

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

Ing. Petr Toman

LOKALIZACE MÍSTA ZEMNÍHO SPOJENÍ V SÍTÍCH VN

LOCATION OF EARTH FAULTS IN MV NETWORKS

ZKRÁCENÁ VERZE PHD THESIS

Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Školitel: Doc. Ing. Evžen Haluzík, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Pavel Santarius, CSc.

Doc. Ing. Petr Vašenka, CSc.

Datum obhajoby: 11. června 2002

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrizační soustava, zemní spojení, zemní poruchy, hromadné dálkové ovládání, lokalizace poruch

KEY WORDS

power systems, earth fault, ground connection, remote control signal, fault location

Rukopis uložen: Vysoké učení technické v Brně
Ústav elektroenergetiky FEKT
Purkyňova 118, 612 00 Brno

© Petr Toman, 2002
ISBN 80-214-2245-9
ISSN 1213-4198

<u>ABSTRACT</u>	5
<u>ÚVOD</u>	6
<u>1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY</u>	6
<u>2 CÍLE PRÁCE</u>	8
<u>3 POUŽITÁ METODIKA</u>	8
<u>3.1 Identifikace ve zkrhované síti pomocí signálů systémové frekvence</u>	8
<u>3.1.1 Princip metody</u>	8
<u>3.1.2 Ověřující výpočet</u>	11
<u>3.2 Identifikace ve zkrhované síti pomocí signálů HDO</u>	14
<u>3.2.1 Ověřující výpočet</u>	15
<u>3.3 Model zkrhované sítě vn s odbočkami</u>	15
<u>4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE</u>	16
<u>4.1 Výpočet konkrétní měřené sítě</u>	16
<u>4.1.1 Výpočet pro systémovou frekvenci 50 Hz</u>	16
<u>4.1.2 Výpočet pro frekvenci HDO 216,66 Hz</u>	18
<u>4.2 Měření zemních spojení v reálné síti</u>	19
<u>4.2.1 Vlastní měření</u>	19
<u>4.2.2 Výsledky měření</u>	20
<u>4.2.3 Zhodnocení měření</u>	24
<u>5 ZÁVĚR</u>	25
<u>5.1 Přínos metody zkrhování</u>	25
<u>6 LITERATURA</u>	27
<u>ŽIVOTOPIS</u>	30

ABSTRACT

The thesis deals with the analysis of possible ways of earth fault detection in MV networks and it is focused on the ways of fault location.

It summarizes the known theoretical principles of earth fault detection, both methods of detecting the faulted feeder and methods of the location of the affected part of the feeder. Also the analysis of the Heafely-Trench method is done. This method describes the application of zero sequence current ratio for earth fault location in a circular network.

The following part of the work includes the analysis of a modified Haefely-Trench method combined with the injecting of remote control signal that is used mainly for electrical heating control. The proposed solution makes use of already existing equipment in its normal operating modes.

The final part of the thesis is dedicated to the analysis and measurement of a real loaded MV network with an earth fault at normal operation, it takes into account both low resistance faults and high resistance and arc faults. The measured and calculated values are compared.

All the measured and calculated values are tabulated in the appendix of the thesis. The appendix contains also the description of software used for the calculations.

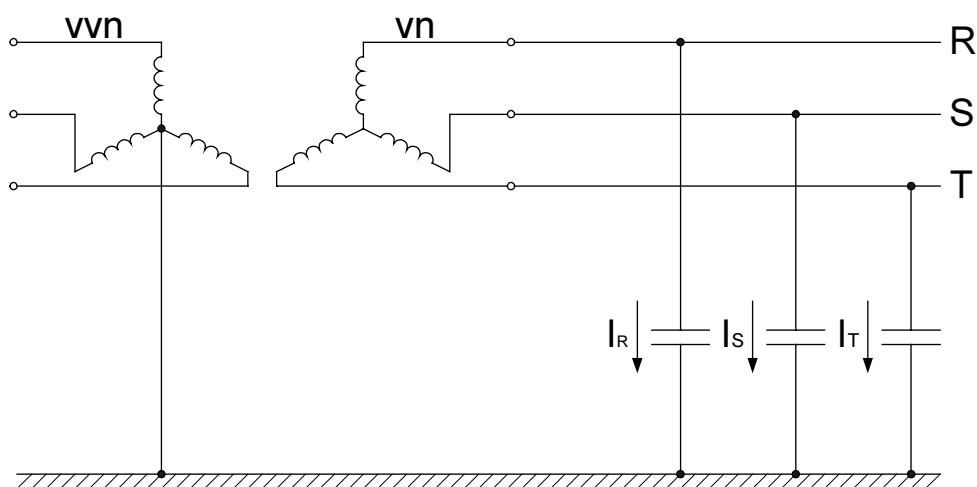
The results of the work can serve as a basis for a technical and economical analysis that will consider the practical application of this method.

ÚVOD

Tato práce se zabývá rozбором jednoho z postupů lokalizace místa poruchy v síti VN. Námět vychází z potřeby rozvodných podniků minimalizovat výpadky dodávky elektrické energie a to jednak z hlediska četnosti výpadků a jednak z hlediska doby výpadku.

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Při vzniku vodivého spojení jedné fáze se zemí vzniká jednofázový zkrat. Za předpokladu, že k takovému vodivému spojení dojde v sítích provozovaných s izolovaným uzlem, popř. v sítích kompenzovaných (tj. v sítích, jejichž uzel je spojen se zemí přes zhášecí tlumivky, nebo u nichž je vytvořen umělý nulový bod pomocí zhášecích transformátorů) nazýváme vodivé spojení jedné fáze se zemí zemní spojení. Zásadní rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je většinou mnohonásobně větší, než proud provozní (nebo je blízký provoznímu proudu) a má indukční charakter, kdežto v místě zemního spojení prochází pouze relativně malý proud kapacitního charakteru. Další zvláštností tohoto proudu je, že nezávisí na vzdálenosti od zdroje (je přibližně stejný ve všech místech sítě). V izolovaných sítích v ustáleném provozním stavu procházejí kapacitami fázový vodič-zem kapacitní proudy, jejichž součet je při symetrické síti a symetrickém napětí roven nule (obr. 1.1).

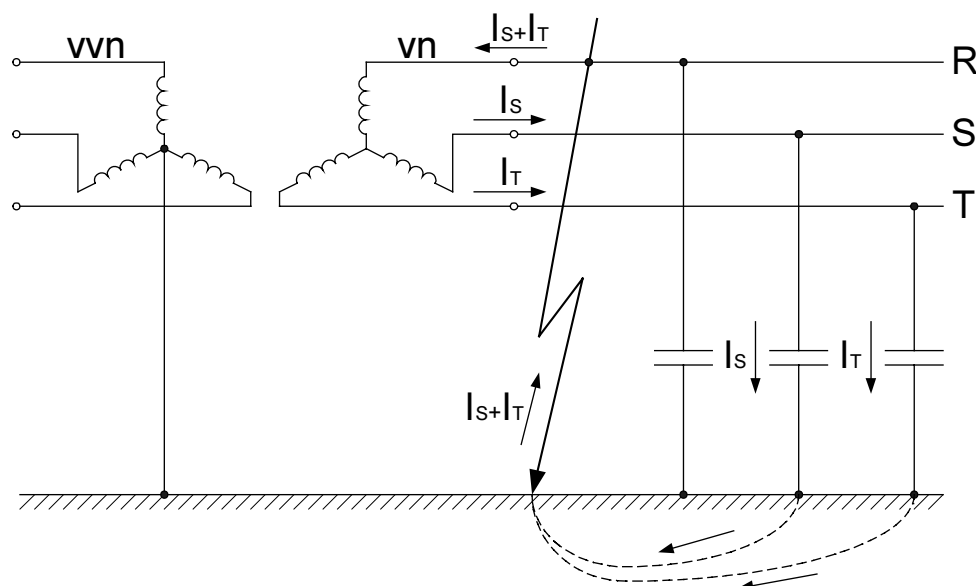


Obr. 1.1: Schématické znázornění sítě s izolovaným uzlem

V případě, že dojde v takové síti ke spojení některé fáze se zemí, uzavírají se kapacitní proudy zdravých fází přes zem, zemní spojení a vinutí transformátoru. Místem zemního spojení procházejí proudy, které při rozsáhlejší síti mohou dosahovat značných velikostí (obr. 1.2)

Pokud poruchový proud nepřekročí stanovenou hodnotu, může být síť s izolovaným uzlem ponechána v provozu. Komplikace nastávají při zemním

spojení, při němž elektrický oblouk hoří nestabilně, tj. dochází k jeho uhasnutí a následně opětovnému zapálení tedy jde o přerušované zemní spojení. V těchto případech může být přerušované zemní spojení zdrojem nebezpečných přepětí v síti.

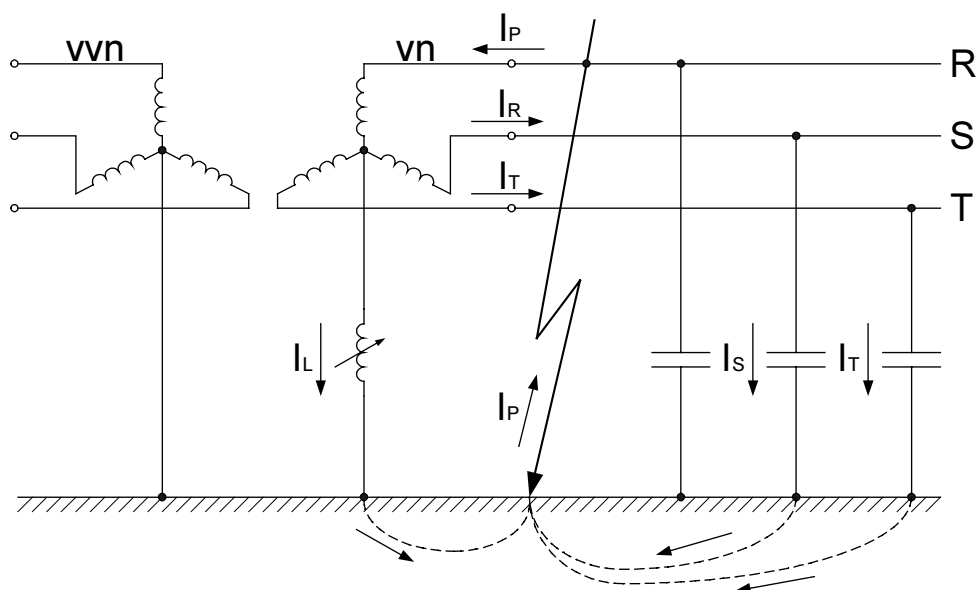


Obr. 1.2: Schematické znázornění sítě s izolovaným uzlem při zemním spojení

Účinným prostředkem pro potlačení oblouku v místě zemního spojení je uzemnění uzlu transformátoru přes tlumivku, jejíž indukčnost se dá nastavit tak, aby indukční proud jdoucí od ní k místu zemního spojení zde kompenzoval kapacitní proudy zdravých fází a aby došlo k uhašení oblouku (obr. 1-3).

Jak již bylo řečeno, problém lokalizace těchto poruch je v tom, že poruchový proud nezávisí na vzdálenosti poruchy od zdroje, ani na konkrétním vedení, ale pouze na velikosti celkové kapacity sítě proti zemi, tedy je přibližně stejný ve všech místech sítě.

V současné době se poruchy lokalizují v několika po sobě následujících krocích. Prvním krokem je identifikace postiženého vývodu. Po identifikaci je snaha pomocí odpínání jednotlivých úseků vedení vymezit co nejmenší úsek s poruchou, který se následně vypne. Dále se postup liší podle toho, zda jde o kabelové, nebo venkovní vedení. V případě kabelového vedení se připojí vysokofrekvenční signál a podle doby odrazu se určí vzdálenost poruchy. V případě venkovního vedení tento princip nelze použít, neboť toto vedení není dostatečně homogenní a na vedení vzniká velké množství odrazů, tedy nelze s dostatečnou přesností určit vzdálenost poruchy. Na venkovním vedením se místo poruchy určuje pochůzkou podél vedení. Je zřejmé, že oba způsoby jsou poměrně zdlouhavé a nákladné a mohou znamenat nedodání energie spotřebiteli.



Obr. 1.3: Schematické znázornění vlivu zhášecí tlumivky

2 CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je návrh metody, která by umožnila lokalizovat zemní spojení za provozu, tedy určit vzdálenost místa zemního spojení od rozvodny aniž by bylo nutné vedení vypnout.

3 POUŽITÁ METODIKA

3.1 IDENTIFIKACE VE ZKRUHOVANÉ SÍTI POMOCÍ SIGNÁLŮ SYSTÉMOVÉ FREKVENCE

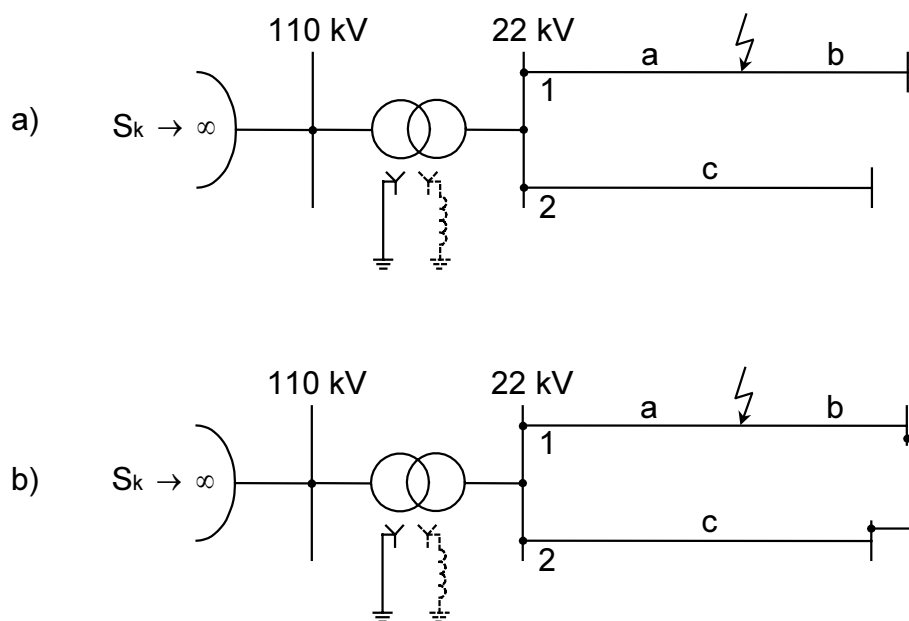
Tato část se zabývá rozбором metody Haefely-Trench určování místa zemního spojení v zkruhované síti [31].

3.1.1 Princip metody

Myšlenka pro určování vzdálenosti poruchy od přípojníc vychází z následujících předpokladů, které jsou v praxi většinou splněny:

- vývody v rozvodnách jsou vybaveny měření nulových složek napětí a proudu
- vývod se zemním spojením lze zkruhovat s dalším vývodem z téže rozvodny

Uvažujeme-li elementární reálnou síť (obr. 3.1a), se zemním spojením na lince **1** ve vzdálenosti **a** od přípojníc, tak pokud zkruhujeme linku **1** a linku **2** (obr. 3.1b), lze tuto síť při použití souměrných složek (v případě, že vedení nahradíme inverzním Γ článkem a uvažujeme velký zkratový výkon nadřazené sítě) překreslit do složkových schémat (obr. 3.2).



Obr. 3.1: Elementární reálná síť vn

Z netočivého schématu je zřejmé, že poměr netočivých složek proudů ve vývodech **1** a **2** závisí taktéž na poměru podélných impedancí vedení Z_{a0} , Z_{b0} , Z_{c0} (obr.3.3).

Dále je ze schématu (obr.3.3) vidět, že proudové transformátory na netočivou složku proudů **1** a **2** měří proudy I_{La0} a I_{Lcb0} . Tyto tečou dvěma paralelními větvemi do místa zemního spojení a postupně kompenzují poruchové kapacitní proudy. Výše uvedené proudy závisí na poměru impedancí paralelních větví.

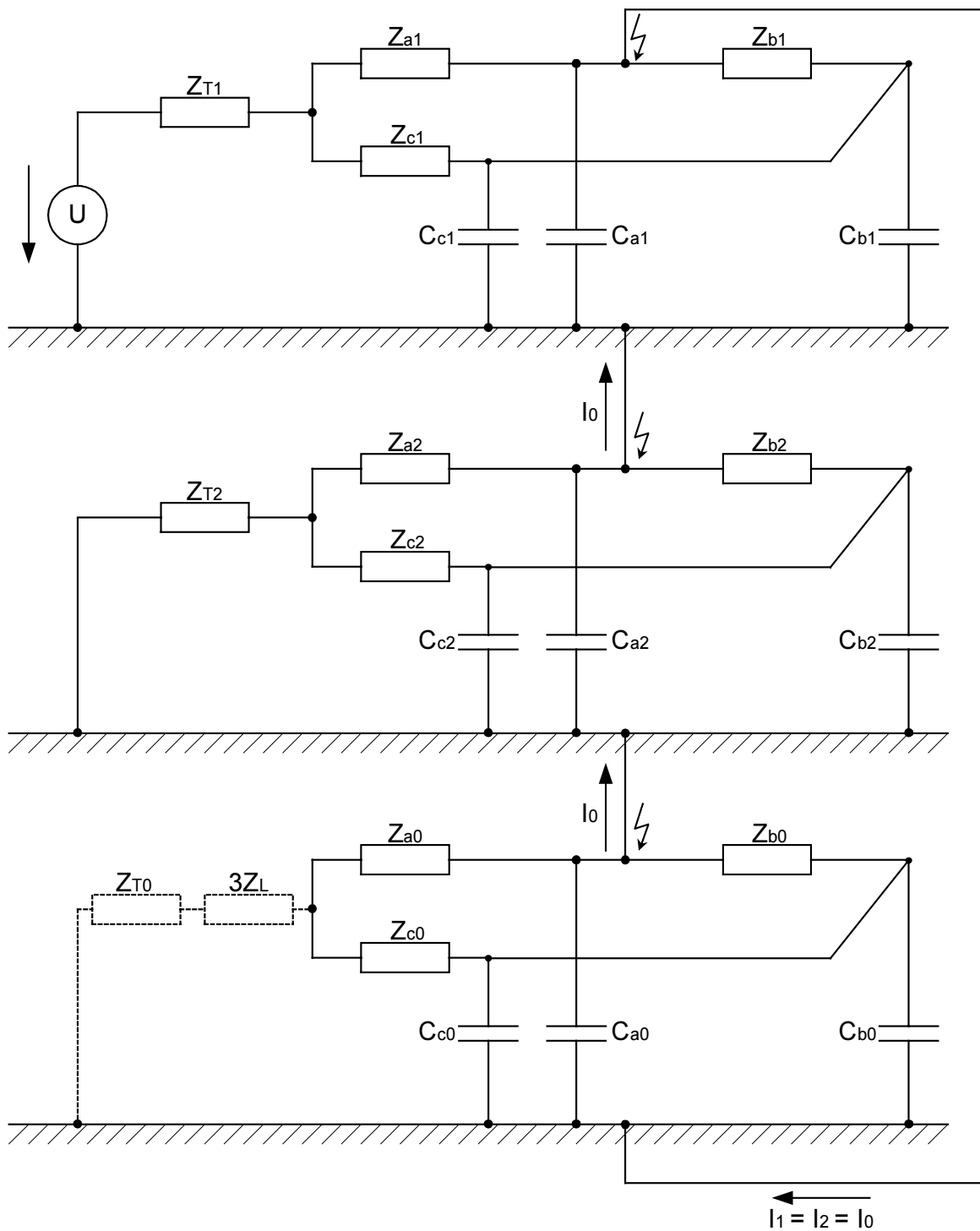
Tedy lze vzdálenost zemního spojení určit na základě porovnání velikosti netočivých proudů v těchto vývodech. Přesnost určení závisí na více faktorech:

a) velikosti přechodového odporu poruchy

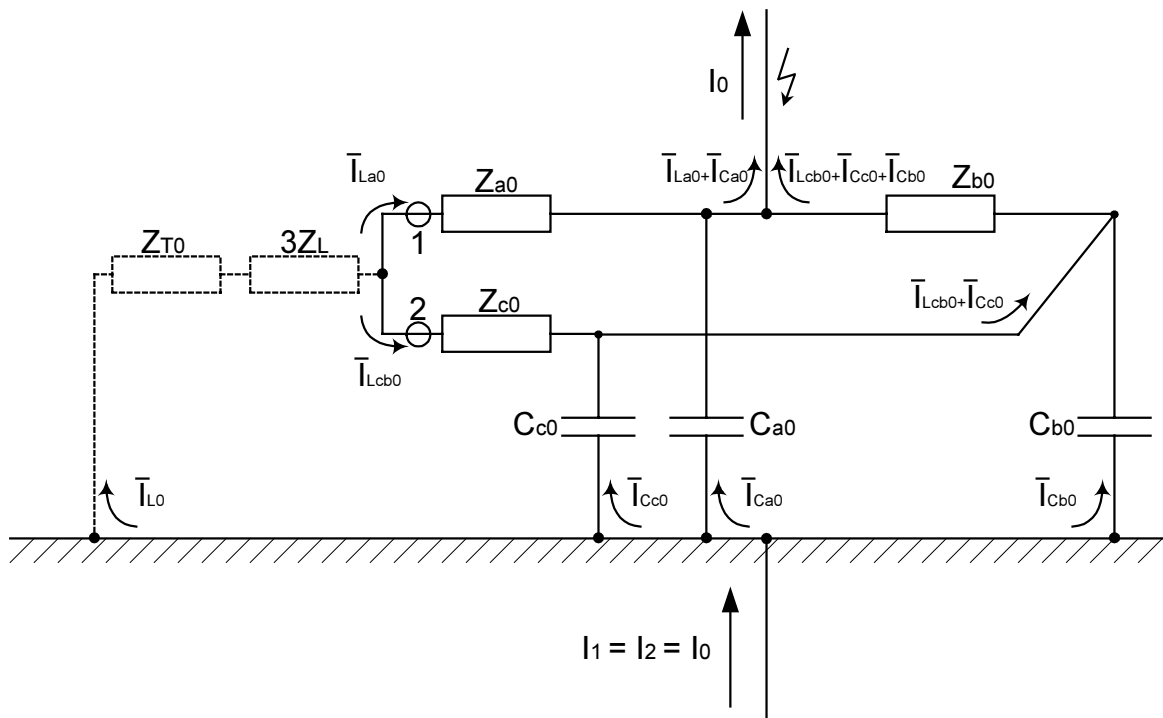
Čím menší je přechodový odpor v místě poruchy, tím menší je také zbytkové napětí v místě poruchy. Toto zbytkové napětí a kapacita vývodu způsobuje zkreslení proudu a tím i měření vzdálenosti. Přesnost měření tedy klesá se vzrůstajícím přechodovým odporem poruchy.

b) homogenitě vedení (parametrech zkruhovaných linek)

Je zřejmé, že přímý přepočítání proudového porovnání na vzdálenost je správný jen při homogenním vedení zapojených do kruhového provozu. Při nehomogenní síti, což většinou v praxi bývá, je nutno vycházet ze skutečných parametrů zkruhovaných vedení a z impedancí určených měření nulových proudů následně vypočítat vzdálenosti.



Obr. 3.2: Složková schémata sítě propojená pro zemní spojení



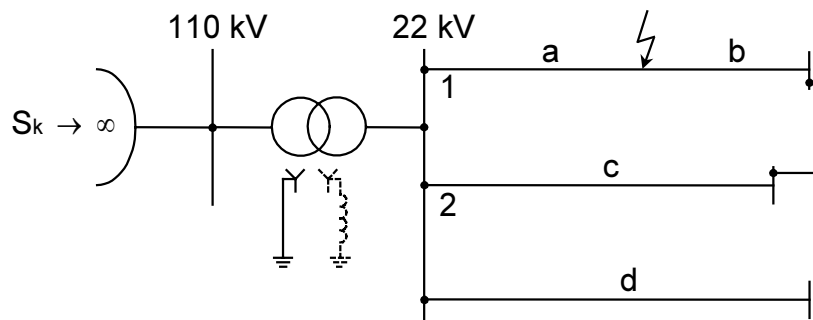
Obr. 3.3: Netočivé schéma při zemním spojení v zkruhované síti

c) přesnosti měřicích transformátorů proudu

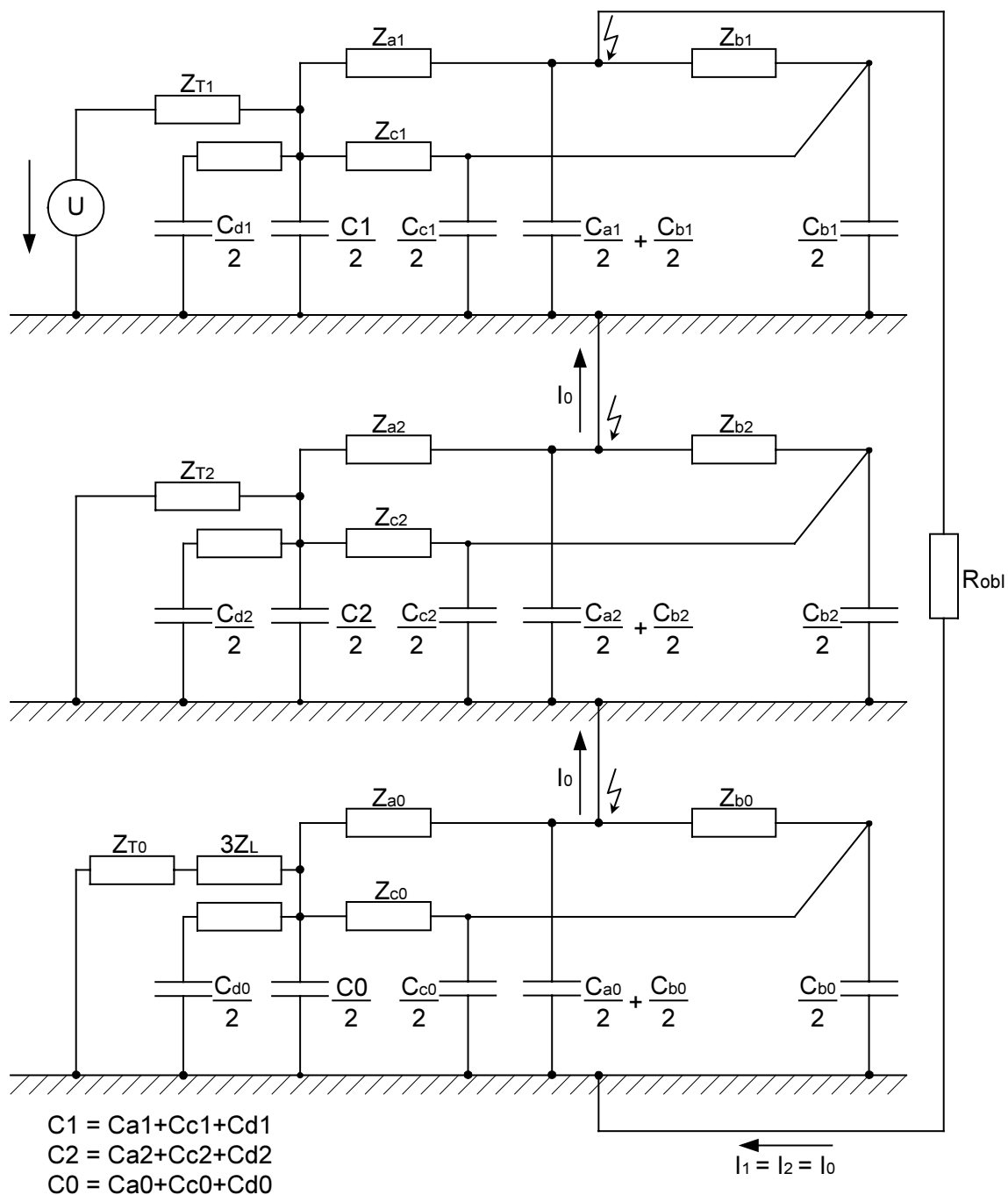
Pokud bychom realizovali výpočet v praxi pomocí automatiky, úhlová chyba měřicích transformátorů proudu by mohla způsobovat nepřesnosti v určení impedancí a následném výpočtu vzdálenosti poruchy.

3.1.2 Ověřující výpočet

Pokud dojde k zemnímu spojení v reálné síti, je třeba předchozí model (obr. 3.1) doplnit o vedení, které reprezentuje zbytek sítě, tedy vedení, jehož kapacitní proud nahradí kapacitní proud, kterým přispívá zdravá síť do místa poruchy (3.4).



Obr. 3.4: Rozšířená síť



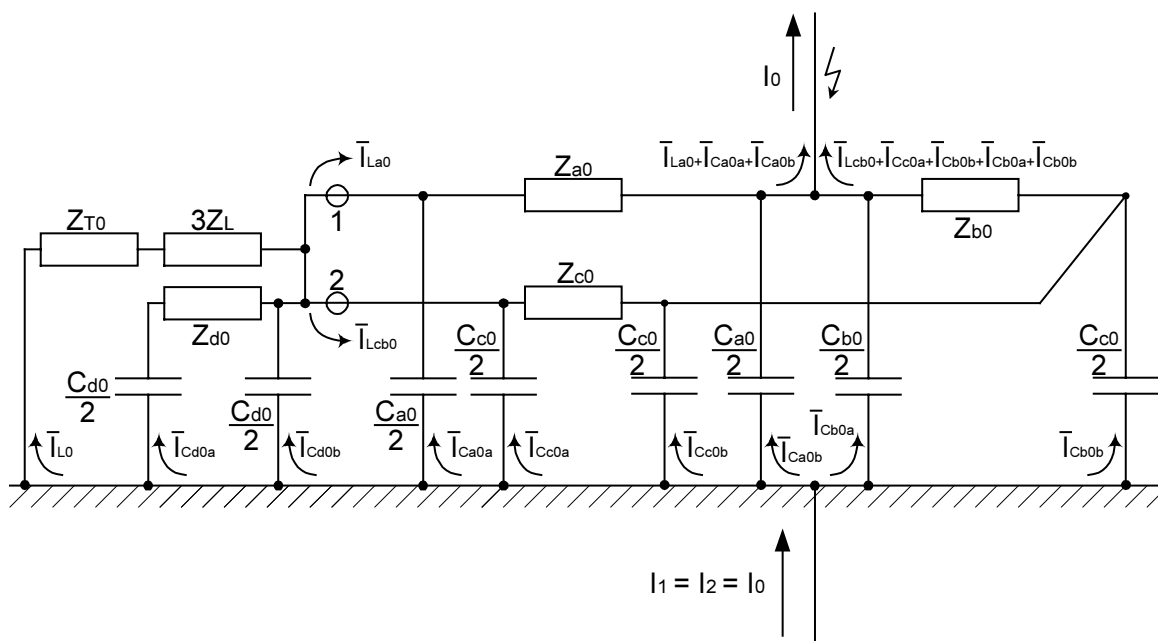
Obr. 3.5: Složkové schéma sítě – vedení modelované článkem II

Potom se změní i složkové schéma sítě při zemním spojení (obr. 3.5). Pro věrnější model vedení je místo Γ článku zvolen článek II. Dále je model doplněn o přechodový odpor oblouku kvůli možnosti modelování i vysokohmových zemních spojení. Netočivé schéma je na obr 3.6. Výpočet sítě při zemním spojení je proveden pomocí metody souměrných složek. Po propojení složkových schémat (obr. 3.5) se

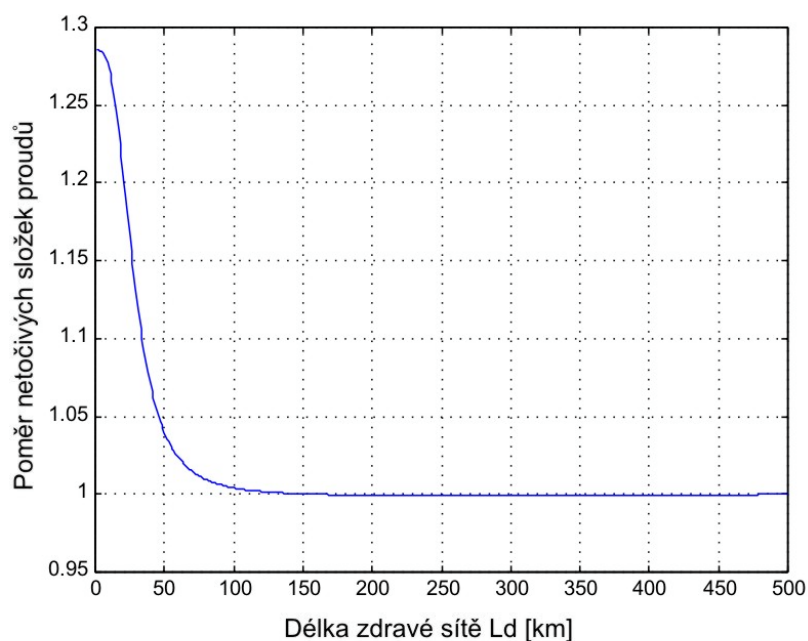
vyřeší schéma pomocí metody uzlových napětí. Pro výpočet slouží program Matlab. Výpočet je proveden pro různé hodnoty odporu oblouku, tedy pro rozsah hodnot $0,1 \Omega$ až $10\,000 \Omega$. Hodnoty byly rozděleny rovnoměrně podle funkce log. Pro zjednodušení byly všechny vedení uvažovány stejné, tedy venkovní s vodiči AlFe 95mm^2 uspořádanými do trojúhelníka.. Petersenova kompenzační tlumivka byla naladěna na kapacitu sítě.

Z výsledků výpočtů (obr. 3.7) bylo zjištěno, že poměr netočivých složek proudů nezávisí na odporu oblouku, ale výsledky jsou naprosto shodné pro celé uvedené pásmo. Dále bylo zjištěno, že přesnost výrazně závisí na celkové délce „zdravé“ sítě. (v obr. 3.4 označené jako **d**). Bylo zjištěno, že pro dosažení v praxi využitelné přesnosti je třeba poměrně velkou připojenou síť (cca 3x víc, než je celková délka zkruhovaných vývodů). Toto nebývá v praxi vždy splněno, stejně jako nebývá vždy splněna podmínka možnosti zkruhování poškozeného vývodu se zdravým vývodem ze stejné přípojnice.

Nevýhodou tohoto způsobu je nutnost podrobné znalosti parametrů jednotlivých linek, přesné konfigurace sítě při poruše a následném měření. Další problém je v tom, že parametry linek nejsou konstantní, ale mění se během roku a to nejen s venkovní teplotou, ale i s odporem půdy. Zhodnocení této metody je provedeno v kapitole 5.



Obr. 3.6: Netočivé schéma sítě – vedení modelováno článkem II



Obr. 3.7: Poměr činných složek netočivých proudů I_{01}/I_{02} , poměr impedancí zkruhovaných linek = 1, délka zkruhovaných vývodů 40 km; $L_a=20$ km, $L_b=10$ km, $L_c=10$ km

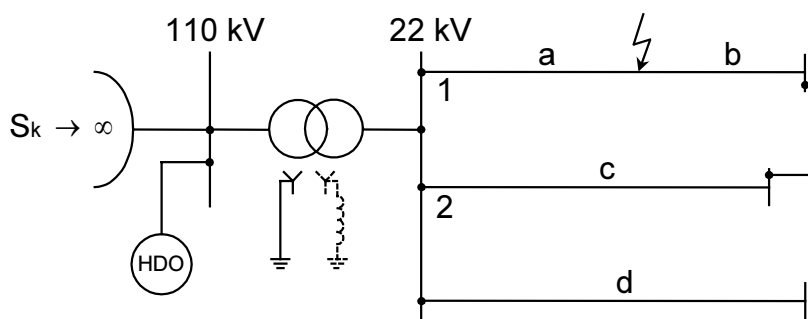
3.2 IDENTIFIKACE VE ZKRUHOVANÉ SÍTI POMOCÍ SIGNÁLŮ HDO

Myšlenka této metody spočívá v modifikaci metody popsané v kapitole 3.1 o injektáž signálu HDO do sítě během zemního spojení (obr. 3.8).

Důvody:

- pro frekvenci HDO 216,66 Hz roste podélná impedance vedení
- pro frekvenci HDO roste příčná admittance (rostou kapacitní proudy)
- pro frekvenci HDO síť není kompenzovaná
- netočivé složky proudu na frekvenci HDO neovlivňují odběratelé el. energie

Tím by mělo dojít ke zpřesnění identifikace ve smyslu snížení závislosti přesnosti určení místa poruchy na celkové délce (kapacitě) „zdravé“ sítě.



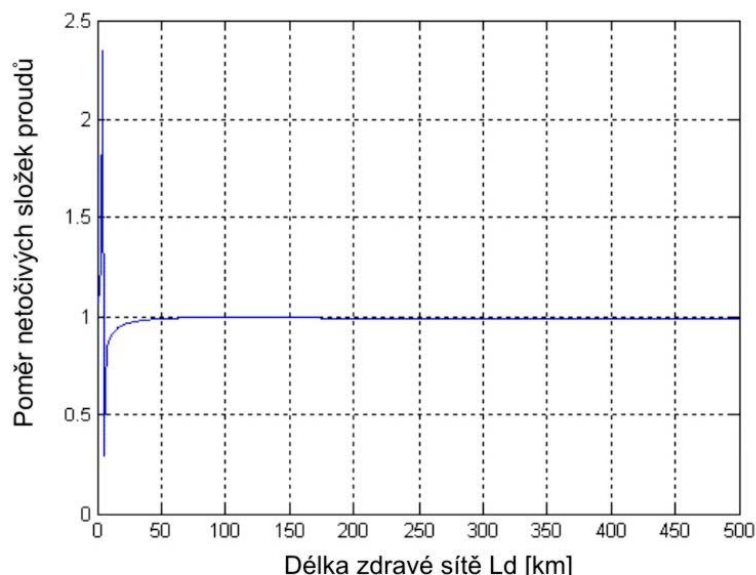
Obr. 3.8: Injektáž signálu HDO

3.2.1 Ověřující výpočet

Výpočet byl analogicky jako v kapitole 3.1 proveden pomocí složkových schémat. Opět byla použita metoda uzlových napětí. Kompenzační tlumivky byla naladěna na kapacitu sítě pro 50 Hz, venkovní vedení s vodiči AlFe 95 mm² uspořádanými do trojúhelníka. Výchozí schéma výpočtu je stejné jako v kap. 3.1. Výsledky výpočtu jsou na obr. 3.9.

Je vidět potvrzení předpokladu menší závislosti přesnosti poměru netočivých složek proudů na délce „zdravé“ sítě. Dále není třeba provádět rozklad netočivých složek proudů na části činné a jalové.

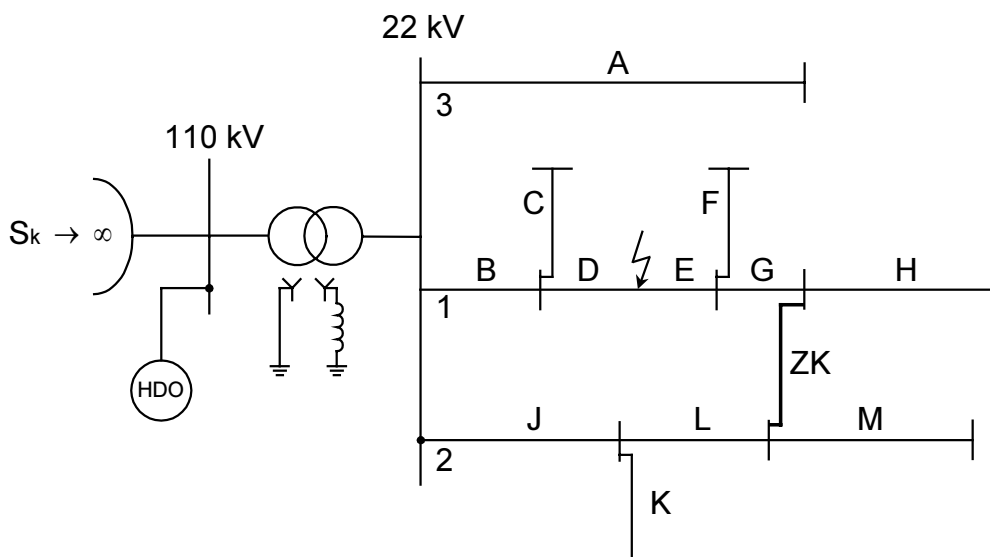
Pro další prověření metody je třeba vytvořit přesnější model sítě uvažující i odbočky ze zkruhovaných vývodů. Přesnější model je popsán v následující kapitole (3.3).



Obr. 3.9: Poměr netočivých složek proudů I_{01}/I_{02} , poměr impedancí zkruhovaných linek = 1, délka zkruhovaných vývodů 40 km; $L_a=20$ km, $L_b=10$ km, $L_c=10$ km

3.3 MODEL ZKRUHOVANÉ SÍTĚ VN S ODBOČKAMI

Na obr. 3.10 je model reálné sítě s odbočkami. Důvodem sestavení tohoto modelu je nutnost ověření funkčnosti metody pro možné použití v praxi.



Obr. 3.10: Reálná síť respektující odbočky na zkruhovaných vývodech

Na schématu je vidět, jakým způsobem se výpočet zkomplikuje (hlavně po překreslení sítě do složkových schémat).

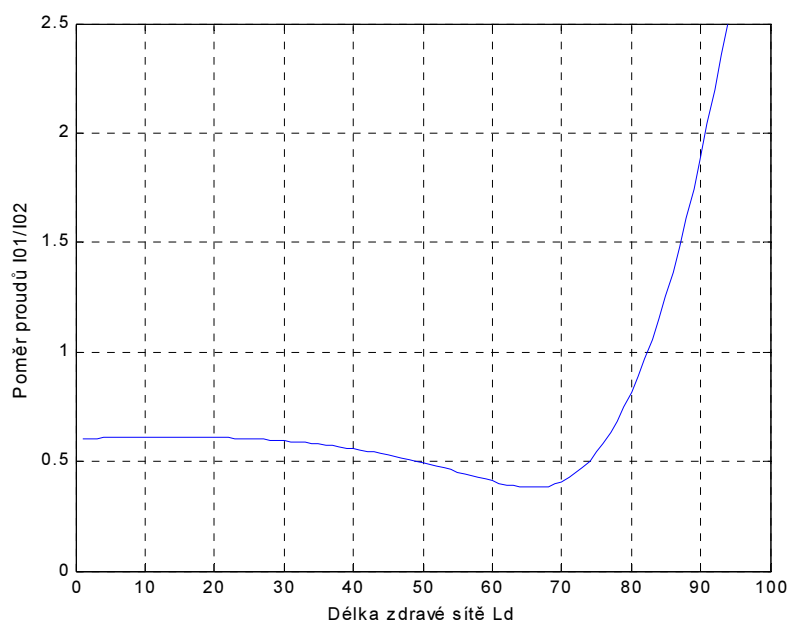
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

4.1 VÝPOČET KONKRÉTNÍ MĚŘENÉ SÍTĚ

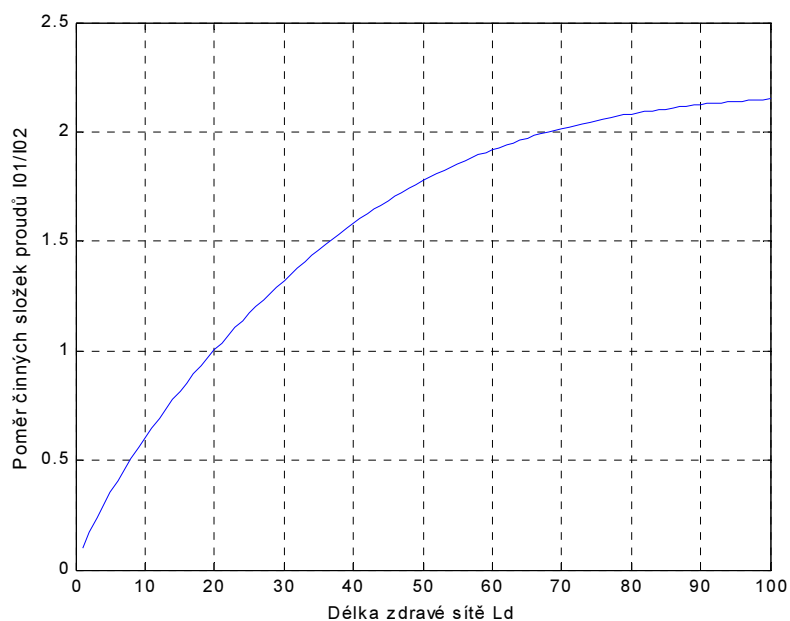
Podle teoretických předpokladů uvedených v kapitolách 3.1, 3.2 a 3.3 bylo provedeno měření v zatížené reálné síti. Poměr impedancí zkruhovaných vývodů $Z_{01}/Z_{01}=2,07$. Parametry sítě byly zadány do programu pro výpočet. Vzhledem ke skutečnosti, že šlo o smíšenou síť, byl při výpočtu uvažován podíl kabelů ve zdravé síti 10% a 35%. Tato náhrada byla uvažována z důvodu neznalosti skladby ostatní sítě připojené na stejnou přípojnicí se zkruhovanými vývody.

4.1.1 Výpočet pro systémovou frekvenci 50 Hz

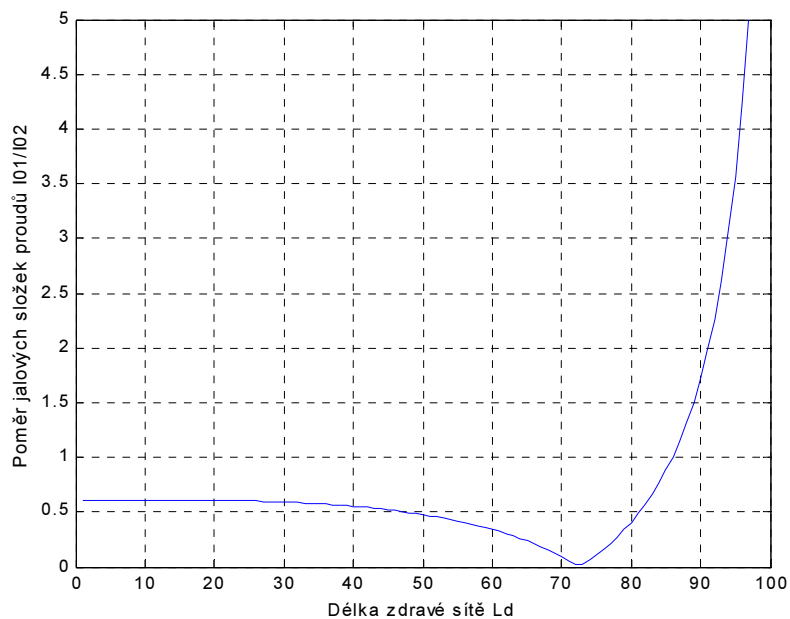
Pro frekvenci 50 Hz je poměr impedancí zkruhovaných vývodů $Z_{02}/Z_{01}=2,07$. Výsledky výpočtů pro systémovou frekvenci pro poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.35 : 0.65 na obr. 4.1 až 4.3. Lze konstatovat, že pro dostatečnou délku (kapacitu) celkové sítě se poměr činných složek proudů blíží skutečné hodnotě, lze tedy z poměru činných složek netočivých proudů určit vzdálenost místa poruchy od přípojníc. Pokud je poruchy na paprsku odcházejícím ze smyčky, určí se tímto způsobem bod, kde je paprsek připojen k zkruhovaným vývodům.



Obr. 4.1: Poměr netočivých složek proudů v závislosti na délce zdravé sítě; poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.35 : 0.65; poměr impedancí zkrhovaných vývodů $Z_{02}/Z_{01}=2,07$

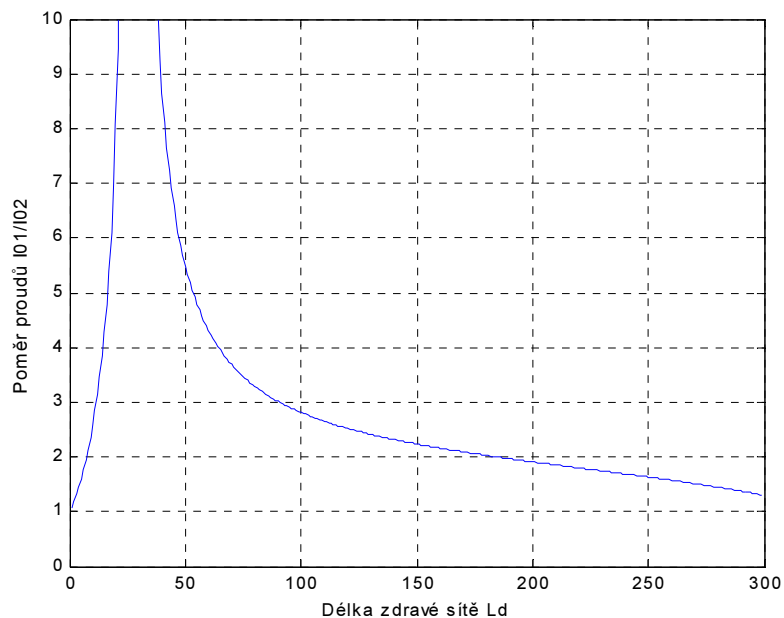


Obr. 4.2: Poměr činných složek netočivých proudů v závislosti na délce zdravé sítě; poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.35 : 0.65; poměr impedancí zkrhovaných vývodů $Z_{02}/Z_{01}=2,07$



Obr. 4.3: Poměr jalových složek netočivých proudů v závislosti na délce zdravé sítě; poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.35 : 0.65; poměr impedancí zkruhovaných vývodů $Z_{02}/Z_{01}=2,07$

4.1.2 Výpočet pro frekvenci HDO 216,66 Hz



Obr. 4.4: Poměr netočivých složek proudů v závislosti na délce zdravé sítě; poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.1 : 0.9; poměr impedancí zkruhovaných vývodů $Z_{02}/Z_{01}=2,07$

Pro frekvenci 216,66 Hz je poměr impedancí zkrhovaných vývodů $Z_{01}/Z_{01}=2,07$, výsledky výpočtů pro frekvenci HDO pro poměr smíšené sítě kabel:venkovní vedení 0.1 : 0.9 jsou na obr. 4.4. Ze závislosti je patrné, že opět nejzávažnějším faktorem pro přesnost určení místa poruchy je celková délka (kapacita) připojené sítě. Při výpočtu dochází k rezonancím v netočivém schématu a tyto rezonance se nepodařilo odstranit ani použitím modelu vedení s rozloženými parametry.

4.2 MĚŘENÍ ZEMNÍCH SPOJENÍ V REÁLNÉ SÍTI

Tato kapitola popisuje konkrétní měření umělých zemních spojení v reálné síti za plného provozu [36].

4.2.1 Vlastní měření

Experiment byl realizován v srpnu 2001. Vlastní zemní spojení bylo realizováno ve fázi L1 na odbočce u obce Číměř ve vzdálenosti 600m od dálkově ovládaného vypínače 104. Měření bylo provedeno na vývodech VN 98, VN 132, odbočka Vladislav.

Popis jednotlivých měření

Měření bylo provedeno pro čtyři druhy zemních spojení a to: kovové, vodič na zemi, obloukové a vodič na stromě.

Dále každé z těchto měření bylo provedeno pro tři kapacitní rozsahy sítě: 21A, 108A a 136A.

Každá zkouška probíhala ve čtyřech etapách:

1. Realizace zemního spojení na paprsku, který byl připojen vývodovým vypínačem vedení VN 98 a byl tvořen vedením VN98, odbočka Vladislav a VN132 a připojení generátoru meziharmonické frekvence na sekundární vinutí tlumivky (cca 5-8 s)
2. Zkruhování sítě vývodovým vypínačem VN132 a provoz s generátorem meziharmonické frekvence (cca 5 s)
3. Vypnutí generátoru a provoz zkrhované sítě bez meziharmonického signálu (cca 5s – podle možnosti sepnutí HDO v síti 110 kV)
4. Provoz zkrhované sítě s injektáží signálu HDO (cca 5s), rozepnutí kruhu a vypnutí zemního spojení dálkově řízeným vypínačem 104

Popis měřící aparatury

Měření bylo provedeno pomocí dvou síťových analyzátorů BK550, které byly připojeny na sekundární vinutí měřících transformátorů proudu a napětí na vývodech VN 98 a VN132. Při měření byly zaznamenávány časové průběhy napětí a proudů ve všech fázích, dále pak netočivé složky napětí a proudů. Veličiny byly

zaznamenávají se vzorkovací frekvencí 6,4 kHz, dále efektivní hodnota a úhel v intervalech 160 ms.

Popis měřené sítě

Byly uvažovány parametry vedení (kilometrové hodnoty):

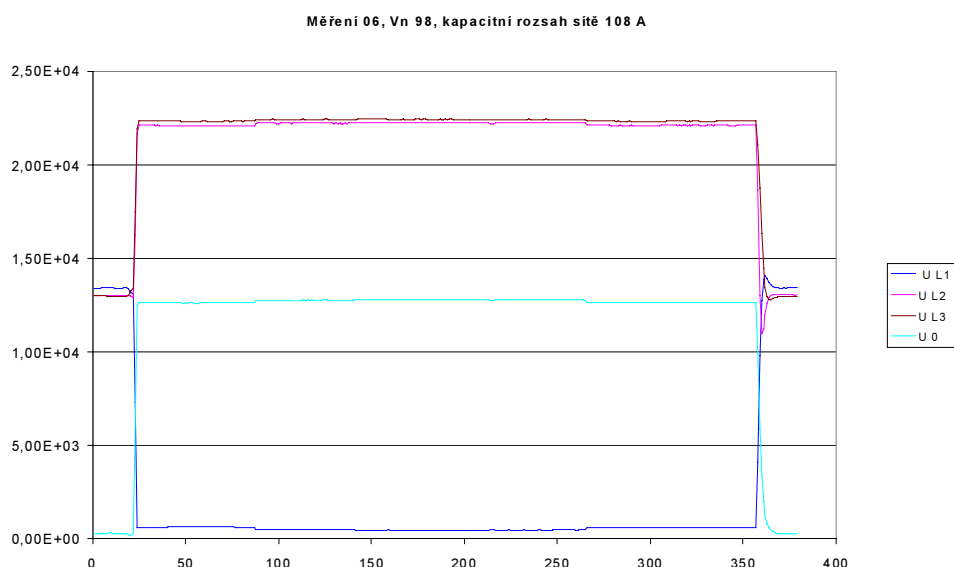
Typ	R_k [Ω]	X_k [Ω]	X_{ck} [$k\Omega$]
Kabel AXEKCEY 240mm ²	0,125	0,113	10,59
Kabel ANKTOYPV 120 mm ²	0,299	0,097	13,66
Venkovní vedení 185 mm ²	0,180	0,335	295,9
Venkovní vedení 95 mm ²	0,369	0,351	314,9
Venkovní vedení 70 mm ²	0,501	0,374	323,6
Venkovní vedení 50 mm ²	0,69	0,384	333,2
Venkovní vedení 42 mm ²	0,75	0,392	338,2
Venkovní vedení 35 mm ²	0,97	0,401	343,4

Tyto parametry byly použity pro výpočet impedancí jednotlivých částí smyčky. Hodnoty jsou uvedeny pro systémovou frekvenci, pro frekvenci HDO reaktance X_k vzroste v poměru 216,66/50 a kapacitní reaktance X_{ck} poklesne ve stejném poměru.

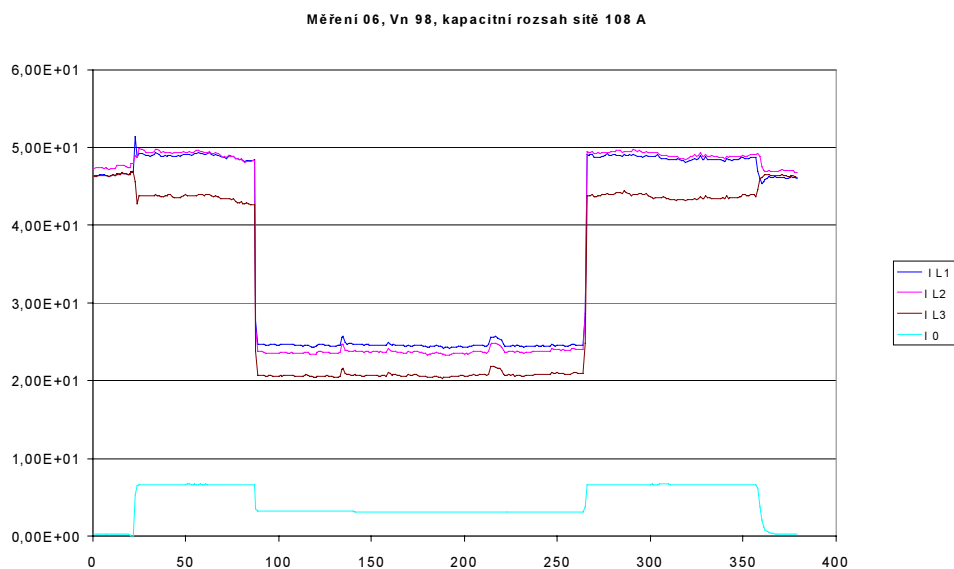
4.2.2 Výsledky měření

Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí vyhodnocovacího software k analyzátoru BK550, dále v programu MS Excel a v programu Matlab 6.1.

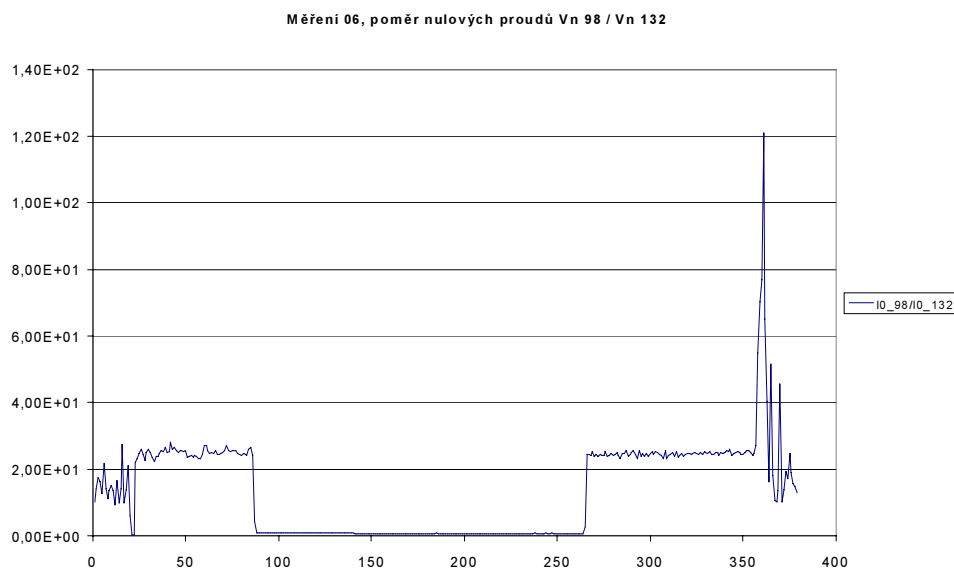
Pro vyhodnocení frekvence 50 Hz byly použity efektivní hodnoty. (pro měření číslo 3 na obr. 4.8 až 4.10):



Obr. 4.8: Průběhy napětí na vývodu VN 98 v závislosti na čase, měření 06



Obr. 4.9: Průběhy proudů na vývodu VN 98 v závislosti na čase, měření 06



Obr. 4.10: Průběhy poměru netočivých složek proudů v závislosti na čase, měření 06

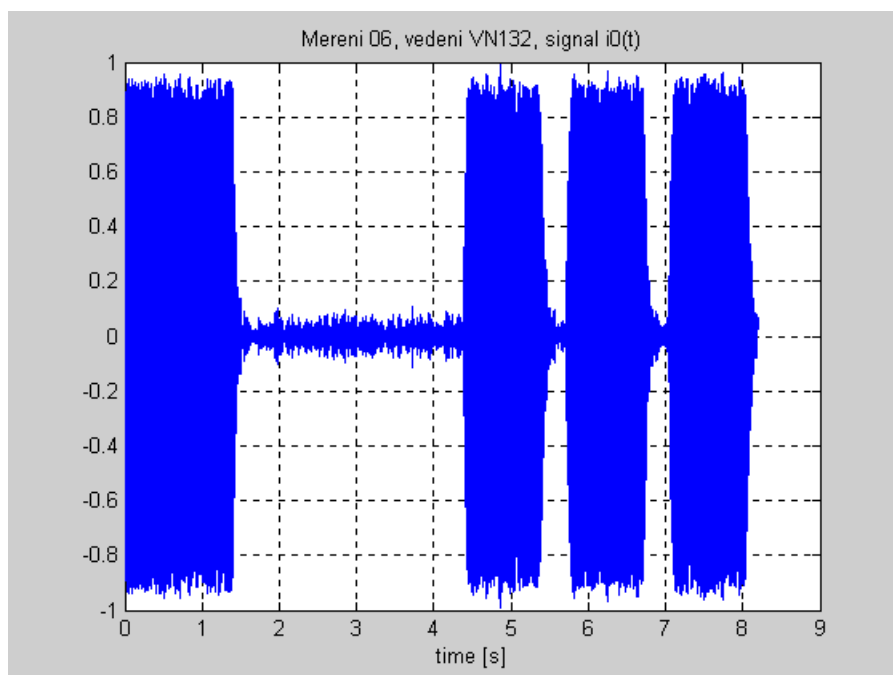
Výsledné hodnoty poměru netočivých složek proudů ve zkruhované síti – průměrné hodnoty

Číslo měření	Poměr absolutních hodnot	Poměr jalových složek	Poměr činných složek
1	0,492	0,479	1,30
2	0,488	0,477	1,4
3	0,770	0,500	6
4	0,940	0,51	9,5

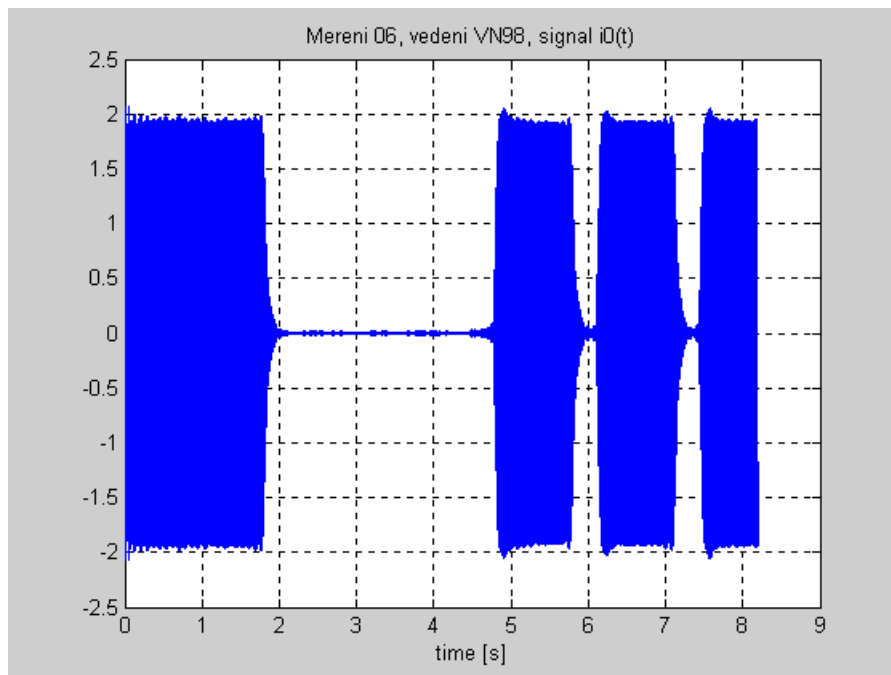
Číslo měření	Poměr absolutních hodnot	Poměr jalových složek	Poměr činných složek
5	0,933	0,517	9,6
6	0,747	0,493	7,1
7	0,490	0,480	1,19
8	0,480	0,480	0,95
9	0,765	0,510	1,3
10	0,95	0,53	5
11	0,70	0,195	5,4
12	0,60	0,37	5,3
13	0,415	0,417	0,35

Vyhodnocení měření ve zkruhované síti pro frekvenci HDO 216,66 Hz bylo provedeno z časového záznamu následujícím způsobem:

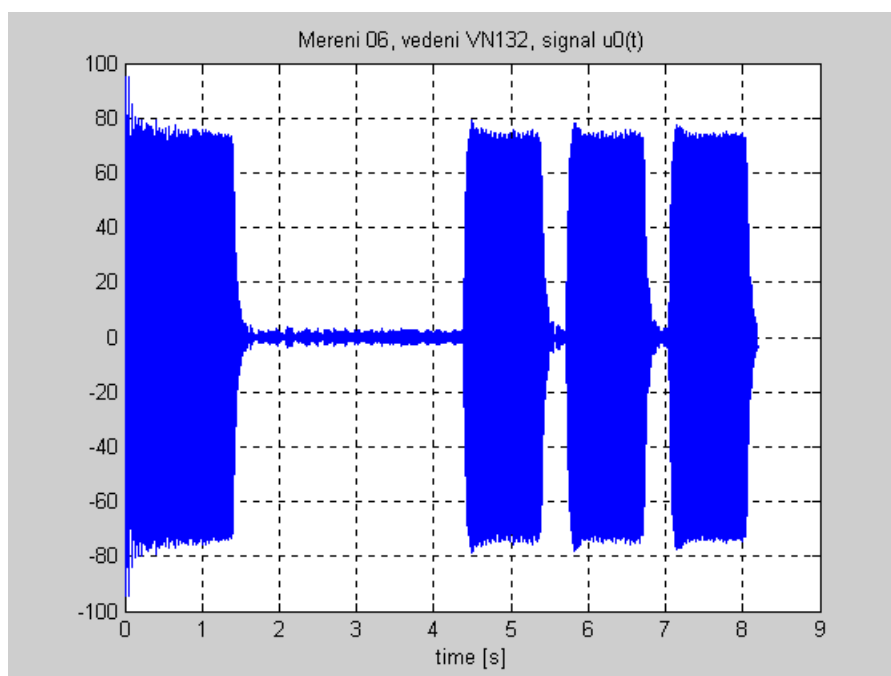
1. Ve vyhodnocovacím programu k BK550 byla v časovém záznamu vyhledána přítomnost signálu HDO a byla provedena synchronizace s druhým vývodem a export 10,25 s záznamu každého vývodu do souboru.
2. Byla provedena Fourierova transformace a pomocí digitálního filtru byl vybrán signál HDO 216,66 Hz \pm 12
3. Byla provedena zpětná Fourierova transformace, výsledky jsou vidět v příloze 7 této práce, pro měření 06 jsou netočivé složky napětí a proudů zobrazeny na obr. 4.11 až 4.13.



Obr. 4.11: Časový průběh netočivé složky napětí na frekvenci 216,66 Hz na vývodech VN 98 a VN132



Obr. 4.12: Časový průběh netočivé složky proudu na frekvenci 216,66 Hz na vývodu VN 98



Obr. 4.13: Časový průběh netočivé složky proudu na frekvenci 216,66 Hz na vývodu VN 132

Číselné hodnoty z jednotlivých zkoušek:

Číslo měření	I_0 VN98	I_0 VN132	I_0 VN98 / I_0 VN132
1	1,3	0,19	6,84 *
2	1,3	0,19	6,84 *
3	9,7	4,5	2,15
4	9,2	4,4	2,09
5	2,2	1,1	2,0
6	1,9	0,95	2,0
7	0,87	0,14	6,21 *
8	-	-	
9	-	-	
10	-	-	
11	0,04	-	
12	0,03	-	
13	0,025	-	

* signál na vývodu VN132 má příliš slabou úroveň pro objektivní vyhodnocení

4.2.3 Zhodnocení měření

Celkové parametry smyčky

Celkové podélné parametry kmenového vedení smyčky:

parametr	VN98	VN132 +odb. Vladislav	Poměr VN98/VN132	Poměr VN132/VN98
R [Ω]	3,76	9,061	0,414	2,415
X [Ω]	3,63	7,695	0,473	2,119
Z [Ω]	5,22	11,88	0,440	2,273
X_{216} [Ω]	15,72	33,34	0,473	2,119
$ Z_{216} $ [Ω]	16,17	34,55	0,468	2,14
R_0 [Ω]	5,16	11,83	0,436	2,29
X_0 [Ω]	17,3	35,27	0,491	2,04
Z_0 [Ω]	18,0	37,20	0,483	2,07
$R_{0\ 216}$ [Ω]	10,28	22,32	0,461	2,17
$X_{0\ 216}$ [Ω]	67,72	140,1	0,483	2,07
$Z_{0\ 216}$ [Ω]	68,49	141,8	0,483	2,07

Zhodnocení měření pro frekvenci 50 Hz

Z výsledků měření vyplývá, že pro systémovou frekvenci je po zkruhování podíl nulových proudů i jejich složek téměř konstantní. Pro měření 1-10 byl poměr jalových složek netočivých proudů přibližně stejný – interval 0,48 - 0,51. Pro vysokoohmová zemní spojení se lišil případ od případu, absolutní hodnoty proudů jsou poměrně malé a při jejich měření pomocí měřících transformátorů proudu může docházet k chybám. Potom i malá odchylka znamená velký rozdíl v poměru veličin.

Co se týká porovnání naměřených veličin s hodnotami vypočtenými z parametrů sítě, tak lze konstatovat, že korespondují s výpočtem popsáním v kapitole 3.8.3.

Zhodnocení měření pro frekvenci 216,66 Hz

Pro měření na frekvenci HDO vychází poměr netočivých složek proudů přibližně roven převrácenému poměru impedancí pro měření. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám vypočteným v kapitole 3.8.3. Netočivé složky proudu jsou téměř čistě kapacitního charakteru (v rámci přesnosti vyhodnocení $90^\circ \pm 3^\circ$). Pro vyhodnocení bylo možno použít měření 3-6. Jedná se o experiment kovové zemní spojení a vodič na zemi, pro kapacitní rozsahy sítě 108 A a 131 A. Zde je přesnost vyhodnocení poměrně dobrá, největší chyba je ± 750 metrů. Tedy při délce smyčky cca 30 km, odpovídá v našem případě 1% z poměru proudů přibližně 100 m délky vedení. Pro podrobnější vyjádření by bylo nutné provést citlivostní analýzu, neboť s velikostí poměru se mění rozsah chyby na 1% poměru.

Z výsledků měření vyplývá, že měření ve zkruhované smyčce za pomoci signálu HDO je skutečně přesnější a výsledky v případě dobré přesnosti měřených veličin odpovídají skutečnosti, hlavní výhoda však spočívá v tom, že není nutné provádět rozklad netočivých složek proudu na složku činnou a jalovou.

5 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rozbor metod identifikace místa zemního spojení v kompenzované síti vn. Dále navrhnout způsob určení vzdálenosti místa poruchy od přípojníc. V prvním kroku byl proveden podrobný výpočet parametrů venkovních vedení. Toto není součástí práce, bylo publikováno v [25]. Dále byl proveden podrobný rozbor metody identifikace místa zemního spojení ve zkruhované síti a byla navržena její modifikace o injektáž signálu HDO, což je hlavním přínosem této práce.

5.1 PŘÍNOS METODY ZKRUHOVÁNÍ

Metodu lokalizace místa poruchy ve zkruhované síti je třeba rozdělit do dvou případů. Jednak určení místa poruchy pomocí systémové frekvence a jednak pomocí frekvence HDO. Závěrem tohoto rozboru lze konstatovat, že metodu zkruhování na systémové frekvenci 50Hz lze použít při splnění určitých předpokladů:

- dostatečně přesné měření netočivých složek proudů na zkruhovaných vývodech, a to hlavně činné složky
- na stejnou přípojnicí se zkruhovanými vývody s poruchou je připojena zdravá síť dostatečné délky (kapacity) a to alespoň 3x větší než délka (kapacita) zkruhovaných vývodů (včetně odboček), přesný násobek závisí na charakteru sítě

Nevýhody:

- při poruše blízko rozvodny je poměr proudů velké číslo, tedy jeho každá změna (nepřesnost) znamená v přepočtu velkou vzdálenost (chybu určení vzdálenosti poruchy)
- ne vždy lze vývod s poruchou zkruhovat se zdravým vývodem připojeným na stejný systém přípojníc
- při zemním spojení na radiálním paprsku vycházejícím z postiženého vývodu lze touto metodou určit pouze vzdálenost bodu, kde paprsek vychází ze smyčky, kterou tvoří zkruhované vývody

Snahou bylo eliminovat podmínku určení místa poruchy z poměru činných složek netočivých proudů. Byla navržena metoda injektáže meziharmonického signálu do sítě. Vzhledem ke skutečnosti, že se v praxi používá systém hromadného dálkového ovládání (HDO) zejména na ovládání elektrického vytápění a spínání ohřevu teplé užitkové vody, který využívá meziharmonické frekvence (nejčastěji 216,66Hz a 183,33Hz), byl uvažován signál frekvence 216,66Hz. Základní výpočet ukazoval snížení závislosti na délce připojené zdravé sítě a nebylo nutné provádět rozklad netočivých složek proudů na složky činné a jalové. Z tohoto důvodu byl vytvořen přesnější model respektující i odbočky na zkruhovaných vývodech. Zavedením odboček došlo ke nepatrnému snížení přesnosti a lze konstatovat, že pokud bude na jednom vývodu součet odboček mnohonásobně přesahovat délku smyčky, přesnost určení místa poruchy podstatně klesne. Dále byl potvrzen předpoklad chování kompenzované sítě na frekvenci HDO jako sítě izolované.

Při analýze zkruhovaných vývodů během zemního spojení bylo zjištěno, že se se zvětšováním délky připojené zdravé sítě dochází na delším vývodu ve smyčce k toku kapacitního proudu do přípojníc místo směrem k místu zemního spojení. Tento jev je způsoben většími kapacitními proudy jednotlivých úseků smyčky a zanedbatelným proudem kompenzační tlumivky. Se zvětšováním délky zdravé sítě dochází postupně ke snižování kapacitního proudu tekoucího do přípojníc tak dlouho, až se změní znaménko a začne téct směrem k místu poruchy. Tím lze vysvětlit zákmity ve výpočtech poměru proudů, neboť dochází k postupnému dělení malým proudem jdoucím pro určitou délku připojené zdravé sítě k nule. Teprve až jsou příspěvky vedení ve smyčce zanedbatelné vzhledem ke kapacitnímu proudu zdravé sítě je přesnost určení místa poruchy vyhovující pro praktické použití.

Výhody použití signálu HDO:

- nedochází k ovlivnění spotřebou elektrické energie

- síť je kompenzovaná pro systémovou frekvenci 50Hz, pro frekvenci HDO se chová jako izolovaná
- není nutné provádět rozklad netočivé složky proudu na složku činnou a jalovou

Nevýhody:

- nutnost měření pouze signálu na frekvenci HDO – nutno použít filtr
- běžně používané měřicí transformátory přenáší signál HDO s velkým zkreslením, při vysokohmických poruchách vůbec – nutno použít přesné měření

při vzniku zemního spojení se musí rozvodna spojit s dispečinkem sítě 110 kV a požádat o vyslání neutrálního telegramu neovlivňující přijímače HDO u spotřebitelů

Pro nasazení této metody do praxe by bylo nutné provést ekonomickou analýzu z hlediska návratnosti vložených prostředků s úvahou k novému zákonu o volném trhu s elektrickou energií a se zvyšujícími se požadavky na kvalitu dodávky.

V praxi by realizace metody znamenala v rozvodně 110/22 kV instalaci průmyslového počítače, kde by byla naprogramována celá síť včetně momentální konfigurace. Na vstup PC se přivedou netočivé složky proudů ze všech vývodů, pomocí filtru se vybere pouze frekvence HDO. Při vzniku zemního spojení program navrhne místo zkruhování. To následně provede dispečer, který si zároveň vyžádá signál HDO. Po změření netočivých složek se smyčka rozpojí a PC z poměru netočivých složek postupně určí místo spojení, eventuálně se potvrdí ověřujícím výpočtem pro konkrétní konfiguraci. Výpočet sítě se podobně, jako v této práci realizuje pomocí metody uzlových napětí, jejíž realizace včetně namodelování spínacích míst je na PC v dnešní době poměrně jednoduchá.

6 LITERATURA

- [1] HODINKA, M., FECKO, Š., NĚMEČEK, F. *Přenos a rozvod elektrické energie*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1989. 328 s. ISBN 80-03-00065-3
- [2] ARRILLAGA, J., ARNOLD, C.P. *Computer analysis of power systems*. 1.vyd. Canterbury : John Wiley & Sons, 1994. 364 s.
- [3] SVOBODA, J. *Hromadné dálkové ovládání*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1976. 107 s. Skriptum ČVUT
- [4] HALUZÍK, E. *Ochrany a automatiky v sítích*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1986. 160 s. Skriptum VUT
- [5] HALUZÍK, E. *Řízení elektrizačních soustav*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1987. 170 s. Skriptum VUT
- [6] DOHNÁLEK, P. *Ochrany pro průmysl a energetiku*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1978. 374 s.

- [7] 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
- [8] SAFI, I.A. *Steady State Calculations Using Maclaurin Series and Location of Single Line to Earth Faults*. Brno: 1998. 143 s. Disertační práce
- [9] DĚDEK, L., DĚDKOVÁ, J. *Elektromagnetismus*. 2. vyd. Brno: VUT v Brně, 2000. 232 s. Skriptum VUT. ISBN 80-214-1548-7
- [10] HODINKA, M. *Přechodné jevy v elektrizační soustavě*. 3. vyd. Brno: VUT v Brně, 1990, 246 s. Skriptum VUT. ISBN 80-214-0083-8
- [11] TROJÁNEK, Z., HÁJEK, J., KVASNICA, P. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*. Praha: SNTL, 1987. 305 s.
- [12] FEJT, Z., ČERMÁK, J. *Elektroenergetika*. 1. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1981. 359 s. Skriptum ČVUT
- [13] HODINKA, M. *Vybrané problémy z elektrizačních soustav*. 1. vyd. Brno: VUT v Brně, 1984. 193 s. Skriptum VUT
- [14] KVASNICA, P. a kol. *Elektroenergetika III*. 2. vyd. Bratislava: Edičné stredisko SVŠT v Bratislave, 1984. 155 s.
- [15] PETERSON H. A. *Transients in Power Systems*. 2 vyd. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1982, 357 s.
- [16] BLACKBURN, J.L. *Protective Relaying*. 2. vyd. New York: Marcel Dekker, Inc., 1998. 538 s. ISBN 0-8247-9918-6
- [17] 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
- [18] HALUZÍK, E. *Ochrany elektrických vedení, vybrané problémy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1999. Učební texty pro postgraduální kurs pořádaný FEI VŠB TU Ostrava
- [19] POSPÍŠIL, J. a kol: *Indikace zemních spojení v sítích vn*. In Sborník Přednášek Konference ČK Cired 2000. Tábor 2000, s. 3/30-3/36.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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.
- [27] STYVAKTAKIS, E., BOLEN, M.H.J., GU, I.Y.H. A Fault Location Technique Using High Frequency Clearing Transients. *IEEE Power Engineering Review*. May 1999, p. 58-60.
- [28] ROBERT, A., HOFFELMAN, J. *Round Table on Neutral Earthing in LV Networks*. In CIRED 2001, Amsterdam: 2001, s.1/4-4/4.
- [29] SAHA, M.M. and collective. *Impedance Based Fault Location Techniques For Power Transmission Lines*. In APE'01. Jurata, Poland: 2001, s.263-270.
- [30] WELFONDER, T. and collective. 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
- [31] Haefely Trench. High voltage technology. Firemní materiály.
- [32] Svedish Neutral. RCC-earth fault protection. Firemní materiály.
- [33] Kablo Kladno. Parametry kabelů vn. Firemní materiály
- [34] ČSN 33 3070. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí.
- [35] Materiály JME a.s. o HDO, kompenzačních tlumivkách a konstrukci vedení vn
- [36] Ústav elektroenergetiky FEKT VUT v Brně, Katedra elektroenergetiky VŠB TU OSTRAVA. Možnosti identifikace zemního spojení v sítích vysokého napětí – závěrečná zpráva pro JME a.s. Brno 2001

ŽIVOTOPIS

Narodil jsem se 7. srpna 1975 ve Velkém Meziříčí. Po absolvování Střední průmyslové školy v Jihlavě obor Silnoproudá elektrotechnika jsem nastoupil na FEI VUT v Brně, obor Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika. Studium jsem ukončil absolvováním státní závěrečné zkoušky v roce 1998. Ve stejném roce jsem nastoupil do druhého stupně magisterského studia na FP VUT v Brně, obor Řízení a ekonomika podniku, kde jsem ukončil studium složením státní závěrečné zkoušky v roce 2001. V říjnu 1998 jsem zahájil doktorské studium na ÚEEN FEI VUT v Brně.

Pod vedením školitele Doc. Ing. Evžena Haluzíka, CSc. jsem se specializoval na oblast elektrických ochran a vyhledávání poruch na vedeních vn. Studium bylo zaměřeno nejen na oblast související bezprostředně s tématem disertační práce, ale obecně na problémy v oblasti elektrických ochran. Dále jsem se věnoval budování experimentální laboratoře elektrických ochran a provádění testování těchto zařízení.

Během studia jsem se aktivně zapojil do vědecké činnosti, publikoval a osobně prezentoval příspěvky s řešenou problematikou na vědeckých konferencích a seminářích.

Seznam vlastních prací

- [1] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Lokalizace zemního spojení ve zkruhované síti vn* In Mezinárodní vědecká konference ELEKTROENERGETIKA 2002. Mezinárodní vědecká konference ELEKTROENERGETIKA 2002. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2002, s. 110 – 114. ISBN 80-248-0060-2
- [2] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Modelování netransponovaných vedení vn pomocí multibranu* In Celostátní konference Silnoproudá elektrotechnika a elektronika na přelomu tisíciletí EPVE '99. Celostátní konference Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika na přelomu tisíciletí EPVE '99. Brno: FEI VUT v Brně, 1999, s. 299 – 302. ISBN 80-214-1419-7
- [3] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Identifikace zemního spojení v zokruhované síti VN* In Sborník prací 2. odborné konference Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava. 2. odborná konference Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2001, s. 69 – 73. ISBN 80-214-2015-4
- [4] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Location of Earth Faults in Compensated MV Distribution Networks* In 1. Mezinárodné vedecké sympóziium Elektroenergetika 2001. 1. Medzinárodné vedecké sympóziium ELEKTROENERGETIKA 2001. Košice: Fakulta elektrotechniky a informatiky, TU Košice, Katedra elektroenergetiky, 2001, s. 259 – 261. ISBN 80-88922-34-8
- [5] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Měření zemního spojení v zokruhované síti VN* In Elektrotechnika a informatika 2001. Elektrotechnika a informatika 2001.

- Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001, s. 121 – 123. ISBN 80-7082-804-8
- [6] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Určení místa zemního spojení v elektrických sítích vn* In Elektroenergetika 2000. Mezinárodní vědecká konference ELEKTROENERGETIKA 2000. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2000, s. 129 – 133. ISBN 80-7078-809-7
- [7] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Možnosti určení místa zemního spojení v elektrických sítích vn* In Sborník prací odborné konference Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava. Budoucnost elektroenergetiky v regionu Jižní Morava. Brno: ÚEEN FEI VUT v Brně, 2000, s. 37 – 42. ISBN 80-214-1725-0
- [8] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Location of Earth Faults in a High Voltage Networks* In Sborník prací studentů a doktorandů volume VI.. Sborník prací studentů a doktorandů. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2000, s. 118 - 120. ISBN 80-7204-155-X
- [9] TOMAN, P., HALUZÍK, E. *Určování parametrů netransponovaných vedení vn* In Sborník prací studentů a doktorandů volume V.. Sborník prací studentů a doktorandů. Brno: FEI VUT Brno, 1999, s. 59 – 64. ISBN 80-214-1155-4

Ostatní vědecká a odborná činnost

- Spolupráce v oblasti vyhledávání poruch v sítích vn - firma JME a.s.
- Spolupráce v oblasti měření kvality dodávané el. energie a hodnocení vlastností kompenzačních zařízení - firma EL-INSTA rozvodny spol. s r.o.
- Spolupráce v oblasti nastavování a testování elektrických ochran – firma ABB s.r.o., org. unit EJJ
- Vedení diplomových prací:
 - Dynamické testování ochran pomocí TZO 3
 - Návrh řešení energetického managementu inteligentní budovy
 - Metodické zpracování testování ochranných funkcí řídicích terminálů ABB
 - Technicko-ekonomické zhodnocení nasazování suchých a olejových transformátorů VN