ČÁSTI DISTRIBUČNÍ SÍTĚ

Aby bylo možné získané výsledky porovnat byl vytvořen další model, tentokrát reálnější model části distribuční sítě. Model je staven dle obrázku 6.



Obrázek 6: Část distribuční sítě

4.1 Prvky elektrizační sítě

Modelovaná síť obsahuje tyto prvky

- Síťový napaječ SN: 110 kV
- Transformátory T1, T2, T3: 22/6 kV Yy0; jmenovitý výkon 10 MVA; napětí nakrátko 9,6% ; proud naprázdno 0,4%; ztráty nakrátko 30 kW; ztráty naprázdno 13 kW
- Transformátor T4: 110/22 kV Yy0; jmenovitý výkon 40 MVA; napětí nakrátko 11,5% ; proud naprázdno 0,4%; ztráty nakrátko 40 kW; ztráty naprázdno 25,6 kW
- Vedení 1: 40 km; typ AlFe 120 mm²; reaktance 0,26 Ω/km
- Vedení 2: 6 km; typ AlFe 95 mm²; reaktance 0,27 Ω/km
- Vedení 3: 6 km; typ AlFe 95 mm²; reaktance 0,27 Ω/km
- Kabel 1: 0,5 km; 3 x 240 Al, odpor 0,326 Ω/km; 0,074 reaktance Ω/km

4.2 Model v ATP – EMTP

Při modelování v ATPDraw bylo provedeno následující nastavení:

4.2.1 Modely vedení

Modelování vedení bylo provedeno pomocí procedury Line a Cable Constants (dále jen LCC), kde se modelují parametry vedení ze zadaných rozměrů a materiálových konstant.

Při výpočtu nahradíme vedení dvojbranem, který nahrazuje vedení s homogenně rozloženými parametry v ustáleném stavu. V ATPDraw volíme typ modelu PI: Nastavení bylo provedeno následovně:

Tato vyplněná pole mají následující význam:

- Phase No – číslo fáze
- Rin – vnitřní průměr
- Rout - vnější poloměr vodiče
- Resis - odpor vodiče
- Horiz – horizontální vzdálenost od středu vodiče
- Vtower - výška lana nad zemí u stožáru
- Vmid – výška lana v místě největšího prověšení (v tomto modelu je prověšení zanedbáno)[4]

4.2.2 Model kabelu

Model kabelu je také nahrazen π -článkem pomocí procedury LCC. Nastavení bylo zadáno následovně:

Význam vyplněných polí je následující:

- Rin – vnitřní poloměr vodiče
- Rout vnější poloměr vodiče
- Rho resistivita vodiče
- Mu relativní permeabilita materiálu vodiče
- mu relativní permeabilita izolace
- Eps realitvní permitivita izolace[4]

4.2.3 Model síťového napaječe

Síťový napaječ v ATP-EMTP je nahrazen ideálním napěťovým zdrojem o amplitudě 89 815 V. Amplituda se vypočte dosazením do vztahu 3.1:

$$U_{MAX} = \sqrt{2} \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \frac{110000}{\sqrt{3}} = 89815 \text{ V}$$

4.2.4 Model zátěže

Distribuční síť napájí asynchronní dvě skupiny motorů s jmenovitým proudem 200 A a s účinnkem 0,9. V ATP-EMTP jsou nahrazeny RL zátěží zapojenou do trojúhelníka. Výpočet prvků zátěže byl vypočten takto:

$$Z_{AM} = \sqrt{3} \frac{U_n}{I_n} = \sqrt{3} \frac{6000}{200} = 51,96 \Omega$$

$$R_{AM} = Z_{AM} \cdot \cos \varphi = 51,96 \cdot 0,9 = 46,76 \Omega$$

$$L_{AM} = \frac{Z_{AM} \cdot \sin \varphi}{2\pi f} = \frac{51,96 \cdot \sin(\arccos 0,9)}{2\pi \cdot 50} = 72,09 \text{ mH}$$

4.2.5 Modely transformátorů

Pro vytvoření modelů transformátorů byla použita procedura BCTRAN, která generuje model ze štítkových hodnot. Po zadání vstupních hodnot je vytvořen model automaticky a uložen do souboru *.BCT.

4.2.6 Simulace zlomení vodiče

Pro simulaci zlomení je použit časem řízený spínač, který způsobí rozepnutí fáze. Druhý spínač způsobí sepnutí fáze se zemí, simuluje dopad vodiče. Pro výpočet doby pádu vodiče předpokládáme pohyb rovnoměrně zrychlený. Pro volný pád platí:

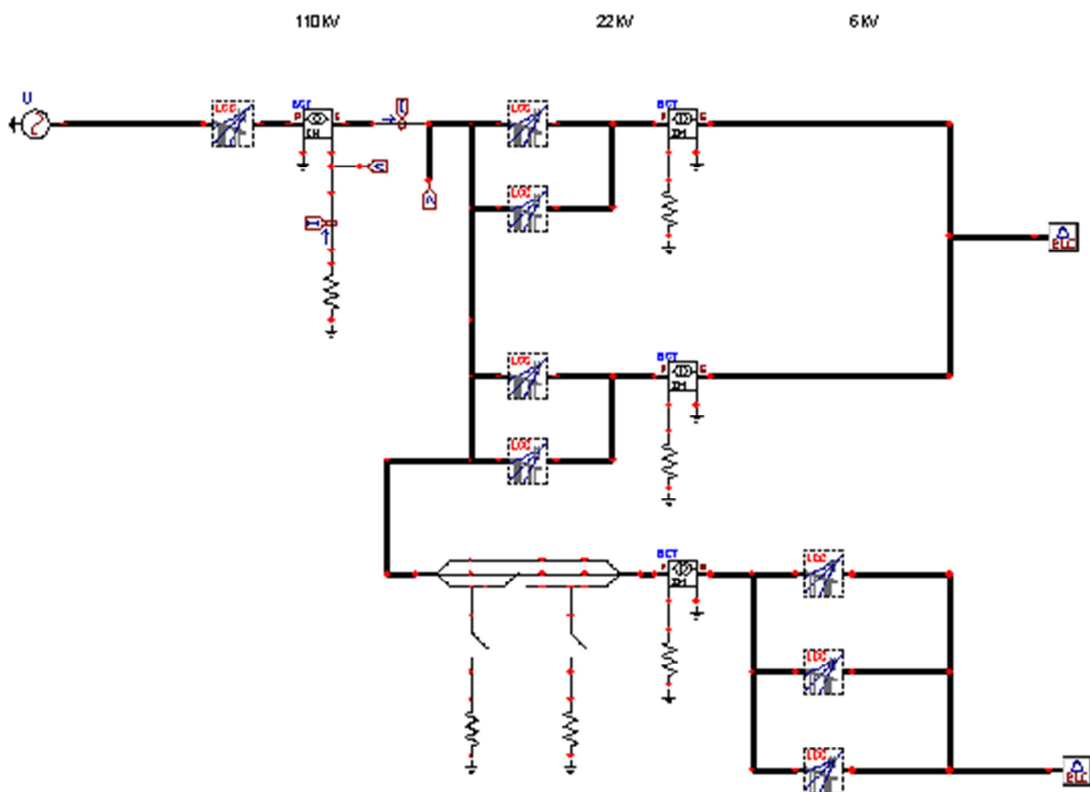
$$s = \frac{1}{2}gt^2 \quad (4.1)$$

V případě vedení dosadíme výšku lana, která činí 12 m:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12}{9,81}} = 1,56 \text{ s}$$

Z důvodu snížení náročnosti a délky výpočtu je v ATP-EMTP tato doba zkrácena na 0,3s. Hodnoty zemního odporu byly navoleny pro co největší rozsah: od 1 Ω do 10 k Ω .

Měření veličin je prováděno v místě předpokládaného umístění ochrany: na sekundární straně transformátoru T4.



Obrázek 7: Realizace části distribuční sítě v modelu

5 ZPRACOVÁNÍ VÝSTUPŮ Z PROGRAMU

Výstupní data všech simulovaných situací jsou ukládány do souboru *.PL4, z těchto souborů jsou nadále získávány informace.

5.1 Zobrazení průběhů

Pro vizualizaci vypočtených dat byl použit výše zmíněný program PlotXY.

5.2 Výpočet periody

V GTPPLOT se funkcí ZEROES zjistí časy, kdy průběh má nulovou hodnotu. Leží-li nulová hodnota mezi dvěma body je dopočítána lineární interpolací. Výpočet periody se zjistí z rozdílu těchto hodnot., není zapotřebí žádná složitá matematická operace. Pro výpočet jsou uvažovány časy, kdy směrnice je kladná, jedná o vzrůstající funkci.

5.2.1 Příklad výpočtu

Po načtení souboru do GTPPLOT se vybere proměnná příkazem PLOT VAR(N?), kde otazník označuje číslo volané proměnné, seznam proměnných lze vyvolat příkazem CHOICE. Po této operaci lze již volat funkci ZEREOS a zadat časový úsek výpočtu. Pro zemní spojení 250 Ω v jednoduché síti pro fázi A obdržíme následující odpověď programu:

```
Zero at t= 9.45711E-03 Seconds (interpolated) slope= 5.07882E+04
Zero at t= 1.94571E-02 Seconds (interpolated) slope= -5.07882E+04
Zero at t= 2.94571E-02 Seconds (interpolated) slope= 5.07882E+04
Zero at t= 3.94571E-02 Seconds (interpolated) slope= -5.07882E+04
Zero at t= 4.94571E-02 Seconds (interpolated) slope= 5.07882E+04
Zero at t= 5.94571E-02 Seconds (interpolated) slope= -5.07882E+04
Zero at t= 6.92987E-02 Seconds (interpolated) slope= 1.77427E+04
Zero at t= 7.92984E-02 Seconds (interpolated) slope= -1.77471E+04
Zero at t= 8.92987E-02 Seconds (interpolated) slope= 1.77427E+04
Zero at t= 9.92987E-02 Seconds (interpolated) slope= -1.77427E+04
Zero at t= 1.09299E-01 Seconds (interpolated) slope= 1.77427E+04
Zero at t= 1.19299E-01 Seconds (interpolated) slope= -1.77427E+04
```

Periodu vypočteme dle vztahu:

$$T_N = t_{n+2} - t_n$$

Po vyčíslení

$$T_1 = t_3 - t_1 = 4,94571 \cdot 10^{-2} - 2,94571 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

$$T_3 = t_5 - t_3 = 6,92987 \cdot 10^{-2} - 4,94571 \cdot 10^{-2} = 1,98416 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 19,84 \text{ ms}$$

$$T_5 = t_7 - t_5 = 8,92987 \cdot 10^{-2} - 6,92987 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

$$T_7 = t_9 - t_5 = 1,09299 \cdot 10^{-2} - 8,92987 \cdot 10^{-2} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ s} = 20 \text{ ms}$$

5.3 Výpočet amplitudy a posunu

Pro metodu souměrných složek je nutné zjistit amplitudy a posun jednotlivých fází. Z těchto hodnot dosazením do rovnic 1.1 až 1.6 zjistíme fázory sousledné a zpětné soustavy.

Abychom mohli zjistit amplitudu a fázi je vhodné vygenerované průběhy transformovat do Fourierových řad. Pro okamžitou hodnotu proudu lze napsat:[7]

$$i = I_{ss} + I_{1a} \sin \omega t + I_{2a} \sin 2\omega t + \dots + I_{1b} \cos \omega t + I_{2b} \cos 2\omega t + \dots$$

Tuto řadu získáme funkcí FOURIER v program GTPLOT, z takto získané řady do výpočtu zahrneme pouze první harmonickou. Pro zjednodušení je možné tento krok přeskočit a funkcí HSOURCES vygenerovat rovnou hledanou amplitudu a posun (tato funkci již zahrnuje Fourierovu analýzu)

5.3.1 Příklad výpočtu

Pro stejný případ jako v předchozím příkladu budeme postupovat při načítání totožně. Po té se zavolá funkce HSOURCES na vymezeném časovém úseku – perioda od času dopadu vodiče (analýza se pro každou perioda provádí zvlášť). Funkce vygeneruje soubory s následujícím obsahem:

```
C Buses: X0026A-X0001A   file name: hsourc04.pch   FREQFR: 5.0000E+01 Hz
C Spectrum from 7.000000E-02 TO 9.000000E-02 seconds
C BUS      AMPLITUDE FREQUENCY PHASE
C -----_-----_-----_-----_-----_-----_-----
14X0026A-1 116.08325 50.      -109.0429      -1.0
C Buses: X0026B-X0001B   file name: hsourc05.pch   FREQFR: 5.0000E+01 Hz
C Spectrum from 7.000000E-02 TO 9.000000E-02 seconds
C BUS      AMPLITUDE FREQUENCY PHASE
C -----_-----_-----_-----_-----_-----_-----
14X0026B-1 144.21339 50.      1.6046052      -1.0
C Buses: X0026C-X0001C   file name: hsourc06.pch   FREQFR: 5.0000E+01 Hz
C Spectrum from 7.000000E-02 TO 9.000000E-02 seconds
C BUS      AMPLITUDE FREQUENCY PHASE
C -----_-----_-----_-----_-----_-----_-----
14X0026C-1 141.41731 50.      -201.1666      -1.0
```

Tyto výsledky lze přepsat rovnou do vektorového tvaru:

$$\mathbf{I}_A = 116,08325 \angle -109,0429 \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_B = 141,41731 \angle -201,1666 \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_C = 144,21339 \angle 1,6046 \text{ A}$$

Výpočet sousledné a zpětné složky dosazením do rovnic:

$$\mathbf{I}_{A(1)} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{aI}_B + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_C) = \frac{1}{3}(116,08325 \angle -109,0429 + \mathbf{a}141,41731 \angle -201,1666 + \mathbf{a}^2144,21339 \angle 1,6046)$$

$$\mathbf{I}_{A(1)} = 128,5849 \angle -102,690^\circ \text{ A}$$

$$\mathbf{I}_{A(2)} = \frac{1}{3}(\mathbf{I}_A + \mathbf{a}^2\mathbf{I}_B + \mathbf{aI}_C) = \frac{1}{3}(116,08325 \angle -109,0429 + \mathbf{a}^2141,41731 \angle -201,1666 + \mathbf{a}144,21339 \angle 1,6046)$$

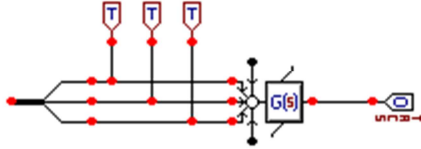
$$\mathbf{I}_{A(2)} = 33,9416 \angle 91,852^\circ \text{ A}$$

Činitel nesouměrnosti sítě pak bude:

$$\rho_i = \frac{|\mathbf{I}_2|}{|\mathbf{I}_1|} \cdot 100 = \frac{33,9416}{128,5849} \cdot 100 = 26,40 \%$$

5.4 Netočivá složka proudu a napětí

Získání těchto hodnot se provede pouhým měřením na uzlu zdroje sítě 22 kV. Další možností je použít v modelu prvek TACS (transient analysis of control systems), který provádí operace dle zadané přenosové funkce. Při realizaci v ATP-EMTP je nutné připojit ke vstupu prvku TACS prvek EMTP_OUT, kterým definujeme, zda sledovaný průběh je napěťový nebo proudový.



Pro zjištění maximální hodnoty tohoto napětí se používá funkce PEAKS

5.4.1 Příklad nalezení maximální hodnoty

Po zadání příkazu PEAKS obdržíme následující informace:

```

Peak at 0.000000E+00 Seconds = 0.000000E+00
Peak at 7.001000E-02 Seconds = -1.567294E+04
Peak at 7.003000E-02 Seconds = -1.550312E+04
Peak at 7.005000E-02 Seconds = -1.533270E+04
Peak at 7.007000E-02 Seconds = -1.516168E+04
Peak at 7.009000E-02 Seconds = -1.499006E+04
Peak at 7.011000E-02 Seconds = -1.481787E+04
Peak at 7.013000E-02 Seconds = -1.464510E+04
Peak at 7.015000E-02 Seconds = -1.447175E+04
Peak at 7.017000E-02 Seconds = -1.429785E+04
Peak at 7.019000E-02 Seconds = -1.412339E+04
Peak at 7.021000E-02 Seconds = -1.394838E+04
Peak at 7.023000E-02 Seconds = -1.377282E+04
Peak at 7.025000E-02 Seconds = -1.359674E+04
Peak at 7.027000E-02 Seconds = -1.342012E+04
Peak at 7.029000E-02 Seconds = -1.324298E+04
Peak at 7.031000E-02 Seconds = -1.306533E+04
Peak at 7.033000E-02 Seconds = -1.288716E+04
Peak at 7.035000E-02 Seconds = -1.270850E+04
Peak at 7.037000E-02 Seconds = -1.252935E+04
Peak at 7.039000E-02 Seconds = -1.234971E+04
Peak at 7.041000E-02 Seconds = -1.216958E+04
Peak at 7.043000E-02 Seconds = -1.198899E+04
Peak at 7.045000E-02 Seconds = -1.180793E+04
Peak at 7.047000E-02 Seconds = -1.162642E+04

```

Z těchto informací již můžeme určit maximální hodnotu a čas, v kterém se nachází:

$$U_{0MAX}(t = 7,001 \cdot 10^{-2}) = -15673 \text{ V}$$

6 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

Následující kapitoly shrnují dosažené výsledky simulací.

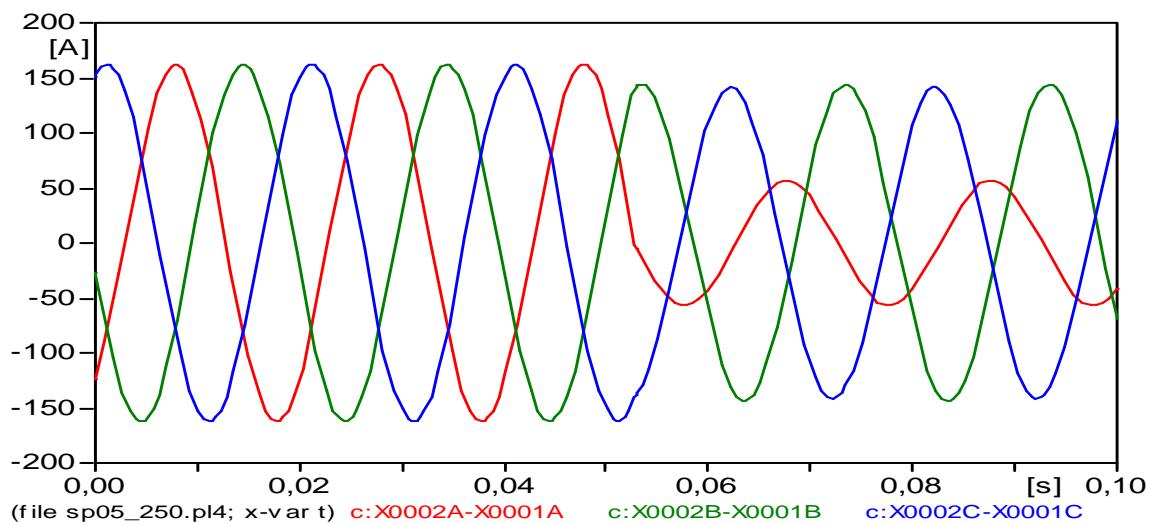
6.1 Měření souměrných složek

6.1.1 Model jednoduchého vedení

| Zemní odpor | I_1 | I_2 | $I_2:I_1$ |
|--------------|-------------------------------|------------------------------|-----------|
| [Ω] | [A] | [A] | [%] |
| 50 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 100 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 150 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 200 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 250 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 300 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 500 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 800 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |
| 1000 | $112,460 \angle 142,20^\circ$ | $49,419 \angle -44,12^\circ$ | 43,94 |

Tabulka 1: Výsledky simulace metody souměrných složek u modelu jednoduchého vedení

Vlivem značně idealizovaného modelu došlo k tomu, že průběhy proudů při zlomení vodiče jsou nezávislé na hodnotě zemního odporu. Zde dochází k působení ochrany ve všech případech.



Obrázek 8: Průběh proudů v jednoduchém modelu

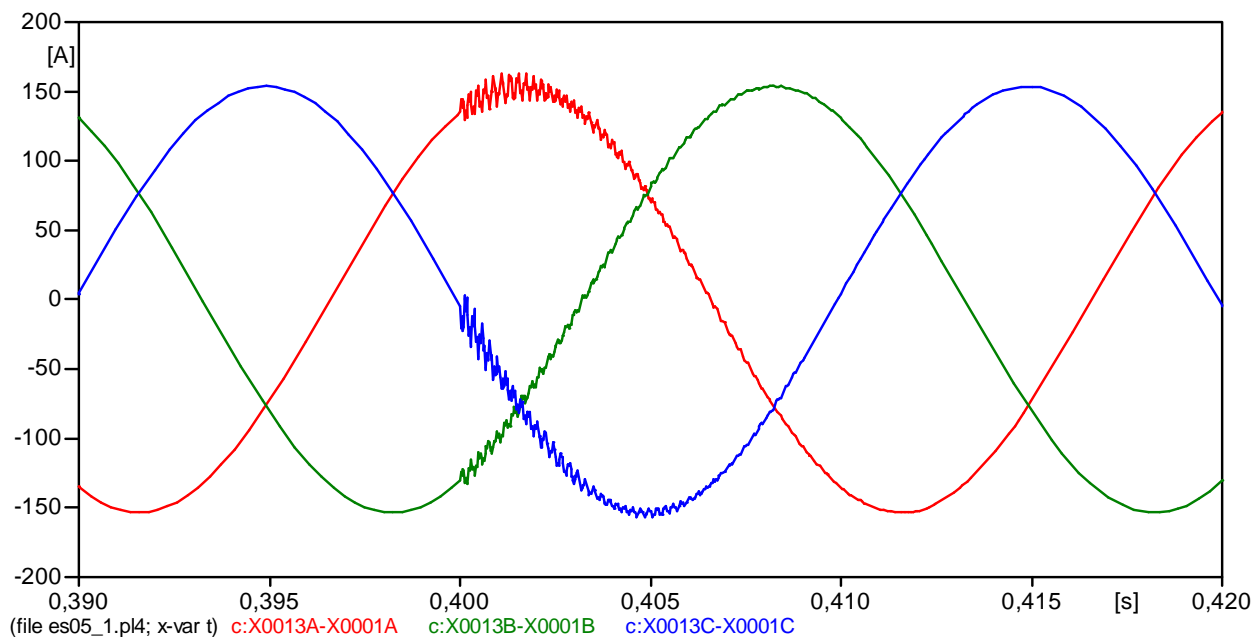
6.1.2 Model části distribuční sítě

| Zemní odpor | I_1 | I_2 | $I_2:I_1$ |
|-------------|-------|-------|-----------|
|-------------|-------|-------|-----------|

| [Ω] | [A] | [A] | [%] |
|--------------|---------------------------|------------------------|------|
| 1 | 153,569 \angle -151,78° | 0,167 \angle -14,99° | 0,11 |
| 2 | 153,570 \angle -151,78° | 0,167 \angle -15,43° | 0,11 |
| 5 | 153,570 \angle -151,78° | 0,166 \angle -16,54° | 0,11 |
| 10 | 153,570 \angle -151,78° | 0,166 \angle -16,96° | 0,11 |
| 50 | 153,582 \angle -151,82° | 0,176 \angle -53,43° | 0,11 |
| 75 | 153,581 \angle -151,82° | 0,176 \angle -52,23° | 0,11 |
| 100 | 153,582 \angle -151,82° | 0,173 \angle -50,72° | 0,11 |
| 150 | 153,581 \angle -151,81° | 0,169 \angle -47,22° | 0,11 |
| 250 | 153,579 \angle -151,81° | 0,166 \angle -42,31° | 0,11 |
| 400 | 153,619 \angle -151,83° | 0,223 \angle -59,62° | 0,15 |
| 700 | 153,623 \angle -151,83° | 0,226 \angle -58,66° | 0,15 |
| 1000 | 153,629 \angle -151,83° | 0,230 \angle -57,70° | 0,15 |
| 2000 | 153,641 \angle -151,83° | 0,238 \angle -54,49° | 0,15 |
| 5000 | 153,655 \angle -151,82° | 0,245 \angle -46,32° | 0,16 |
| 10000 | 153,652 \angle -151,80° | 0,239 \angle -37,59° | 0,16 |

Tabulka 2: Výsledky simulace metody souměrných složek u modelu části distribuční sítě

Při dopadu vodiče k zemi dojde k silnému harmonickému zkreslení, pro výpočet se však uvažuje první harmonická, která se v těchto případech mění pouze nepatrně. V této síti nelze detekovat zemní spojení pomocí souměrných složek.



Obrázek 9: Harmonické zkreslení proudů při dopadu vodiče

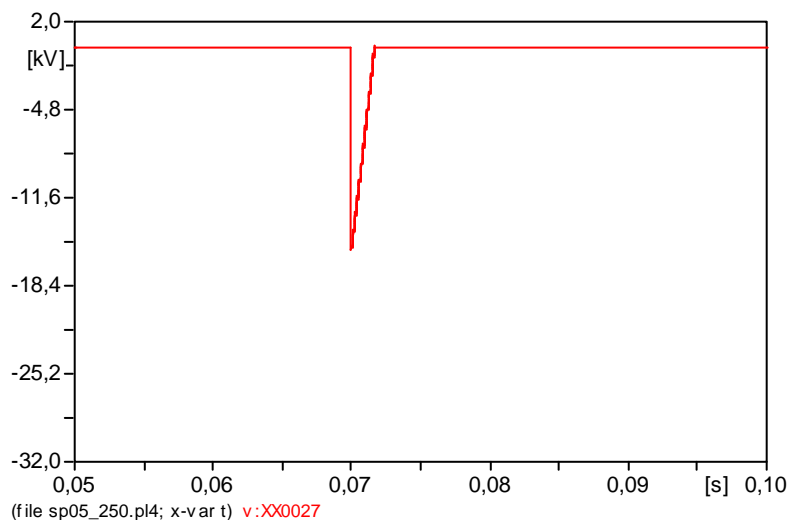
6.2 Metoda netočivé složky napětí

6.2.1 Model jednoduchého vedení

| Zemní odpor | U_{0MAX} | $U_{0MAX}:U_f$ |
|--------------|------------|----------------|
| [Ω] | [V] | [%] |
| 50 | 15673 | 87,25 |
| 100 | 15673 | 87,25 |
| 150 | 15673 | 87,25 |
| 200 | 15673 | 87,25 |
| 250 | 15673 | 87,25 |
| 300 | 15673 | 87,25 |
| 500 | 15672 | 87,25 |
| 800 | 15672 | 87,25 |
| 1000 | 15671 | 87,24 |

Tabulka 3: Výsledky simulace metody netočivé složky napětí u modelu jednoduchého vedení

Při měření netočivé složky napětí v jednoduchém modelu docházelo k napěťové špičce, její hodnota byla při všech měření téměř stejná.

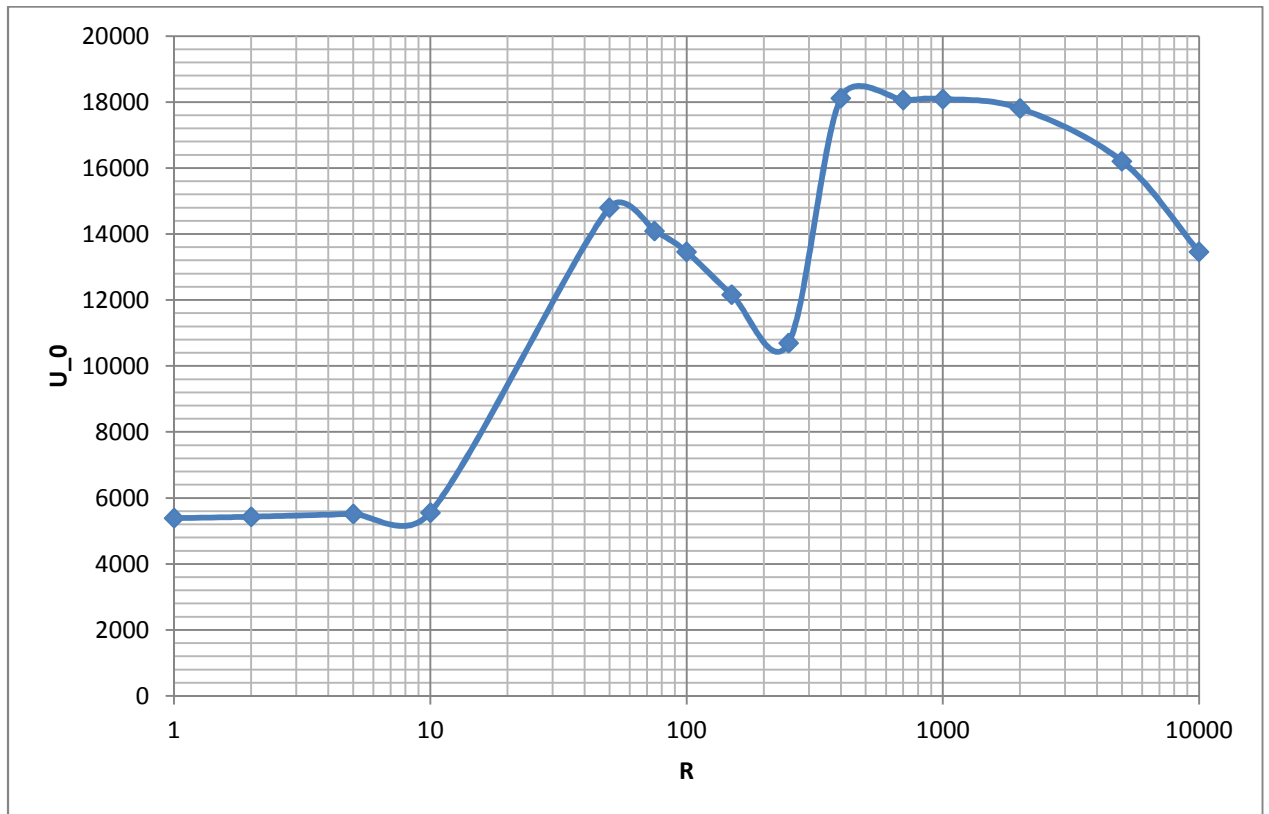


Obrázek 10: Napěťová špička netočivé složky napětí

6.2.2 Model části distribuční sítě

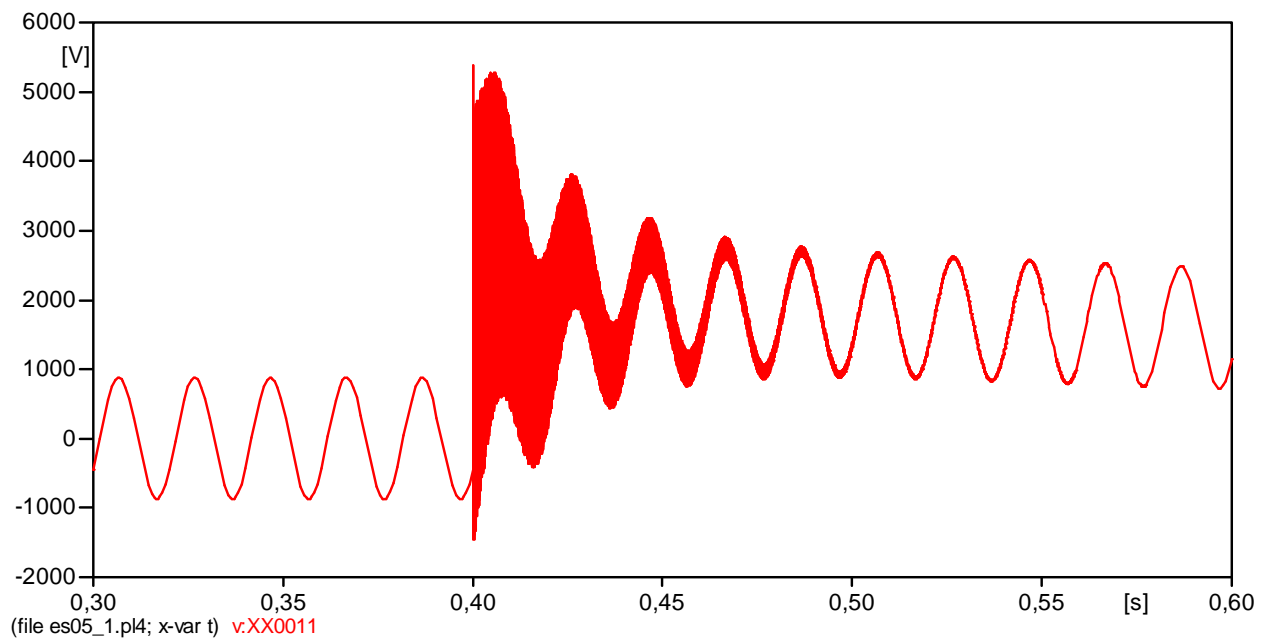
| Zemní odpor [Ω] | U_{0MAX} [V] | $U_{0MAX}:U_f$ [%] |
|--------------------|-------------------|-----------------------|
| 1 | 5390 | 30,01 |
| 2 | 5431 | 30,23 |
| 5 | 5516 | 30,71 |
| 10 | 5558 | 30,94 |
| 50 | 14796 | 82,37 |
| 75 | 14094 | 78,46 |
| 100 | 13460 | 74,93 |
| 150 | 12159 | 67,69 |
| 250 | 10697 | 59,55 |
| 400 | 18123 | 100,89 |
| 700 | 18063 | 100,56 |
| 1000 | 18093 | 100,72 |
| 2000 | 17806 | 99,13 |
| 5000 | 16209 | 90,24 |
| 10000 | 13464 | 74,95 |

Tabulka 4: Výsledky simulace metody netočivé složky napětí u modelu části distribuční sítě



Obrázek 11: Závislost netočivé složky napětí na zemním odporu

V modelu částí distribuční sítě došlo pro detekci k nejnepříznivějšímu případu u hodnot kovových spojení. Avšak i v těchto případech by ochrana působila.



Obrázek 12: Průběh netočivé složky napětí u kovového spojení

6.3 Metoda časového posunu

6.3.1 Model jednoduchého vedení

| Zemní odpor | T _{IA} | T _{IB} | T _{IC} |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| [Ω] | [ms] | [ms] | [ms] |
| 50 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 100 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 150 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 200 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 250 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 300 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 500 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 800 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |
| 1000 | 19,84 | 18,96 | 21,03 |

Tabulka 5: Výsledky simulace metody časového posunu u modelu jednoduchého vedení

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že změna periody při přetržení vodiče nezávisí na hodnotě odporu zemního spojení. Změna periody se vždy objevila v čase přetržení a nikoli v čase dopadu vodiče.

6.3.2 Model části distribuční sítě

| Zemní odpor | T _{IA} | T _{IB} | T _{IC} |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| [Ω] | [ms] | [ms] | [ms] |
| 1 | 20 | 20 | 10,22 |
| 2 | 20 | 19,95 | 10,21 |
| 5 | 20 | 19,97 | 10,21 |
| 10 | 20 | 19,97 | 10,22 |
| 50 | 20 | 19,99 | 10,27 |
| 75 | 20 | 19,99 | 10,28 |
| 100 | 20 | 19,99 | 10,29 |
| 150 | 20 | 19,98 | 19,99 |
| 250 | 20,02 | 20 | 20 |
| 400 | 20 | 20 | 20 |
| 700 | 20 | 20 | 20 |
| 1000 | 20 | 20 | 20 |
| 2000 | 20 | 20 | 20 |
| 5000 | 20 | 19,98 | 20 |
| 10000 | 20 | 19,98 | 20 |

Tabulka 6: Výsledky simulace metody časového posunu u modelu části distribuční sítě

Metoda časového posunu v modelu části distribuční sítě se ukázala jako nespolehlivá. Vyhodnocení zkrácení periody bylo způsobeno vlivem přítomnosti vyšších harmonických.

7 SHRNU TÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Při simulacích bylo zanedbáváno značné množství vlivů, které se vyskytují u reálných sítí, proto by bylo vhodné metody ověřit i měřením na skutečné síti. Jako nejspolehlivější metoda se ukázala metoda nejjednodušší – metoda netočivé složky napětí. Naopak metody vycházející z průběhů proudů se v simulacích ukázaly jako nejisté a mnohdy neschopné detekovat zemní spojení. U modelu jednoduchého vedení metodou časového posunu bylo možné zjistit poruchu v síti již před dopadem vodiče, při ověření v reálnějším modelu se však tato metoda nepotvrdila a nebylo dosaženo změny periody větší jak 1 ms. Také metoda souměrných složek, které vychází z průběhů proudů, nebyla potvrzena v modelu části distribuční sítě. Model jednoduché sítě byl vytvořen podle externího zdroje[2] a bylo dosaženo rozdílných výsledků, které mohou pramenit z vzájemné nekompatibility verzí ATP-EMTP a rozdílného nastavení.

8 OCHRANY PŘI ZEMNÍCH SPOJENÍ

Zařízení detekující zemní spojení vychází z výše uvedených metod. Tato zařízení poruchy pouze signalizují, ale sítě nevypínají. Nejrozšířenější ochrany pracují jako wattová relé, kdy reagují na součin netočivé složky napětí a netočivé složky proudu. Dnes jsou také používány pokročilé distanční ochrany, které měří množství parametrů vedení, vyhodnocování poruch pak závisí na aplikačním softwaru.

8.1 Ochrany jed noučelové

Tyto ochrany slouží pouze k detekci zemního spojení, jejich principem je měření netočivé složky napětí resp. proudu. Výše simulované stavy zemních spojení by identifikovala spolehlivě. Mezi tato ochranná zařízení patří:

8.1.1 Ochrana GSC12, GSS12

Zemní ochrana GSC 12 je wattová a používá se pro selektivní indikaci trvalého zemního spojení v kompenzovaných sítích. Ochrana GSS 12 je jalová a chrání sítě nekompenzované. Základem je citlivé elektrodynamické směrové relé SW. Statorové vinutí je buzeno složkou proudu:

$$I_0 = I_A + I_B + I_C$$

Rámeček je napájen netočivou složkou napětí:

$$U_0 = U_A + U_B + U_C$$

Při objevení obou těchto složek vznikne v relé moment, který podle směru netočivého výkonu vychýlí relé buď k zapínacímu kontaktu, nebo jej ještě více přitlačí ke kontaktu klidovému. U zemních ochrana GSC 12 a GSS 12, které pracují bez pomocného napětí, je činnost pomocného obvodu při sepnutí pracovního kontaktu směrového členu blokována proti chybné indikaci připojením na netočivé napětí. Koncové relé působí až při dostatečně velkém zemním napětí $U_0 = 30$ až 40 V. Vzhledem tomu, že měřicí transformátory mají poměr $U_f/100$ V, tak tato hodnota odpovídá 30% - 40% fázového napětí.[8]

8.1.2 Indikátor zemních spojení a zkratů MEG60

Indikátor MEG60 indikuje zemní spojení na základě vyhodnocení přechodného děje a činné složky signálu odpovídajícímu netočivé složce napětí a netočivé složce proudu měřeného vedení. Zkratové proudy jsou vyhodnoceny ze signálu odpovídajícího proudové nesymetrii měřeného VN vedení. Výhodou tohoto indikátoru oproti starším ochranám GSC12 a GSS12 je možnost parametry nastavovat přes PC obslužným program, není tedy pevně dáno zemní napětí.[9]

8.1.3 Relé pro lokalizaci zemních spojení EOR-D

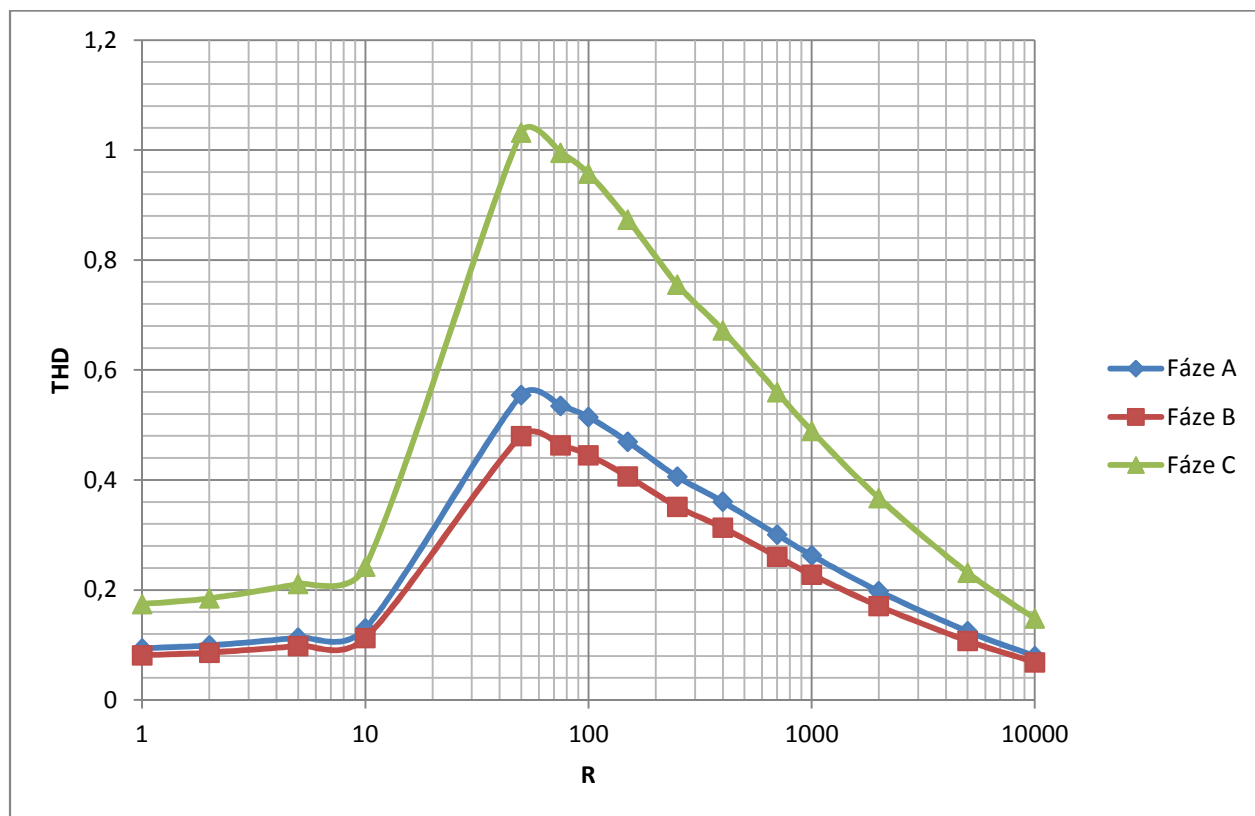
Toto programovatelné relé kromě metody měření I_0 a U_0 využívá i metodu vyšších harmonických a metodu pulzní lokalizace.

Metoda pulzní lokalizace je použitelná pouze u kompenzovaných sítí. Při lokalizaci zemního spojení se ke zhášecí tlumivce připojí kapacita. Tím se na součtový proud I_0 superponují impulzy, jejich časový průběh je snímám a vyhodnocuje se speciálním algoritmem. Použitím tohoto algoritmu je možno rozlišit postižené fáze i vysokoohmových poruch.

U metody vyšších harmonických se hlášení zemního spojení sepne nastavenou hodnotou netočivé složky napětí. Po tomto hlášení se vyhodnotí jako postižený vývod, ten který obsahu největší vyšší harmonický proud[10]. Pro ověření této metody byla získána tato data ze simulace zemního spojení v části distribuční sítě:

| Zemní odpor | THD I _A | THD I _B | THD I _C |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| [Ω] | [%] | [%] | [%] |
| 1 | 0,0936 | 0,0813 | 0,1744 |
| 2 | 0,0992 | 0,0861 | 0,1848 |
| 5 | 0,1134 | 0,0983 | 0,2111 |
| 10 | 0,1302 | 0,1128 | 0,2423 |
| 50 | 0,5546 | 0,4800 | 1,0318 |
| 75 | 0,5349 | 0,4630 | 0,9952 |
| 100 | 0,5143 | 0,4453 | 0,9570 |
| 150 | 0,4695 | 0,4065 | 0,8736 |
| 250 | 0,4059 | 0,3516 | 0,7555 |
| 400 | 0,3604 | 0,3133 | 0,6721 |
| 700 | 0,3005 | 0,2606 | 0,5597 |
| 1000 | 0,2630 | 0,2277 | 0,4894 |
| 2000 | 0,1976 | 0,1707 | 0,3672 |
| 5000 | 0,1247 | 0,1075 | 0,2315 |
| 10000 | 0,0798 | 0,0687 | 0,1480 |

Tabulka 7: Celkové harmonické zkreslení v jednotlivých fázích



Obrázek 13: Závislost harmonického zkreslení proudů

Výše uvedená data ze simulace potvrzují, že proud postiženou fází obsahuje největší podíl vyšších harmonických. Vyšší harmonické byly zkoumány do 33. řádu.

8.2 Pokročilé distanční ochrany

Moderní ochrany vedení sdružují více ochranných funkcí do jednoho zařízení (označujeme IED inteligentní elektronické zařízení). Tato zařízení na základě měřených veličin vyhodnocují různé stavy vedení.

8.2.1 ABB IED RE615

Zařízení IED REF615 je specifické zařízení, které určeno pro chránění, ovládání, měření a monitorování vývodů v rozvodnách. Obsahuje směrovou i nesměrovou zemní ochranu. Toto zařízení využívá všechny zde uvedené metody: měří netočivé složky, porovnává souměrné složky a využívá frekvenční ochranu. Navíc nabízí rozsáhlé možnosti konfigurace ochran. Toto zařízení může být náhradou všech výše uvedených ochran[11].

9 ZÁVĚR

Práce se zabývala srovnáním metod pro detekci zemního spojení. Dnes nejvyžívanější metoda netočivé složky napětí zde byla porovnána s metodami časového posunu a metodou souměrných složek.

Veškeré simulace byly prováděny v programu ATP-EMTP. Verze programu je z roku 2005. Novější verze vykazovaly značnou nestabilitu a v některých situacích byly nepoužitelné. V tomto programu byly vytvořeny dva modely distribuční sítě o napětí 22 kV. Simulace zemního spojení probíhala při různých hodnotách zemních odporů. Průběhy přechodných jevů byly zaznamenány a následně vyhodnocovány za pomoci postprocessorů dodávaných společně s hlavním programem.

U metoda netočivé složky napětí bylo srovnáváno fázové napětí s velikostí netočivé složky. V simulaci byly srovnávány skutečné hodnoty, ve skutečné síti se srovnávají hodnoty měřené na měřících transformátorech. Ve všech případech byla zjištěna velikost netočivé složky napětí větší jak 30% fázového napětí. Ochrany založené na této metodě by působily ve 100% zde simulovaných přechodných dějů. Většina dnešních ochranných metod tuto metodu používá. Není třeba tuto metodu nahrazovat nebo modifikovat. Pro konkrétní síť může být mezní hodnota nastavována různě. Dnešní ochrany ji pouze doplňují z důvodu snadnější lokalizace zemního spojení.

Myšlenka u metody časového posunu detekovat poruchu ještě před dopadem vodiče se při simulacích neprokázala, závisí na konkrétní konfiguraci sítě. V případě jednoduchého modelu byla změna periody větší jak 1 ms, tedy hodnota, kterou by bylo možné bez problému zaznamenat. V modelu části distribuční sítě byly změny periody zanedbatelné u vysokoohmových poruch, naopak u nízkohmových poruch byly způsobeny harmonickým zkreslením. V současné době není vyráběna žádná ochrana pracující na tomto principu, pouze v případě moderních ochranných metod dochází k měření frekvence z důvodu ochrany před frekvenční nesymetrií

Porovnávání zpětné a sousledné složky pro detekci zemního spojení se ukázalo jako nevhodné. Oproti metodě měření netočivé složky napětí nepřináší žádné výhody, naopak aplikace by byla náročnější a bez zaručených výsledků. Měření těchto složek má význam u ochranných nadproudových, takovéto měření provádí dnešní moderní distanční ochrany vedení.

Pro lokalizaci postiženého vývodu byla částečně ověřena metoda vyšších harmonických. Ověření proběhlo na již uloženém průběhu přechodné děje, kde bylo zjišťováno celkové harmonické zkreslení do 33. řádu. Tento způsob lokalizace se jevil jako účinný. Při dalších zkoumáních by bylo vhodné ověřit vliv dalších přechodných jevů na harmonické zkreslení a vyhodnotit tak možnost lokalizace jiných poruch v elektrických sítích.

10 PŘÍLOHA A

Průběhy napětí při zemním spojení

11 PŘÍLOHA B

Průběhy proudů při zemním spojení

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DRIESEN, Johan a CRAENENBROECK. *Kvalita elektrické energie: Rušení napětí*. [online]. [cit. 2011-12-15]. Dostupné z: http://www.medportal.cz/files/file/lpq_cz/5_1_3.pdf
- [2] RUNGSEEVIJITPRAPA a PONGTHA VORNSAWAD. *A novel dection system for broken distribution conductor on radial scheme*. 2011.
- [3] AREVA. *Micom P120/P121/P122/ P123: Technical guide*. Version 10. Dostupné z: www.electricalplantdesign.co.uk%2Fadmin%2Findex.php%3Fdir%3DRelay%2BData%252FLeyman%2BProtection%2BManuals%2Band%2BData%252FAreva%2B_%2BGEC%252F%26download%3DMicom%2BP120%2Bto%2BP123%2BVersion%2B10.pdf&ei=pSnKT7qhFMf34QSPkLRF&usg=AFQjCNEzWwUjXXUTsxLggXMYfb8W1iSCnA
- [4] ATP-EMTP. MIŠÁK, Stanislav. *Stanislav Mišák* [online]. [cit. 2012-11-22]. Dostupné z: http://www.stanislav-misak.com/index.php?option=com_content&view=article&id=95&Itemid=67
- [5] Additional ATP tools. HEVIA, Orlando. *World-wide mostly used transients program ATP-EMTP* [online]. [cit. 2012-06-02]. Dostupné z: <http://www.emtp.org/tools.html#gtpplot>
- [6] MACENAUER, Michal. *Elektromagnetické přechodné děje v elektroenergetice* [online]. Ostrava, 2002. Dostupné z: <http://www.macenauer.net/soubory/Macenauer-DP-2002.doc>. Diplomová práce. VŠB.
- [7] HALUZÍK, Evžen, Libor WEIDINGER a Milan KRÁTKÝ. *Ochrany a jištění zařízení*. VUT v Brně
- [8] REDAKCE OTS. *Katalogový list GSC12, GSS12*. Pardubice, 1988.
- [9] MĚŘÍCÍ ENERGERGETICKÉ APARÁTY. *Indikátor zemních spojení a zkratů*. Dostupné z: <http://www.e-mega.cz/doc/meg60m.pdf>
- [10] A-EBERLE. *Relé pro lokalizaci zemních spojení EOR-D*. Dostupné z: www.gmc.cz/pdf/EOR-D.pdf
- [11] ABB. *IED pro chránění a ovládání vývody REF615: Popis a technická data*. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot22.nsf/veritydisplay/44678be5f2d40a29c125784c004152d6/\\$file/ref615_pg_756625_czb.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot22.nsf/veritydisplay/44678be5f2d40a29c125784c004152d6/$file/ref615_pg_756625_czb.pdf)
- [12] ČSN 33 307. *Kompence zemních kapacitních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: ÚNM, 1981.
- [13] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. VUT V BRNĚ. *Distribuce elektrické energie*.