

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Analýza nulové složky napětí a proudů na vývodech při jednofázovém
zemním spojení v sítích s izolovaným a neúčinně uzemněným středem**

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub HEREJK**
Osobní číslo: **E14B0017P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Analýza nulové složky napětí a proudů na vývodech při
jednofázovém zemním spojení v sítích s izolovaným
a neúčinně uzemněným středem**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište dle nastudované literatury distribuční síť s neúčinně uzemněným středem provozované v ČR.
2. Sestavte jednoduchý laboratorní prototyp sítě s izolovaným nebo neúčinně uzemněným středem modelující jednofázové zemní spojení, parazitní kapacity a svody sítě.
3. Provedte měření nulové složky napětí a proudu v místě napájení sítě a na jednotlivých vývodech ve stavu bez poruchy a ve stavu s poruchou.
4. Sestavte fázorové diagramy.

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na analýzu nulových složek napětí a proudů na vývodech při zemním spojení v soustavách s izolovaným a neúčinně uzemněným středem. Jádrem práce je měření na sestaveném laboratorním prototypu distribuční sítě a analýza poměrů na jednotlivých vývodech při jednofázovém zemním spojení. Cílem je identifikace vztahu složek proudů na vývodech a nulové složky napětí, a to pro činné i jalové.

Klíčová slova

Distribuční síť, jednofázové zemní spojení, izolovaná soustava, neúčinně uzemněná (kompenzovaná) soustava, detekce zemního spojení.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the analysis of zero components of voltages and currents at terminals at ground connection in systems with isolated and inefficiently grounded center. At the core of the thesis is the measurement on the assembled laboratory prototype of the distribution network and the analysis of the ratios at the individual terminals in the single-phase ground connection. The aim is to identify the relationship of the components of the currents to the terminals and the zero voltage components, both active and reactive.

Key words

Distribution network, single-phase ground fault, Isolated system, ineffectively grounded (compensated) system, ground fault detection.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Jakub Herejk

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Tomášovi Komrskovi, Ph.D. za odbornou pomoc při řešení problémů během práce, praktické rady a profesionální vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 ZPŮSOBY PROVOZU DISTRIBUČNÍCH SÍTÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ Z HLEDISKA ZAPOJENÍ UZLU TRANSFORMÁTORU	10
1.1 SÍŤ IZOLOVANÉ	10
1.2 SÍŤ KOMPENZOVANÉ	12
1.2.1 <i>Zhášecí (Petersenova) tlumivka</i>	13
2 IDENTIFIKACE VÝVODU S PORUCHOU	14
2.1 METODY STATICKÉ	14
2.1.1 <i>Statické metody vhodné pro soustavy s izolovaným středem</i>	14
2.1.2 <i>Statické metody vhodné pro soustavy se zhášecí tlumivkou</i>	15
2.2 METODY DYNAMICKÉ	16
3 NÁVRH LABORATORNÍHO MODELU DISTRIBUČNÍ SÍŤE	16
3.1 NÁVRH PARAMETRŮ LABORATORNÍHO PROTOTYPU POMOCÍ MATEMATICKÉHO MODELU	17
3.2 VÝSLEDKY SIMULACÍ NA MATEMATICKÉM MODELU	19
4 STAVBA LABORATORNÍHO MODELU DISTRIBUČNÍ SÍŤE	21
5 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ	25
5.1 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÝCH A PROUDOVÝCH POMĚRŮ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ V IZOLOVANÉ SOUSTAVĚ	25
5.2 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÝCH A PROUDOVÝCH POMĚRŮ PŘI ZEMNÍM SPOJENÍ V KOMPENZOVANÉ SOUSTAVĚ	26
6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	28
ZÁVĚR	30
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	31

Seznam symbolů a zkratk

L_1, L_2, L_3	Fázové vodiče napájecí soustavy
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
U_0	Netočivá složka napětí $[V]$
I_{01}, I_{02}	Netočivé složky proudů $[A]$
I_L	Proud zhášecí tlumivkou $[A]$
I_p	Poruchový proud zemním spojením $[A]$
$L_1 - L_7$	Hodnoty použitých indukčností $[H]$
$R_1 - R_{12}$	Hodnoty použitých rezistorů $[\Omega]$
$C_1 - C_6$	Hodnoty použitých kapacitorů $[F]$
f_0	Rezonanční kmitočet $[Hz]$
$X1 - X3$	Označení použitých svorkovnic
k_1, k_2	Kontakty paketového přepínače
GND	Bod zemního potenciálu
CAD	Computer aided design
$MATLAB$	Matrix laboratory
$RICE$	Regionální inovační centrum elektrotechniky

Úvod

Předkládaná práce se zabývá poměry netočivých složek napětí a proudů v distribučních sítích s izolovaným a neúčinně uzemněným středem. Znalost těchto poměrů je v praxi důležitá pro správnou funkčnost ochran a jiných prostředků, které zaručují další funkčnost sítě a minimální následky při zemním spojení v distribuční síti.

V prvních dvou kapitolách je zmíněn krátký teoretický úvod o distribučních sítích provozovaných v ČR a jejich rozdělení z hlediska uzemnění uzlu transformátoru. Jsou zde vysvětleny napěťové a proudové pochody při zemním spojení v těchto distribučních sítích a snaha minimalizovat jeho následky. Je probrána identifikace poškozeného vývodu, která téměř vždy funguje na principu porovnávání měřitelných netočivých složek napětí a proudů, jejichž identifikace a analýza je jádrem této práce.

Pro zjištění těchto napěťových a proudových poměrů bylo nezbytné zkonstruovat laboratorní prototyp distribuční sítě. V práci je popsána simulace pomocí matematického modelu, konstrukce laboratorního prototypu, měření na něm a následná analýza naměřených výsledků. V závěru práce jsou analyzované výsledky porovnány s teoretickými předpoklady.

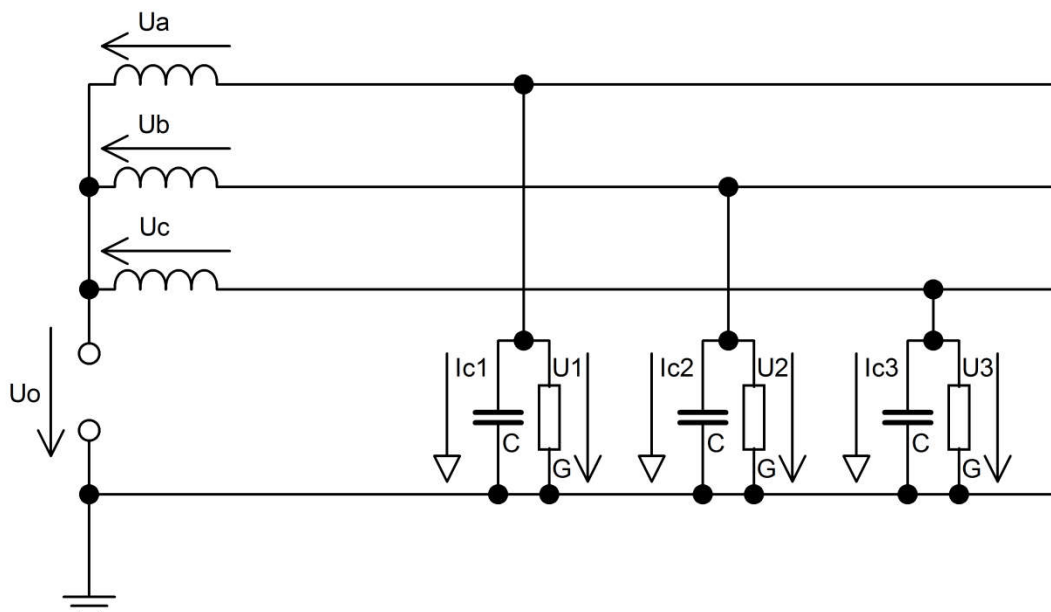
1 Způsoby provozu distribučních sítí vysokého napětí z hlediska zapojení uzlu transformátoru

Distribuční soustavy vysokého napětí se obvykle provozují jako izolované nebo s neúčinně uzemněným středem, kdy mezi středem sekundárního vinutí distribučního transformátoru a bodem zemního potenciálu je připojena vysoká impedance [1]. Propojení středu distribučního transformátoru a bodu zemního potenciálu může být realizováno odporem. Tento způsob zapojení se hojně vyskytuje ve Francii, Slovinsku a Velké Británii. Poruchový proud jednofázové poruchy je na rozdíl od sítí s účinně uzemněným středem omezen hodnotou odporu tohoto zařízení, a to na hodnotu blízké jmenovitého proudu sítě. V druhém případě je síť kompenzována pomocí zhášecí tlumivky [2].

V ČR jsou distribuční sítě provozovány převážně o napěťových hladinách 22 a 35 kV. V provozu jsou sice stále i sítě o hladinách 3, 6 a 10 kV, které se ale již vyskytují jen zřídka, jelikož nejsou dále rozvíjeny. Pro unifikaci jsou nahrazovány hladinami 22 resp. 35 kV. Z převážné většiny se jedná o sítě kompenzované. Izolované sítě vyskytující se na našem území jsou zastaralé a jsou nahrazovány kompenzovanými [3].

1.1 Síť izolované

V distribuční soustavě vysokého napětí se s izolovanými sítěmi setkáme ve dvou napěťových úrovních a to na 500 V a 6 kV. Tyto sítě jsou využívány převážně v malých průmyslových distribučních sítích, kde v případě zemního spojení neprotéká poruchový proud větší než 20 A. Velikost kapacitního poruchového proudu je úměrná velikosti izolované sítě (čím větší síť, tím roste její kapacita proti zemi a roste tedy i proud uzavíraný místem poruchy). Při přesáhnutí hodnoty proudu 20 A je síť nutné kompenzovat [4].



Obr.1.1 Schéma el. vedení vysokého napětí s izolovaným středem v bezporuchovém stavu

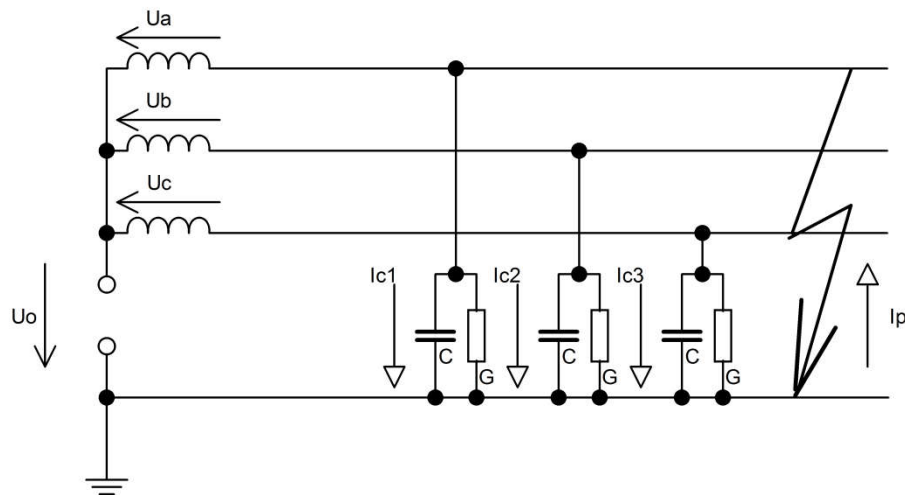
Při provozu izolované sítě není střed transformátoru s bodem zemního potenciálu galvanicky spojen viz *Obr.1.1*. Při bezporuchovém stavu je netočivá složka napětí U_0 nulová nebo je dána běžnou nesymetrií sítě. Platí soustava rovnic (1.1). Kapacity jednotlivých fází jsou symetrické a parazitní kapacitní proudy vytvářejí souměrnou trojfázovou zátěž (vektorový součet jejich fázorů je roven nule). Jedná se tedy o čistě točivou složku, která nevyvolává žádný zemní proud.

$$\begin{aligned}\overline{U}_1 - \overline{U}_A - \overline{U}_0 &= 0, \\ \overline{U}_2 - \overline{U}_B - \overline{U}_0 &= 0, \\ \overline{U}_3 - \overline{U}_C - \overline{U}_0 &= 0,\end{aligned}\tag{1.1}$$

Při zemním spojení jedné fáze vznikne značná nesymetrie soustavy. Napětí uzlu vinutí transformátoru proti zemi se zvýší z nuly na hodnotu napětí fázového viz (1.2). Napětí nepoškozených fází proti zemi vzroste na hodnotu napětí sdruženého a zemním spojením se začne uzavírat poruchový proud I_p [3]. Ten je sumou všech kapacitních a svodových proudů celé provozované sítě viz *Obr.1.2*.

$$\begin{aligned} \overline{U}_1 &= 0 \\ \overline{U}_0 &= -\overline{U}_A \\ \overline{U}_2 &= \overline{U}_B + \overline{U}_0 = -\sqrt{3}e^{j30^\circ}\overline{U}_A \\ \overline{U}_3 &= \overline{U}_C + \overline{U}_0 = -\sqrt{3}e^{j30^\circ}\overline{U}_A \end{aligned} \quad (1.2)$$

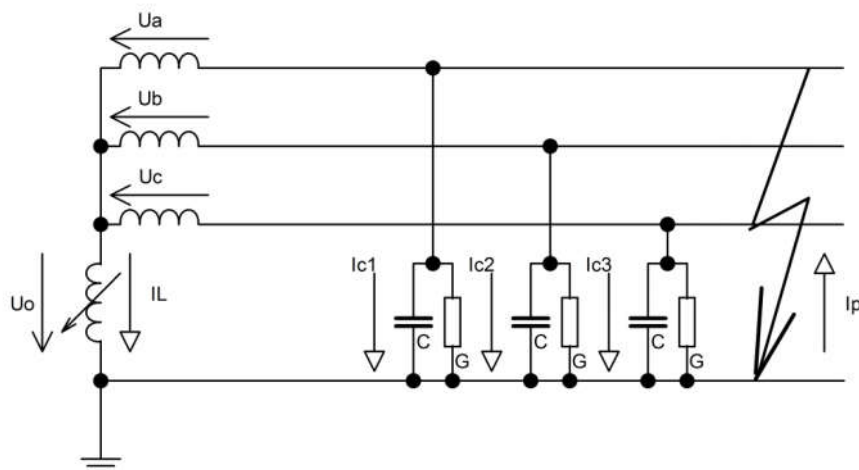
Ačkoli jednofázové zemní spojení způsobuje nebezpečné stavy, nemusí nutně dojít k přerušení dodávky elektrické energie a síť lze nadále provozovat. Avšak napětí nepoškozených fází vůči zemnímu potenciálu je při zemním spojení sdružené, proto musí být izolace v této soustavě na takovou velikost napětí dimenzována. Dalším problémem jsou veliká přepětí (hlavně při přerušovaném zemním spojení), která mohou způsobit přeskok a tedy dvojitě zemní spojení, kdy vedení musí již být odpojeno [1].



Obr.1.2 Schéma el. vedení vysokého napětí s izolovaným středem při zemním spojení

1.2 Síť kompenzované

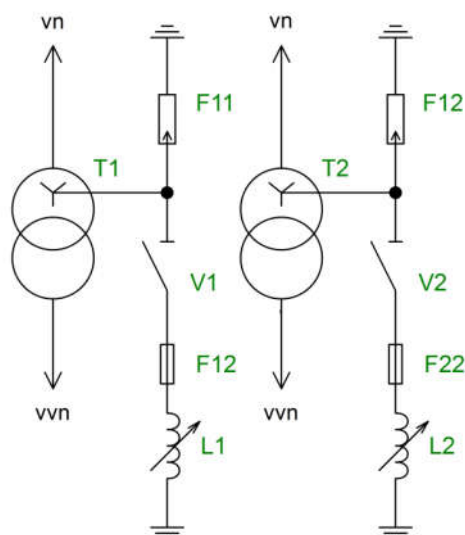
Nulový bod soustavy je v tomto případě uzemněn přes tzv. zhášecí neboli Petersenovu tlumivku. V bezporuchovém stavu je napětí mezi uzlem transformátoru a zemí $U_0 = 0$, případně je nenulové vlivem běžné nesymetrie sítě. Zhášecí tlumivkou tedy neprotéká žádný nebo jen velmi malý proud I_L . V případě zemní poruchy vzroste na tlumivce nulové napětí U_0 a tlumivkou do země teče proud I_L induktivního charakteru, který kompenzuje proud poruchou I_p viz Obr.1.3. Vzniká paralelní rezonance a při správném nastavení tlumivky se kapacitní složka (cca 90 %) zemního poruchového proudu vykompenzuje. Při správně vykompenzované síti se poruchovým spojení uzavírá pouze činná složka [3].



Obr.1.3 Náhradní schéma distribuční sítě vysokého napětí s neúčinně uzemněným středem pomocí zhášecí tlumivky při zemním spojení

1.2.1 Zhášecí (Petersenova) tlumivka

Jak je výše uvedeno, tato tlumivka je v kompenzovaných sítích připojena mezi uzel napájecího transformátoru a bod zemního potenciálu. Poruchový proud I_p , který má minimalizovat, je kapacitního charakteru vzhledem k netočivé složce napětí U_0 . Je-li reaktance zhášecí tlumivky X_t taková, že induktivní proud I_L dodávaný tlumivkou do místa poruchy je do velikosti stejný jako kapacitní složka poruchového proudu I_{pC} , sníží se proud procházející místem poruchy a zvýší se tak pravděpodobnost zhasnutí případného oblouku. Odtud název „zhášecí“ [5].



Obr.1.4 Zapojení plynule říditelných zhášecích tlumivek v transformovně, kde jsou: T1, T2 – transformátory, F11, F21 – bleskojistky V1, V2 – jednopólové odpojovače F12, F22 – pojistky L1, L2 – plynule říditelné zhášecí tlumivky.

Na Obr.1.4 můžeme vidět zapojení zhášecích tlumivek v transformovně. Pokud není uzel transformátoru vyveden, vytvoří se trojfázovou tlumivkou nebo nezatíženým transformátorem v zapojení Y_d s vyvedeným uzlem [6].



Obrázek 1.5 Montáž zhášecí tlumivky v trafostáně T101 při výstavbě TR Černice 110/22kV roku 2010 (vlastní archiv)

2 Identifikace vývodu s poruchou

Metody pro lokalizaci zemní poruchy se dělí na aktivní a pasivní. Aktivní využívají specifického signálu vysílaného do sítě s poruchou a následného „stopování“ odezvy k lokalizaci poruchy. Kvůli své náročnosti ale tyto metody nejsou hojně rozšířeny jako metody pasivní, které sledují napěťové a proudové pochody generované přímo poruchou. Pasivní metody se dále dělí na statické (využívají ustáleného stavu po odeznění přechodového děje), metody dynamické (sledují napětí a proud během přechodového děje) [7].

2.1 Metody statické

2.1.1 Statické metody vhodné pro soustavy s izolovaným středem

Pro nejvyšší přesnost se kombinují metody porovnávání amplitudy a fáze netočivé složky proudu. V prvním kroku se odliší vývody s největšími amplitudami netočivých složek proudu a poté se porovnávají fáze těchto proudů, přičemž vývod, jehož netočivá složka proudu je v protifázi, je námi hledaný postižený vývod. Pokud mají všechny tyto vývody stejnou fázi, porucha se nachází v rozvodně. Při zemi spojení s velkou impedancí v síti s krátkými

délkami není tato metoda dostatečně spolehlivá a může dojít k označení závady na špatném vývodu.

Jelikož u vývodu se zemním spojením předbíhá nulové napětí nulový proud o 70° - 80° (záleží na poměru proudů protékajících svody a kapacitami) a u zdravého vývodu je tomu naopak, stačí označit vývod se záporným znaménkem za postižený. Není nutné porovnávat výkon s ostatními vývody, ovšem při malém netočivém proudu je opět problém se správnou lokalizací [3].

2.1.2 Statické metody vhodné pro soustavy se zhášecí tlumivkou

Využívá se rozpoznání směru zbytkového reziduálního proudu (činné nekompensované složky proudu poruchového). U postiženého vývodu je tento proud opačného smyslu a větší amplitudy než u nepostižených vývodů. Pro správnou funkci této metody je důležité správné nastavení použitých PTP. Pro zvýraznění činné složky netočivého proudu se používá připnutí pomocného odporníku, zvýší se tak citlivost zemních ochran. Tento princip se nazývá Wattmetrická metoda.

Další metodou je tzv. admitanční metoda netočivé složky, která sleduje nepřetržitě netočivé složky napětí a proudu U_0 a I_0 . Pro přesný chod metody se nejvíce používá přírůstkových výpočtů (rozdíly hodnot před poruchou a po poruše). V případě zdravého vývodu je vypočtená admitance rovna záporné hodnotě celkové admitance chráněného vývodu. V případě poruchy je hodnota vypočtené admitance rovna součtu celkové admitance nepostižených vývodů a admitance zhášecí tlumivky. Princip je podobný jako u distančních ochran, jediný rozdíl je v tom, že pokud je admitance uvnitř admitanční charakteristiky, jde o zdravý vývod. Jakmile se hodnota dostane vně tuto charakteristiku, je vývod označen za postižený. Admitančních metod je více, využívají například násobky základní harmonické nebo se soustředí na velikosti konduktance sítě apod [8].

V městských sítích se využívá Metody vyšších harmonických, která je založena na výskytu parazitních harmonických (zejména 3., 5. a 7.), které jsou v těchto sítích způsobeny velkým zatížením nelineárními spotřebiči. Jejich součet většinou převyšuje úroveň první

harmonické zbytkového činného proudu, což je nástrojem pro indikaci poruchy. Sumací těchto řádů získáme signál, jehož úroveň je u postiženého vývodu nejvyšší [3].

2.2 Metody dynamické

Jedná se např. o Metodu první půlperrody. Ta sleduje okamžitou situaci po vzniku zemního spojení, kde dochází vlivem kapacit vývodů ke značnému a přechodovému ději, při němž se vybíjí kapacita postižené fáze a nabíjí ostatní kapacity v daném vývodu. Metoda srovnává nulové složky napětí a proudů okamžitě po vzniku poruchy. Zdravý vývod se vyznačuje stavem, kdy během první půlperrody je nulové napětí a proud ve fázi, naopak v případě, že jsou tyto veličiny v protifázi, je vývod označen za postižený [3].

3 Návrh laboratorního modelu distribuční sítě

Hlavním cílem práce je analýza vývodů při jednofázovém zemním spojení. K tomuto účelu bylo nutné postavit funkční laboratorní model distribuční sítě respektující zapojení izolované či neúčinně uzemněné soustavy a zejména pak parazitní kapacity a svody sítě. Laboratorní model byl zkonstruován se dvěma vývody představující:

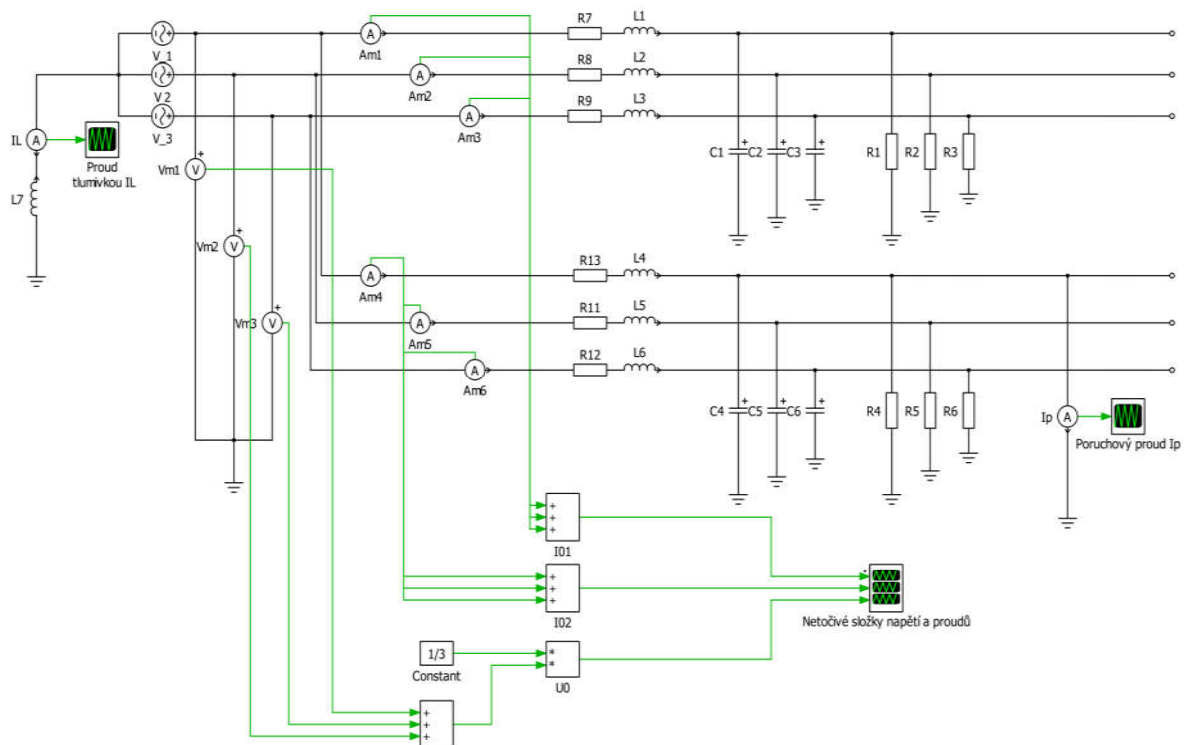
- součet všech nepoškozených vývodů,
- vývod, kde je možno simulovat zemní spojení.

Model je dimenzován na napětí 3x 50V/50Hz. Model je navržen tak, aby se hodnota poruchového proudu I_P pohybovala v rozmezí 1-3 A. Model vedení obsahuje podélné parametry (činný odpor a indukčnost vedení) a parametry příčné (činné odpory představující svody sítě a kapacity vedení proti zemi).

Parametry komponent byly navrženy pomocí sestaveného matematického modelu v simulačním programu PLECS. Model byl navržen s dostupnou toroidní cívku o hodnotě indukčnosti $L = 63,2$ mH představující zhašecí tlumivku. Hodnoty podélných indukčností L_1 - L_6 byly navrženy symetricky (47 μ H) a dimenzovány na proud 5 A. Ostatní hodnoty byly navrženy pomocí simulací v prostředí PLECS.

3.1 Návrh parametrů laboratorního prototypu pomocí matematického modelu

Byl navržen a sestaven matematický model sítě, kde pomocí série simulací byla provedena optimalizace parametrů laboratorního prototypu distribuční sítě. Schéma matematického modelu je na Obr.3.1.



Obr.3.1 Sestavený matematický model distribuční sítě v prostředí PLECS Standalone

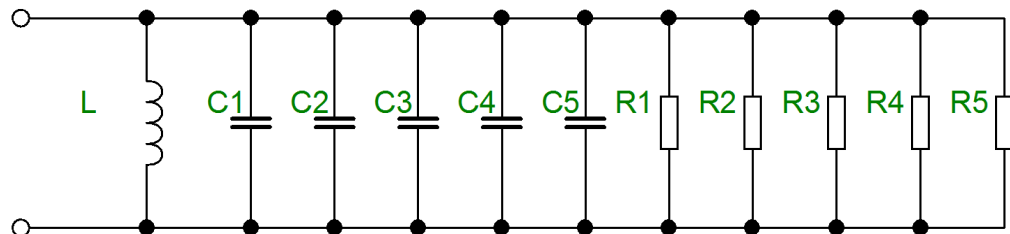
Na Obr.3.1 je vidět matematický model distribuční sítě pro simulace zemního spojení. V matematickém modelu měříme netočivou složku napětí, pro kterou platí (3.1).

$$\overline{U}_0 = \frac{1}{3}(\overline{U}_A + \overline{U}_B + \overline{U}_C) \quad (3.1)$$

Netočivá složka proudů je v praxi měřena součtovými transformátory, kde platí:

$$3\overline{I}_0 = \overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C \quad (3.2)$$

Parametry C_1 - C_6 představující parazitní kapacity sítě proti zemnímu potenciálu byly voleny s ohledem na velikost indukčnosti představující zhášecí tlumivku tak, aby soustava byla v rezonanci při simulovaném jednofázovém zemi spojení. Při zemi spojení jsou všechny kapacity a svody v paralelním uspořádání. Po připojení zhášecí tlumivky mezi střed transformátoru a bod zemiho potenciálu vzniká paralelní rezonanční obvod viz *Obr.3.2*.



Obr.3.2 Náhradní model kompenzované soustavy pro určení rezonance při zemi spojení

Jelikož hodnoty paralelně spojených kapacit se sčítají a svodové odpory v tomto případě nehrají roli, lze parametry potřebných kondenzátorů vypočítat pomocí Thompsonova vztahu. Hodnoty sériových indukčností jsou v tomto případě zanedbatelné.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.3)$$

po úpravě pro výpočet kapacity tedy

$$C = \frac{1}{L(2\pi f_0)^2}, \quad (3.4)$$

po dosazení L a f_0

$$C = \frac{1}{0,0632(100\pi)^2} = 1,603 \times 10^{-4} F, \quad (3.5)$$

hodnota jedné kapacity tedy bude

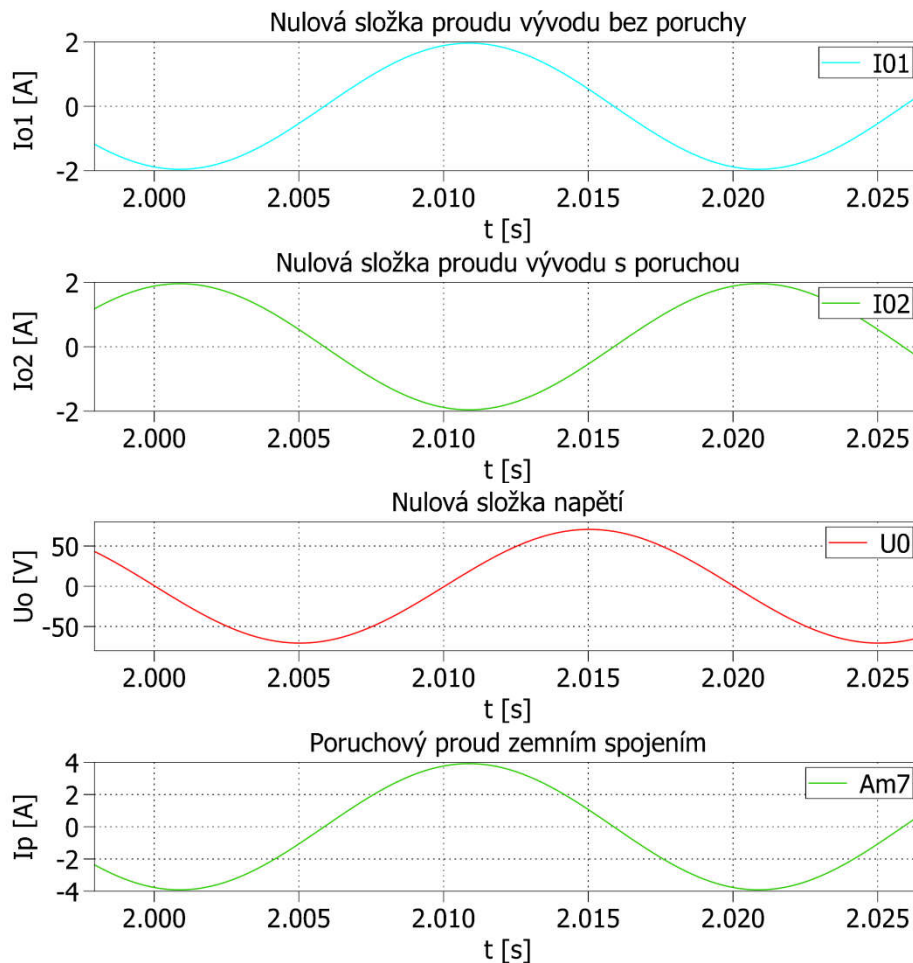
$$C_i = \frac{C}{5} = \frac{1,603 \times 10^{-4}}{5} \cong 32 \times 10^{-6} F. \quad (3.6)$$

Nejbližší dostupná jmenovitá hodnota rozběhového kondenzátoru byla $30 \mu F$. Na tuto hodnotu byly nastaveny všechny kapacity v matematickém modelu.

Hodnoty svodových odporů byly navrženy tak, aby činná složka proudu byla dostatečně zvýrazněna. Fázový posun mezi netočivou složkou napětí U_0 a netočivou složkou proudu zdravého vývodu I_{01} při zemním spojení činí přibližně 75° fázového posuvu. Zvýraznění činné složky bylo provedeno jak pro model izolované, tak pro model kompenzované sítě. Na základě optimalizace na matematickém modelu byla navržena hodnota pro R_1 - $R_6 = 820 \Omega$. Pro respektování vlastního činného odporu vedení a omezení přechodových jevů byly voleny hodnoty podélných odporů R_7 - $R_{12} = 15 \Omega$.

3.2 Výsledky simulací na matematickém modelu

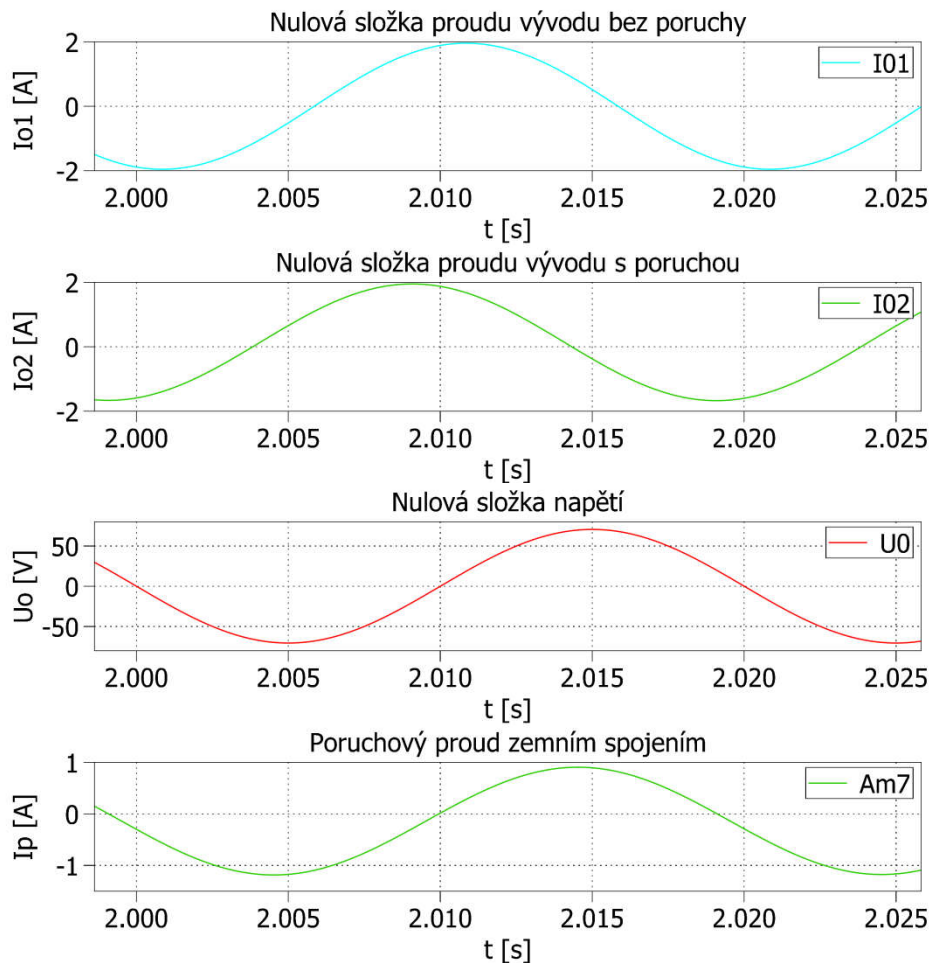
Na Obr.3.3 jsou výsledky simulace při výše zmíněných hodnotách parametrů modelu distribuční sítě s izolovaným středem po odeznění přechodových jevů.



Obr.3.3 Výsledky simulace při zemním spojení bez kompenzace

Z výsledků simulace je patrné, že při zemním spojení je suma netočivé složky proudu nepoškozených vývodů a vývodu s poruchou I_{01} a I_{02} v protifázi. Suma netočivé složky proudu nepoškozených vývodů I_{01} má vůči napětí U_0 kapacitní charakter, což odpovídá dominantnímu vlivu parazitních kapacit sítě vůči bodu zemního potenciálu. Rozdílného natočení fázoru proudu vývodu s poruchou I_{02} využívá i statická metoda při určování toku jalového výkonu při lokalizaci poruchy. Poruchový proud I_p zemním spojením bez kompenzace dosahuje amplitudy 4 A, tu se snažíme minimalizovat v následujícím případě při připojení zhášecí tlumivky.

Po připnutí zhášecí tlumivky je patrná změna fázového posuvu netočivé složky proudu vývodu s poruchou I_{02} , kdy se fázor tohoto proudu natočí po směru hodinových ručiček ze třetího do druhého kvadrantu a je skoro v zrcadlové poloze od fázoru netočivé složky proudu vývodu bez poruchy I_{01} . Poruchový proud do bodu zemního potenciálu I_p snížil svou hodnotu o více než 70 % na hodnotu amplitudy kolem 1 A. Amplituda ani fázový posuv netočivé složky napětí U_0 se nezměnily. Výsledek simulace s kompenzací je na Obr.3.4.



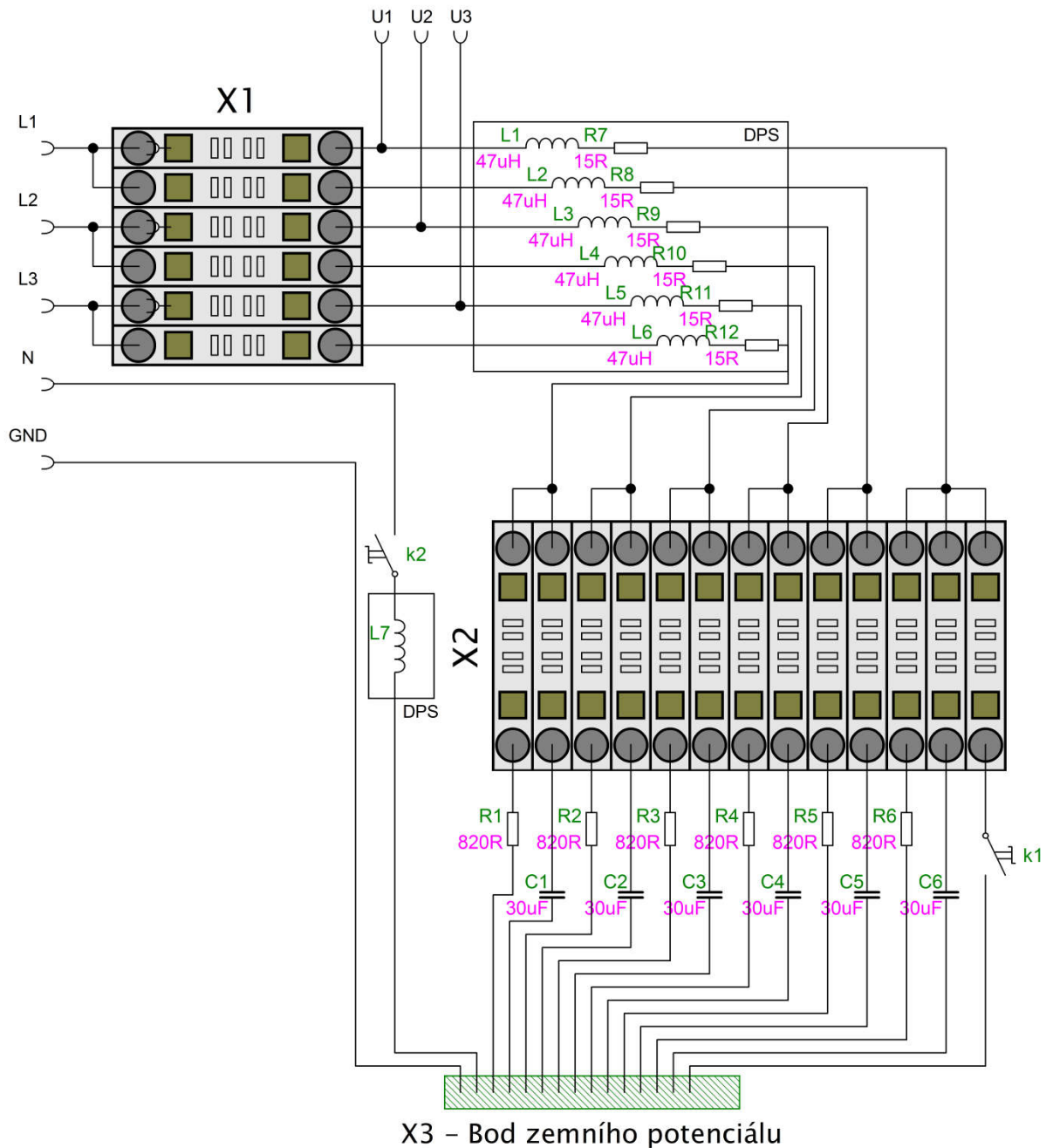
Obr.3.4 Výsledky simulace při zemním spojení s kompenzací

Výsledky simulací potvrdily teoretické předpoklady.

4 Stavba laboratorního modelu distribuční sítě

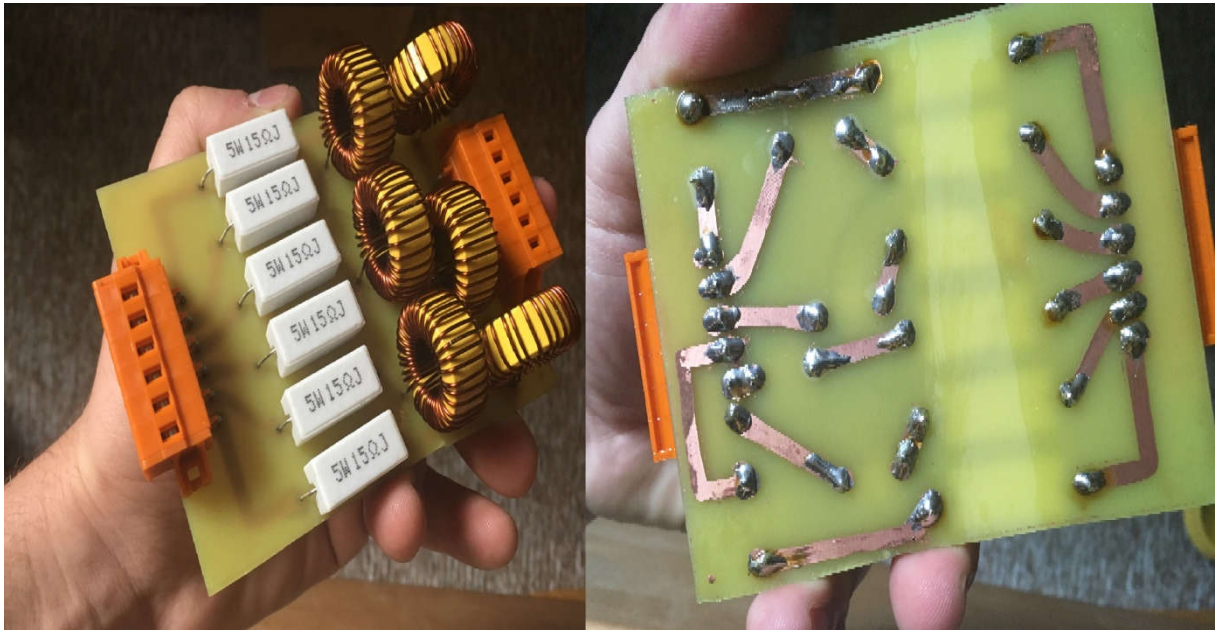
Pro jednoduchou a bezpečnou obsluhu modelu bylo navrženo uspořádat celý el. obvod do klasické instalační krabice. Napájecí a měřicí zdířky, smyčky fázových vodičů vývodů pro měření netočivých složek proudů klešťovou sondou a paketový přepínač pro přepínání mezi stavy „bez poruchy“, „porucha“ a „kompenzovaná porucha“ byly vyvedeny na víko krabice pro bezpečnou obsluhu a měření.

Do zvolené krabice byl vložen plech tloušťky 0,75 mm o rozměrech přesně vyplňující dno. Na ten byly pomocí šroubů ukotveny kondenzátory, prakticky umístěné DIN lišty, které byly následně osazeny svorkami WAGO podobně jako je naznačeno ve schématu zapojení na Obr.4.1 Navržené schéma zapojení modelu distribuční soustavy.



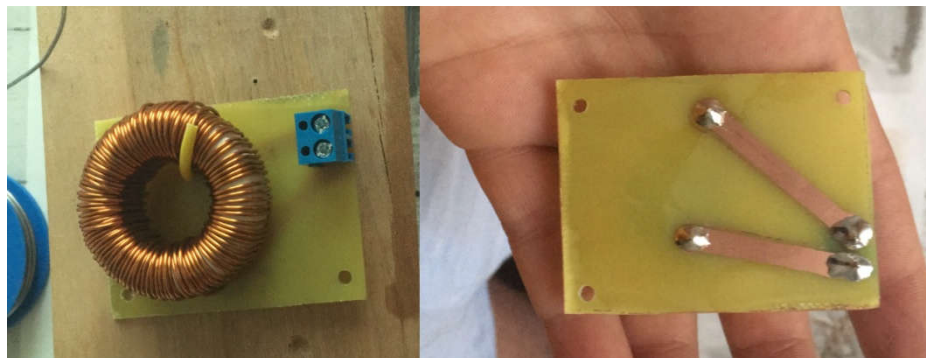
Obr.4.1 Navržené schéma zapojení modelu distribuční soustavy

Napájecí napětí se přivádí na zdířky s označením $L_1 - L_3$, které jsou vyvedeny na svorkovnici X1. Ta rozděljuje napájení na dva trojfázové vývody a jsou zde vyvedeny body pro měření fázových napětí. Obvod ze svorkovnice X1 pokračuje na podélné parametry vedení L_1-L_6 a R_7-R_{12} , které jsou upevněny pomocí DPS. DPS byla klasicky leptána pomocí chloridu železitého a po zapájení ošetřena směsí acetonu s kalafunou. Vývody DPS jsou z obou stran řešeny svorkovnicemi pro jednoduché a úhledné propojení.



Obr.4.2 DPS s podélnými parametry R a L

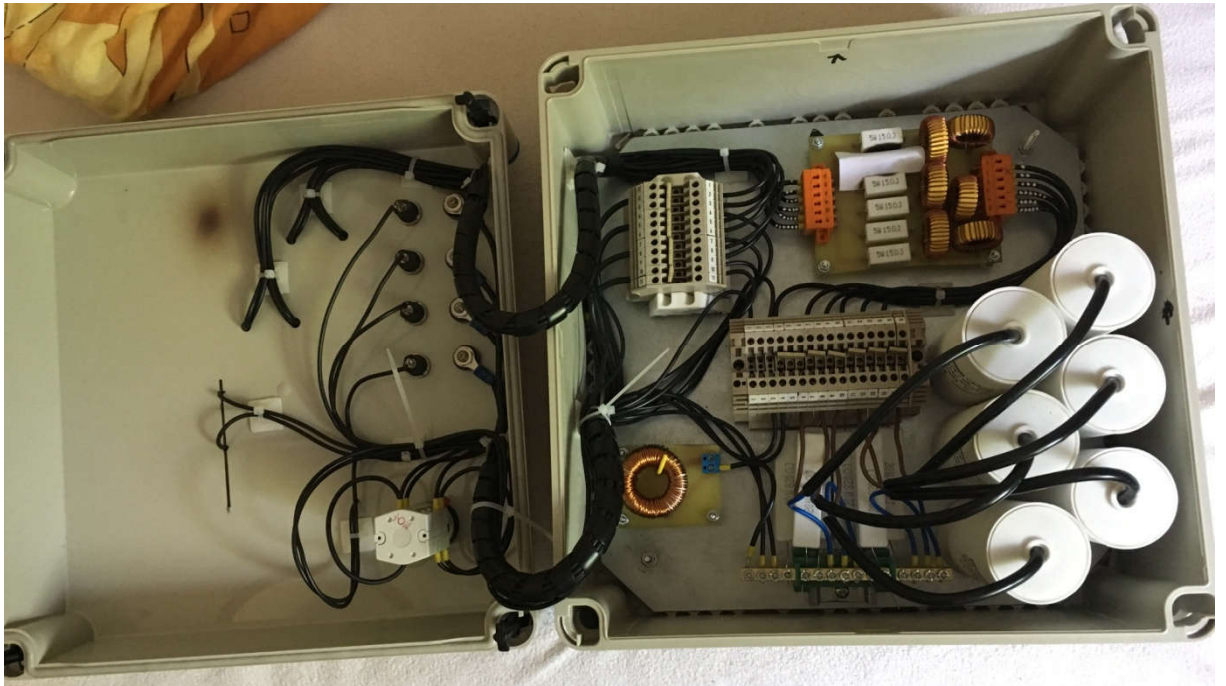
Obvod pokračuje na svorkovnici X2, která je spojena přes svodové odpory a kapacity s klasickou rozvaděčovou zemnicí sběrnicí X3. Ta je použita jako bod zemního potenciálu tohoto modelu. První fáze jednoho z vývodů je spojena s bodem zemního potenciálu přes kontakt k_1 paketového přepínače, který v poloze „0“ je vypnutý a v poloze „1“ a „2“ je zapnutý. Sepnutím je simulováno zemní spojení. Zdířka s označením „N“ je spojena s bodem zemního potenciálu přes kontakt k_2 a zhášecí tlumivku, která je též upevněna na DPS.



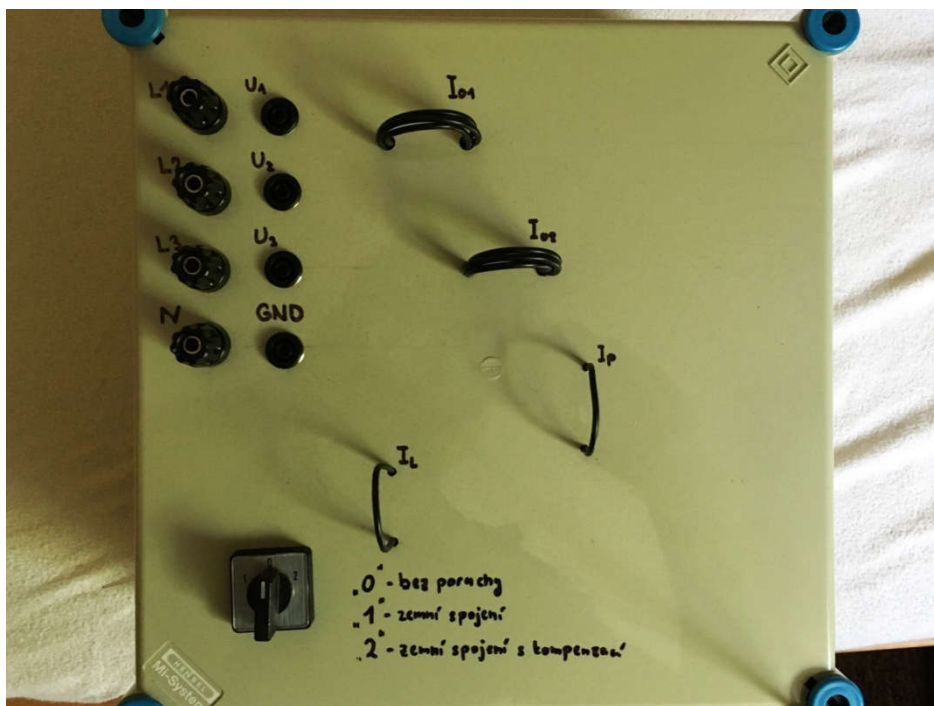
Obr.4.3 DPS se zhášecí tlumivkou

Kontakt k_2 je v polohách „0“ a „1“ rozepnutý a v poloze „2“ sepnutý. Sepnutím je připojena cívka představující zhášecí tlumivku a dochází ke kompenzaci zemního poruchového proudu I_p . Svorka „GND“ je přímo spojena s bodem zemního potenciálu pro možnost měření netočivé složky napětí U_0 mezi ní a bodem „N“.

Model byl z většiny zapojen vodiči CYA 1 mm², výjimkou je přívod od napájecích svorek, které musely být připojeny okem M5. Tyto propoje byly realizovány vodiči CYA 2,5 mm².



Obr.4.4 Zkompletovaný zapojený model distribuční sítě uvnitř



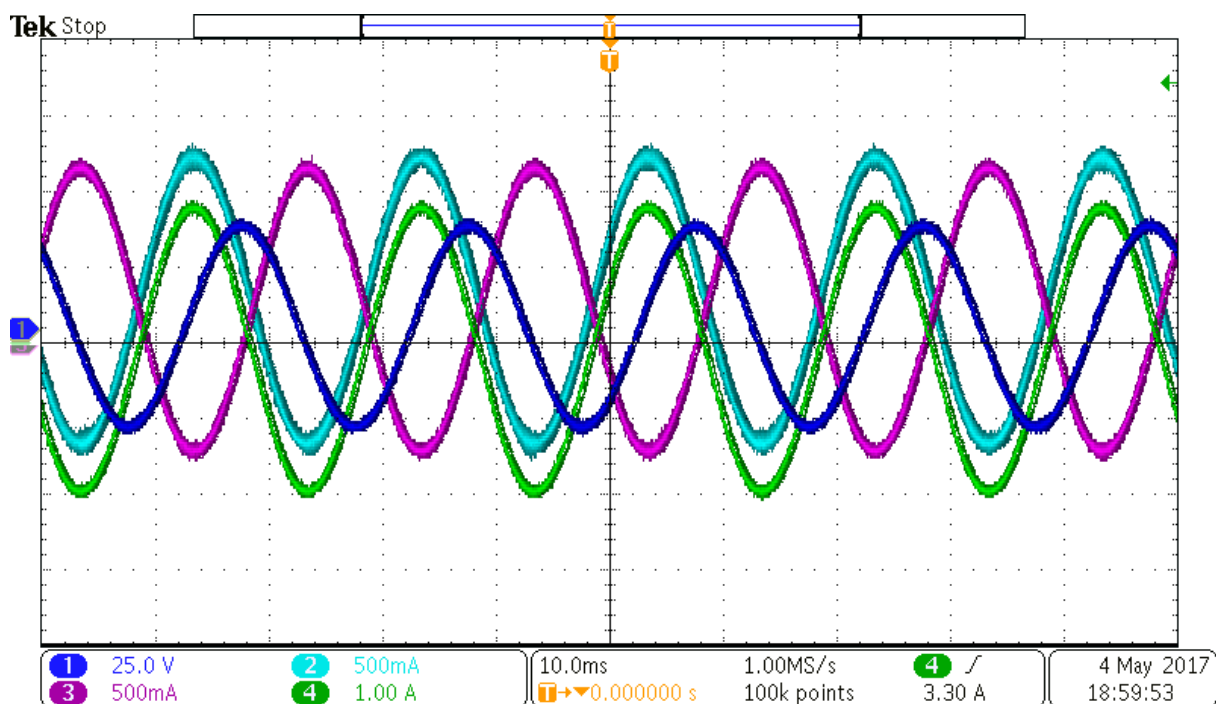
Obr.4.5 Kompletní model distribuční sítě

5 Experimentální měření

Po kontrole správného zapojení pomocí obvodové zkoušečky bylo možné začít na modelu měřit. Měření probíhalo v laboratoři budovy RICE. Jako napájení byl zvolen panelový spínaný zdroj laboratoře. Pro možnost generování netočivých složek napětí a proudu byl připojen mezi zdroj a model ještě transformátor schopen přenášet výkon 900 VA s převodem fázových napětí 230 / 132 V a s vyvedeným středem na primární i sekundární straně. Transformátor byl zapojen způsobem Yy. Model je napájen napětím přes zdířky s označením $L_1 - L_3$ a nulový bod transformátoru byl spojen se zdířkou označenou N. Klešťové měřicí sondy osciloskopu byly zavěšeny na vyvedené smyčky pro měření netočivých složek proudů I_{01} , I_{02} a na smyčku poruchového proudu I_p . Netočivá složka napětí je měřena mezi zdířkami N a GND (bod zemního potenciálu) napěťovou měřicí sondou.

5.1 Měření napěťových a proudových poměrů při zemním spojení v izolované soustavě

Po zapojení modelu dle instrukcí uvedených výše bylo na spínaném zdroji nastaveno napětí 80 V. Na sekundární straně transformátoru a tedy na modelu bylo fázové napětí přibližně 40 V (napětí nepřesahující hodnotu na kterou byl model dimenzován). Paketový přepínač byl přepnut do polohy „1“ (zemní spojení v izolované soustavě).

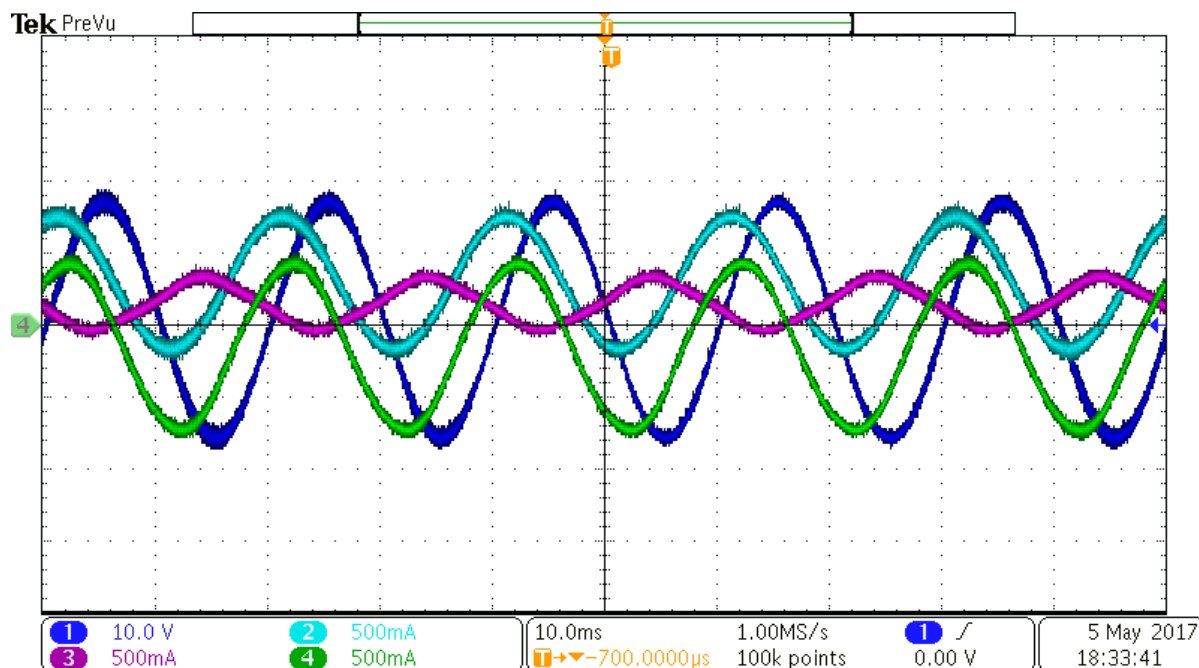


Obr.5.1 Oscilogram netočivých složek napětí a proudů a poruchového proudu při zemním spojení v izolované soustavě

Na *Obr.5.1* je zachycen oscilogram zjišťovaných netočivých složek napětí a proudů a poruchového proudu I_p , kde kanál 1 (modrý) je netočivá složka napětí U_0 , kanál 2 (světle modrý) netočivá složka proudu vývodu bez poruchy I_{02} , kanál 3 (fialový) netočivá složka proudu vývodu s poruchou I_{01} a kanál 4 (zelený) průběh zemního poruchového proudu I_p do bodu zemního potenciálu. Naměřené průběhy splňují teoretické předpoklady, proto byl z osciloskopu na flash disk exportován .csv soubor s vektory průběhů a časové základny pro další zpracování a analýzu těchto výsledků.

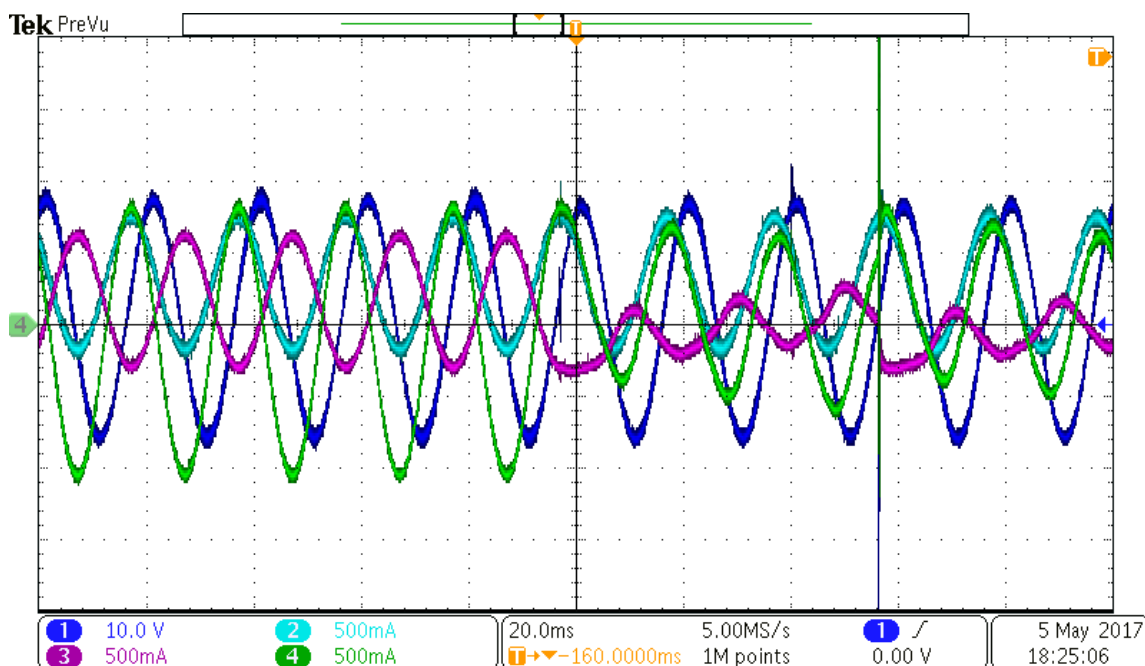
5.2 Měření napěťových a proudových poměrů při zemním spojení v kompenzované soustavě

Napájecí a měřicí obvod byl zapojen obdobně jako při měření při zemním spojení v izolované soustavě. Hodnota napětí spínaného zdroje byla nastavena opět na hodnotu 80 V. Paketový přepínač byl přepnut do polohy „2“ (zemní spojení s kompenzací), bod zemního potenciálu a střed transformátoru byly tedy spojeny zhášecí tlumivkou. V tomto případě měření neprobíhalo dle předpokladů. Poruchový proud se zvětšil a netočivé složky proudů vývodů nabyly příliš vysokých hodnot. Použitá tlumivka byla pravděpodobně přesycována a v obvodu se chovala jako zkrat. Model byl z bezpečnostních důvodů odpojen od napájení a pro další měření překonfigurován tak, že na místo toroidní cívky v modelu byly jako zhášecí tlumivky použity laboratorní cívky o indukčnostech 20 mH a 30 mH spojeny do série, tedy o výsledné hodnotě 50 mH. Při dalším měření byla hodnota napětí spínaného zdroje snížena na hodnotu poloviční tedy 40 V, pro nižší hodnoty proudů a prevenci případného dalšího přesycování použitých cívek. Fázová napětí na modelu dosahovala tedy hodnot 23 V.



Obr.5.2 Oscilogram netočivých složek napětí a proudů a poruchového proudu při zemním spojení v kompenzované soustavě

Na Obr.5.2 jsou zaznamenány průběhy netočivých složek napětí a proudů vývodů a poruchového proudu v kompenzované soustavě. Popis kanálů je totožný jako v případě Obr.5.1. Je zřetelný pokles netočivé složky proudu vývodu s poruchou I_{02} (fialový). Pro viditelnost poklesu poruchového proudu při této částečné kompenzaci byl pořízen oscilogram zachycující okamžik připnutí zhášecí tlumivky na Obr.5.3 .



Obr.5.3 Oscilogram zachycující připnutí zhášecí tlumivky mezi bod zemního potenciálu a střed napájecího transformátoru

Na Obr.5.3 je viditelné omezení poruchového proudu I_p částečnou kompenzací o 50% (zelený průběh). Částečná kompenzace tedy splňuje naše teoretické předpoklady. Z osciloskopu byly exportovány datové řady všech průběhů ve formátu .csv k další analýze.

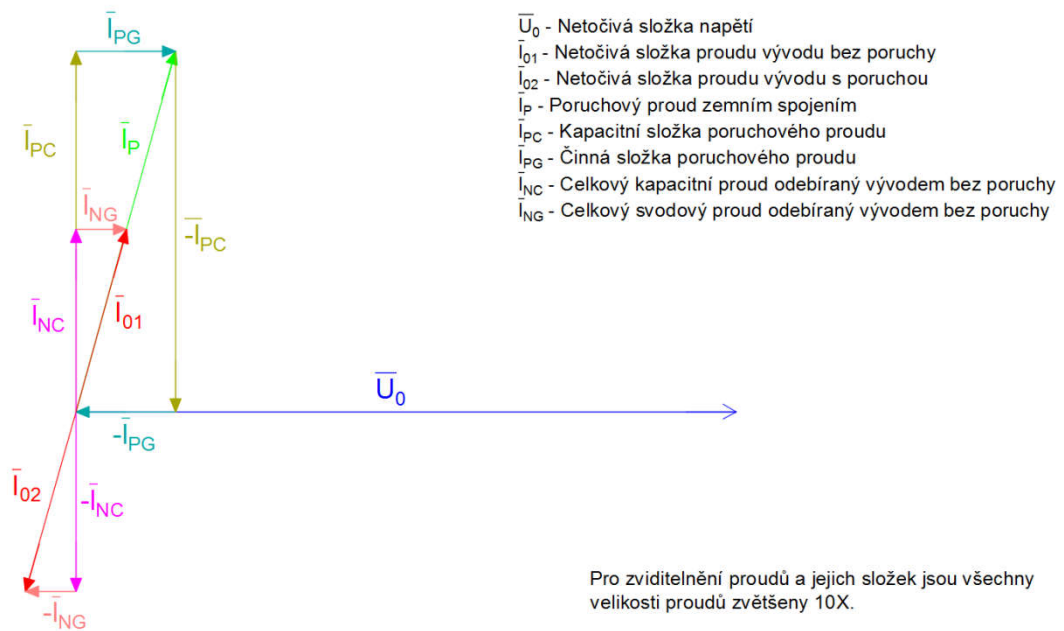
6 Analýza výsledků měření

Data z obou měření ve formátu .csv byla importována formou vektorů do prostředí MATLAB. Pro konstrukci fázorových diagramů byla provedena DFT (diskrétní Fourierova analýza), jejíž pomocí byla identifikována základní harmonická analyzovaných průběhů. V programu MATLAB pak byly zjištěny amplitudy a fázové posuvy jednotlivých netočivých složek napětí a proudů a dále poruchových proudů z měření poměrů při zemním spojení v izolované a kompenzované soustavě.

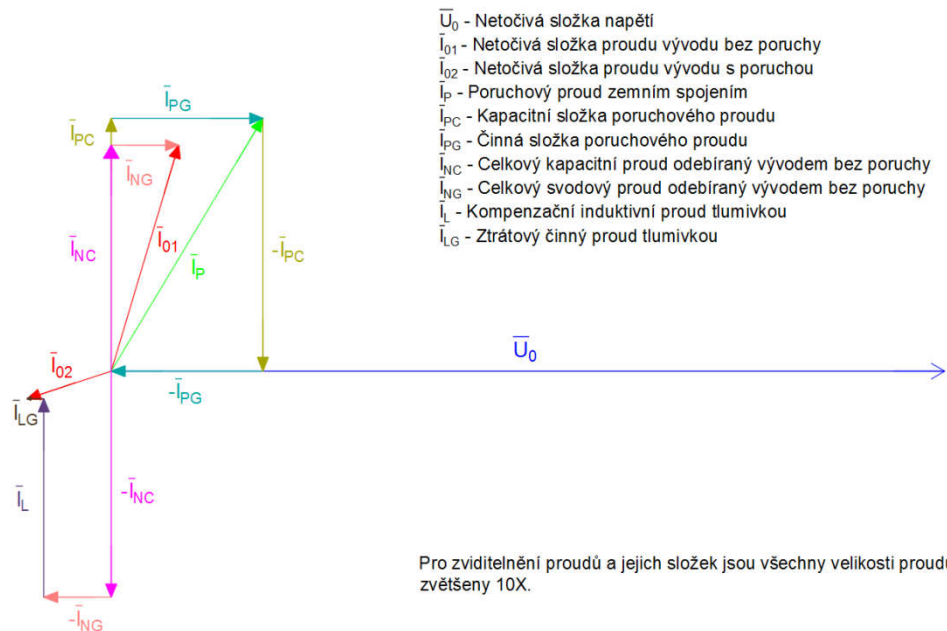
6.1 Identifikované vektory pomocí DFT analýzy naměřených průběhů

	Izolovaná soustava		Kompenzovaná soustava	
	Amplituda	φ [°]	Amplituda	φ [°]
U_0 [V]	33,0812	0	16,3055	0
I_{01} [A]	0,9448	74,3952	0,4616	73,4203
I_{02} [A]	0,9349	-105,6166	0,174	-161,8512
I_p [A]	1,8704	74,5582	0,5764	59,08

Teoretická správnost měření byla zkontrolována vynesemím těchto vektorů do komplexní roviny pomocí funkce „compass“ v programu MATLAB. Po potvrzení teoretických předpokladů byly vyneseny fázorové diagramy naměřených hodnot pro oba případy měření pomocí software AutoCAD viz Obr.6.1 Fázorový diagram naměřených netočivých složek napětí, proudů a poruchového proudu, jejich kapacitních a svodových složek na modelu distribuční sítě s izolovaným středem Obr.6.2.



Obr.6.1 Fázorový diagram naměřených netočivých složek napětí, proudů a poruchového proudu, jejich kapacitních a svodových složek na modelu distribuční sítě s izolovaným středem



Obr.6.2 Fázorový diagram naměřených netočivých složek napětí, proudů a poruchového proudu, jejich kapacitních a svodových složek na modelu částečně kompenzované distribuční sítě

Závěr

Práce se zabývá analýzou poměrů netočivých složek napětí a proudů na vývodech distribuční sítě izolované nebo kompenzované při zemním spojení. Po sestavení matematického modelu a návrhu parametrů byl zkonstruován laboratorní prototyp distribuční sítě, na kterém probíhala veškerá měření a analýza těchto poměrů.

Po zpracování naměřených hodnot byly sestaveny fázorové diagramy pro provedená analýzy poměrů na jednotlivých vývodech. Sestavené fázorové diagramy potvrzují teoretické předpoklady. V případě izolované sítě je fázor poruchového proudu, téměř ve fázi s netočivou složkou proudu zdravého vývodu. Jeho složky tvoří celkový svodový proud (činná složka) a celkový proud parazitními kapacitami soustavy (kapacitní složka). Fázor netočivé složky proudu poškozeného vývodu je v protifázi s fázorem netočivé složky proudu zdravého vývodu.

Z výsledků získaných při měření na modelu sítě s částečnou kompenzací je zřetelný pokles hodnoty kapacitní složky poruchového proudu I_p , který lze z obou obrázků porovnat vůči činné složce poruchového proudu I_{PG} (ta je v obou případech stejná). Kapacitní složka poruchového proudu je zde částečně kompenzována induktivní složkou proudu I_L zhášecí tlumivkou. V případě správně hodnoty indukčnosti zhášecí tlumivky by byla kapacitní složka zcela kompenzována. Činná složka fázoru netočivé složky proudu postiženého vývodu I_{02} má při úplné kompenzaci zhášecí tlumivkou totožnou velikost, jako činná složka sumy netočivých složek proudu nepoškozených vývodů, avšak opačný směr (nachází se v protifázi k napětí U_0). Fázor netočivé složky proudu poškozeného vývodu tak předbíhá fázor U_0 o více než 90° , zatímco suma fázorů netočivých složek proudu vývodů zdravých I_{01} o méně než 90° .

V tomto případě dochází pouze k částečné kompenzaci, ale je viditelné natažení fázoru I_{02} ze 3. do 2. kvadrantu. Činná složka proudu zhášecí tlumivkou I_{LG} je v tomto případě zanedbatelná.

Analýzou jsme potvrdili teoretické předpoklady o chování a poměrech netočivých složek napětí a proudů v distribučních sítích izolovaných a kompenzovaných.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MERTLOVÁ, Jiřina. *Elektrické stanice a vedení*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1994. ISBN 80-7082-155-8.
- [2] ŽÁK, František. *Analýza způsobů uzemnění uzlu sítí VN a jejich vliv na provoz a ochranění sítí VN*. Plzeň: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2014. 214s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.
- [3] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [4] BERAN, Miloš. *Elektrické ochrany strojů a zařízení elektrizační soustavy*. Plzeň: Vysoká škola strojí a elektrotechnická, 1980.
- [5] HODINKA, Miloslav. *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00065-3.
- [6] HEŘMAN, Josef. *Příručka silnoproudé elektrotechniky*. 2. nezm. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [7] TOPOLÁNEK, David. *Lokalizace místa zemního spojení v kompenzované distribuční síti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. S. 148. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [8] WAHLROOS A., ALTONEN J. *Compensated network and admittance based earth-fault protection*. Kaunas University of Technology and Aalto University organized seminar on Methods and techniques for earth fault detection, indication and location. Espoo (Finland). 2011

