

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií  
Ústav elektroenergetiky

**Ing. Jaroslava Orságová**

**LOKALIZACE ZEMNÍHO SPOJENÍ V RADIÁLNÍ SÍTI  
POMOCÍ SIGNÁLU HDO**

EARTH FAULT LOCATION IN A RADIAL NETWORK USING  
REMOTE CONTROL SIGNAL

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Karel Sokanský, CSc.  
Doc. Ing. Petr Vašenka, CSc.  
Ing. Petr Toman, Ph.D.

Datum obhajoby: 3. 3. 2004

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Zemní spojení, lokalizace poruch v kompenzovaných sítích, nesymetrické zkraty, kompenzace zemních kapacitních proudů, zhášecí tlumivka, ochrany při zemních spojeních, distribuční sítě vn.

## **KEYWORDS**

Phase-to-ground fault, distribution networks, fault location in compensated networks, unsymmetrical faults, Petersen coil, phase-to-ground protection.

**Místo uložení rukopisu:** Vědecké oddělení děkanátu FEKT VUT v Brně  
Údolní 53, Brno, 602 00

## Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1 ÚVOD.....  | 5  |
| 2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....  | 5  |
| 2.1 Popis metody.....  | 6  |
| 2.1.1 Výpočetní algoritmus .....   | 6  |
| 2.1.2 Použití signálu HDO.....   | 9  |
| 3 OVĚŘOVACÍ EXPERIMENT .....   | 9  |
| 3.1 Popis měřené lokality.....   | 9  |
| 3.2 Postup měření .....  | 9  |
| 3.3 Popis měřící aparatury .....   | 10 |
| 4 VÝPOČET PRAVDĚPODOBNÉ VZDÁLENOSTI MÍSTA PORUCHY<br>Z NAMĚŘENÝCH HODNOT ..... | 12 |
| 4.1 Matematický model sítě.....  | 12 |
| 4.2 Verifikace modelu.....   | 12 |
| 4.3 Určení pravděpodobné vzdálenosti poruchy.....                              | 12 |
| 4.3.1 Výsledky výpočtu .....   | 14 |
| 4.4 Citlivostní analýza výpočtu .....  | 16 |
| 4.4.1 Změna délky testovaného úseku .....                                      | 16 |
| 4.4.2 Změna testovaného úseku.....   | 16 |
| 4.4.3 Změna odporu poruchy.....  | 18 |
| 5 ZÁVĚRY PRÁCE .....   | 19 |
| 5.1 Hodnocení metody .....   | 20 |
| 5.2 Zhodnocení poruchových zapisovačů ochran.....                              | 22 |
| 5.3 Možnosti pokračování výzkumu.....  | 22 |
| LITERATURA .....   | 24 |
| CURRICULUM VITAE .....   | 26 |
| ABSTRACT .....   | 27 |



# 1 ÚVOD

Vodivé spojení jedné fáze se zemí je v soustavách s přímo uzemněným uzlem nazýváno jednofázovým zkratem. V soustavách s uzlem izolovaným nebo nepřímo uzemněným se tato porucha označuje jako zemní spojení. Ve všech ostatních případech (účinně uzemněný uzel, uzel spojený se zemí přes odpor nebo při spojení více fází) se jedná o zkrat.

V distribučních sítích vn je převážně zemnění uzlu přes zhášecí tlumivku – jsou to sítě kompenzované. Výjimkou jsou malé sítě, např. sítě některých průmyslových závodů, vlastních spotřeb tepláren a elektráren, které jsou provozovány s izolovaným uzlem. Kabelové sítě vn, např. ve městech, mohou být provozovány s uzlem uzemněným přes činný odpor.

Volba uzemnění uzlu v sítích vn má pro provozovatele sítě velký význam a proto je předmětem různých studií a ověřování. Kritéria pro posouzení různých metod ošetření uzlu sítě vycházejí z chování sítě při zemním spojení a jsou následující:

- důsledky poruchového proudu - velikost dotykového a krokového napětí, co nejmenší poškození v místě poruchy
- provozní aspekty – automatická, rychlá a selektivní lokalizace poruchy bez velkého rozsahu manipulací v síti, žádné následné rozšíření poruchy na dvojité zemní spojení, malé ovlivnění sousedních vedení
- spolehlivost dodávky elektrické energie – odepnout poruchu bez přerušení zásobování nebo alespoň minimalizovat dobu přerušení
- hospodárnost – nízké investiční náklady – např. nároky na napěťovou odolnost přístrojů

Výše uvedené požadavky jsou nejlépe splněny v případě kompenzovaných sítí s možností rychlé lokalizace zemního spojení. V důsledku redukce poruchových proudů vlivem kompenzace se však komplikuje lokace poruchy a je více nejistá, než u sítě s izolovaným uzlem nebo odporově uzemněným uzlem. To přináší řadu problémů s včasným odstraněním trvalých zemních spojení, kdy výhoda zhášení zemního spojení má smysl jen pro přechodná zemní spojení u venkovního vedení, protože po odstranění poruchy je izolace opět intaktní, zatímco v kabelových sítích mohou zůstat slabá místa a je nutné přezkoušení kabelů. Z hlediska provozní spolehlivosti je tedy nezbytná rychlá a selektivní lokalizace poruchy.

## 2 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době se místo poruchy většinou určuje pomocí spínacích manipulací, kde ve spojení se zkušeností dispečera je možno najít místo poruchy jako nejmenší úsek vedení, který lze na postiženém vývodu vypnout. Vlastní lokalizaci poruchy pak provádí poruchová služba pochůzkou podél vedení. Problémem identifikace místa poruchy je skutečnost, že narozdíl od zkratů poruchový proud nedosahuje většinou ani hodnot proudů provozních. Při vzniku vysokoohmové poruchy je pak velikost poruchového proudu téměř zanedbatelná.

Výzkumné úsilí je současně zaměřeno k vývoji nových metod lokalizace zemního spojení s následujícími parametry:

- centrální lokátor instalovaný v rozvodně
- jsou vyhodnocovány pouze proudy a napětí měřitelné v rozvodně
- určování poruchových elementů v radiálně strukturované síti
- predikce vzdálenosti poruchy v tomto elementu

Cílem této disertační práce je zhodnotit možnost využití metody pravděpodobného určení místa zemního spojení, která splňuje výše uvedené požadavky a jejíž princip byl popsán v [1].

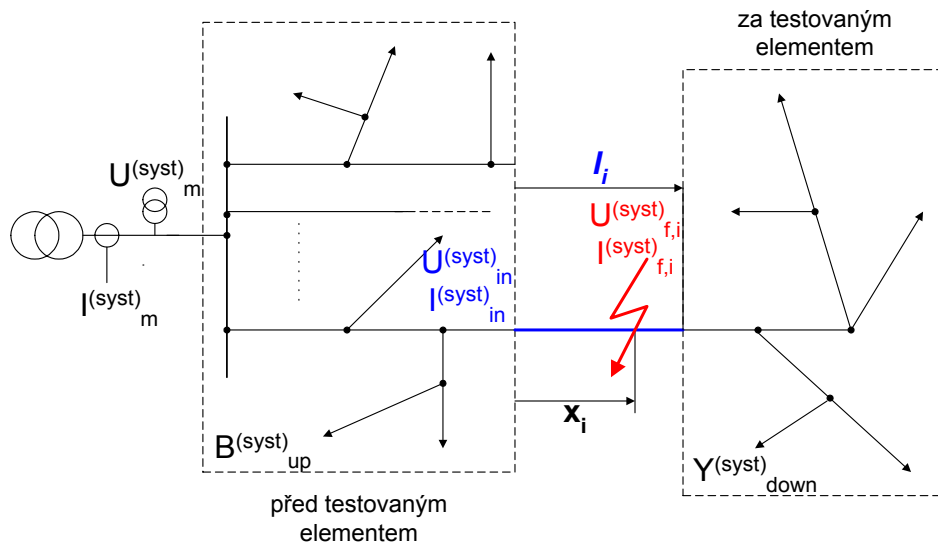
## 2.1 POPIS METODY

Předložená metoda lokalizace poruchy využívá signálu měřeného na přípojnicích v rozvodně a modelu celé distribuční sítě napájené z těchto přípojníc. Jejím základem je postupné testování jednotlivých elementů sítě, kde element sítě představují jednotlivé úseky vedení, tak jak jsou vyčleněny topologií sítě – např. jednotlivými odbočkami, úsečníky nebo přechodem z venkovního do kabelového vedení. V dnešním provozu elektrizační soustavy jsou informace o struktuře sítě trvale dostupné v reálném čase prostřednictvím řídicího systému a proto není problém kdykoliv získat reálný model sítě pro potřeby této metody.

Testovací kritérium metody představuje obecná rovnice (2.4) odvozená na základě I. A II. KZ pro místo poruchy. Jednotlivé členy rovnice představují napětí a proudy souměrných složek v místě poruchy vyjádřené jako funkce vzdálenosti poruchy  $x_i$  v testovaném elementu. Řešením této rovnice je tedy vzdálenost poruchy  $x_i$  a rozhodující je pak jednak relace mezi touto vypočtenou vzdáleností a délkou testovaného elementu  $l_i$  a jednak skutečnost, že vypočítaná vzdálenost je reálné číslo, nebo se mu alespoň blíží.

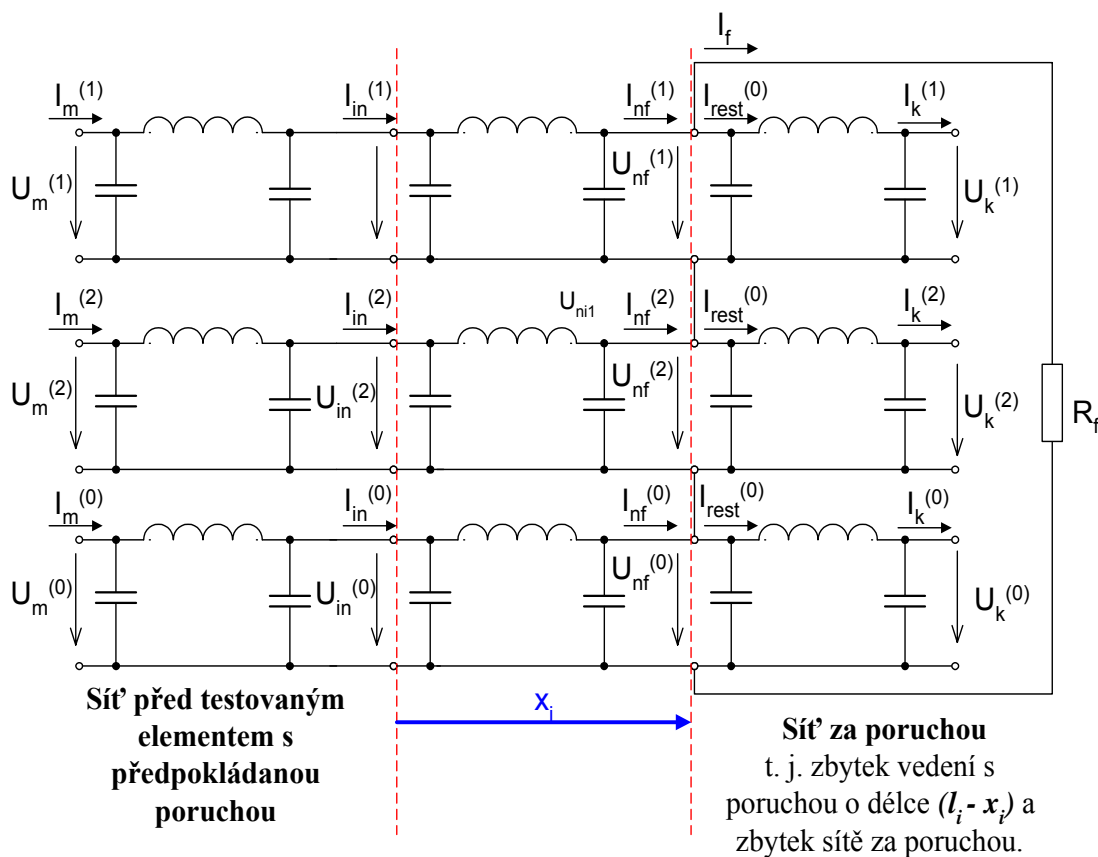
### 2.1.1 Výpočetní algoritmus

V prvním kroku je celá třífázová síť transformována do ekvivalentní sady tří jednofázových soustav užitím symetrických složek, kde je každý prvek sítě reprezentován admitanční maticí 2x2 v každé ze tří soustav. Na základě známé topologie sítě jsou z těchto elementů sestaveny admitanční matice sousledné, zpětné a nulové složky sítě. Použitím maticových operací získáme zpětnou kaskádní matici  $\bar{B}_{up}^{(syst)}$  reprezentující síť před testovaným elementem a admitanční matici  $\bar{Y}_{down}^{(syst)}$  představující zbývající síť za poruchou (kde  $syst = 1, 2, 0$  je index symetrické složky). Jak ukazuje obrázek 2.1  $\bar{B}_{up}^{(syst)}$  zahrnuje všechny části sítě před elementem  $i$  (tj. mezi rozvodnou a elementem) včetně sousedních napaječů.  $\bar{Y}_{down}^{(syst)}$  nahrazuje všechny části za elementem  $i$  s předpokládanou poruchou, viděno z rozvodny. Tyto matice jsou opět určeny pro všechny symetrické systémy: sousledný ( $syst = 1$ ), zpětný ( $syst = 2$ ) a nulový ( $syst = 0$ ).



Obr.2.1: Schéma paprskové sítě

Pomocí matice  $\bar{B}_{up}^{(syst)}$  a hodnot napětí a proudu  $\bar{U}_m^{(syst)}$  a  $\bar{I}_m^{(syst)}$  měřených v rozvodně během poruchy jsou následně určeny napětí a proud na vstupu čtyřpólu  $\bar{U}_{in}^{(syst)}$  a  $\bar{I}_{in}^{(syst)}$ , kterým je nahrazen testovaný element vedení.  $\bar{Y}_{rest}^{(syst)}$  pak reprezentuje zátěž čtyřpólu, tj. zbývající část testovaného elementu a síť za testovaným elementem reprezentovanou admitanční maticí  $\bar{Y}_{down}^{(syst)}$ .



Obr. 2.2: Složkové schéma sítě pro výpočet zemního spojení

Na obrázku 2.2 je náhradní schéma poruchy, ve kterém je už nahrazena celá síť třemi sadami přenosových matic pro jednotlivé složky a lze je popsat třemi sadami rovnic (2.1), (2.2) a (2.3).

$$\begin{pmatrix} \overline{U}_{in}^{(syst)} \\ \overline{I}_{in}^{(syst)} \end{pmatrix} = \left[ \overline{B}^{up(syst)} \right] \begin{pmatrix} \overline{U}_m^{(syst)} \\ \overline{I}_m^{(syst)} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{U}_{nf}^{(syst)} \\ \overline{I}_{nf}^{(syst)} \end{pmatrix} = \left[ \overline{B}_i^{(syst)}(x_i) \right] \begin{pmatrix} \overline{U}_{in}^{(syst)} \\ \overline{I}_{in}^{(syst)} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{pmatrix} \overline{I}_{rest}^{(syst)} \\ \overline{I}_k^{(syst)} \end{pmatrix} = \left[ \overline{Y}_{rest}^{(syst)}(l_i - x_i) \right] \begin{pmatrix} \overline{U}_{nf}^{(syst)} \\ \overline{U}_k^{(syst)} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Při jednofázovém zemním spojení v elementu  $i$  je místo poruchy spojeno přes odpor poruchy  $R_f$ , kterým protéká poruchový proud  $I_f$ . Tímto místem je schéma rozděleno na levou a pravou stranu, kdy levou stranu tvoří síť před testovaným elementem a část testovaného elementu  $i$  před místem poruchy, která je popsána zpětnou kaskádní maticí  $\overline{B}_i^{(syst)}$ . Její koeficienty závisí na neznámém parametru  $x_i$ , představující vzdálenost poruchy v testovaném elementu. Admitanční matice popisuje pravou stranu schématu, což je zbývající část elementu  $i$  za poruchou o délce  $(l_i - x_i)$  a zbývající část sítě za testovaným elementem  $i$  - matice  $\overline{Y}_{down}^{(syst)}$ .

Vstupní veličiny testovaného elementu  $i$  -  $\overline{U}_{in}^{(syst)}$ ,  $\overline{I}_{in}^{(syst)}$  - a prvky matice jako funkce vzdálenosti  $x_i$  jsou známy a může být odvozena obecná rovnice pro místo poruchy.

$$\overline{U}_{nf}^{(1)}(x_i) + \overline{U}_{nf}^{(2)}(x_i) + \overline{U}_{nf}^{(0)}(x_i) = 3 \cdot R_f \cdot \overline{I}_f = 3 \cdot R_f \left( \overline{I}_{nf}^{(1)}(x_i) - \overline{I}_{rest}^{(1)}(x_i) \right) \quad (2.4)$$

kde napětí na levé straně jsou vypočtena dosazením z rovnice (2.2):

$$\overline{U}_{nf}^{(syst)} = \overline{b}_{i,11}^{(syst)}(x_i) \cdot \overline{U}_{in}^{(syst)} + \overline{b}_{i,12}^{(syst)}(x_i) \cdot \overline{I}_{in}^{(syst)} \quad (2.5)$$

$$syst = 1, 2, 0$$

a proudy pomocí rovnic (2.2) a (2.3):

$$\overline{I}_{nf}^{(1)}(x_i) = \overline{b}_{i,21}^{(1)}(x_i) \cdot \overline{U}_{in}^{(1)} + \overline{b}_{i,22}^{(1)}(x_i) \cdot \overline{I}_{in}^{(1)} \quad (2.6)$$

$$\overline{I}_{rest}^{(1)}(x_i) = \overline{y}_{rest,11}^{(1)}(l_i - x_i) \cdot \overline{U}_{nf}^{(1)} \quad (2.7)$$

Po dosazení a úpravách vede rovnice (2.4) na polynom, jehož stupeň závisí na způsobu náhrady testovaného elementu.

Přesnější model vedení umožní získat vyšší řád  $x_i$  v rovnici (2.5). Její kořeny mohou být určeny numericky. Jestliže je testovaný element v poruše, musí se mezi vypočtenými kořeny – vzdálenostmi poruchy  $x_i$  – objevit ty fyzikálně reálné. Jestliže však zemní spojení na tomto elementu neexistuje dostáváme pouze záporné nebo komplexní výsledky nebo kladné, ale mnohem větší než je délka uvažovaného elementu.



Vyhledávací algoritmus založený na této metodě opakuje výše vysvětlený výpočet pro každý element sítě. Jestliže je postižený vývod v rozvodně už znám díky zemi ochraně stačí testovat pouze elementy uvažovaného vývodu.

### 2.1.2 Použití signálu HDO

Kromě toho, že prvky matice závisí na vzdálenosti poruchy  $x_i$  v elementu, závisí také na použité frekvenci. Pro frekvenci injektovaného signálu může být teoreticky zvolena jakákoliv hodnota vyjma základní frekvence, která je nevhodná vzhledem k vlivu kompenzační cívky. Výše používané elektrické veličiny jsou tedy vektory definované pro jinou frekvenci než základní a musí být určeny Fourierovou transformací měřeného poruchového signálu.

Při praktické aplikaci této metody byl pro měření použit signál HDO o frekvenci 216,6 Hz, neboť se jedná o signál, který je v distribučních sítích snadno dostupný a řeší tedy problém nutnosti použití vnějšího zdroje pro měření.

## 3 OVĚŘOVACÍ EXPERIMENT

Ověření uvedené metody pro lokalizaci zemního spojení bylo provedeno ve dvou fázích. První sloužila k získání potřebných údajů a dat a bylo v ní provedeno měření v reálné distribuční síti 22 kV při simulaci zemního spojení. V druhé fázi byla tato data zpracována a použita pro určení místa zemního spojení. Pro měření bylo nutno použít jiné frekvence než základní. Bylo tedy měřeno pomocí signálu HDO, protože je v těchto sítích snadno dostupný. Součástí měření bylo i otestování teoretické možnosti využití poruchových zapisovačů digitálních ochran pro identifikaci místa poruchy.

### 3.1 POPIS MĚŘENÉ LOKALITY

Experiment byl realizován na rozvodně Ptáčov u Třebíče JME a.s. v termínu 20.-21. listopadu 2002. Vlastní zemní spojení bylo provedeno na vývodu VN98 ve fázi L1 na odbočce u obce Číměř ve vzdálenosti 600m od dálkově ovládaného vypínače 104. Linka je převážně venkovní vedení, kabelové vedení je pouze mezi vývodovým polem z rozvodny a prvním stožárem linky. Vývod VN98 byl provozován jako paprskový, pod zatížením. Měření bylo provedeno jednak na zkratovišti a jednak na přívodním poli rozvodny 22kV (na vývodu transformátoru 110/22kV).

### 3.2 POSTUP MĚŘENÍ

Měření bylo provedeno pro čtyři druhy zemních spojení – kovové, odporové s odporem poruchy 8 k $\Omega$  a 2,5 k $\Omega$  a obloukové

Každé z těchto měření bylo provedeno pro dva kapacitní rozsahy sítě – pro maximální kapacitní rozsah sítě 147A a pro kapacitní rozsah sítě 63A.

Každá zkouška probíhala ve čtyřech plánovaných krocích:

1. Příprava zkratoviště na daný typ zemní poruchy a změna konfigurace sítě na požadovaný kapacitní rozsah

2. Spuštění vysílače signálu hromadného dálkového ovládnání (HDO)
3. Následné připojení poruchy vypínačem 104 ovládaným místně
4. Vypnutí vypínače 104 po 5-20s podle typu poruchy

### 3.3 POPIS MĚŘÍCÍ APARATURY

V přívodním poli rozvodny 22kV byl instalován analyzátor sítí BK550 v provedení DEWE 2010, který umožňuje zaznamenávat časové průběhy čtyř proudů a čtyř napětí se vzorkovací frekvencí 6,4 kHz.

Napětí bylo snímáno pomocí R-C děličů s napěťovým dělicím poměrem 1:250 a s přesností 0,5% nainstalovaných v kobce měření. Napěťový vstupní modul analyzátoru DAQP-DMM, rozsah 120V a 230V, přesnost 0,1%.

Měření proudů bylo provedeno pomocí pružných převodníků proudu AMPFLEX A100 s rozsahem 1000A/1V s přesností 1%. Vstupní modul analyzátoru DAQP-V s rozsahem 1V s přesností 0,1%.

Na měniče pevně nainstalované v přívodním poli byly během měření připojeny ochranné terminály:

- REF 543- výrobce: ABB

Připojena fázová napětí  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , netočivá složka napětí  $U_0$ , Fázové hodnoty proudů  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a netočivá složka proudu  $I_0$ . Napěťové vstupy 100 V, proudové 5 A. Z ochranných funkcí terminálu byla využita podpěťová a zemní ochrana s účinností na start poruchového zapisovače.

Parametry poruchového zapisovače: Vzorkovací frekvence 2 kHz, maximální doba záznamu pro 8 snímaných kanálů 2,5s.

- SEPAM 1000, typ 42 - výrobce: Schneider-Electric

Připojena fázová napětí  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , Fázové hodnoty proudů  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  a netočivá složka proudu  $I_0$ . Napěťové vstupy 100V, proudové 5A. Z ochranných funkcí byly aktivovány podpěťová a zemní ochrana opět s účinností na start poruchového zapisovače.

Parametry poruchového zapisovače: Vzorkovací frekvence 600 Hz, maximální doba záznamu pro 7snímaných kanálů 10s.

Na zkratovišti bylo nainstalováno měření poruchového proudu a napětí na poruše.

Parametry měřicích transformátorů:

Napětí: Vinutí M-N: 22 kV/100 V,  $S_n=50$  VA, t.p. 0,5%, vinutí R-S: ,  $S_n = 50$  VA, n.č. 5P,  $R = 6,3$  k $\Omega$

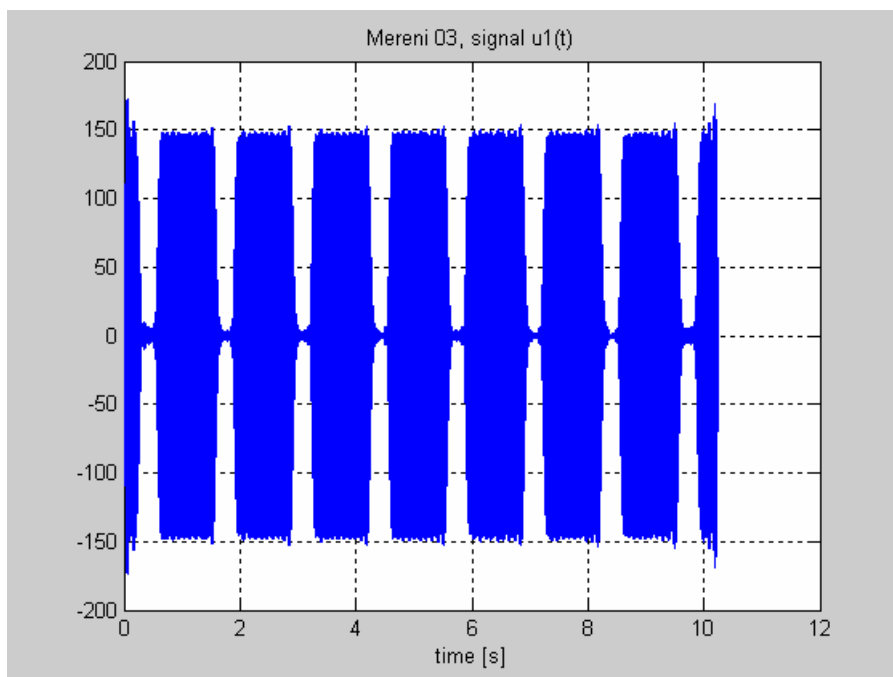
Proud: Vinutí K-L: 15/5 A,  $S_n = 30$  VA, t.p. 0,5%, vinutí 2: 15/5 A,  $S_n = 30$  VA, n.č. 5P5,  $R = 0,23$   $\Omega$

- PRYM - výrobce: EGÚ Brno

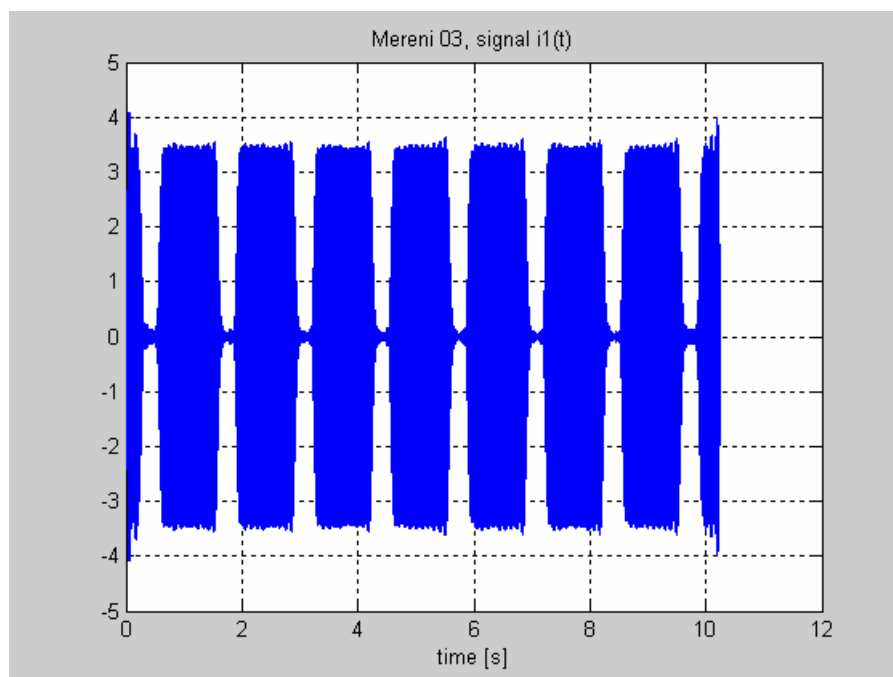
Parametry: Vzorkovací frekvence 7,2 kHz, napětí snímáno z měřicího transformátoru napětí, proud přes kleště z měřicího transformátoru proudu. Maximální doba dvoukanalového záznamu 40 s.

Cílem hlavní části měření bylo zjištění výsledných průběhů signálu HDO na frekvenci 216,66 Hz a v první řadě určení efektivní hodnoty a fáze jednotlivých veličin (fázových hodnot napětí a proudů). Tento problém byl řešen za pomoci

výpočtového programu Matlab 6.0. Signál z analyzátoru byl upraven do matice ve formátu pro načtení do programu. Následně byl doplněn o potřebný počet vzorků, aby bylo možno provést rychlou Fourierovu transformaci. Po provedení Fourierovy transformace do frekvenční oblasti bylo pomocí pravoúhlého okna vybráno okolí kmitočtu HDO v šířce pásma 30 Hz. Následně byla provedena inverzní Fourierova transformace zpět do časové oblasti. Po té byla vypočtena efektivní hodnota a fáze signálu.



*Obr. 3.1: Průběh okamžitých hodnot napětí signálu HDO  $u(t)$  [V],  $f = 216,6$  Hz získaných z analyzátoru BK 550 během 3. měření*



*Obr. 3.1: Průběh okamžitých hodnot proudu signálu HDO  $i(t)$  [V],  $f = 216,6$  Hz získaných z analyzátoru BK 550 během 3. měření*

## 4 VÝPOČET PRAVDĚPODOBNÉ VZDÁLENOSTI MÍSTA PORUCHY Z NAMĚŘENÝCH HODNOT

### 4.1 MATEMATICKÝ MODEL SÍTĚ

Pro výpočet byl vytvořen matematický model sítě jako sady tří přenosových článků jednotlivých souměrných složek, které reprezentují síť mezi zdrojem a místem poruchy. Pomocí zpětných kaskádních rovnic těchto přenosových článků jsou určeny proudy a napětí jednotlivých složek na začátku testovaného úseku. Pro model sítě byly k dispozici údaje získané přímo z řídicího systému rajónního dispečinku JME. Tato data představovala topologii celé sítě s délkami jednotlivých úseků vedení a základními údaji o vodičích – typ vodiče a jeho průřez. Výpočet byl proveden pomocí programu MATLAB.

Protože byl výpočet proveden s hodnotami proudů a napětí frekvence HDO, byly pro výpočet parametry přepočítány pro tuto frekvenci vynásobením jejich imaginárních složek faktorem  $k_f = f_{HDO}/f_n$ .

Pro výpočet byly sestaveny dvě varianty admitanční sítě, z nichž jedna obsahovala také příčné zatěžovací admitance v uzlech s odběry. Tyto admitance byly vypočteny na základě rozdělení celkového zatížení sítě, tak jak bylo měřeno na základní frekvenci do jednotlivých uzlů podle poměru odběrů. Zatížení bylo modelováno jako souměrné, tj. pouze jeho sousledná složka.

### 4.2 VERIFIKACE MODELU

Verifikace modelu byla provedena pomocí známých veličin zjištěných experimentálně:

- na základě známých kapacitních proudů sítě. Tyto byly měřeny v rozvodně během ladění zhášecí tlumivky pro daný rozsah sítě a porovnány s hodnotami vypočtenými pomocí modelu sítě.
- na základě hodnot napětí a proudů v místě poruchy, které byly měřeny během simulovaných poruch přímo na zkratovišti.

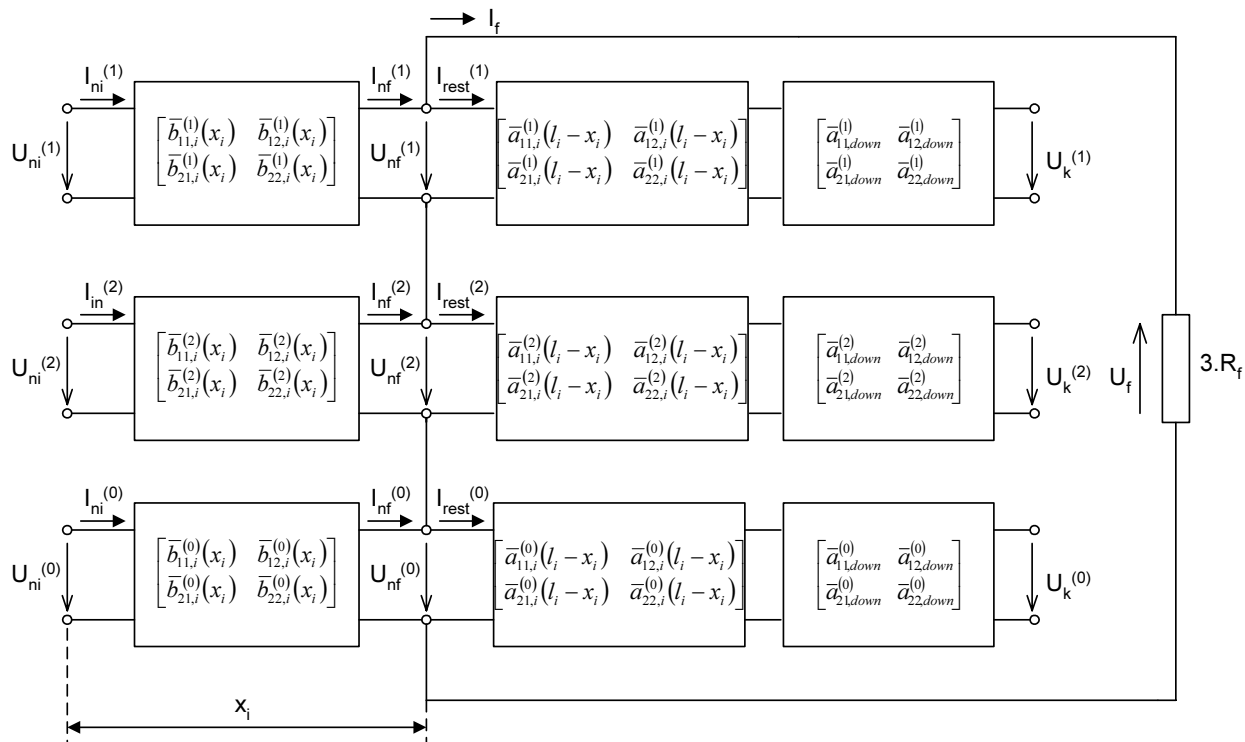
### 4.3 URČENÍ PRAVDĚPODOBNÉ VZDÁLENOSTI PORUCHY

Na základě uvedené verifikace byl matematický model sítě využit pro určení místa zemního spojení pomocí výpočetního algoritmu uvedeného v kapitole 2.1.1. Pro tento účel byl sestaven výpočetní program pro stanovení koeficientů polynomu v MATLABU, které jsou funkcí proudů  $\bar{I}_{in}^{(1)}, \bar{I}_{in}^{(2)}, \bar{I}_{in}^{(0)}$  a napětí  $\bar{U}_{in}^{(1)}, \bar{U}_{in}^{(2)}, \bar{U}_{in}^{(0)}$  na vstupu testovaného elementu sítě (rovnice (2.4)). Pro stanovení kořenů polynomu je v MATLABu použita Newtonova metoda.

Pro náhradu testovaného úseku bylo použito kaskádního spojení dvou „Π“ článků. Po té byly určeny kořeny polynomu jako možné hodnoty vzdálenosti poruchy pro všechna měření při odporových zemních spojeních.

Rozhodující význam pro výsledky výpočtu má konečný tvar kritériální rovnice (2.4) a to především její pravá část, ve které je určen proud zbývající části sítě za poruchou  $I_{rest}$ .

Na obr. 3.3 je vidět schéma zapojení přenosových článků jednotlivých částí sítě včetně popisu koeficientů jejich matic, ze kterého vychází odvození výsledné kritériální rovnice.



Obr. 3.3: Schéma zapojení přenosových článků vedení v místě poruchy

Proud  $I_{rest}$  je stejně jako napětí a proudy v místě poruchy funkcí vzdálenosti poruchy  $x_i$ :

$$I_{rest}^{(1)}(l_i - x_i) = \bar{U}_{nf}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{y}_{rest,11}^{(1)}(l_i - x_i)$$

$$I_{rest}^{(1)}(l_i - x_i) = \left( \bar{b}_{i,11}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(1)} + \bar{b}_{i,12}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(1)} \right) \cdot \frac{\bar{a}_{rest,22}^{(1)}(l_i - x_i)}{\bar{a}_{rest,12}^{(1)}(l_i - x_i)} \quad (4.1)$$

Výsledný tvar kritéria vznikne dosazením proudu  $I_{rest}$  do rovnice 2.4:

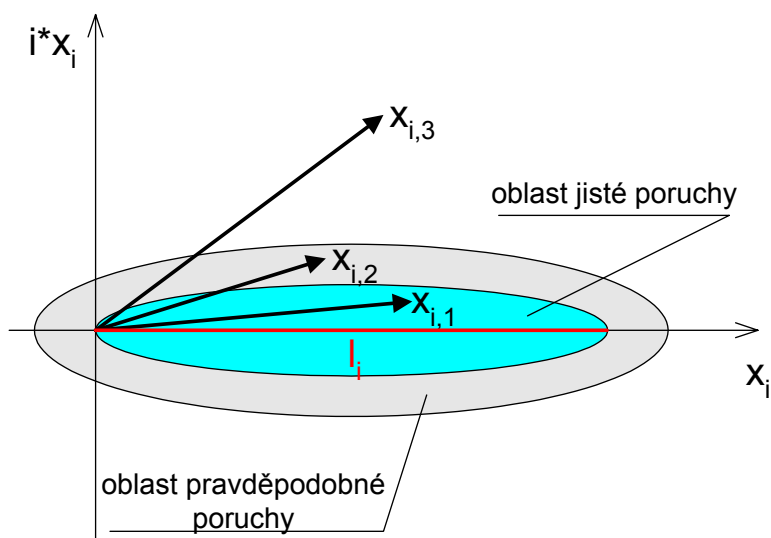
$$\begin{aligned} & \bar{b}_{i,11}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(1)} + \bar{b}_{i,12}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(1)} + \\ & \bar{b}_{i,11}^{(2)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(2)} + \bar{b}_{i,12}^{(2)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(2)} + \\ & \bar{b}_{i,11}^{(0)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(0)} + \bar{b}_{i,12}^{(0)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(0)} = \\ & 3.R_f \left( \left( \bar{b}_{i,21}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(1)} + \bar{b}_{i,22}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(1)} \right) - \left( \bar{b}_{i,11}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{U}_{in}^{(1)} + \bar{b}_{i,12}^{(1)}(x_i) \cdot \bar{I}_{in}^{(1)} \right) \cdot \frac{\bar{a}_{rest,22}^{(1)}(l_i - x_i)}{\bar{a}_{rest,12}^{(1)}(l_i - x_i)} \right) \quad (4.2) \end{aligned}$$

Tato rovnice vede na polynom, n-tého řádu, ve kterém neznámou je vzdálenost poruchy  $x_i$ . Protože byl testovaný úsek nahrazen kaskádním spojením dvou  $\Pi$ -

článků, vedla rovnice na polynom osmého řádu, jehož řešením bylo osm kořenů  $x_{i,1} \dots x_{i,8}$ , představujících možnou vzdálenost poruchy.

### 4.3.1 Výsledky výpočtu

Rozhodujícím kritériem pro skutečnost poruchy v testovaném úseku je reálná hodnota některého z kořenů a nebo alespoň přibližně reálná a to samozřejmě jen v případě, že se jedná o hodnotu kladnou. Podle [1] je jedna z možností hodnocení kořenů polynomu vymezením tří oblastí v komplexní rovině, které představují geometrické místo vektorů s definovaným poměrem imaginární a reálné složky. Na základě aplikace tohoto kritéria (obr. 4.2) se rozhoduje o tom zda porucha v testovaném úseku skutečně je nebo není nebo by v něm mohla být.



Obr. 4.2 : Kritérium pro hodnocení kořenů polynomu

Podle obr. 4.2 má tedy kořen  $x_{i,1}$  nebo  $x_{i,2}$  odpovídající hodnotu pro identifikaci poruchy v  $i$ -tém úseku vedení, zatímco v případě hodnoty  $x_{i,3}$  je porucha v testovaném úseku délky  $l_i$  vyloučena.

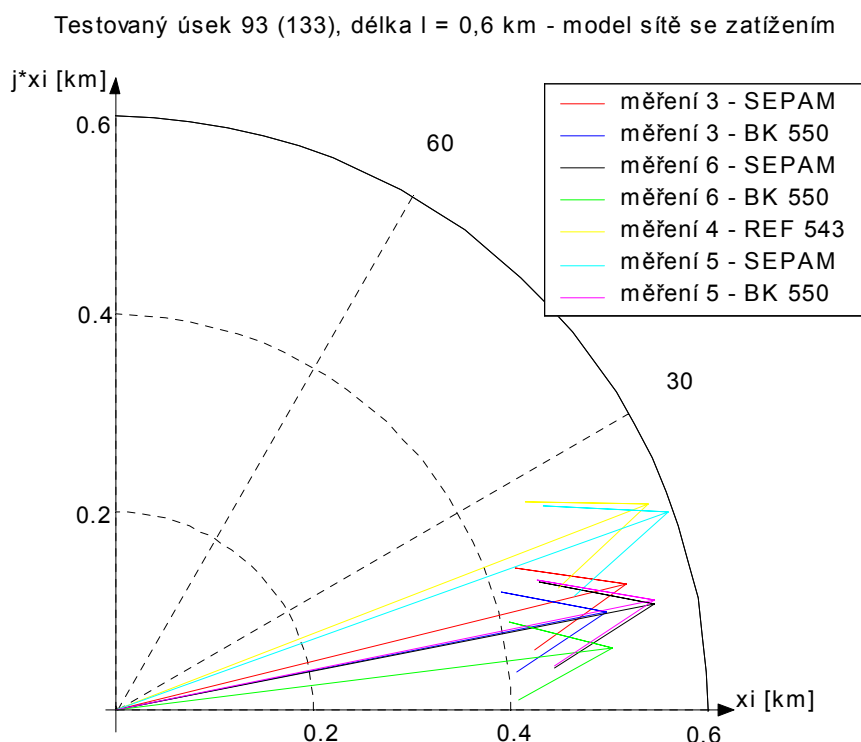
V první fázi výpočtu byl testován úsek 93 (nebo 133 v síti s větším rozsahem), kde byla porucha skutečně simulována. Kořeny byly vypočteny jak pomocí modelu sítě, ve kterém byla modelována zátěž, tak pomocí sítě modelované bez zatížení. Výsledky byly jednoznačně lepší při použití modelu se zatížením.

Pro testování byly využity hodnoty  $\bar{U}_m^{(syst)}$  a  $\bar{I}_m^{(syst)}$  ze všech měření pro odporové zemní spojení, tak jak byly získány z jednotlivých měřících přístrojů. V každém výpočtu byl nalezen jeden kořen s reálnou složkou odpovídající délce testovaného elementu.

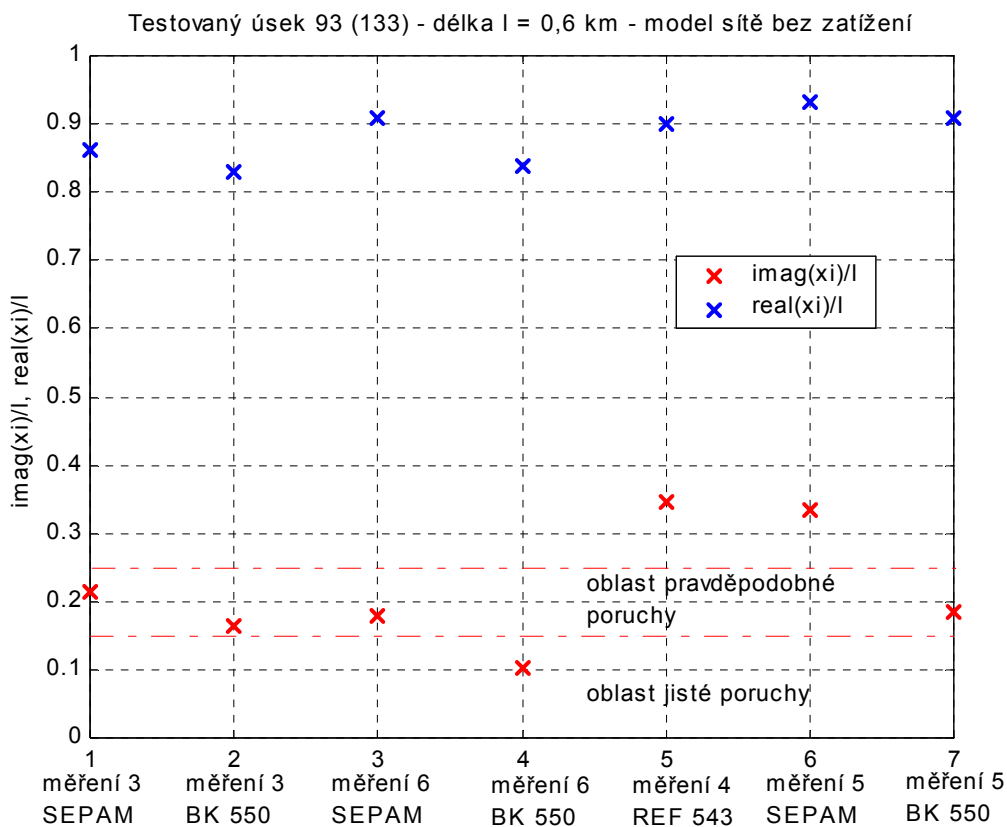
Pro vyhodnocení těchto kořenů lze použít jejich zobrazení v komplexní rovině (obr. 4.3), což je ovšem poněkud nepřehledné v případě, že kořeny leží blízko sebe. Jako přehlednější se ukázalo zobrazení výsledků podle obr. 4.4., kde jsou uvedeny vždy hodnoty poměrných imaginárních a reálných složek jednotlivých kořenů vzhledem k délce testovaného úseku  $l$ .

Tab. 4.1: Výsledky testování úseku 93 (133), délka  $l = 0,6$  km, model sítě se zatížením

| Zdroj hodnot<br>$\bar{U}_m^{(syst)}, \bar{I}_m^{(syst)}$ | Kořeny polynomu $x_i$ [km]   |
|--|--|
| měření 3 - BK 550<br>$R_f = 8000 \Omega$                 | -727.6-51.31*i, -527.8-97.03*i, -70.98+491.6*i,<br><b>0.4980+0.9832e-1*i</b> , 39.07-574.3*i, 467.9+18.19*i,<br>758.7+89.89*i, 4753.-3967.*i |
| měření 3 – SEPAM<br>$R_f = 8000 \Omega$                  | -733.2-51.11*i, -517.0-97.04*i, -66.56+497.7*i,<br><b>0.5178+0.1281*i</b> , 52.29-568.9*i, 477.5+15.86*i,<br>755.4+94.47*i, 4077.-5172.*i    |
| měření 6 - BK 550<br>$R_f = 2500 \Omega$                 | -729.4-36.87*i, -549.9-73.57*i, -96.87+498.6*i,<br><b>0.5034+0.6193e-1*i</b> , 19.02-524.6*i, 458.4+37.06*i,<br>749.9+96.51*i, 5728.-3214.*i |
| měření 6 – SEPAM<br>$R_f = 2500 \Omega$                  | -736.6-56.41*i, -515.5-93.20*i, -75.46+440.8*i,<br><b>.5461+0.1075*i</b> , 35.08-639.8*i, 478.0+22.07*i,<br>754.7+86.89*i, 3976.-5080.*i     |
| měření 4 - REF 543<br>$R_f = 8000 \Omega$                | -741.2-60.48*i, -503.1-88.61*i, -70.59+492.2*i,<br><b>0.5399+0.2082*i</b> , 58.43-576.0*i, 492.7+24.57*i,<br>746.7+92.79*i, 3224.-8212.*i    |
| měření 5 - BK 550<br>$R_f = 2500 \Omega$                 | -749.3-54.25*i, -526.3-94.53*i, -97.17+447.3*i, -7.836-<br>617.7*i, <b>0.5450+0.1103*i</b> , 472.2+25.02*i, 745.7+89.86*i,<br>4033.-5021.*i  |
| měření 5 –SEPAM<br>$R_f = 2500 \Omega$                   | -749.7-72.20*i, -505.8-89.13*i, -93.03+435.6*i,<br><b>0.5600+0.2009*i</b> , 14.13-652.0*i, 489.0+28.58*i,<br>740.3+84.29*i, 3120.-8087.*i    |



Obr. 4.3: Zobrazení kořenů polynomů z tab. 4.1 v komplexní rovině



Obr. 4.4: Poměrné hodnoty reálných a imaginárních složek kořenů z tab. 4.1

## 4.4 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA VÝPOČTU

### 4.4.1 Změna délky testovaného úseku

Protože byla porucha simulována na konci elementu vedení 93 (133), za kterým síť pokračovala dalšími dvěma úseky volného vedení, je třeba ověřit také výsledky při testování elementu vedení, který je součtem úseku 93 a 94 (příp. 133 a 134 v síti většího rozsahu).

Zvětšením délky testovaného úseku došlo k výraznému zlepšení výsledků jednotlivých testů. Hodnoty kořenů představujících možnou vzdálenost poruchy v testovaném úseku mají podstatně menší imaginární složku a identifikují tedy poruchu v tomto úseku vedení pro všechna uvedená měření, zatímco při délce testovaného úseku 0,6 km (výsledky na obr. 4.4) je porucha vyhodnocena pouze v pěti případech ze sedmi.

### 4.4.2 Změna testovaného úseku

Princip metody spočívá v postupném testování jednotlivých úseků vedení ve vývodu se zemním spojením způsobem, který je uveden v předcházející kapitole. Vychází se tedy z předpokladu, že výsledky odpovídající identifikaci poruchy budou vycházet pouze v úseku, kde porucha skutečně je. Proto je nutno ověřit jaké budou



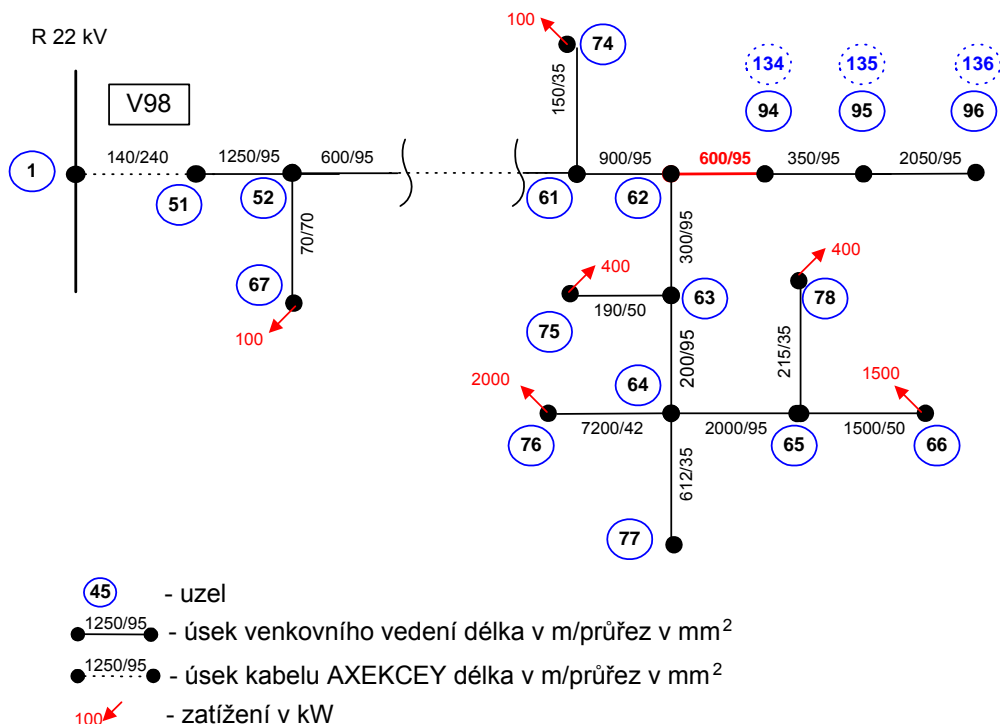
výsledky při použití tohoto kritéria v úsecích vedení bez poruchy a vyloučit možnost falešného působení metody – tzn. ve zdravých úsecích.

Pro tento účel byly testovány zbývající dva úseky vedení za poruchou - 94 a 95 (134 a 135), a dále úsek 62, 63, 64 a 51 před poruchou. Pro výpočet byly použity vždy hodnoty ze všech měření a oba modely sítě, tj. se zatížením i bez něj. Výsledky testování jsou uvedeny v tabulce.

Tab. 4.2: Výsledky testů ve vybraných zdravých úsecích vedení V98

| Testovaný úsek                        | Model sítě   | měření 3         |                  | měření 4    | měření 5    |             | měření 6         |                  |
|---------------------------------------|--------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|------------------|
|                                       |              | BK 550           | SEPAM            | REF 543     | BK 550      | SEPAM       | BK 550           | SEPAM            |
| 94(134)<br>l = 0,35 km<br>uzly 94-95  | se zatížením | pravděp. porucha | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | pravděp. porucha | pravděp. porucha |
|                                       | bez zatížení | bez poruchy      | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy      | pravděp. porucha |
| 95 (135)<br>l = 2,05 km<br>uzly 95-96 | se zatížením | bez poruchy      | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy      | bez poruchy      |
|                                       | bez zatížení | bez poruchy      | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy      | bez poruchy      |
| 62<br>l = 0,2 km<br>uzly 62-63        | se zatížením | bez poruchy      | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy      | bez poruchy      |
|                                       | bez zatížení | bez poruchy      | bez poruchy      | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy | bez poruchy      | bez poruchy      |
| 63<br>l = 0,3 km<br>uzly 63-64        | se zatížením | bez poruchy      | bez poruchy      | -           | -           | -           | bez poruchy      | bez poruchy      |
|                                       | bez zatížení | bez poruchy      | bez poruchy      | -           | -           | -           | bez poruchy      | bez poruchy      |
| 64<br>l = 2 km<br>uzly 64-65          | se zatížením | pravděp. porucha | pravděp. porucha | -           | -           | -           | pravděp. porucha | pravděp. porucha |
|                                       | bez zatížení | jistá porucha    | jistá porucha    | -           | -           | -           | jistá porucha    | jistá porucha    |
| 51<br>l = 1,25 km<br>uzly 51-52       | se zatížením | bez poruchy      | bez poruchy      | -           | -           | -           | bez poruchy      | bez poruchy      |
|                                       | bez zatížení | bez poruchy      | bez poruchy      | -           | -           | -           | bez poruchy      | bez poruchy      |

Přehled o umístění jednotlivých testovaných úseků ve vedení V98 dává zjednodušené schéma tohoto vývodu na obr. 4.5. Testovány byly záměrně úseky, které mají stejnou nebo velmi podobnou elektrickou vzdálenost od rozvodny (úseky 62, 63, 64, 94, 95) a pro ilustraci také jeden úsek na počátku vedení V98 (úsek 51). Testy úseků 63, 63, 64, a 51 byly provedeny v síti menšího rozsahu tedy pouze pro hodnoty z 3. a 6. měření.



Obr. 4.5: Zjednodušené schéma vedení V98 s vybranými testovanými úseky

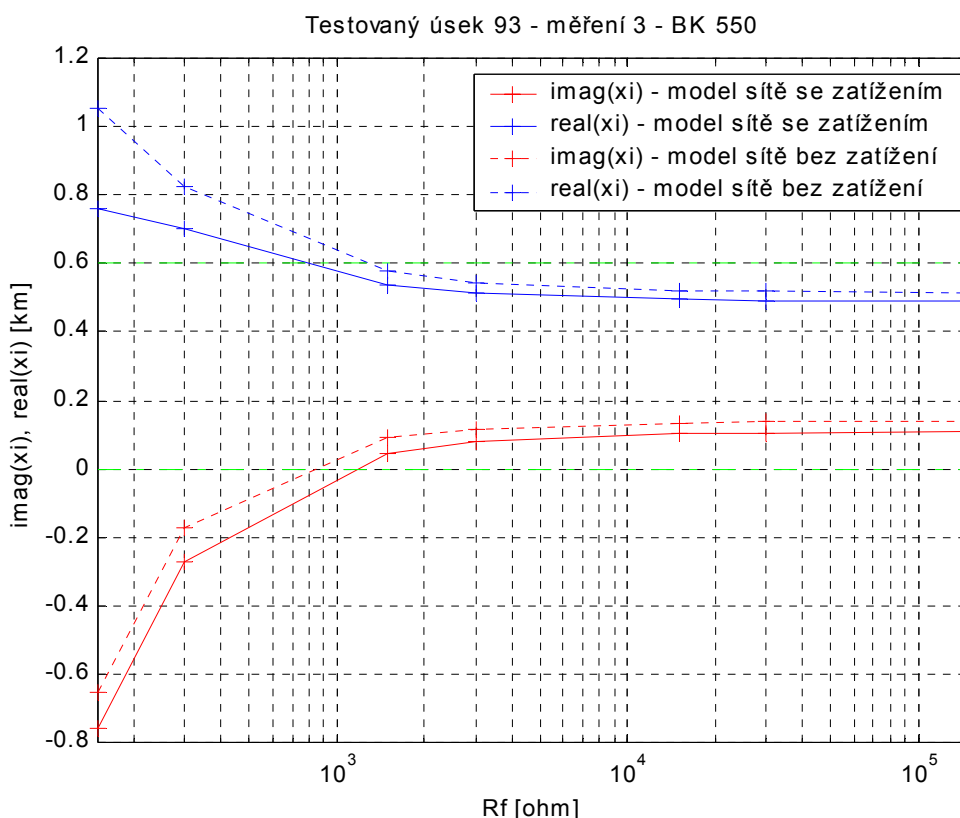
Z výsledků v tab. 3.7 je vidět že k falešnému působení dochází v případě, kdy přenosové články sítě před a za testovaným elementem přibližně odpovídají úseku 93, kde byla simulována porucha – tj. v úsecích 94 a 64. Uvážíme-li že impedance před poruchou se pro testované úseky 62, 63, 64 a 94 příliš nezměnila vzhledem k rozsahu sítě před poruchou, je zcela jasné, že rozhodovala především zbývající část sítě za poruchou.

#### 4.4.3 Změna odporu poruchy

Protože není odpor poruchy předem znám předpokládá se, že bude tato metoda lokalizace zemního spojení pracovat vždy s nějakou předem zvolenou hodnotou odporu poruchy. Ta může být určena na základě dlouhodobých sledování a měření v síti a zkusmo použita v určitém rozsahu hodnot, které jsou pro tuto síť charakteristické. Jak uvádí např. [2] nebo [33], hodnoty odporu poruchy se pohybují v rozmezí desítek ohmů do desítek kiloohmů. Pro vodič vedení 22 kV spadlý na zem se uvádí maximální hodnota asi 15 kΩ. Současné ochranné systémy kompenzovaných sítí dokáží určit pravděpodobnou hodnotu odporu při trvalém zemním spojení pomocí injektáže proudu do uzlu sítě.

Při zkoumání vlivu hodnoty odporu  $R_f$  dosazené v kritériální rovnici na hodnoty kořenů – tj. pravděpodobných vzdáleností poruchy bylo použito rozmezí hodnoty  $R_f$  od 50 Ω do 150 kΩ. Vliv na výsledky testování při takto proměnných podmínkách je vyjádřeno grafickou závislostí hodnot imaginární a reálné složky vypočtených kořenů na změně odporu a to opět pro dvě varianty modelované sítě (se zatížením a bez něj). Všechny grafy měly velmi podobný průběh tomu, který je uveden na

obrázku 4.6. Jedná se o testování úseku 93 podle hodnot z 6. měření (zeleně je vyznačena délka testovaného úseku).



Obr. 4.6: Závislost velikosti reálné a imaginární složky kořenů polynomu na odporu poruchy – BK 550, měření 3

Pro menší hodnoty odporu byly reálné složky kořenů mimo oblast délky testovaného úseku (vyznačena v grafu zelenými čerchovanými čarami) a imaginární klesaly do záporných hodnot. Naopak pro hodnoty  $R_f$  nad  $2 \text{ k}\Omega$  se tyto jejich velikosti ustálily zhruba na hodnotách, které jsou prezentovány v předešlé kapitole a dále se již neměnily.

## 5 ZÁVĚRY PRÁCE

Cílem této práce bylo prakticky ověřit metodu lokalizace zemního spojení v kompenzované síti, která vychází z principů uvedených v kapitole 1.5 a zhodnotit tak možnosti jejího využití. Hlavní předností této metody je možnost určení místa poruchy z hodnot měřených během poruchy přímo v rozvodně bez nutnosti změny konfigurace sítě. Zároveň je v tomto konkrétním praktickém příkladě vyloučena nutnost instalace zdroje s frekvencí odlišnou od frekvence základní použitím signálu HDO.

Součástí hodnocení metody bylo také posouzení možnosti nasazení poruchových zapisovačů digitálních ochran jako zařízení pro technickou realizaci využití této metody k lokalizaci poruchy. Z tohoto důvodu byly tedy zpracovány také hodnoty naměřené pomocí těchto terminálů a použité pro výpočet pravděpodobné vzdálenosti poruchy.

Vzhledem k tomu, že se jedná o způsob lokalizace poruchy, který nebyl zatím v našich sítích použit, bylo potřeba pro hodnocení získat co možná nejvíce údajů a prověřit různé modifikace celého matematického modelu sítě pro výpočet pravděpodobné vzdálenosti poruchy.

## **5.1 HODNOCENÍ METODY**

Výsledky měření a výpočtů při testování jednotlivých úseků vedení jsou uvedeny v předcházející kapitole a lze je vyhodnotit, podle toho jak odpovídaly skutečné situaci v síti a to především co se týče identifikace poruchy v úseku vedení 93 (133) se simulovanou poruchou nebo vzhledem k falešnému působení ve zdravých úsecích.

Z výše uvedených výsledků je patrné, že úspěšnost identifikace poruchy závisela na následujících faktorech:

### **1. Na modelu sítě**

Pro vyhledání místa simulované poruchy je potřeba použít co možná nejpřesnějšího modelu celé sítě. Je nezbytné modelovat síť včetně aktuálního zatížení.

### **2. Na délce testovaného úseku**

Výsledky testů jsou příznivější testuje-li se úsek s větší délkou, kde velikost imaginární složky vypočtené pravděpodobné vzdálenosti poruchy představuje menší podíl. Výpočet vzdálenosti poruchy v úseku se simulovanou poruchou prokázal, že hodnota imaginární složky pro dané místo v síti příliš nemění a je dána přesností měření a výpočtu. Možnost testování delšího úseku vedení umožňuje eliminaci chyb měření a modelu sítě a tak příznivě ovlivňuje výsledky testování. Tento požadavek ovšem omezuje selektivitu metody a jeho splnění je možné pouze v případě odpovídající konfigurace sítě. Tak tomu bylo právě v případě našeho experimentu, kdy byla porucha simulována na samém konci úseku vedení 93 a za ním následovaly další dva úseky bez odboček.

### **3. Na hodnotách naměřených v rozvodně na frekvenci HDO**

Výsledky testů pro jednotlivá měření se poměrně značně lišily především v hodnotě imaginární složky vypočtených kořenů a tím tedy i v úspěšnosti vyhledání poruchy v úseku vedení se simulovanou poruchou.

Přehled výsledků testů v úseku vedení se simulovanou poruchou z jednotlivých měření je uveden v tabulce 5.1.

Rozdíly ve výsledcích ukazují jednak možnost vlivu rozdílných podmínek jednotlivých měření (různý odpor zapojený v místě poruchy, různý rozsah sítě), ale především skutečnost, že úspěšnost metody je značně ovlivněna přesností měření. Výsledky testů odpovídaly přesnosti přístrojů - lepší byly při výpočtech pomocí hodnot z analyzátoru BK 550, který má podstatně vyšší vzorkovací frekvenci než oba zbývající přístroje (SEPAM, REF 543).

Skutečnost horších podmínek měření daných hodnotou vzorkovací frekvence se projevil už ve fázi verifikace modelu, kdy hodnoty poruchových veličin vypočtené

z jednotlivých měření jasně prokázaly větší přesnost analyzátoru BK 550 s vyšší vzorkovací frekvencí oproti poruchovým zapisovačům ochranných terminálů – především SEPAM se vzorkováním jen 600 Hz (což je 10x méně než analyzátor BK 550).

Tab. 5.1 : Výsledky testů v úseku vedení se simulovanou poruchou

| měření       | rozsah sítě | odpor poruchy<br>$R_f[\Omega]$ | Testovaný úsek                 |                       |  |                       |
|--------------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|
|              |             |                                | 93 (133)<br>délka $l = 0,6$ km |                       | 93+94 (133+134)<br>délka $l = 0,95$ km |                       |
|              | $I_c$ [A]   |                                | model bez zatížení             | model se zatížením    | model bez zatížení                     | model se zatížením    |
| 3<br>BK 550  | 63          | 8 000                          | pravděpod.<br>porucha          | pravděpod.<br>porucha | jistá<br>porucha                       | jistá<br>porucha      |
| 3<br>SEPAM   |             |                                | bez poruchy                    | pravděpod.<br>porucha | jistá<br>porucha                       | jistá<br>porucha      |
| 4<br>REF 543 | 147         |                                | bez poruchy                    | bez poruchy           | pravděpod.<br>porucha                  | pravděpod.<br>porucha |
| 5<br>BK 550  |             | 2500                           | bez poruchy                    | pravděpod.<br>porucha | pravděpod.<br>porucha                  | jistá<br>porucha      |
| 5<br>SEPAM   |             |                                | bez poruchy                    | bez poruchy           | pravděpod.<br>porucha                  | pravděpod.<br>porucha |
| 6<br>BK 550  |             | 63                             | pravděpod.<br>porucha          | jistá<br>porucha      | jistá<br>porucha                       | jistá<br>porucha      |
| 6<br>SEPAM   | bez poruchy |                                | pravděpod.<br>porucha          | jistá<br>porucha      | jistá<br>porucha                       |                       |

Celkově horší jsou výsledky v případě většího rozsahu sítě. Bohužel pro měření 4 chybí právě signál přesného analyzátoru a je k dispozici pouze měření poruchového zapisovače REF 543, což byl jediný přístroj, který tento typ zkoušky zaznamenal.

#### 4. Na hodnotě odporu poruchy, která byla dosazena do kritériální rovnice

Výsledky citlivosti výpočtu na změnu odporu jsou v kapitole 3.3.3 a dále v příloze 12. Podle průběhu jednotlivých grafů lze usoudit, že výsledky testování nebudou ovlivněny hodnotou odporu poruchy bude-li se nacházet nad hodnotou zhruba 1 k $\Omega$ . Počínaje touto hodnotou je průběh hodnot imaginární i reálné složky přibližně konstantní. Tato necitlivost pro vyšší odpor poruchy dokazuje vhodnost metody pro lokalizaci vysokoohmových poruch.

Podle výsledků uvedených v tabulce byla metoda lokalizace poruchy pro úsek se simulovanou poruchou úspěšná pouze v jednom případě v ostatních označila úsek pouze jako úsek s pravděpodobnou poruchou nebo bez poruchy. Pokud tedy budeme akceptovat pouze výsledky při testování úseku 93 (133) lze konstatovat, že jde o metodu, která je poměrně náročná na přesnost. Otázka přesnosti metody není ovšem pouze záležitostí vlastního měření, ale také celého procesu zpracování výsledků

počínaje Fourierovou transformací a konče numerickou metodou pro hledání kořenů polynomu.

Zcela zásadní je pro úspěšnost vyhledání poruchy touto metodou co možná nejuvěrnější matematický model sítě. Výpočty ukázaly, že teprve při získání odpovídajícího modelu sítě, verifikovaného výpočtem proudu a napětí poruchy dává tato metoda výsledky, podle kterých lze usuzovat na místo poruchy. Velmi významnou chybou, která nebyla ve výpočtu eliminována zůstala skutečnost že modelovaná síť byla symetrická oproti síti měřené a je zcela jistě jedním z důvodů proč vyhledání simulované poruchy bylo tak nepřesné.

## 5.2 ZHODNOCENÍ PORUCHOVÝCH ZAPISOVAČŮ OCHRAN

Jednou z možností jak vyřešit technickou stránku realizace uvedené metody je použití současných digitálních ochran, které jsou vybaveny poruchovými zapisovači a umožňují záznam průběhu celé poruchy. Proto byly v průběhu experimentu použity pro měření kromě analyzátoru BK 550 také dvě ochrany s poruchovými zapisovači, které jsou v současné době již běžně používané pro chránění vývodů vedení v rozvodnách vn. Jejich parametry jsou uvedeny v kapitole 2.3.

Z hlediska jejich použití se lze vyjádřit jen k ochraně SEPAM, jejíž data byla zpracována ve většině výpočtů. Výsledky testů pomocí dat získaných z této ochrany, byly horší a lze konstatovat, že v uvedeném experimentu přesnost poruchového zapisovače SEPAM nebyla příliš vyhovující. Je to bezesporu dáno nízkou vzorkovací frekvencí tohoto přístroje vzhledem k frekvenci měřeného signálu (216,6 Hz), kdy poměr obou frekvencí je na hranici minima daného Shanon-Kotělnikovým teorémem. Otázkou zůstává nakolik byla nepřesnost dána měřením a nakolik modelem sítě.

Co se týče druhé ochrany, jsou k dispozici data pouze z jednoho měření pro odporové poruchy, které navíc proběhlo s velmi špatnými výsledky – signál BK byl značným způsobem zašuměn a na frekvenci HDO nebyly získány žádné odpovídající hodnoty. Jediné výsledky, které jsou pro tento terminál k dispozici tedy nelze porovnat. Skutečnost, že bylo získáno velmi málo měřených hodnot pomocí poruchového zapisovače této ochrany byla způsobena velmi krátkým časem poruchového zapisovače 2,5 s. Protože bylo nutno analyzovat data měřená po ukončení přechodného děje a po odepnutí přídavného odporu v pomocném vinutí tlumivky, byl čas poruchového zapisovače příliš krátký, uvážíme-li že se spouštěl se začátkem poruchy.

## 5.3 MOŽNOSTI POKRAČOVÁNÍ VÝZKUMU

Na základě výsledků uvedeného experimentu lze stanovit základní problémy, které by měly být v dalším výzkumu této metody vyřešeny:

- provést experiment s větším počtem simulovaných poruch na více místech v síti, pokud možno také na kmenových vedeních. Tato práce vychází z experimentu, při kterém byla porucha simulována zcela na konci sítě a navíc na odbočce volného vedení, které v daném místě nebylo zatíženo. Je třeba

porovnat účinnost metody při simulaci poruchy v jiných místech sítě, přestože se předpokládá, že výsledky by neměly být příliš rozdílné.

- Pro přesnější modelování sítě použít hodnot měřených nulových admitancí jednotlivých fází sítě. Model sítě použitý pro výpočet byl symetrický a nerespektoval tedy skutečnost přirozené nesymetrie měřené sítě. To by mohlo vyřešit právě měření hodnot nulových admitancí sítě a tedy zjištění nesymetrie sítě před simulovanou poruchou. K tomuto účelu lze využít metodu pro měření parametrů kompenzované sítě injektováním proudu do uzlu sítě, jak je popsána v [34]. Jedná se o princip, který používá také např. ochranný systém Shwedish Neutral nebo Haefely – Trench pro určení vývodu vedení s poruchou.
- Na základě zpřesněného modelu prověřit citlivost metody na změnu místa poruchy v elementu vedení. To znamená zjistit v jakých mezích se může pohybovat rozlišovací schopnost metody.

## LITERATURA

- [1] LEITLOFF, V., FEUILLET, R., GRIFFEL, D. Detection of Resistive Single-Phase Earth Faults in a Compensated Power-Distribution Systems. *ETEP*. 1997, Vol. 7, No. 1, p.65-73.
- [2] HANNINEN, S., LEHTONEN, M. Characteristic of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing. *Electric Power System Research*. 1998, No. 44, p. 155-161.
- [3] HALUZÍK, E. Identifikace pravděpodobné vzdálenosti místa zemního spojení signálem HDO v radiálních sítích vn. In *Sborník prací 2. odborné konference Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001, s. 5 – 8. ISBN 80-214-2015-4
- [4] ORSÁGOVÁ J, TOMAN P., HALUZÍK E. Metoda pro pravděpodobné určení místa zemního spojení. In *ELEKTROENERGETIKA*, Stará Lesná , 16. - 18. 9. 20
- [5] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3
- [6] NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1.vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1983. 224 s. Skriptum ČVUT
- [7] WELFONDER, T. et al. Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2000, Vol.15, No. 4., s.1121-1128.
- [8] PROCHÁZKA, K. *Vybrané problémy provozu distribučních sítí vn*. Příručka pro provozní pracovníky. České Budějovice: Výzkumný ústav energetický, 1992. 63s.
- [9] ARRILLAGA, J., ARNOLD, C.P. *Computer analysis of power systems*. 1.vyd. Canterbury: John Wiley & Sons, 1994. 364 s.
- [10] SVOBODA, J. *Hromadné dálkové ovládání*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1976.107 s. Skriptum ČVUT .
- [11] HALUZÍK, E. *Ochrany a automatiky v sítích*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1986. 160 s. Skriptum VUT
- [12] HALUZÍK, E. *Řízení elektrizačních soustav*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1987. 170 s. Skriptum VUT
- [13] DOHNÁLEK, P. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978. 374 s.
- [14] VALSA, J., DĚDEK, L., ČERMÁK, P. *Teoretická elektrotechnika II*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1991. 229 s. Skriptum VUT. ISBN 80-214-0312-8
- [15] REISS, L., MALÝ, K., PAVLÍČEK, Z., BÍZIK, J. *Teoretická elektroenergetika*. 2. přeprac. vyd. Bratislava: ALFA, 1979. 560 s.
- [16] HODINKA, M. *Přechodné jevy v elektrizační soustavě*. 3. vyd. Brno: VUT v Brně, 1990, 246 s. Skriptum VUT. ISBN 80-214-0083-8
- [17] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1987. 305 s.
- [18] FEJT, Z., ČERMÁK, J. *Elektroenergetika*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1981. 359 s. Skriptum ČVUT
- [19] HODINKA, M. *Vybrané problémy z elektrizačních soustav*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1984. 193 s. Skriptum VUT
- [20] KVASNICA, P. a kol. *Elektroenergetika III*. 2. vyd. Bratislava: Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1984. 155 s.
- [21] PETERSON H. A. *Transients in Power Systems*. 2 vyd. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982, 357 s.
- [22] BLACKBURN, J.L. *Protective Relaying*. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, Inc., 1998. 538 s. ISBN 0-8247-9918-6



- [23] VALSA, J. *Algoritmy pro simulaci lineárních a nelineárních elektronických obvodů na počítači*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1997. Studijní text k vybraným kapitolám postgraduálního doktorandského studia
- [24] HALUZÍK, E. *Ochrany elektrických vedení, vybrané problémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1999. Učební texty pro postgraduální kurs pořádaný FEI VŠB TU Ostrava
- [25] POSPÍŠIL, J. a kolektiv: *Indikace zemních spojení v sítích vn*. In Sborník Přednášek Konference ČK Cired 2000. Tábor 2000, s. 3/30-3/36.
- [26] POSPÍŠIL, J. a kol: *Aplikace nových metod při indikaci zemních spojení v sítích vn*. In *Sborník přednášek konference ČK Cired 2001*. Tábor 2001, s. 3/34-3/37.
- [27] HANŽLÍK, J., BÜRGER, P. Měření impedancí sítí 22 kV na frekvenci 216.6 Hz. In *Sborník přednášek konference ČK Cired 2001*. Tábor 2001, s. 3/38-3/40.
- [28] TOMAN, P., HALUZÍK, E. Identifikace zemního spojení v zokruhované síti VN. In *Sborník prací 2. odborné konference Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001, s. 69 - 73. ISBN 80-214-2015-4
- [29] VÁLEK, P., SOKANSKÝ, K. Modelování přechodových dějů v silnoproudých obvodech. In *ELEKTROENERGETIKA 2001*, zborník prednášok. Košice: Viena 2001. s. 267-274. ISBN 80-88922-34-8
- [30] TOMAN, P., HALUZÍK, E. Modelování netransponovaných vedení vn pomocí multibránu. In *Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika na přelomu tisíciletí EPVE'99*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1999, s. 299-302. ISBN 80-214-1419-7
- [31] TOMAN P. *Lokalizace místa zemního spojení v sítích vn*. Disertační práce. Brno: VUT, Ústav elektroenergetiky 2002. 88 s.
- [32] ČSN 33 3070: 1981. *Kompenzace zemních kapacitních proudů v sítích vysokého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 1981. 32s.
- [33] PROCHÁZKA, K. Podmínky činnosti zemních ochran v sítích vysokého napětí, *Energetika*, 1979, roč. 27, č. 8, s. 253-260.
- [34] *Distribuce elektrické energie*. Odborný bulletin regionálních energetických společností, květen 2000, č. 27. Jihomoravská energetika, a. s.

## CURRICULUM VITAE

**Jméno:** Jaroslava Orságová  
**Narozena:** 5. 6. 1961 v Kaplici  
**Adresa:** Horácké nám. 4, 621 00 Brno  
**Zaměstnání:** Asistentka na ÚEEN FEKT VUT v Brně, Purkyňova 118  
**E-mail:** [orsagova@feec.vutbr.cz](mailto:orsagova@feec.vutbr.cz)  
**Telefon:** (+420) 541 149 228

### Dosažené vzdělání:

1987 FE VUT Brno – ve studijním oboru elektroenergetika  
1995 FE VUT Brno – Doplňující pedagogické studium

### Odborná praxe:

1987 – 1993 VÚEP Brno - technička  
1993 – 1996 SOU ELDO s. r. o. - učitelka odborných předmětů  
od 1996 FEKT VUT v Brně – asistentka

### Jazykové znalosti:

Angličtina

## **ABSTRACT**

A single phase-to-ground connection is a fault that appears very frequently in MV lines of distribution networks. This fault can result in injuries of persons that occur near to the point of the fault and it can result as well in an interruption in the supply of electricity. Most distribution networks are operated as a compensated network, where an immediate disconnection of the fault is not necessary. The line can be operated without interruption, but only under condition that the fault is quickly located and eliminated. It means that a prompt fault identification and appropriate location guarantee at least uninterrupted energy supply.

At present, digital protections using the admittance principle are able to identify quite reliably a single phase-to-ground connection and to determine the affected feeder. Still, the location of the fault presents a task yet to be solved. The main problem of a fault location consists is a low value of the fault current during a single phase-to-ground fault in compensated networks.

This work is a continuation of an experiment performed in the second half of 2001. The experiment explored a possibility of the identification of a fault location in a circular network by means of remote load control signal. The work deals with a novel method for a fault location that is able to determine the distance of a fault in a radial network (without a possibility of a circular interconnection) using only values measured in a switching station. It presents the application of the method in a real distribution network and the evaluation of the results of this experiment.