

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kompenzace zemních poruch pomocí spínaného zdroje proudu  
připojeného k uzlu soustavy

Autor práce: **Bc. František Iška**  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Komrska, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2022/2023

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. František IŠKA**  
Osobní číslo: **E21N0003K**  
Studijní program: **N0714A060017 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Kompence zemních poruch pomocí spínaného zdroje proudu připojeného k uzlu soustavy**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

## Zásady pro vypracování

1. Sestavte matematický model neúčinně uzemněné distribuční sítě.
2. Navrhněte topologii a sestavte matematický model výkonového měniče připojeného k uzlu sítě, generující kompenzační proud.
3. Sestavte jednoduchý laboratorní prototyp distribuční sítě kompenzované řízeným zdrojem proudu – výkonovým polovodičovým měničem v uzlu sítě.
4. Na laboratorním prototypu proveďte měření a analýzu účinnosti kompenzace jednofázových zemních poruch pomocí zdroje proudu.

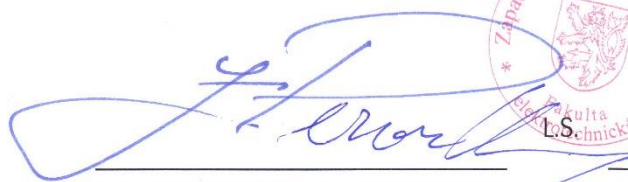


Rozsah diplomové práce: **40 – 60**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. TOMAN, Petr, et al. Provoz distribučních soustav. *ČVUT v Praze, Praha*, 2011, 263.
2. „IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines,“ in IEEE Std C37.230-2007 , vol., no., pp.1-100, 2008, doi: 10.1109/IEEESTD.2007.4447926.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Tomáš Komrska, Ph.D.**  
Research and Innovation Centre for Electrical  
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**  
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**

---

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan

**Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce je zaměřena na kompenzaci proudu zemního spojení v neúčinně uzemněných elektrizačních sítích pomocí výkonového polovodičového měniče, připojeného k uzlu sítě. V teoretické části je popsána problematika vzniku zemního spojení, jeho negativní důsledky a kompenzace prostřednictvím zhášecí tlumivky. Dále se práce zabývá možností využití jednofázového napěťového střídače pro kompenzaci proudu zemního spojení. Součástí praktické části práce je pak ověření principu kompenzace prostřednictvím sestaveného matematického modelu a experimentálních měření provedených na sestaveném fyzickém modelu neúčinně uzemněné sítě.

## **Klíčová slova**

distribuční síť, kompenzace zemního spojení, neúčinně uzemněná síť, napěťový střídač

## **Abstract**

This master thesis is focused on the compensation of the earth fault current in ineffectively grounded grids using a semiconductor converter connected to the neutral point of the grid. In the theoretical part, the issue of the formation of an earth fault, its negative consequences and its compensation using Petersen coil are described. Furthermore, the thesis deals with the possibility of using a single-phase voltage inverter for compensation of the earth fault current. Practical part of this thesis deals with the verification of the principle of this compensation through constructed mathematical model and experimental measurements performed on the constructed physical model of the ineffectively grounded grid.

## **Key Words**

Distribution grid, earth fault compensation, inefficiently grounded grid, voltage inverter

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 22. 5. 2023

Bc. František Iška

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Tomášovi Komrskovi, Ph.D. za cenné rady, metodické vedení a vřelý přístup.

# Obsah

Úvod.....	- 1 -
1 Teoretický úvod.....	- 2 -
1.1 Způsoby uzemnění uzlu sítě.....	- 2 -
1.2 Druhy zemních spojení.....	- 3 -
1.3 Příčiny a důsledky zemního spojení.....	- 4 -
1.4 Zemní spojení v izolované síti .....	- 4 -
1.5 Kompenzace proudu zemního spojení zhášecí tlumivkou .....	- 5 -
1.5.1 Zbytkový proud.....	- 7 -
1.6 Problematika vyšších harmonických.....	- 7 -
1.7 Kompenzace zemního spojení pomocí střídače .....	- 8 -
2 Matematické modely .....	- 9 -
2.1 Model sítě.....	- 9 -
2.2 Model měniče.....	- 11 -
2.3 Model sítě kompenzované měničem .....	- 13 -
3 Fyzický model distribuční sítě.....	- 16 -
3.1 Popis modelu .....	- 16 -
3.1.1 Měnič a jeho řízení .....	- 17 -
3.1.2 Proudová a napěťová čidla.....	- 18 -
3.2 Řídící algoritmy.....	- 18 -
3.2.1 Synchronizace pomocí algoritmu SOGI .....	- 19 -
3.2.2 Synchronizace pomocí Fourierovy transformace .....	- 21 -
3.2.3 Regulace výstupního proudu měniče .....	- 22 -
3.2.4 Modulace .....	- 24 -
4 Experimentální měření na laboratorním prototypu .....	- 25 -
4.1 Zemní spojení v izolované síti .....	- 25 -
4.2 Zemní spojení kompenzované zhášecí tlumivkou .....	- 28 -
4.3 Kompenzace proudu ZS prostřednictvím měniče .....	- 31 -
4.4 Kompenzace měničem při zesíleném svodu sítě.....	- 36 -
4.5 Kompenzace třetí harmonické.....	- 39 -



Zhodnocení a závěr .....	- 43 -
Použitá literatura .....	- 44 -

## Seznam symbolů a zkratek

<b>Značka</b>	<b>Popisek</b>
ZS	Zemní spojení
DS	Distribuční síť
VVN	Velmi vysoké napětí
VN	Vysoké napětí
NN	Nízké napětí
ZT	Zhášecí tlumivka
$U_f$	Fázové napětí sítě
$\omega$	Úhlová frekvence
$U_0$	Netočivá složka napětí sítě
$I_{zs}$	Proud zemního spojení (též poruchový proud)
$I_{kap}$	Kapacitní proud sítě
$I_{0x}$	Netočivá složka proudu měřeného na vývodu z rozvodny
$L$	Indukčnost tlumivky
$C$	Kapacita
$R_{zs}$	Odpor zemního spojení (též odpor poruchy)
$R_s$	Svodový odpor sítě
$I_L$	Proud tlumivky
$I_{me}$	Proud generovaný měničem
IGBT	Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem
RCC	Zařízení pro kompenzaci zbytkového proudu

## Úvod

Penetrace výkonových polovodičových systémů do energetických sítí stále roste. Příkladem, dnes již běžně používaných zařízení, jsou takzvané statické synchronní kompenzátory (STATCOM), využívající obvykle tranzistory typu IGBT, nebo měniče pro stejnosměrný vysokonapěťový přenos (HVDC) [1].

Lze předpokládat, že i do budoucna bude trend využívání polovodičových systémů pokračovat, a to především v souvislosti s přibývajících fotovoltaickými elektrárnami a bateriovými uložišti.

Tato práce se zabývá možností využití výkonových měničů k řešení problémů souvisejících se zemním spojením v distribučních sítích VN, konkrétně pak kompenzací proudu zemního spojení prostřednictvím jednofázového napěťového střídače připojeného k uzlu sítě.

Teoretická část práce bude popisovat problematiku zemního spojení (ZS), jeho vzniku, dnes používané kompenzaci proudu ZS pomocí zhasací tlumivky a potenciálními výhodami plynoucími z použití výkonového měniče připojeného k uzlu sítě.

Praktická část práce spočívá v ověření principu kompenzace proudu ZS výkonovým měničem, a to prostřednictvím sestaveného matematického modelu a experimentálního měření na sestaveném laboratorním prototypu s výkonovým měničem a fyzickém modelu DS. K vytvoření matematického modelu měniče připojeného k uzlu neúčinně uzemněné sítě a simulace jeho provozu je použit simulační nástroj PLECS a prostředí Matlab Simulink. Fyzický nízkonapěťový model neúčinně uzemněné sítě emuluje rozvodnu VN se dvěma vývody s možností emulace zemního spojení.

## 1 Teoretický úvod

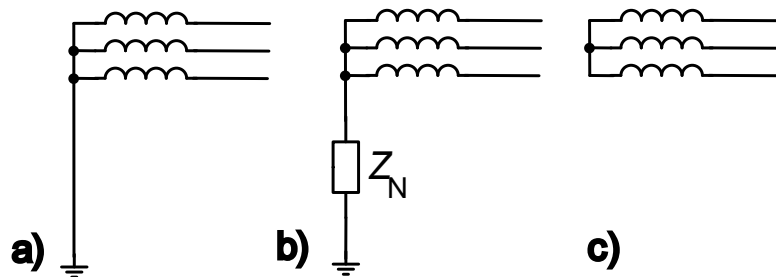
Distribuční sítě VN na území ČR pracují na napětí 10, 35 nebo nejčastěji 22 kV. Mezi nejdůležitější požadavky kladené na tyto sítě patří bezpečnost a spolehlivost provozu, tedy schopnost zajištění nepřetržité dodávky elektrické energie [2].

Nejčastějším poruchovým stavem v těchto sítích je takzvané zemní spojení (dále jen ZS). Jde o situaci, kdy dojde ke spojení jedné fáze se zemí. Chování elektrizační sítě při této poruše záleží na způsobu uzemnění jejího uzlu.

### 1.1 Způsoby uzemnění uzlu sítě

Elektrické sítě lze obecně rozdělit podle způsobu uzemnění uzlu do třech skupin:

- účinně uzemněné, které mají uzel transformátoru přímo spojen s bodem zemního potenciálu,
- neúčinně uzemněné, kde je uzel uzemněn přes impedanci  $Z_N$ ,
- izolované.

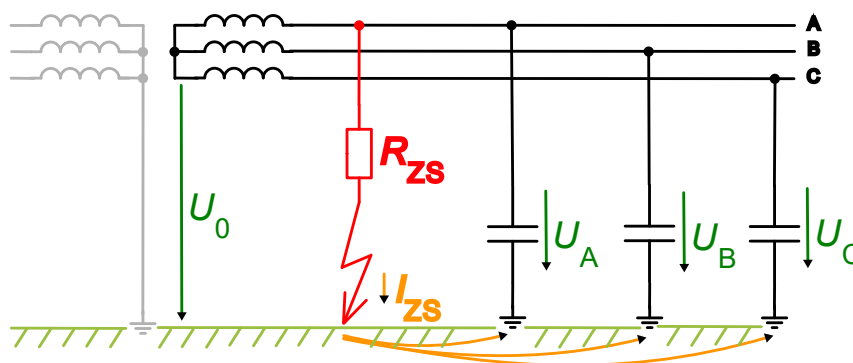


Obr. 1 Způsoby uzemnění uzlu sítě: a) účinně uzemněná síť, b) neúčinně uzemněná síť, c) izolovaná síť

Jako účinně uzemněné jsou provozovány například sítě VVN (110 kV) a typicky sítě NN. Dojde-li ke spojení jednoho fázového vodiče se zemí, hovoříme v tomto případě o zkratu, nikoliv o ZS a poškozený vývod musí být ihned vypnut.

V dalších dvou zmíněných případech spojení jedné fáze se zemí (tedy ZS) další provoz sítě umožňuje. Problém však může představovat proud, který místem ZS prochází v důsledku parazitních kapacit a svodu fázových vodičů proti zemi.

Při zemním spojení je v síti přítomna netočivá složka napětí, kdy se napětí mezi uzlem transformátoru a bodem zemního potenciálu odvíjí od fázového napětí transformátoru. Netočivá složka napětí vyvolá netočivou složku proudu, která se uzavírá místem ZS (poruchový proud  $I_{ZS}$ ) a zejména parazitními kapacitami vedení.



Obr. 2 Zemní spojení v izolované síti

Na obr. 2 je znázorněno zemní spojení v nekompensované, kapacitně symetrické, izolované síti, u které zanedbáváme vliv svodu. Proud  $I_{ZS}$  závisí na odporu zemního spojení  $R_{ZS}$ . Je-li odpor  $R_{ZS}$  nulový, pak proud  $I_{ZS}$  odpovídá kapacitnímu proudu sítě  $I_{kap}$ :

$$I_{kap} = j3\omega C_0 U_f, \quad (1.1)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence,  $C_0$  je kapacita vodiče jedné fáze proti zemi na všech vedeních v dané síti a  $U_f$  je fázové napětí transformátoru vn/vn na straně vn. Pro každý typ vedení se udává hodnota měrné kapacity (kapacity na jednotku délky vedení), přičemž pro kabelová vedení bývá tato hodnota výrazně vyšší než pro venkovní vedení.  $C_0$  je pak součtem kapacit všech vedení, která jsou v danou chvíli zapojena v síti [3].

Sítě s nízkými hodnotami  $I_{kap}$  lze provozovat s izolovaným uzlem. Jedná se zpravidla o malé sítě v průmyslových, elektrárenských či teplárenských provozech. Překračuje-li  $I_{kap}$  hodnotu 20 A, je nutné provozovat danou síť jako neúčinně uzemněnou a proud ZS kompenzovat. Pro venkovní síť VN se doporučuje kompenzace už pro hodnotu  $I_{kap}$  větší než 10 A [2] [3].

V reálné síti je pak poruchový proud tvořen nejen jalovou kapacitní složkou, ale také činnou složkou, která představuje celkový svodový proud sítě (vodivosti mezi fázovými vodiči a zemí). Podstatný vliv na velikost proudu ZS má také přítomnost vyšších harmonických složek napětí v síti [2].

## 1.2 Druhy zemních spojení

Zemní spojení lze rozdělit podle doby jejich trvání na:

- mžiková – s dobou trvání do 0,5 s,
- krátkodobá – s dobou trvání do 5 minut,
- trvalá – trvajících zpravidla až do odstranění poruchy a

- přerušovaná – opakující se mžiková či krátkodobá ZS způsobená obvykle zhasínáním a opětovným zapalováním oblouku [4].

Dalším kritériem pro rozdělení bývá velikost odporu v místě ZS. Rozlišujeme:

- odporová zemní spojení s nezanedbatelným odporem (řádově stovky  $\Omega$ ),
- kovová a oblouková zemní spojení jejichž odpor bývá řádově jednotky  $\Omega$  a jeho vliv je zanedbatelný [4].

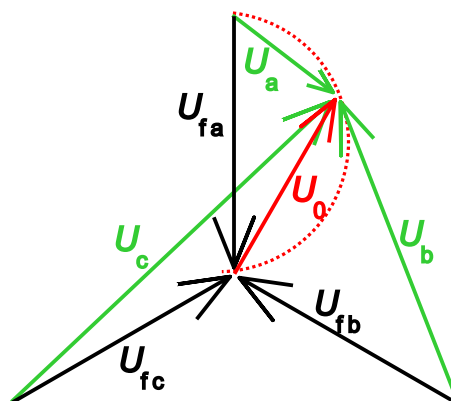
### 1.3 Příčiny a důsledky zemního spojení

Zemní spojení je důsledkem izolační vady, která u venkovních vedení vzniká často v důsledku atmosférických vlivů, značným znečištěním izolátorů a v některých případech také zásahem osoby či zvířete (především velkých ptáků dosedajících na sloup). Oblouk při obloukových ZS na venkovním vedení může poškozovat izolátory, přepalovat vodiče nebo způsobit požár. Díky své pohyblivosti může oblouk zasáhnout i vodič další fáze a způsobit dvoufázový i trojfázový zkrat, což vede k vypnutí vedení nadproudovými ochranami a přerušování dodávky energie spotřebitelům [4].

Jak je ukázáno dále, napětí nepostižených fází proti zemi se při ZS může zvýšit i na hodnotu odpovídající sdruženému napětí sítě, v důsledku čehož dochází v celé síti k většímu namáhání izolace což zvyšuje pravděpodobnost vzniku další poruchy.

Dále jsou zde problémy související s poruchovým proudem, který v místě ZS vytváří krokové napětí. Je zde riziko úrazu elektrickým proudem a také riziko vzniku požáru.

### 1.4 Zemní spojení v izolované síti



Obr. 3 Fázorový diagram – ZS v izolované síti [4]

Ve fázorovém diagramu na obr. 3 vidíme napěťové poměry v izolované síti při zemním spojení na fázi A. Vidíme zde napětí jednotlivých fází proti uzlu transformátoru ( $U_{fa}$ ,  $U_{fb}$ ,

$U_{fc}$ ). Tato napětí nejsou poruchou dotčena, stejně tak sdružená napětí mezi jednotlivými fázemi, která jsou důležitá z hlediska distribučních sítí NN, napájených ze sítě VN přes distribuční transformátory v zapojení Dy. Právě tato skutečnost umožňuje provoz sítě i při zemním spojení. Dále jsou v diagramu zakreslena napětí jednotlivých fází proti zemi (značena  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ ) a netočivá složka napětí  $U_0$ , která odpovídá napětí mezi uzlem sítě a bodem zemního potenciálu. Napětí  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  i  $U_0$  závisí zejména na odporu poruchy. Při dokonalém kovovém ZS napětí fází bez poruchy ( $U_b$  a  $U_c$ ) svou velikostí odpovídají sdruženému napětí sítě a platí:

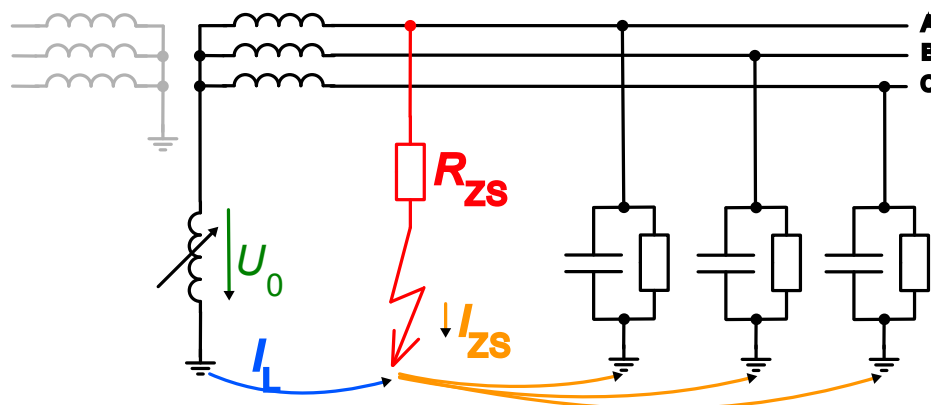
$$U_0 = -U_{fa} \quad (1.2)$$

Při zvětšování odporu zemního spojení  $R_{ZS}$  se fázory  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  a  $U_0$  pohybují po naznačené kružnici, přičemž fázové napětí nepostižené fáze může překročit hodnotu sdruženého napětí soustavy. Od určité mezní hodnoty odporu se síť z hlediska napětí jeví jako bez poruchy a  $U_0$  je nulové [2].

### 1.5 Kompenzace proudu zemního spojení zhášecí tlumivkou

V současné době většina distribučních sítí na našem území využívá centralizované kompenzace prostřednictvím zhášecí tlumivky (ZT), též označované jako Petersonova cívka. Obvykle se jedná o tlumivku s laditelnou indukčností, umístěnou v transformovně VVN/VN, připojenou mezi uzlem napájecího transformátoru a bodem zemního potenciálu. Zhášecí tlumivka tak realizuje neúčinné uzemnění sítě.

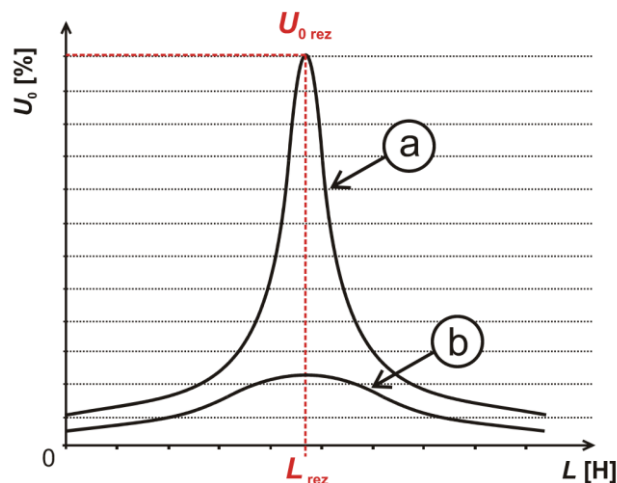
V případě ZS se na ZT objevuje netočivá složka napětí sítě  $U_0$ , které na tlumivce vyvolá proud  $I_L$  působící jako kompenzační proud ZS. V optimálním případě kompenzace odpovídá proud tlumivky celkovému proudu parazitních kapacit a proud ZS je pak minimální [2].



Obr. 4 Kompenzace ZS prostřednictvím zhášecí tlumivky [4]

Pro dokonalou kompenzaci kapacitního proudu je nutné ZT naladit do rezonance s kapacitou vedení. Ladění se obvykle provádí změnou velikosti vzduchové mezery magnetického jádra tlumivky. Přeladění tlumivky je nutné při každé změně uspořádání sítě (např. při odpojení části vedení) a v současné době je automatizované. Na obr. 5 jsou rezonanční křivky, dle kterých se tlumivka ladí. Strmá rezonanční křivka a) odpovídá síti s poměrně velkou kapacitní nesymetrií, kde je napětí  $U_0$  v rezonanci vysoké. ZT se v takovém případě podladí, aby zvýšené napětí v bezporuchovém stavu příliš nenamáhalo izolaci. Podladění tlumivky ovšem způsobí, že kompenzace jalové složky poruchového proudu není optimální [2].

U sítě s malou kapacitní nesymetrií, což jsou typicky sítě s vyšším podílem kabelových vedení, je rezonanční křivka naopak poměrně plochá (křivka b na obr. 5). Nalezení maxima  $U_0$ , a tedy naladění tlumivky do rezonance, tak může být obtížné [2].



Obr. 5: Rezonanční křivka sítě s velkou (a) a malou (b) kapacitní nesymetrií, převzato z [2]

Je-li zemní spojení v síti se ZT dobře kompenzováno, poruchový proud dosahuje minimálních hodnot (mluvíme o tzv. zbytkovém proudu, viz dále). Tím se sice omezují negativní následky ZS spojené s krokovým napětím a hořením oblouku v místě ZS, na druhou stranu se tím omezuje schopnost zemních ochran identifikovat postižený vývod. Proto se pro zvýšení citlivosti ochran používá připínání pomocného odporníku. Pomocný odporník, obvykle o odporu jednotek ohmů, se pomocí stykače připojuje k pomocnému sekundárnímu vinutí ZT o jmenovitém napětí 500 V. Tím se zvýší činná složka poruchového proudu a postižený vývod lze snáze identifikovat. Připnutí odporníku je řízeno automatikou a trvá jen po dobu nezbytnou k zareagování zemní ochrany postiženého vývodu (obvykle 1 s). Poruchový proud se však připnutím odporníku zvýší [2].



### 1.5.1 Zbytkový proud

Zbytkový, nebo též reziduální proud je proud, který místem ZS v reálné síti protéká po vykompenzování. Jak již bylo uvedeno, ZT obvykle není naladěna přesně do rezonance, ale provozuje se mírně podladěná či přeladěná. Jalová složka poruchového proudu, způsobená kapacitou sítě tak není vykompenzována dokonale. Proud zemního spojení však má i činnou složku, způsobenou svodem sítě. Tu prostřednictvím tlumivky, coby pasivního prvku, kompenzovat nelze. V reálné síti pak bývá zbytkový proud tvořen i vyššími harmonickými složkami.

### 1.6 Problematika vyšších harmonických

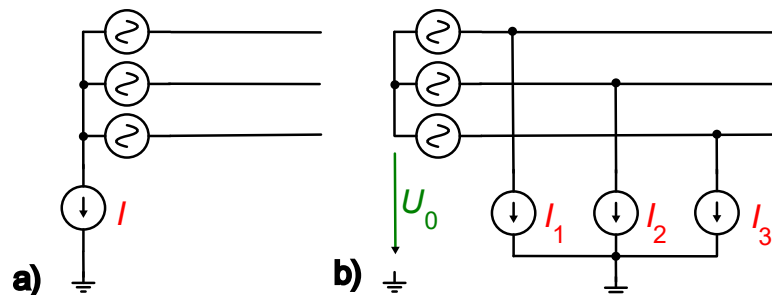
V distribučních soustavách se běžně setkáváme s proudy, jejichž časový průběh není dokonale sinusový, tedy neobsahuje pouze základní harmonickou složku o jmenovité frekvenci soustavy, ale též její násobky (vyšší harmonické). Tyto vyšší harmonické složky proudu vyvolávají úbytky napětí na podélné impedanci vedení a transformátorů a tím dochází též k deformaci průběhu napětí. Vyšší harmonické pak mohou tvořit i podstatnou část zbytkového proudu při kompenzaci ZS.

Zdroji vyšších harmonických jsou nelineární zátěže, odebírající neharmonický proud i v případě, že jsou napájeny harmonickým napětím. Jde například o obloukové pece, zářivková a výbojková svítidla, usměrňovače a transformátory, jejichž magnetický obvod pracuje v nelineární oblasti magnetizační křivky. jinými zdroji. Zdrojem vyšších harmonických v distribučních sítích může být i samotná zhášecí tlumivka, díky nelinearitě svého magnetického obvodu. V proudu zemního spojení bývá obvykle nejvíce zastoupena pátá a sedmá harmonická [5].

Zhášecí tlumivka tvoří spolu s kapacitou sítě rezonanční obvod, který se snažíme naladit do blízkosti rezonance. Je-li tlumivka naladěna do rezonance na jednom kmitočtu, nemůže být současně v rezonanci na jiných kmitočtech. Z toho vyplývá že při naladění ZT do rezonance na základní harmonické 50 Hz nelze současně kompenzovat vyšší harmonické složky proudu ZS. Dosahuje-li některá složka proudu ZS vyšší hodnoty než základní harmonická, může být ZT použita ke kompenzaci této harmonické, ovšem opět pouze jedné [2].

### 1.7 Kompenzace zemního spojení pomocí střídače

V současné době lze ke kompenzaci proudu ZS využít též výkonové měniče. Na obrázku 6 jsou naznačeny dva způsoby generování kompenzačního proudu pomocí střídačů řízených jako zdroje proudu.



Obr. 6 Řešení aktivní kompenzace ZS pomocí řízeného zdroje proudu: a) řešení připojené k uzlu [6], b) kompenzace třífázovým zdrojem připojeným k fázovým vodičům [7]

První možností je připojení řízeného zdroje proudu k uzlu sítě (viz obr. 6a). Tento způsob kompenzace [6], je předmětem řešení této práce. Řízený zdroj proudu může kompenzovat jalovou složku poruchového proudu, stejně jako ZT, ale také činnou složku i vyšší harmonické.

Moderní měniče s vícehladinovou topologií, dimenzované na dostatečně vysoké napětí, by mohly ZT přímo nahradit. Další možností je připojení měniče k uzlu sítě přes jednofázový transformátor. Roli tohoto transformátoru může plnit i zhášecí tlumivka, která disponuje pomocným vinutím, původně určeným k připínání pomocného odporníku, čehož využívá i systém zvaný RCC (Residual current compensation), vyvinutý firmou Swedish Neutral, určený ke kompenzaci pouze zbytkového proudu po kompenzaci ZT [2].

Střídač připojený k uzlu je jednofázový a potřebuje ke své činnosti vnější napájení. I v případě, že by měnič kompenzoval pouze jalovou složku poruchového proudu, je potřeba určitý výkon na krytí ztrát. Činný výkon přitom nelze odebrat přímo z uzlu transformátoru prostřednictvím netočivé složky. Tím by se zvětšovala činná složka poruchového proudu.

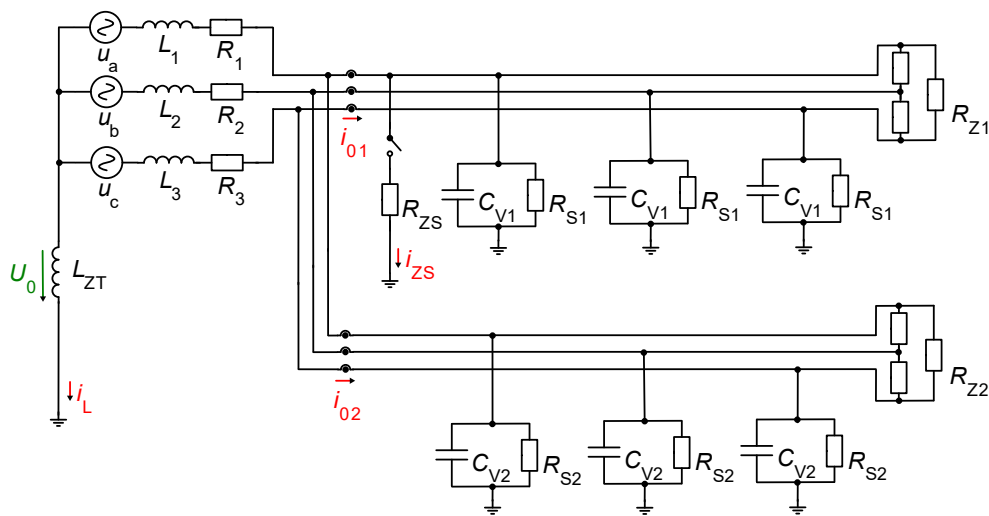
Další možností využití aktivního systému pro kompenzaci proudu ZS je řešení se třemi řízenými zdroji proudu připojenými k fázovým vodičům (viz obr. 6b). Systém lze realizovat pomocí vysokonapěťového měniče přímo připojeného k síti nebo doplnit vinutým dílem, např. speciálním třífázovým transformátorem. Jednou z mnoha výhod je však možnost napájet systém přímo ze sítě odběrem činného výkonu prostřednictvím sousledné složky proudu. Toto zapojení je předmětem patentu [7] a jeho principem se detailně zabývá například [8].

## 2 Matematické modely

Matematické modely sestavené pomocí simulačního nástroje Matlab Simulink a PLECS Blockset zahrnují model distribuční sítě se dvěma vedeními pro simulace stavů při zemním spojení. Dále pak model jednofázového napěťového střídače, a nakonec model sítě kompenzované měničem připojeným k uzlu sítě, sestavený s využitím předchozích dvou modelů.

### 2.1 Model sítě

Schéma modelu distribuční sítě, který byl sestaven v prostředí PLECS Blockset, je na obr. 7. Vidíme zde tři zdroje napětí  $u_a$ ,  $u_b$  a  $u_c$ , ty představují napětí indukovaná na sekundárním vinutí transformátoru. Toto vinutí je zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem, jak je tomu u skutečných transformátorů VVN/VN používaných na našem území.  $L_1$ ,  $L_2$  a  $L_3$  představují rozptylové indukčnosti vinutí transformátoru a rezistory  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  jejich odpory.



Obr. 7 Schéma vytvořeného matematického modelu sítě.

Napěťové zdroje  $u_a$ ,  $u_b$  a  $u_c$ , jsou zdroje harmonických průběhů napětí tvořící třífázový systém:

$$u_a = U_m \sin(\omega t), \quad (2.1)$$

$$u_b = U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2.2)$$

$$u_c = U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right). \quad (2.3)$$

Pro úhlovou frekvenci  $\omega$  platí:

$$\omega = 2\pi f, \quad (2.4)$$

kde  $f$  je frekvence. Amplituda napětí  $U_m$  je vypočtena ze zadané efektivní hodnoty fázového napětí  $U_f$ :

$$U_m = \sqrt{2}U_f. \quad (2.5)$$

Dále model zahrnuje dvě vedení, která mají parazitní kapacitu proti zemi ( $C_{V1}$  a  $C_{V2}$ ) a svod ( $R_{S1}$  a  $R_{S2}$ ). Kapacity i svodové odpory jednotlivých vedení jsou symetrické. Na konci každého vedení je připojena symetrická zátěž, tvořená rezistory zapojenými do trojúhelníku. Jelikož model nezahrnuje podélné parametry vedení (indukčnost a odpor vodičů), na kterých by vznikaly úbytky napětí, nehraje tato zátěž velkou roli z hlediska zemního spojení, avšak po jejich přidání do modelu se zkrátil čas potřebný na odeznění přechodových dějů, vznikajících při spuštění simulace.

Důležitou součástí modelu je rezistor  $R_{ZS}$ , představující odpor zemního spojení. Pro simulaci kovového ZS lze jednoduše nastavit odpor  $R_{ZS}$  na nulu. Indukčnost  $L_{ZT}$  představuje zhášecí tlumivku.

Ve schématu jsou též vyznačeny veličiny, které jsou z hlediska problematiky zemního spojení důležité: proud zemního spojení  $I_{ZS}$ , kompenzační proud  $I_L$ , součtové měření netočivé složky proudu  $I_{01}$  a  $I_{02}$  na prvním, resp. druhém vývodu a netočivá složka napětí  $U_0$ .

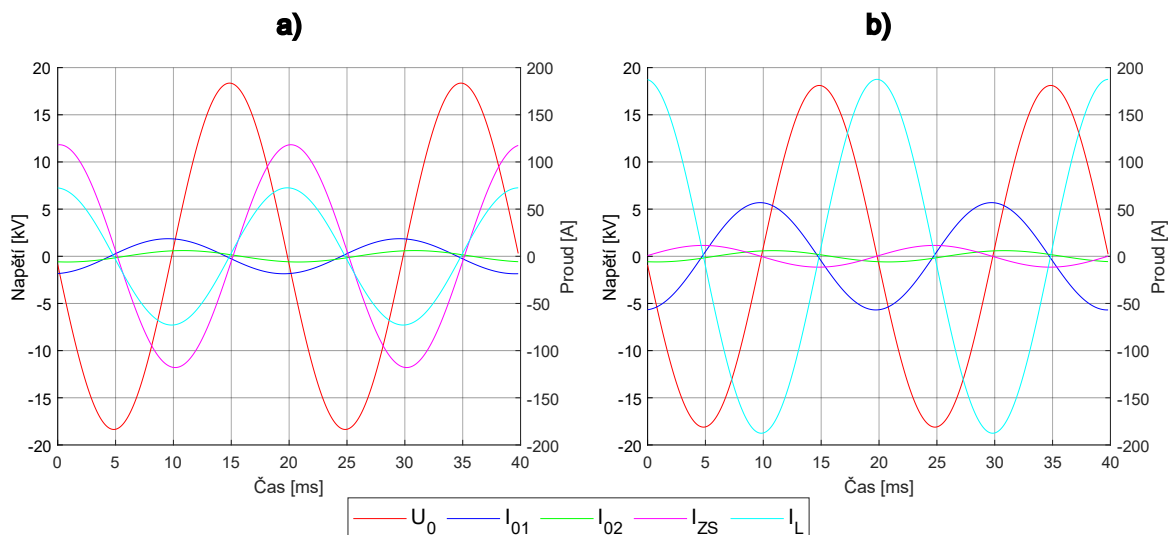
V této kapitole jsou dále prezentovány výsledky simulace, pro kterou byly zvoleny parametry uvedené v tabulce 1.

Tab. 1 Parametry matematického modelu sítě

Parametr	Hodnota
$f$	50 Hz
$U_f$	12,7 kV
$L_1, L_2, L_3$	10 mH
$R_1, R_2, R_3$	1 $\Omega$
$C_{V1}$	10 $\mu$ F
$C_{V2}$	1 $\mu$ F
$R_{S1}, R_{S2}$	10 k $\Omega$
$R_{Z1}, R_{Z2}$	2,9 k $\Omega$
$R_{ZS}$	0 $\Omega$
$L_{ZT}$	Postupně zadávány různé hodnoty

Pro výpočty v prostředí Matlab Simulink byla zvolena metoda Matlabu ode45 s variabilní délkou kroku simulace. Maximální délka kroku byla nastavena na 10  $\mu$ s.

Na obr. 8 jsou průběhy sledovaných veličin, tedy netočivé složky napětí  $U_0$ , proudu vývodu s poruchou  $I_{01}$ , proudu vývodu bez poruchy  $I_{02}$ , proudu zemního spojení  $I_{ZS}$  a proudu zhášecí tlumivky  $I_L$  při dvou různých hodnotách indukčnosti zhášecí tlumivky  $L_{ZT}$ .

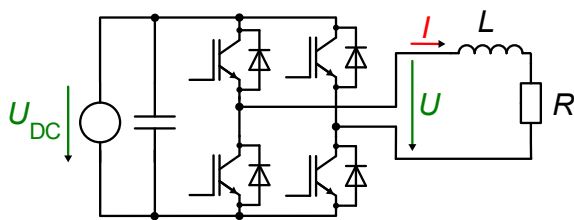


Obr. 8 Výsledky simulace – model sítě: průběhy netočivých složek napětí  $U_0$ , proudu na vývodu s poruchou  $I_{01}$ , proudu na vývodu bez poruchy  $I_{02}$ , proudu zemního spojení  $I_{ZS}$  a proudu zhášecí tlumivky a) při indukčnosti  $L_{ZT} = 800$  mH., b) při indukčnosti  $L_{ZT} = 304$  mH

Při indukčnosti zhášecí tlumivky  $L_{ZT} = 800$  mH je ZT silně podladěná (indukčnost je příliš vysoká a tlumivka je daleko od rezonance s kapacitou sítě). V tomto stavu je zemní spojení kompenzováno pouze částečně a poruchový proud  $I_{ZS}$  je tak poměrně velký. Ve druhém případě, kdy je tlumivka naladěna téměř do rezonance ( $L_{ZT} = 304$  mH), je téměř vykompenzována jalová složka poruchového proudu  $I_{ZS}$ , který nyní představuje zbytkový proud po kompenzaci. Zbytkový proud je výrazně nižší, než poruchový proud v případě tlumivky a převládá jeho činná složka.

## 2.2 Model měniče

Na obr. 9 je model jednofázového napěťového střídače v můstkovém zapojení. Tento měnič je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí  $U_{DC}$  a je zatížen RL zátěží.



Obr. 9 Model napěťového střídače s RL zátěží

K řízení spínání IGBT tranzistorů je použita PWM s nosným pilovým signálem, který se porovnává se dvěma modulačními signály, které jsou vzájemně v protifázi pro dosažení maximálního napětí. Každý z modulačních signálů řídí jednu větev měniče. Tranzistory jsou spínány na základě toho, zda je okamžitá hodnota modulačního signálu větší (sepne horní tranzistor) nebo menší (sepne dolní tranzistor) než okamžitá hodnota pilového průběhu. Perioda spínání odpovídá periodě pilového průběhu  $T_P$ . Jelikož se tranzistory v simulaci chovají jako ideální spínače, není nutno zde řešit vkládání mrtvých časů mezi vypnutí jednoho a sepnutí druhého tranzistoru.

Měnič je modulován harmonickým průběhem napětí  $u_{ab}$ :

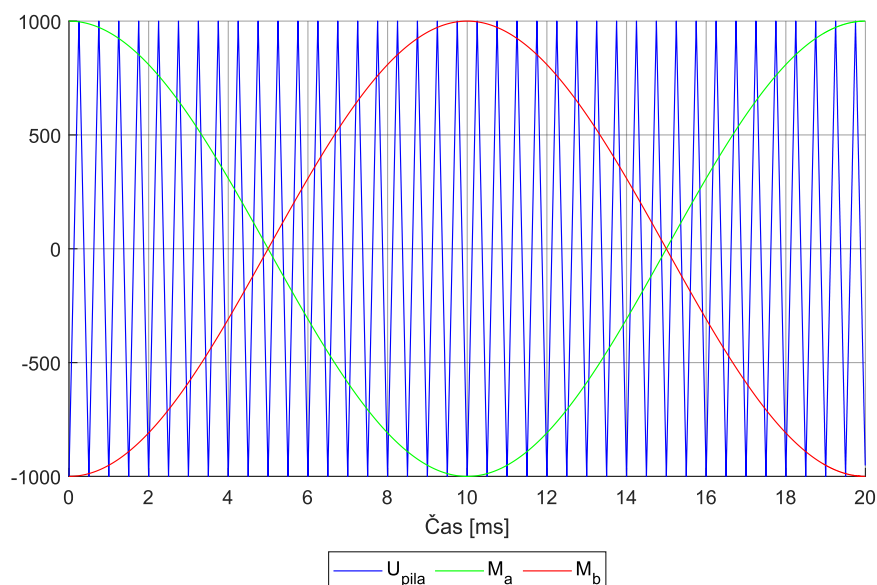
$$u_{ab} = U_m \sin(\omega t) . \quad (2.6)$$

Simulace byla provedena s parametry uvedenými v tab. 2. Jako metoda výpočtu byla opět zvolena ode45 a maximální délka kroku byla omezena na 1  $\mu$ s.

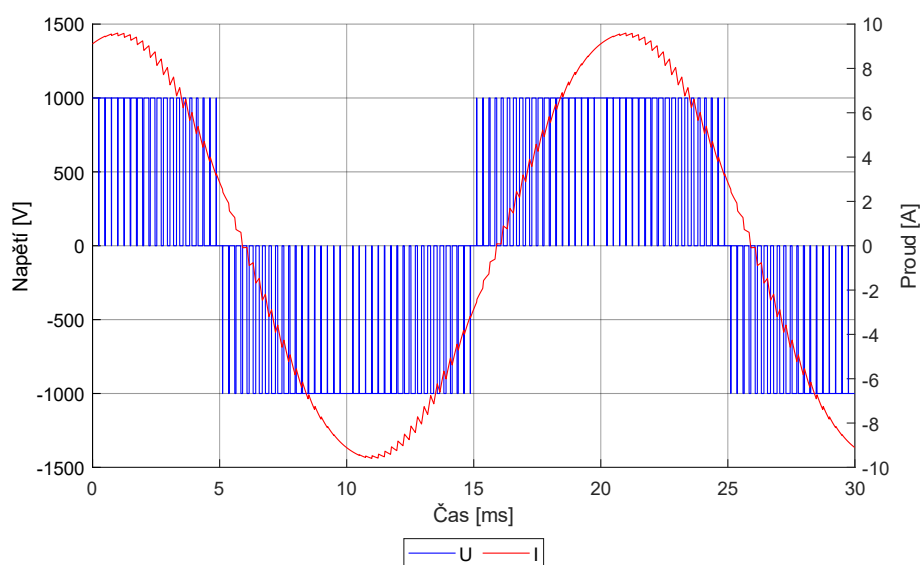
Tab. 2 Parametry simulace modelu střídače

Parametr	Hodnota
$f$	50 Hz
$U_{DC}$	1 kV
$U_m$	1 kV
$L$	100 mH
$R$	100 $\Omega$
$T_P$	500 $\mu$ s

Na obrázku 10 je průběh pily generovaný modulátorem a oba modulační signály, se kterými je porovnáván. Obr. 11 zobrazuje průběhy výstupního napětí střídače a proudu odebíraného zátěží, zobrazeno je posledních 30 ms simulace.



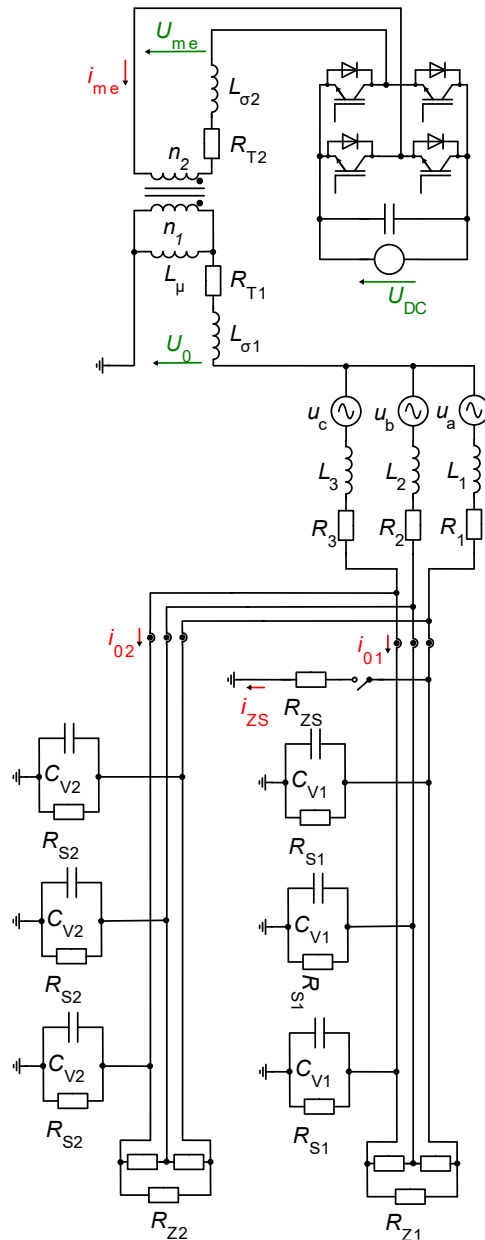
Obr. 10 Výsledky simulace – model měniče: Generovaný pilovitý průběh  $U_{pila}$  a modulační signály  $m_a$  a  $m_b$



Obr. 11 Výsledky simulace – model měniče: Průběh výstupního napětí  $U$  měniče a proudu  $I$  odebraného zátěží

### 2.3 Model sítě kompenzované měničem

Spojením modelu distribuční sítě a modelu výkonového měniče byl sestaven cílový model pro simulace systému aktivní kompenzace připojeného k uzlu transformátoru. Schéma tohoto systému je na obr. 12.



Obr. 12 Schéma kompletního modelu sítě kompenzované měničem

Měnič je připojen k pomocnému vinutí zhášecí tlumivky, která je zde namodelována jako jednofázový transformátor s magnetizační indukčností  $L_{\mu}$ , vztažené k primárnímu vinutí. Dále model transformátoru zohledňuje rozptylovou indukčnost  $L_{\sigma 1}$  a odpor  $R_{T1}$  primárního vinutí (respektive hlavního vinutí ZT) i indukčnost  $L_{\sigma 2}$  a odpor  $R_{T2}$  sekundárního vinutí (tedy pomocného vinutí ZT). Převod transformátoru byl zvolen dle převodu mezi hlavním a pomocným vinutím reálné zhášecí tlumivky:

$$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{13\,300}{500}. \quad (2.7)$$



Měnič je modulován harmonickým průběhem napětí  $u_{ab}$ :

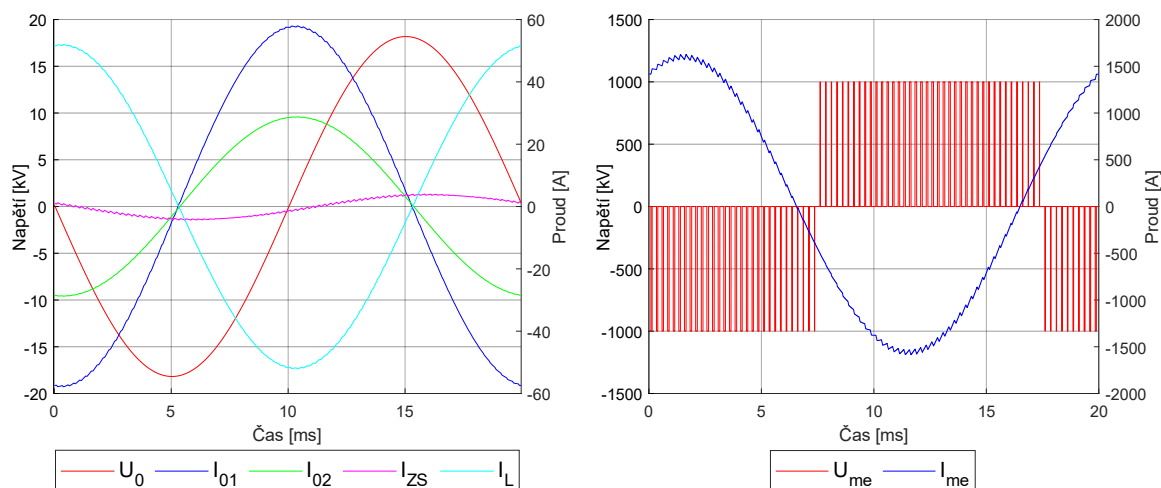
$$u_{ab} = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.8)$$

Byla nastavena taková hodnota amplitudy  $U_m$  a fáze  $\varphi$ , při které je poruchový proud vykompenzován na hodnotu podstatně nižší než při kompenzaci tlumivkou naladěnou do rezonance v kapitole 2.1 a to navzdory tomu že byl v této simulaci nastaven větší svod (nižší hodnoty  $R_{S1}$  a  $R_{S2}$ ), viz tab. 3.

Tab. 3 Parametry simulace modelu sítě kompenzované měničem

Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota	Parametr	Hodnota
$f$	50 Hz	$C_{V1}$	10 $\mu$ F	$L_{\sigma 1}$	22 mH
$U_f$	12,7 kV	$C_{V2}$	5 $\mu$ F	$R_{T1}$	0 $\Omega$
$L_1, L_2, L_3$	10 mH	$R_{S1}$	3 k $\Omega$	$L_{\sigma 2}$	0,9 mH
$R_1, R_2, R_3$	1 $\Omega$	$R_{S2}$	6 k $\Omega$	$R_{T2}$	1 m $\Omega$
$R_{ZS}$	0 $\Omega$	$R_{Z1}, R_{Z2}$	2,9 k $\Omega$	$L_\mu$	250 mH
$U_{DC}$	1 kV	$U_m$	300 V	$\varphi$	$\pi/4$

Metoda výpočtu simulace byla ode45 a maximální délka kroku byla nastavena na 1  $\mu$ s. Na obrázku 13 jsou zobrazeny průběhy sledovaných veličin v ustáleném stavu, konkrétně pak netočivé složky napětí  $U_0$ , netočivé složky proudu postiženého vývodu  $I_{01}$  a nepostiženého vývodu  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{ZS}$ , kompenzačního proudu  $I_L$  (zobrazeného v měřítku 1:5), výstupního napětí měniče  $U_{me}$  a výstupního proudu měniče  $I_{me}$ .



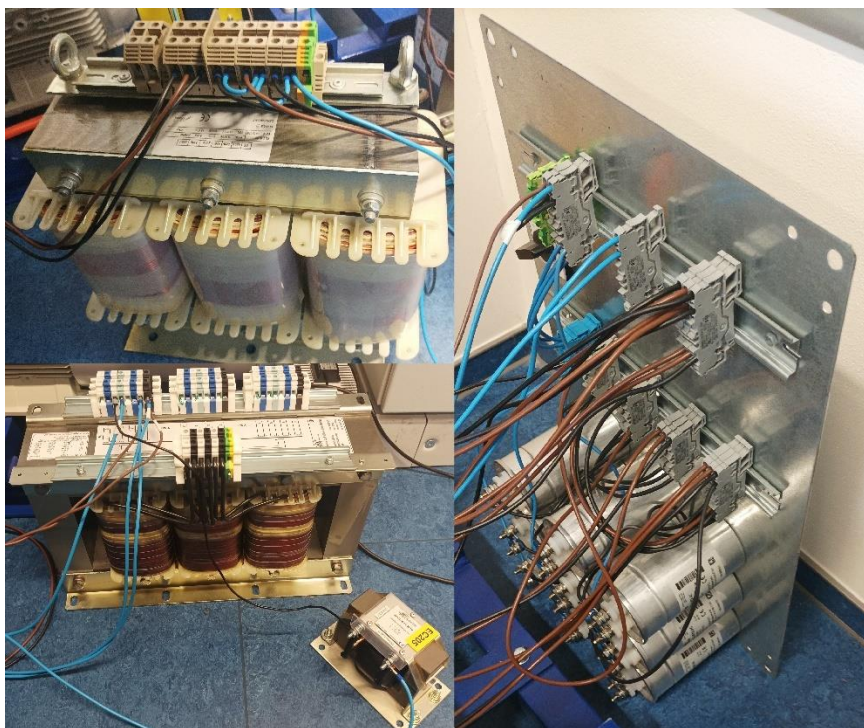
Obr. 13 Výsledky simulace – síť kompenzovaná měničem: Průběh netočivé složky napětí sítě  $U_0$ , netočivé složky proudu postiženého vývodu  $I_{01}$  a nepostiženého vývodu  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{ZS}$ , kompenzačního proudu  $I_L$  (zobrazeného v měřítku 1:5), výstupního napětí  $U_{me}$  a proudu  $I_{me}$  měniče

### 3 Fyzický model distribuční sítě

#### 3.1 Popis modelu

Sestavený fyzický model představuje neúčinně uzemněnou distribuční síť s napájecím transformátorem a dvěma vývody, přičemž kapacita vedení je na každém vývodu odlišná. Kapacitu jednotlivých vodičů proti zemi představují kondenzátory  $22 \mu\text{F}$  a ke stavbě modelu jich bylo použito celkem devět. Na prvním vývodu jsou na každou fázi zapojeny paralelně dva tyto kondenzátory, čímž dostáváme kapacitu  $44 \mu\text{F}$ , na druhém vývodu je pak pouze jeden kondenzátor na fázi a kapacita je tedy poloviční. Kondenzátory byly spolu s propojovacími svorkovnicemi umístěny na kovovou desku. Dále je zde spínač, kterým se realizuje jednofázové zemní spojení.

Během experimentů pak byly k základu modelu připojovány indukčnosti představující zhášecí tlumivku a odporník pro simulaci odporového zemního spojení. Další odporníky byly použity pro umělé zvýšení svodu sítě a zesílení reziduálního proudu ZS.



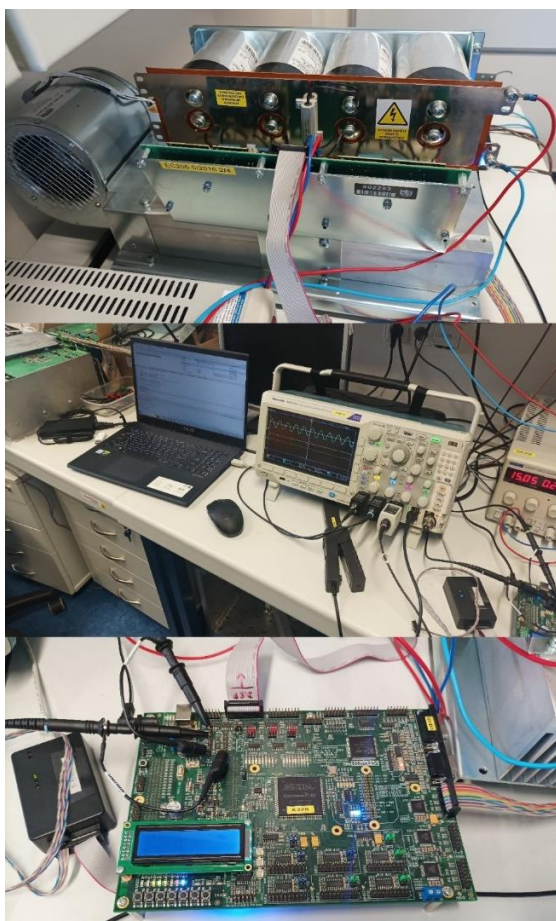
Obr. 14 Třífázový transformátor se sekundárním vinutím zapojeným do hvězdy a vyvedeným středem (vlevo nahoře), deska s kondenzátory představující model dvou vývodů soustavy s parazitními kapacitami vedení (vpravo), transformátor představující zhášecí tlumivku s pomocným vinutím pro připojení měniče a malá filtrační tlumivka (vlevo dole)

Model byl během experimentů napájen z třífázového laboratorního zdroje s nastavitelnou hodnotou výstupního napětí a kmitočtu. Během všech prováděných experimentů byl kmitočet nastaven na 50 Hz. Napětí zdroje je přivedeno na primární vinutí třífázového

transformátoru, který představuje transformátor VVN/VN distribuční soustavy. Sekundární vinutí tohoto transformátoru bylo zapojeno do hvězdy s vyvedeným středem a napájí model DS.

### 3.1.1 Měnič a jeho řízení

Řízený zdroj kompenzačního proudu představuje výkonový měnič na obr. 15. Jedná se o jednofázový napěťový střídač v můstkovém zapojení s tranzistory IGBT. Konkrétně jde o moduly SKM 400GB125D od firmy Semikron, ve kterých je integrován polomůstek ze dvou IGBT tranzistorů se zpětnými antiparalelními diodami. Jejich maximální blokovací napětí kolektor-emitor  $V_{CES}$  je 1200 V a maximální trvalý proud  $I_C$  je 300 A. Nad IGBT moduly je umístěn filtr stejnosměrného obvodu měniče tvořený čtyřmi paralelně spojenými kondenzátory o kapacitě  $4 \times 415 \mu\text{F}$ . Ze strany chladiče je pak upevněna DPS s budiči výkonových tranzistorů. Stejnoseměrný obvod měniče byl napájen z laboratorního zdroje stejnosměrného napětí o velikosti 60 V.



Obr. 15 Sestavený laboratorní prototyp s výkonovým měničem: jednofázový napěťový střídač (nahore), pohled na pracoviště během měření včetně instrumentace (uprostřed) a řídicí jednotka MLC interface s DSP (dole)

K řízení měniče byl použit vývojový kit MLC interface, vyvinutý na fakultě elektrotechnické ZČU. Jedná se o řídicí jednotku s digitálním signálovým procesorem Texas Instruments TMS320F28335 (150 MHz) a periferiemi pro řízení měničů.

Kromě čtyř PWM výstupů pro řízení jednofázového H-můstku byly využity čtyři z celkem dvaceti čtyř analogových vstupů s osmnáctibitovými A/D převodníky, pomocí kterých byly zpracovávány signály z čidel, viz následující kapitola. Během vývoje řídicího software bylo třeba zobrazovat různé signály na osciloskopu. K tomu posloužily analogové výstupy s D/A převodníky, jejichž rozlišení je 12 bitů [9].

### 3.1.2 Proudová a napěťová čidla

K měření netočivé složky napětí  $U_0$ , netočivých složek proudu obou vývodů  $I_{01}$  a  $I_{02}$  i výstupního proudu měniče  $I_{me}$  byl použit přípravek s napěťovým převodníkem LEM LV 20-P a proudovými čidly LEM LA 55-P. Pro měření netočivé složky proudu byly skrz čidlo protaženy všechny tři fázové vodiče, jedná se tedy o součtové měření představující měření vývodu součtovým transformátorem proudu na rozvodně DS. Signály z čidel byly snímány A/D převodníky na desce MLC interface.

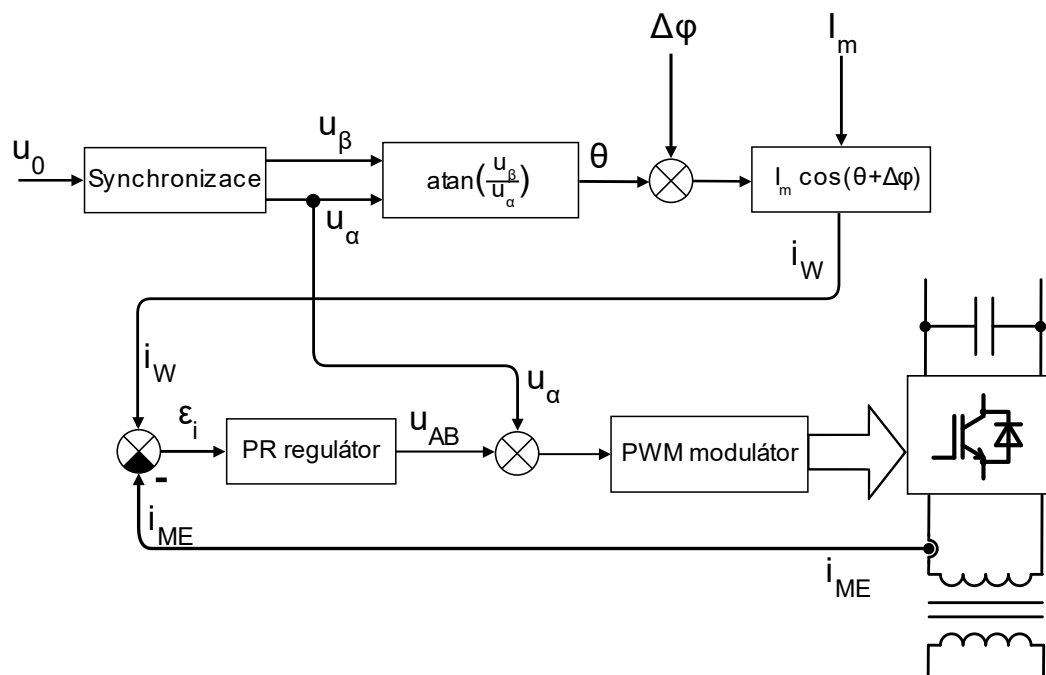
## 3.2 Řídicí algoritmy

Byly navrženy, implementovány a verifikovány algoritmy řízení pracující v reálném čase. Kód pro mikrokontroler v MLC interface byl implementován v programovacím jazyce C. Bylo použito vývojové prostředí Code Composer Studio od Texas Instruments. Byla použita vzorkovací perioda řízení 100  $\mu$ s. Od toho se odvíjí frekvence vzorkování měřených signálů (10 kHz) a také spínací frekvence měniče (5 kHz).

Na začátku přerušeni probíhá spuštění převodu v A/D převodníku. Po jeho dokončení jsou získané hodnoty signálu s využitím kalibračních konstant přepočteny na hodnoty proudů  $i_{01}$ ,  $i_{02}$ ,  $i_{ME}$  a napětí  $u_0$ . Ty jsou v bloku softwarových ochran dále porovnány s nastavenými maximy těchto veličin a v případě, že jejich absolutní hodnota toto maximum překračuje, dojde k zablokování spínání tranzistorů, tedy k vypnutí měniče.

Dále se provádí úkony související se synchronizací měniče. Dva různé synchronizační algoritmy, které byly testovány, jsou popsány níže. Výsledkem těchto algoritmů je hodnota

úhlu  $\theta$  popisující aktuální fázový úhel základní harmonické netočivé složky napětí  $u_0$ . Na obr. 16 je vidět blokové schéma regulační smyčky.



Obr. 16 Blokové schéma řízení měniče

Na vstupu je provedena synchronizace s netočivou složkou napětí  $u_0$ . Výstupem synchronizačního algoritmu jsou signály  $u_\alpha$  a  $u_\beta$ , které představují odhad složek rotujícího napětíového vektoru základní harmonické složky  $u_0$  ve stojícím souřadném systému. Z těchto hodnot je vypočten úhel  $\theta$ :

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{u_\beta}{u_\alpha} \right). \quad (3.1)$$

Na základě zadané hodnoty požadovaného fázového posunu generovaného kompenzačního proudu oproti netočivé složce napětí sítě  $u_0$  a požadované amplitudy kompenzačního proudu  $I_m$  je generován průběh požadovaného proudu  $i_w$ . Odchylka skutečného výstupního proudu měniče  $i_{me}$  od požadovaného proudu  $i_w$  je zpracována proporcionalně-rezonančním (PR) regulátorem. K výstupnímu signálu PR regulátoru se v rámci dopředného řízení přičítá reálná složka odhadovaného napětí  $u_\alpha$ . Výsledkem je signál, kterým je modulováno výstupní napětí měniče.

### 3.2.1 Synchronizace pomocí algoritmu SOGI

Algoritmus SOGI (Second Order Generalized Integrator) vytváří odhad složek rotujícího napětíového vektoru  $u_\alpha$  a  $u_\beta$  (základní harmonické) ve stojícím souřadném systému. V tomto případě probíhá synchronizace s měřeným napětím netočivé složky  $u_0$ .

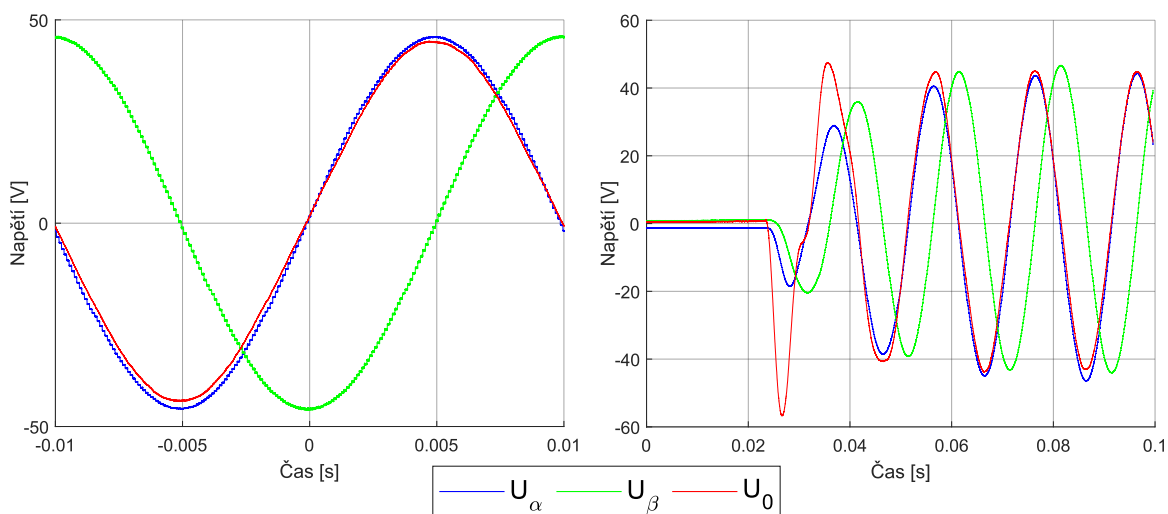
Funkci synchronizačního algoritmu SOGI lze popsat rovnicí:

$$\begin{bmatrix} \frac{du_\alpha}{dt} \\ \frac{du_\beta}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + K_R \begin{bmatrix} \varepsilon_u \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

kde  $\omega$  je úhlová frekvence základní harmonické,  $K_R$  je rezonanční zesílení a  $\varepsilon_u$  je odchylka okamžité hodnoty  $u_\alpha$  od  $u_0$ :

$$\varepsilon_u = u_0 - u_\alpha. \quad (3.3)$$

Je provedena integrace pomocí Eulerovy metody. Průběh  $u_\alpha$  představuje odhadovanou reálnou složku základní harmonické,  $u_\beta$  pak složku imaginární. Funkčnost algoritmu byla ověřena porovnáním průběhu napětí  $u_0$  měřeného přímo osciloskopickou sondou a průběhů  $u_\alpha$  a  $u_\beta$ , které byly odesílány na D/A převodníky a měřeny na analogových výstupech MLC interface. Výstupní signál  $u_\alpha$  je počítán a odesílán na D/A převodník s periodou 100  $\mu$ s. Jelikož vzorkovací perioda osciloskopu byla výrazně vyšší, jsou na nasnímaných průbězích patrné skokové změny. Tyto průběhy jsou zobrazeny na obr. 17 a to v ustáleném stavu i během přechodového děje po připojení modelu sítě k napájení. Průběhy  $u_\alpha$  a  $u_\beta$  se ustálí již po uplynutí doby několika period  $u_0$ .



Obr. 17 Průběhy  $U_\alpha$  a  $U_\beta$  generované synchronizačním algoritmem SOGI a jejich porovnání s průběhem  $U_0$  v ustáleném stavu (vlevo) a při zapnutí napájení modelu (vpravo)

Během experimentů s kompenzací ZS měničem, kdy bylo  $u_0$  výrazně deformováno v důsledku nedokonalé filtrace proudu měniče, se tento algoritmus jevil jako méně spolehlivý a při určité velikosti generovaného proudu docházelo ke ztrátám synchronizace. Z toho důvodu byl dále používán synchronizační algoritmus založený na DFT.

### 3.2.2 Synchronizace pomocí Fourierovy transformace

Tento algoritmus je založen na analýze navzorkovaného signálu  $u_0$  pomocí diskrétní Fourierovy transformace (DFT). Pro harmonickou řádu  $n$  platí:

$$U(n) = \sum_{k=1}^{N-1} u(k) e^{-jnk\frac{2\pi}{N}}, \quad (3.4)$$

kde  $u(k)$  je posloupnost vzorků napětí  $u_0$  odebraných za dobu jedné periody a  $N$  je počet těchto vzorků. V našem případě je počítána pouze jediná složka, základní harmonická  $U(1)$ . Pro její reálnou složku  $u_\alpha$  a imaginární složku  $u_\beta$  platí:

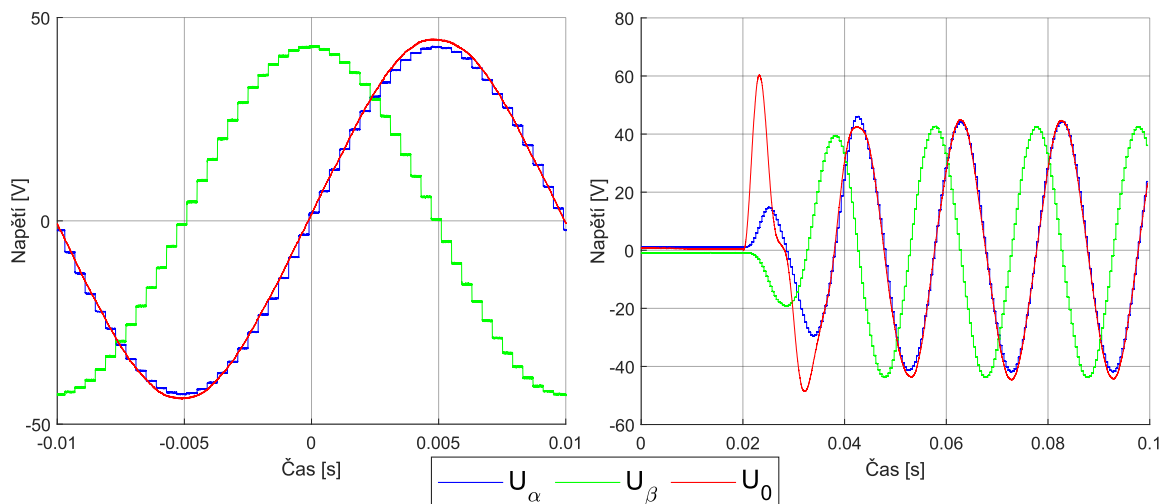
$$u_\alpha = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \cos\left(k\frac{2\pi}{N}\right), \quad (3.5)$$

$$u_\beta = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) \sin\left(k\frac{2\pi}{N}\right). \quad (3.6)$$

Je zde využit princip tzv. plovoucího vzorkovacího okna. Vzorky  $u(k)$  jsou uchovávány v registru o délce  $N$ . Každý nově odebraný vzorek je uložen na začátek registru a současně je z registru odstraněn poslední nejstarší vzorek. Pro zrychlení provádění výpočtu jsou hodnoty funkcí kosinus a sinus pro dané  $N$  a pro všechna  $k$  uložena v paměti mikrokontroleru (vypočtena jsou při spuštění programu).

Provádění funkce, která se spouští při přerušení, nesmí trvat déle, než je doba mezi jednotlivými přerušeními, tedy v našem případě 100  $\mu\text{s}$ . Doba výpočtu  $u_\alpha$  a  $u_\beta$  prostřednictvím tohoto algoritmu samozřejmě závisí na počtu vzorků  $N$  odebraných za jednu periodu  $u_0$ . Za účelem zkrácení této doby se vzorek odebíral jen v každém čtvrtém kroku. Perioda vzorkování se tak zvýšila na 400  $\mu\text{s}$  a počet vzorků  $N$  klesl na čtvrtinu ( $N = 50$ ).

Hodnoty  $u_\alpha$  a  $u_\beta$  jsou aktualizovány každých 400  $\mu\text{s}$ , jak je vidět na obr. 18, kde jsou tyto generované průběhy opět porovnávány se skutečným průběhem  $U_0$ . Obr. 18 zachycuje i přechodový děj při zapnutí napájení. K ustálení zde došlo po jedné celé periodě  $U_0$ .



Obr. 18 Průběhy  $U_\alpha$  a  $U_\beta$  generované synchronizačním algoritmem DFT a jejich porovnání s průběhem  $U_0$  v ustáleném stavu (vlevo) a při zapnutí napájení modelu (vpravo)

### 3.2.3 Regulace výstupního proudu měniče

Cílem řízení je, aby měnič generoval proud s určitým fázovým posuvem  $\Delta\varphi$  vůči napětí  $U_0$  a amplitudou  $I_m$ . Hodnoty  $I_m$  a  $\Delta\varphi$  jsou zadány ručně před spuštěním měniče a okamžitá hodnota požadovaného proudu  $i_W$  je vypočtena následovně:

$$i_W = I_m \cos(\theta + \Delta\varphi). \quad (3.7)$$

Výstupní proud měniče  $i_{ME}$  je řízen pomocí proporcionálně-rezonančního (PR) regulátoru. Výstupem tohoto regulátoru, tedy akční veličinou je napětí  $u_{AB}$ . Tímto napětím je pak řízen střídač.

PR regulátor byl implementován dle následujících vztahů:

$$\varepsilon_i = i_W - i_{ME}, \quad (3.8)$$

kde  $\varepsilon_i$  je odchylka proudu od požadované hodnoty,

$$s(k+1) = s(k) + y(k), \quad (3.9)$$

$$y(k+1) = y(k) + \varepsilon_i K_R \Delta t - s(k+1) (\omega \Delta t)^2, \quad (3.10)$$

kde  $\Delta t$  je perioda vzorkování ( $100 \mu s$ ),  $\omega$  je úhlová frekvence základní harmonické a  $K_R$  je zesílení rezonanční složky regulátoru. Výstupním signálem PR regulátoru je signál  $u_{AB}$ , který je součtem výstupu rezonanční složky regulátoru  $y(k)$  a proporcionální složky:

$$u_{AB}(k) = y(k) + \varepsilon_i K_P, \quad (3.11)$$

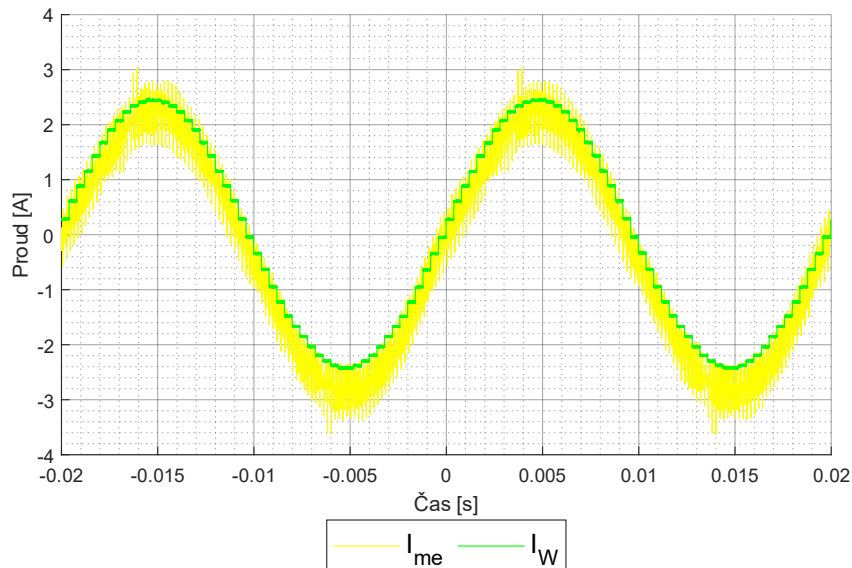
kde  $K_P$  je zesílení proporcionální složky regulátoru. Během experimentálního měření bylo použito následující naladění regulátoru:

$$K_R = 10,$$

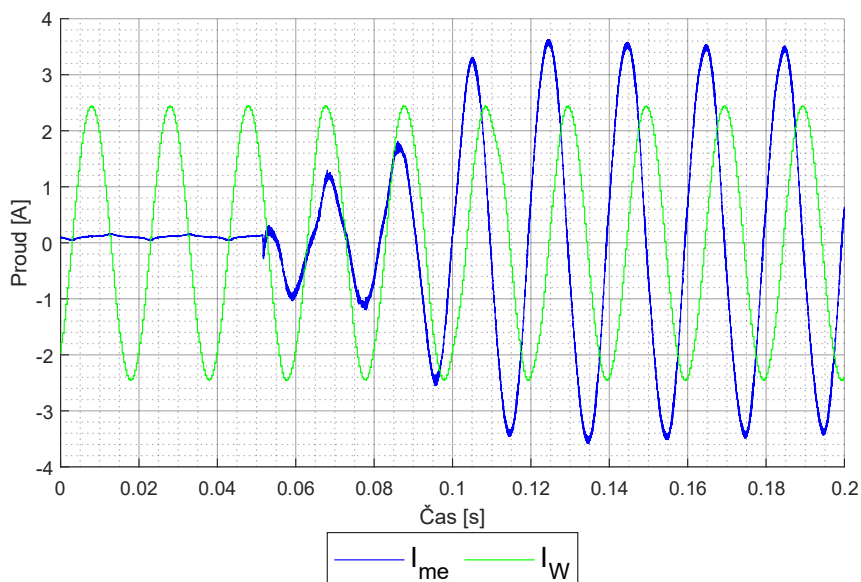
$$K_P = 4.$$



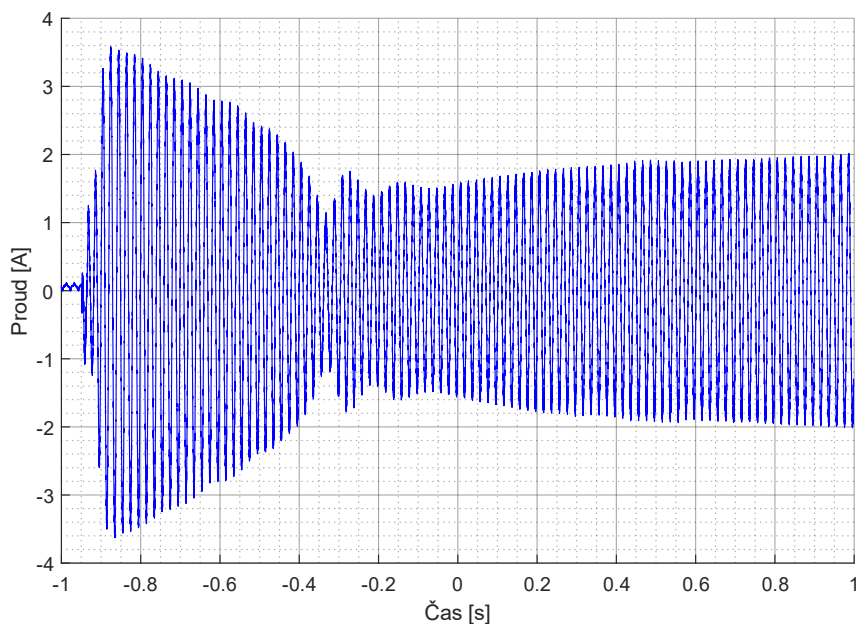
Na obr. 19 až 21 je demonstrována činnost řízení měniče. Jsou zobrazeny průběhy požadované hodnoty proudu  $I_W$  a skutečného výstupního proudu měniče  $I_{me}$  měřeného klešťovou sondou. Průběhy byly nasnímány během experimentu popsáno v kapitole 4.3 při nastavené amplitudě požadovaného proudu  $I_m = 2,5$  A a fázového posunu  $\Delta\varphi = -1,45$  rad.



Obr. 19 Průběh požadované hodnoty proudu  $I_W$  a skutečného výstupního proudu  $I_{me}$  v ustáleném stavu



Obr. 20 Požadovaný proud  $I_W$  a skutečný proud měniče  $I_{me}$  v okamžiku zapnutí měniče


 Obr. 21 Výstupní proud měniče  $I_{me}$ . přechodový děj při spuštění měniče

### 3.2.4 Modulace

Z hodnoty napětí  $u_{AB}$  jsou vypočtena modulační napětí  $u_A$  a  $u_B$  pro obě větve měniče.

$$u_A = \frac{u_{AB}}{2} \quad (3.12)$$

$$u_B = -u_A \quad (3.13)$$

Hodnoty  $u_A$  a  $u_B$  jsou následně omezeny tak, aby se pohybovaly v intervalu  $\langle \frac{U_{DC}}{2}; \frac{-U_{DC}}{2} \rangle$ . Následně jsou tyto hodnoty vyděleny polovinou  $U_{DC}$  a získáme modulační signály  $m_A$   $m_B$ , které se pohybují v intervalu  $\langle -1; 1 \rangle$  a udávají střídání jednotlivých větví měniče.

$$m_A = \frac{2u_A}{U_{DC}} \quad (3.14)$$

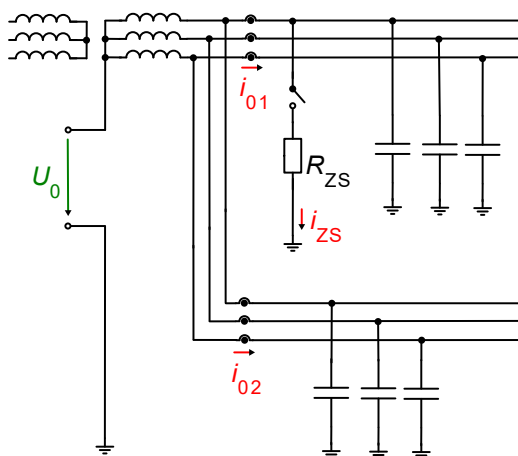
$$m_B = \frac{2u_B}{U_{DC}} \quad (3.15)$$

Narozdíl od matematického modelu je u reálného měniče nutné zajistit, aby řídicí PWM signály obsahovaly mrtvé časy (dead time), přestože díky nim vzniká odchylka mezi skutečným modulačním napětím a napětím  $u_{AB}$ . Nejvýraznější odchylka nastává při hodnotách  $u_{AB}$  blízkých nule. V našem případě byly mrtvé časy nastaveny na 2,5  $\mu$ s.

## 4 Experimentální měření na laboratorním prototypu

### 4.1 Zemní spojení v izolované síti

První fáze verifikace probíhala na modelu izolované sítě (viz obr. 22), u které bylo zkoumáno chování při nekompenzovaném zemním spojení. Fázové napětí zdroje napájecího primární vinutí transformátoru bylo nastaveno na 10 V, stejná hodnota byla následně použita i při ostatních měřeních. Na sekundární straně transformátoru se pak efektivní hodnota fázového napětí pohybovala kolem 30 V. Odpor  $R_{ZS}$  byl tvořen reostatem, na kterém byly postupně nastavovány hodnoty odporu  $Z_S$  od 20  $\Omega$  do 100  $\Omega$ . Při simulaci kovového zemního spojení ( $R_{ZS} = 0 \Omega$ ) byl reostat z obvodu vyřazen a byl nahrazen zkratem.



Obr. 22 Zapojení fyzického modelu pro simulaci  $Z_S$  v izolované síti

Během experimentu byly osciloskopem měřeny netočivé složky proudu jednotlivých vývodů  $I_{01}$  a  $I_{02}$ , netočivá složka napětí  $U_0$  a proud zemního spojení  $I_{ZS}$ , a to při různých hodnotách odporu  $R_{ZS}$ . Smysl měřeného proudu odpovídá šipkám ve schématu. Naměřené průběhy byly zpracovány pomocí softwaru Matlab.

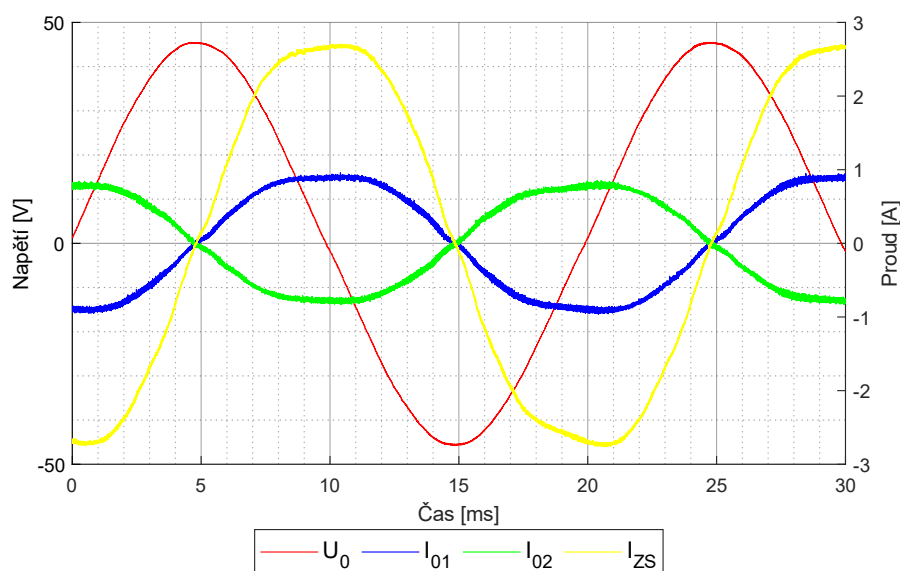
Amplituda základní harmonické složky napětí  $U_0$  a poruchového proudu  $I_{ZS}$  při různých hodnotách  $R_{ZS}$  je uvedena v tabulce 4.

Tab. 4 Výsledky experimentu: Hodnoty amplitudy základní harmonické napětí  $U_0$  a proudu  $I_{ZS}$  při různých hodnotách odporu zemního spojení  $R_{ZS}$

$R_{ZS}$ [ $\Omega$ ]	$U_0$ [V]	$I_{ZS}$ [A]
0	44,611	2,869
20	25,325	1,633
40	15,085	0,978
60	10,455	0,687
80	7,902	0,538
100	6,308	0,438

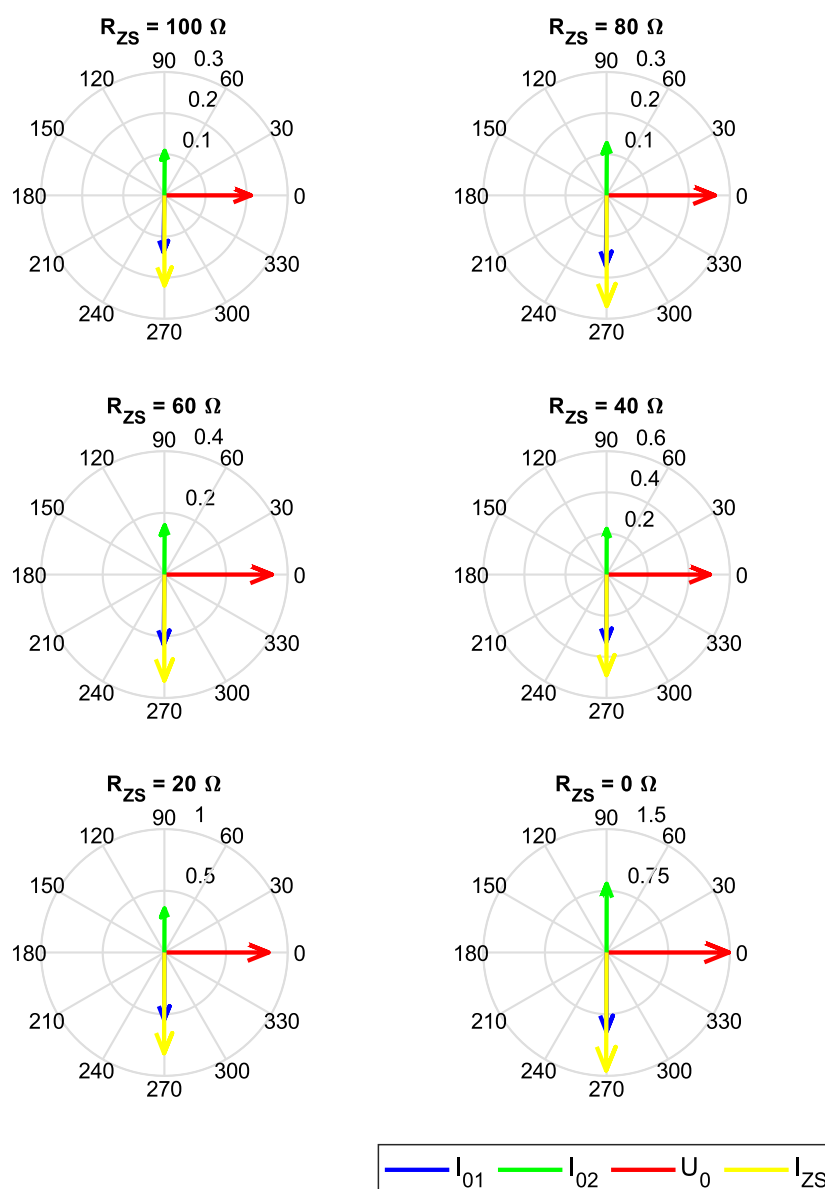
Amplituda základní harmonické proudu  $I_{ZS}$  naměřeného při kovovém zemním spojení (tedy při  $R_{ZS} = 0 \Omega$ ) je důležitou hodnotou, kterou můžeme porovnávat s hodnotami při dalších experimentech a demonstrovat tak účinek kompenzace základní harmonické.

Na obrázku 23 jsou časové průběhy netočivé složky napětí  $U_0$ , netočivé složky proudu postiženého vývodu  $I_{01}$  a nepostiženého vývodu  $I_{02}$  a proudu zemního spojení  $I_{ZS}$  při kovovém zemním spojení (při  $R_{ZS} = 0 \Omega$ ).



Obr. 23 Výsledky experimentu – ZS v izolované síti: časové průběhy netočivé složky napětí  $U_0$ , netočivé složky proudu postiženého vývodu  $I_{01}$ , nepostiženého vývodu  $I_{02}$  a poruchový proud  $I_{ZS}$  při kovovém zemním spojení v izolované síti

Prostřednictvím Fourierovy transformace byla zjišťována amplituda a fáze základní harmonické (50 Hz) těchto veličin a byly vytvořeny fázorové diagramy (viz obrázek 24).

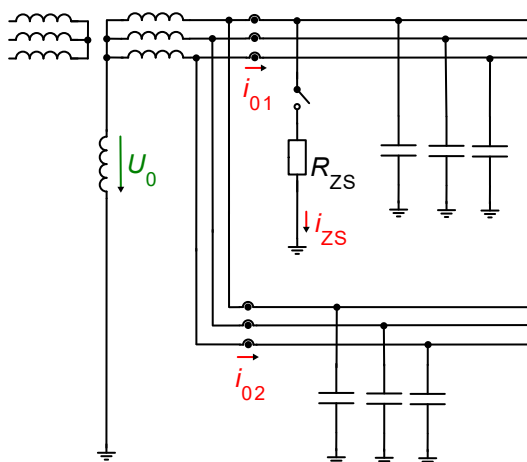


Obr. 24 Výsledky experimentu – ZS v izolované síti: Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:30), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  a proudu  $I_{ZS}$  (v měřítku 1:2) při ZS na vývodu č. 1 v izolované síti

Jak můžeme vidět, netočivé složky proudů obou vývodů jsou vůči sobě v protifázi. U poruchového proudu  $I_{ZS}$  výrazně převládá jalová složka, což znamená, že je v síti minimální svod (případný svod by zde mohl být způsoben pouze nedokonalostí dielektrika kondenzátorů). Z průběhu  $I_{ZS}$  také vidíme, že obsahuje též vyšší harmonické složky. Ty jsou pravděpodobně způsobené mírnou deformací průběhu napájecího napětí v důsledku lokálního přesycování jádra transformátoru, který je zatížen značně nesymetrickou zátěží. Se změnou odporu ZS se mění velikost  $U_0$  i ostatních veličin, jejich poměr i vzájemný fázový posun však zůstává stejný.

## 4.2 Zemní spojení kompenzované zhášecí tlumivkou

Připojením tlumivky mezi uzel sítě a zem se nám z předchozího zapojení stává model neúčinně uzemněné sítě, který vidíme na obrázku 25.



Obr. 25 Zapojení fyzického modelu sítě kompenzované tlumivkou

Během tohoto experimentu byl zkoumán stav částečné kompenzace podladěnou zhášecí tlumivkou (příliš velká indukčnost  $L_1$ ), dále překompenzovaný stav (příliš nízká indukčnost  $L_2$ ) a také stav téměř dokonale naladěné tlumivky (indukčnost  $L_3$ ). Tlumivka s plynule nastavitelnou indukčností však nebyla k dispozici a různých hodnot indukčnosti bylo dosaženo použitím různých tlumivek.

Jako indukčnost  $L_1$  bylo použito jedno vinutí třífázového pětisloupkového transformátoru, přičemž ostatní vinutí tohoto transformátoru byla naprázdno. Indukčnost  $L_2$  tvořila tlumivka o jmenovité indukčnosti 5 mH.

Indukčnost  $L_3$  byla zvolena tak, aby stav sítě byl co nejbližší dokonalému vykompenzování. Tomu se nejvíce blížila sériová kombinace dvou tlumivek, každá o jmenovité indukčnosti 20 mH (tedy celkem 40 mH).

Stejně jako při předchozím experimentu byly měřeny netočivé složky proudů obou vývodů  $I_{01}$  a  $I_{02}$ , poruchový proud  $I_{ZS}$  a netočivá složka napětí  $U_0$ , navíc zde byl měřen i proud tlumivky  $I_L$ , tj. kompenzační proud. V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty amplitudy základní harmonické složky  $U_0$  a proudu  $I_{ZS}$  při kovovém ZS i při  $R_{ZS} = 100 \Omega$ . Také jsou zde hodnoty skutečné indukčnosti tlumivek, vypočtené na základě předpokladu:

$$X_L = |Z| = \frac{U_0}{I_L}, \quad (4.1)$$

$$L = \frac{X_L}{\omega}. \quad (4.2)$$

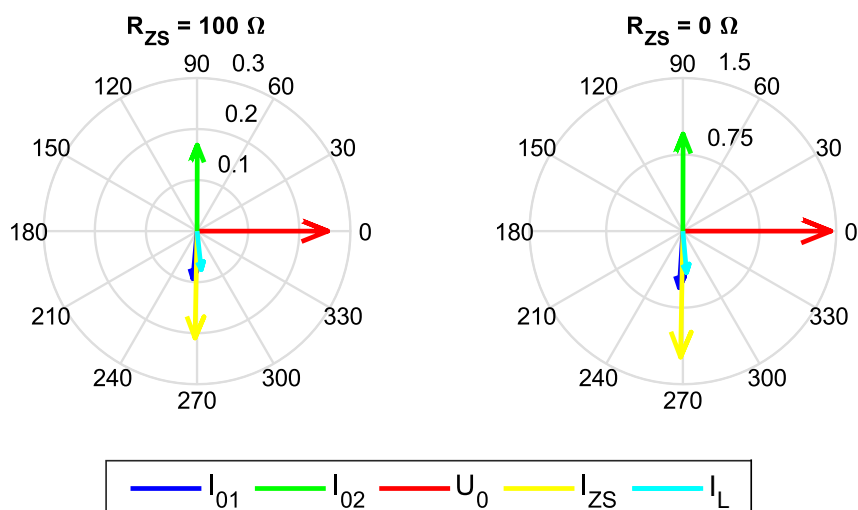
Tyto vztahy samozřejmě nezohledňují odpor vinutí tlumivky ani její případnou nelinearitu. Jedná se pouze o přibližné stanovení indukčnosti tlumivky.

Tab. 5 Vypočtená indukčnost tlumivek  $L$  a amplitudy základní harmonické napětí  $U_0$  a proudů  $I_L$  a  $I_{ZS}$

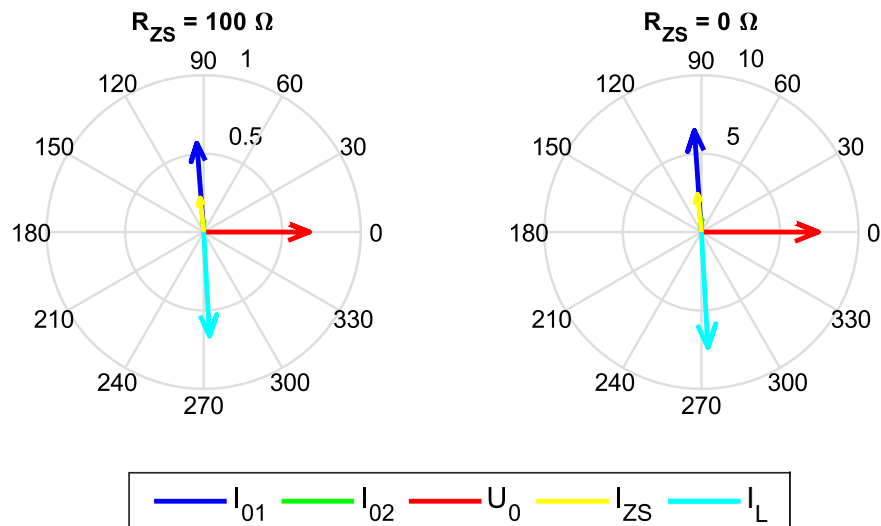
Tlumivka	Indukčnost $L$ [mH]	$R_{ZS} = 0 \Omega$			$R_{ZS} = 100 \Omega$		
		$U_0$ [V]	$I_L$ [A]	$I_{ZS}$ [A]	$U_0$ [V]	$I_L$ [A]	$I_{ZS}$ [A]
$L_1$	330,0	43,429	0,408	2,470	7,669	0,076	0,419
$L_2$	6,4	14,881	7,372	4,807	1,345	0,664	0,435
$L_3$	38,6	34,379	2,840	0,103	27,981	2,299	0,083

Vidíme, že vypočtená indukčnost tlumivek  $L_2$  a  $L_3$  se od štítkových hodnot (5 mH respektive 40 mH) liší o jednotky mH. Porovnáním hodnot základní harmonické poruchového proudu  $I_{ZS}$  s hodnotou, které tento proud dosahoval při nekompensovaném ZS v izolované síti (což bylo 2,869 A pro  $R_{ZS} = 0$ ) zjišťujeme, že s indukčností  $L_1$  poruchový proud poklesl pouze o 14 % jeho původní hodnoty. Indukčnost  $L_2$  nám poruchu naopak výrazně zhoršila. Indukčnost  $L_3$  je poměrně blízko rezonance s kapacitou sítě a proud  $I_{ZS}$  je nižší o 96 %. Všimněme si také toho, že tlumivka v rezonanci ( $L_3$ ) nám při odporovém ZS zvyšuje napětí  $U_0$  oproti stavům mimo rezonanci (pokles  $U_0$  při zvýšení odporu poruchy ( $R_{ZS} = 100$ ) je při použití tlumivky  $L_3$  menší než v případě  $L_1$  a  $L_2$ ).

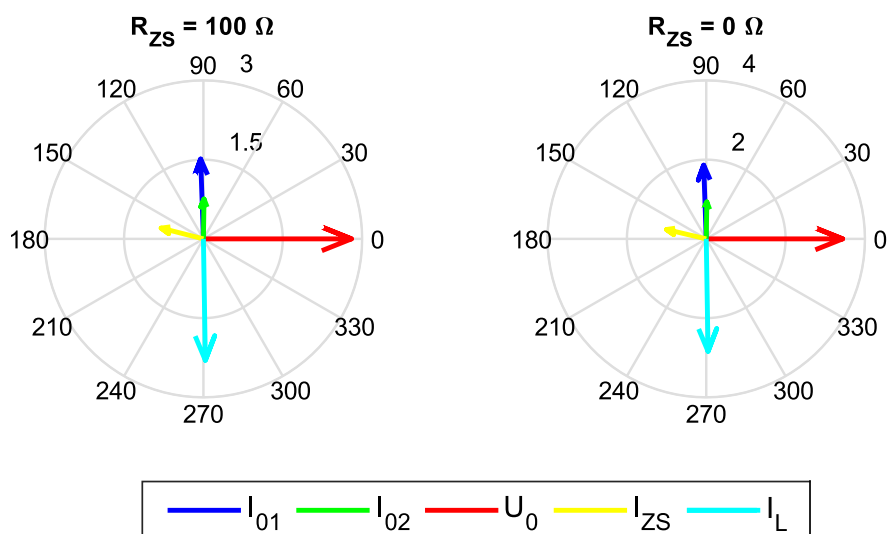
Na obrázcích 26 až 28 jsou fázorové diagramy základních harmonických složek všech měřených veličin, tedy netočivé složky napětí sítě  $U_0$ , proudu vývodu s poruchou  $I_{01}$  a vývodu bez poruchy  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{ZS}$  a kompenzačního proudu  $I_L$ .



Obr. 26 Výsledky experimentu s tlumivkou  $L_1$  (nedokompensováno): Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:30), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ , proudu  $I_{ZS}$  (v měřítku 1:2) a kompenzačního proudu  $I_L$



Obr. 27 Výsledky experimentu s tlumivkou  $L_2$  (překompenzováno): Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:2), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ , proudu  $I_{ZS}$  (v měřítku 1:2) a kompenzačního proudu  $I_L$

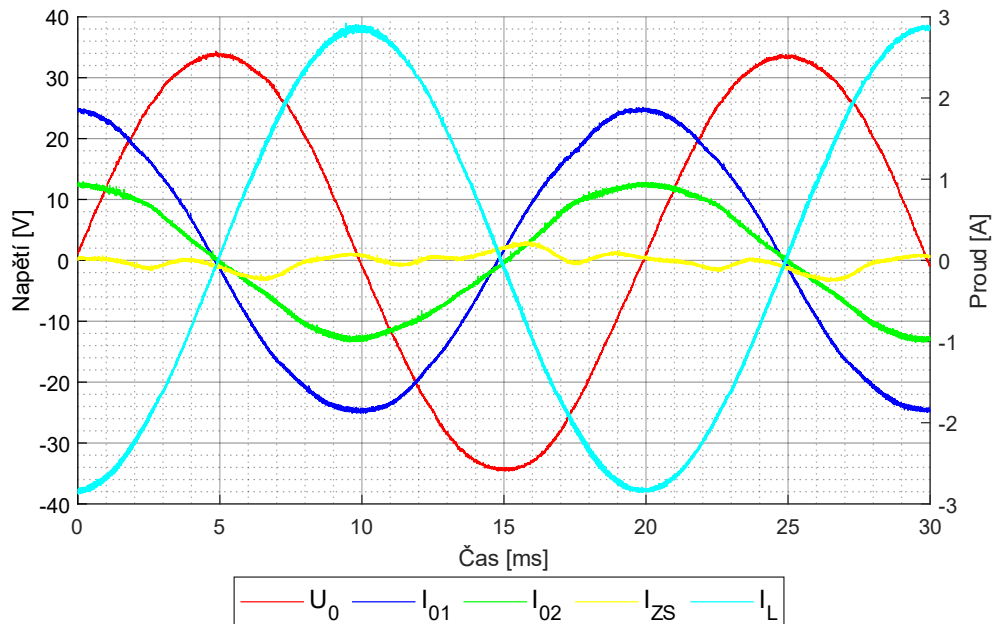


Obr. 28 Výsledky experimentu s tlumivkou  $L_3$  (téměř vykompenzáno): Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:10), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ , proudu  $I_{ZS}$  (v měřítku 10:1) a kompenzačního proudu  $I_L$

Z výše uvedených fázorových diagramů je patrné, že kompenzací se mění velikost i fáze netočivé složky proudu na nepostiženém vývodu. S tlumivkou naladěnou do rezonance (čemuž je nejbližší  $L_3$ ) se  $I_{01}$  a  $I_{02}$  dostávají do fáze a poruchový proud  $I_{ZS}$  zároveň dosahuje minima a má převážně činný charakter. Kromě svodu sítě však k této činné složce přispívá i samotná tlumivka svými ztrátami, díky kterým má i proud  $I_L$  svou činnou složku (což je nejvíce patrné u  $L_1$  a  $L_2$ ).



Na obrázku 29 jsou zobrazeny časové průběhy sledovaných veličin, naměřené při kovovém ZS kompenzovaném tlumivkou  $L_3$ . Je zde patrné, že ve zbytkovém proudu  $I_{ZS}$  je vysoký podíl vyšších harmonických.

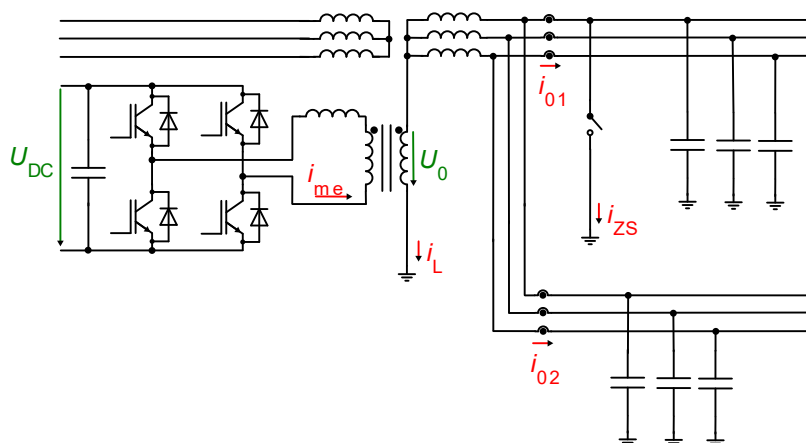


Obr. 29 Výsledky experimentu – kompenzace ZS zhasívací tlumivkou: Průběhy netočivé složky napětí sítě  $U_0$ , proudu postiženého vývodu  $I_{01}$ , proudu nepostiženého vývodu  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{ZS}$  a kompenzačního proudu  $I_L$  při kovovém zemním spojení kompenzovaném tlumivkou  $L_3$

### 4.3 Kompenzace proudu ZS prostřednictvím měniče

Na obrázku 30 je schéma modelu sítě kompenzované měničem, připojeným k uzlu sítě přes transformátor. Byl použit stejný transformátor, jehož jedno vinutí bylo v předchozím experimentu použito jako indukčnost  $L_1$ . Toto vinutí bylo mezi uzlem a zem připojeno i nyní a sloužilo jako primární vinutí. Další vinutí o stejných parametrech umístěné na stejném sloupku bylo použito jako sekundární a měnič k němu byl připojen přes filtrační tlumivku o jmenovité indukčnosti  $100 \mu\text{H}$ . Převod transformátoru byl 1:1.

Zdroj napájející stejnosměrný obvod měniče byl nastaven na napětí  $U_{DC} = 60 \text{ V}$ . Na střídavém zdroji bylo nastaveno stejné napětí jako v předchozích případech. Amplituda  $U_0$  se při kovovém ZS opět pohybovala kolem 43 V.



Obr. 30 Kompenzace zemního spojení pomocí měniče

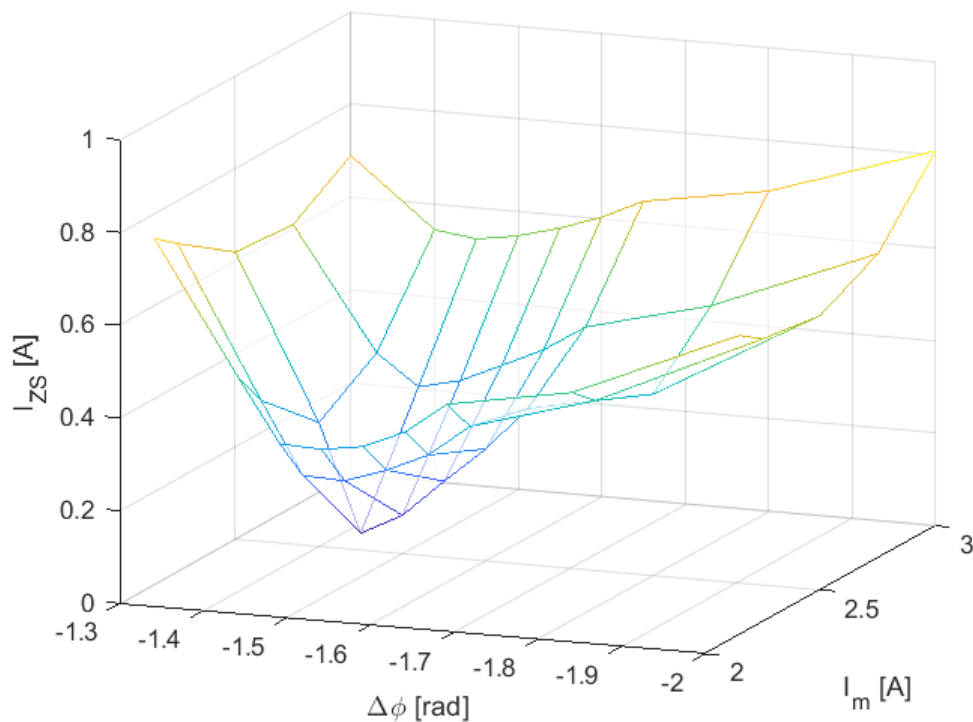
Chování soustavy při vypnutém měniči odpovídá síti v předchozím experimentu (kapitola 4.2) s indukčností  $L_1$ , která poruchový proud kompenzuje pouze částečně (amplituda  $I_{ZS}$  byla 2,47 A). Následně byl měnič aktivován a řízen jako zdroj proudu o amplitudě  $I_m$ , fázově posunutém oproti napětí  $U_0$  o úhel  $\Delta\varphi$ . Hodnoty  $I_m$  a  $\Delta\varphi$  byly zadávány ručně před spuštěním, případně i během chodu měniče (nadřazené řízení nebylo předmětem řešení této práce).

Na základě měření poruchového proudu  $I_{ZS}$  byla nalezena oblast hodnot  $I_m$  a  $\Delta\varphi$ , ve které proud dosahoval minima. Poté byla provedena série měření pro několik různých hodnot  $I_m$  a  $\Delta\varphi$  v okolí tohoto minima. Fourierovou transformací pak byla zjišťována amplituda základní harmonické složky  $I_{ZS}$ , výsledky jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Výsledky experimentu – kompenzace pomocí výkonového měniče: Hodnoty amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$  při různých hodnotách amplitudy požadovaného proudu  $I_m$  a úhlu  $\Delta\varphi$ . Barevně je vyznačeno dosažené minimum

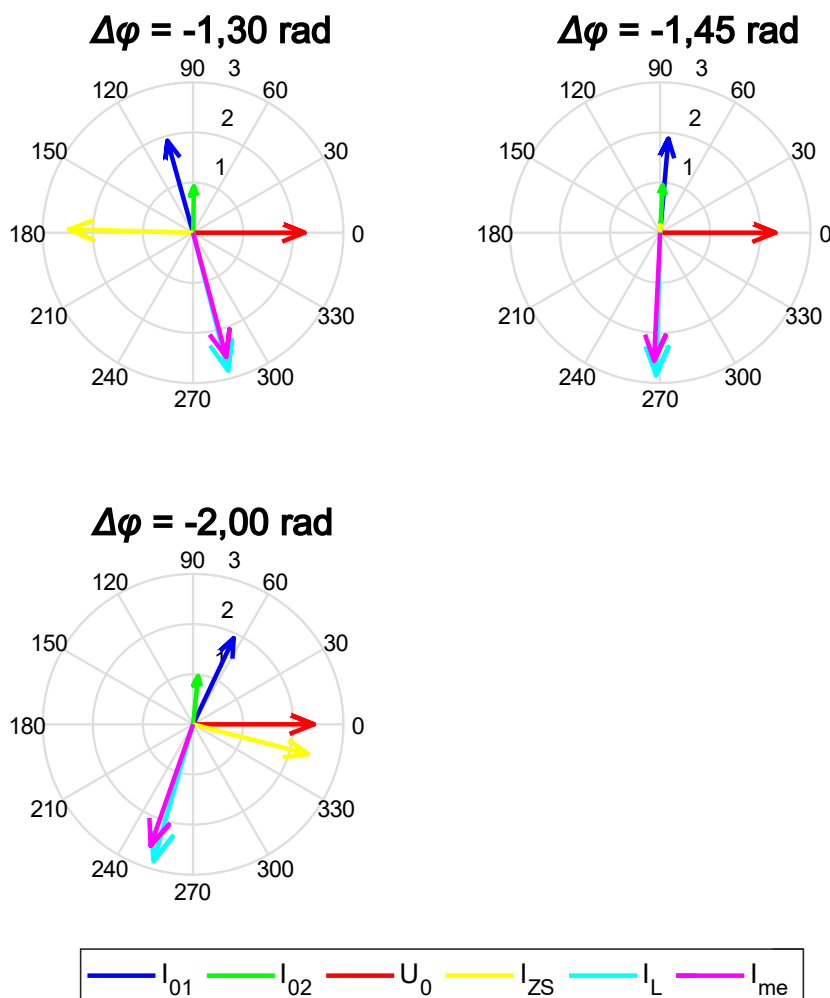
		Amplituda požadovaného proudu $I_m$ [A]				
		2,15	2,25	2,50	2,75	3,00
Fázový posun $\Delta\varphi$ [rad]	-1,30	0,745	0,707	0,619	0,610	0,690
	-1,40	0,462	0,384	0,267	0,349	0,545
	-1,45	0,326	0,230	0,036	0,283	0,533
	-1,50	0,322	0,226	0,083	0,304	0,547
	-1,55	0,336	0,257	0,164	0,345	0,572
	-1,60	0,375	0,297	0,242	0,386	0,603
	-1,65	0,442	0,367	0,336	0,443	0,645
	-1,80	0,491	0,446	0,391	0,513	0,691
	-2,00	0,645	0,610	0,592	0,656	0,809

Zjištěné hodnoty amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$ , v závislosti na amplitudě  $I_m$  a fázovém posunu  $\Delta\varphi$  požadovaného kompenzačního proudu jsou též zobrazeny prostřednictvím grafu na obr. 31.



Obr. 31 Výsledky experimentu – kompenzace pomocí výkonového měniče: Graf amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$  v závislosti na generovaném proudu (velikosti  $I_m$  a úhlu  $\Delta\varphi$ ). Minimum  $I_{ZS}$  dosahuje hodnoty 36 mA a nastává při amplitudě generovaného proudu  $I_m = 2,5$  A a úhlu  $\Delta\varphi = -1,45$  rad.

Kromě poruchového proudu  $I_{ZS}$  byly opět měřeny i proudy vývodů  $I_{01}$  a  $I_{02}$ , celkový kompenzační proud  $I_L$ , napětí  $U_0$  a také výstupní proud měniče  $I_{me}$ . Základní harmonické složky těchto veličin jsou znázorněny ve fázorových diagramech na obr. 32. Tyto fázorové diagramy se vztahují k nastavenému proudu  $I_m = 2,5$  A, při kterém bylo dosaženo minimum  $I_{ZS}$  a ke třem vybraným hodnotám  $\Delta\varphi$ , z nichž jedna odpovídá stavu úplného minima  $I_{ZS}$  ( $\Delta\varphi = -1,45$  rad).

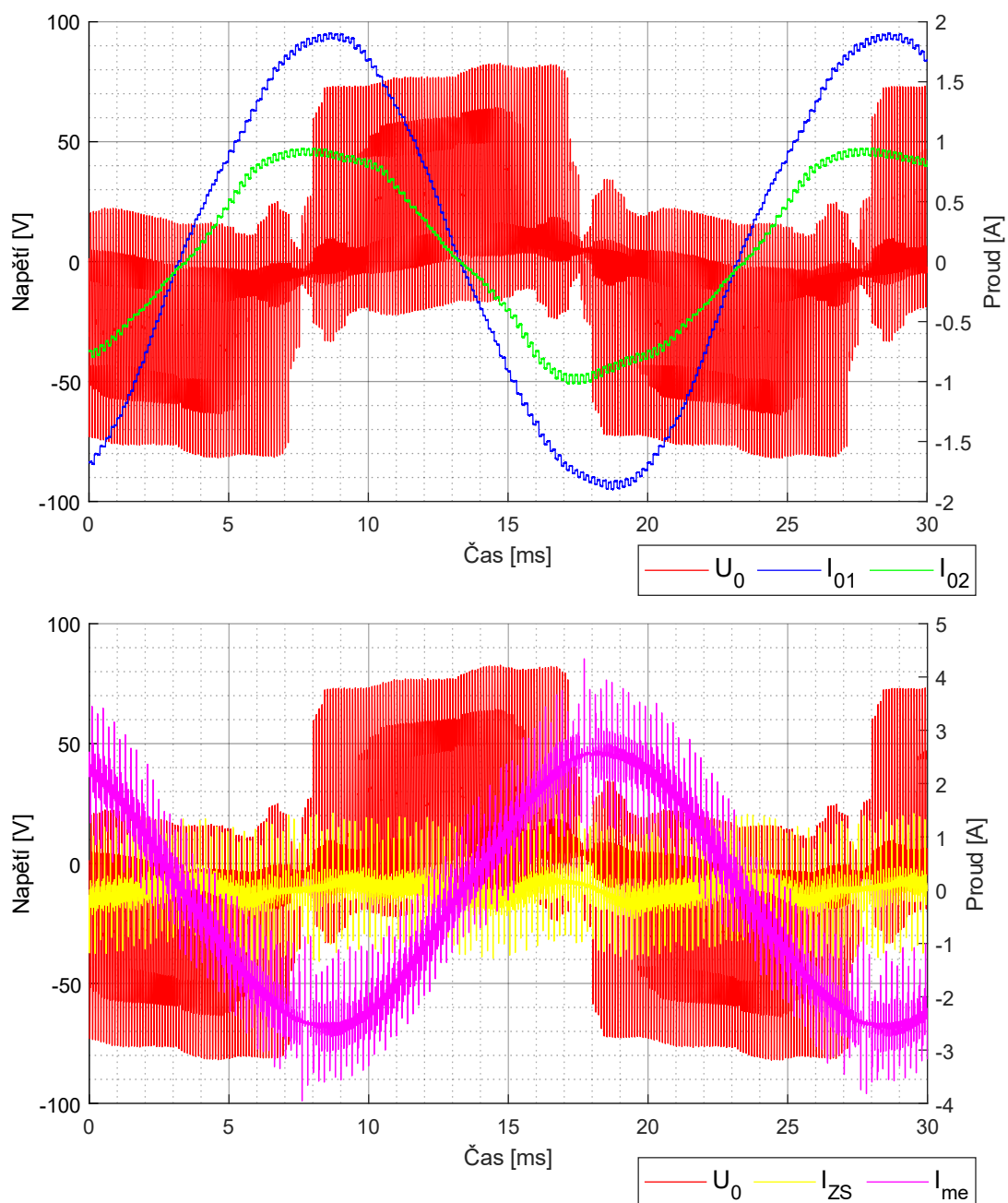


Obr. 32 Výsledky experimentu – kompenzace pomocí výkonového měniče: Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:15), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ , proudu  $I_{ZS}$  (v měřítku 4:1),  $I_L$  a  $I_{me}$  při kompenzaci ZS měničem s nastavenou amplitudou požadovaného proudu  $I_m = 2,5 \text{ A}$  a různých hodnotách úhlu  $\Delta\varphi$

Při nastaveném úhlu  $\Delta\varphi = -1,45 \text{ rad}$  měnič téměř dokonale kompenzuje jak jalovou, tak i nepatrnou činnou složku poruchového proudu. Při nastaveném úhlu  $\Delta\varphi = -2 \text{ rad}$  je dodáváný činný výkon příliš velký (činná složka reziduálního proudu překompenzována) a při  $\Delta\varphi = -1,3 \text{ rad}$  je činný výkon měničem naopak odebírán (činná složka reziduálního proudu podkompenzována). V obou případech se tím výrazně zvyšuje činná složka  $I_{ZS}$ .

V diagramech je také patrný rozdíl mezi proudem  $I_{me}$  tekoucím z měniče do sekundárního vinutí transformátoru a proudem  $I_L$ , což je proud protékající primárním vinutím (celkový kompenzační proud). Tento rozdíl je dán magnetizačním proudem transformátoru a jelikož primární vinutí tohoto transformátoru bylo použito v předchozím experimentu jako tlumivka  $L_1$ , měl by tento proud odpovídat i kompenzačnímu proudu  $L_1$ , který však kompenzoval jen malou část  $I_{ZS}$ .

Na obr. 33 vidíme průběhy všech sledovaných veličin, tedy netočivé složky napětí sítě  $U_0$ , proudu vývodu s poruchou  $I_{01}$  a vývodu bez poruchy  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{ZS}$ , kompenzačního proudu  $I_L$  a výstupního proudu měniče  $I_{me}$ , při dosaženém minimu  $I_{ZS}$ .

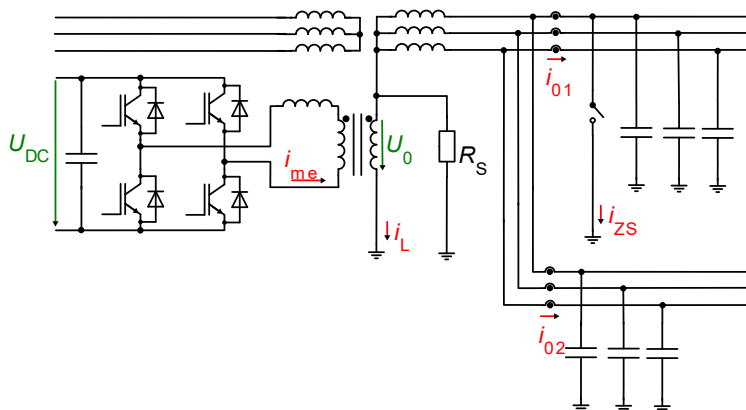


Obr. 33 Výsledky experimentu – kompenzace pomocí výkonového měniče: Netočivá složka napětí  $U_0$ , proudu vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  proud zemního spojení  $I_{ZS}$  a výstupní proud měniče  $I_{me}$  při dosaženém minimu  $I_{ZS}$

Z průběhů je patrné, že při provozu měniče je napětí  $U_0$  výrazně deformované jeho spínací frekvencí. Spínací frekvence se také objevuje v samotném poruchovém proudu. Zmíněné jevy jsou způsobeny charakterem fyzického modelu sítě, který obsahuje pouze kondenzátory.

#### 4.4 Kompenzace měničem při zesíleném svodu sítě

Pro zdůraznění možnosti kompenzovat činnou složku poruchového proudu (reziduální proud) byl proveden experiment, při kterém byl uměle zesílen svod sítě, jelikož kondenzátory použité v modelu sítě mají svod velmi nízký. Pro jednoduchost nebyl připojován paralelní rezistor na každou fázi, ale byl použit jeden rezistor, ve schématu označen jako  $R_S$ , připojen paralelně ke kompenzační tlumivce, viz obrázek 34. Odpor tohoto rezistoru je  $R_S = 20 \Omega$ .



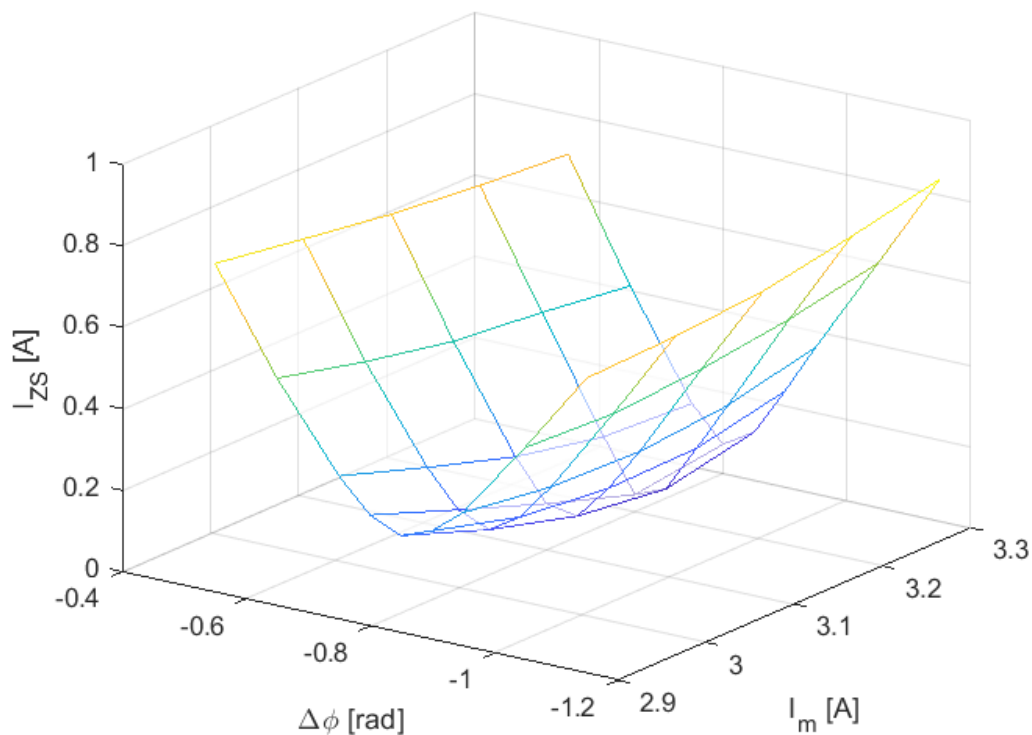
Obr. 34 Kompenzace zemního spojení pomocí výkonového měniče v síti se zesíleným svodem

Bez zapnutého měniče byla naměřena amplituda základní harmonické  $I_{ZS}$  2,715 A, tedy více než bylo v síti bez  $R_S$ . Experiment byl proveden stejným způsobem jako v předchozím případě. Pozorováním poruchového proudu na osciloskopu byla vytipována oblast, ve které se nachází minimum a poté proběhla série měření pro několik různých hodnot  $I_m$  a  $\Delta\varphi$  v této oblasti. Zjištěné hodnoty amplitudy základní harmonické složky  $I_{ZS}$ , jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 Výsledky experimentu: Hodnoty amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$  při různých hodnotách amplitudy požadovaného proudu  $I_m$  a úhlu  $\Delta\varphi$ . Barevně je vyznačeno dosažené minimum

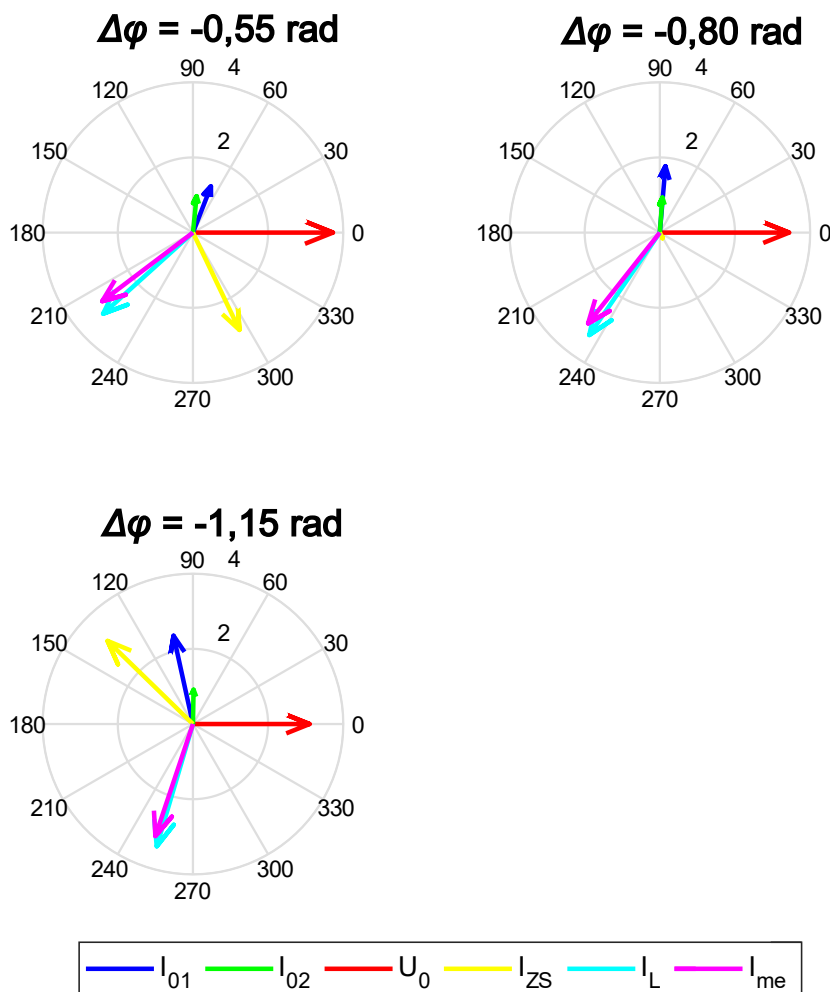
		Amplituda požadovaného proudu $I_m$ [A]				
		2,9	3,0	3,1	3,2	3,3
Fázový posuv $\Delta\varphi$ [rad]	-0,55	0,807	0,773	0,741	0,717	0,701
	-0,65	0,559	0,505	0,462	0,439	0,410
	-0,75	0,352	0,279	0,212	0,167	0,155
	-0,80	0,273	0,192	0,113	0,042	0,072
	-0,85	0,239	0,160	0,099	0,072	0,118
	-0,90	0,267	0,207	0,184	0,189	0,236
	-0,95	0,328	0,298	0,291	0,311	0,361
	-1,05	0,521	0,511	0,527	0,557	0,600
	-1,15	0,726	0,734	0,752	0,793	0,839

Zjištěné hodnoty amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$ , v závislosti na amplitudě  $I_m$  a fázovém posunu  $\Delta\phi$  požadovaného kompenzačního proudu jsou též zobrazeny prostřednictvím grafu na obrázku 35.



Obr. 35 Výsledky experimentu – kompenzace ZS výkonovým měničem v síti se zesíleným svodem: Graf amplitudy základní harmonické složky poruchového proudu  $I_{ZS}$  v závislosti na kompenzačním proudu (velikosti  $I_m$  a úhlu  $\Delta\phi$ ). Minimum  $I_{ZS}$  dosahuje hodnoty 42 mA a nastává při amplitudě kompenzačního proudu  $I_m = 3,2$  A a úhlu  $\Delta\phi = -0,8$  rad.

Kromě poruchového proudu  $I_{ZS}$  byly měřeny i proudy vývodů  $I_{01}$  a  $I_{02}$ , celkový kompenzační proud  $I_L$ , netočivá složka napětí sítě  $U_0$  a také výstupní proud měniče  $I_{me}$ . Základní harmonické složky těchto veličin jsou znázorněny ve fázorových diagramech na obrázku 36. Tyto fázorové diagramy se vztahují k nastavenému proudu  $I_m = 3,2$  A, při kterém bylo dosaženo minimum  $I_{ZS}$  a ke třem vybraným hodnotám  $\Delta\phi$ , z nichž jedna odpovídá stavu úplného minima  $I_{ZS}$  ( $\Delta\phi = -0,8$  rad).

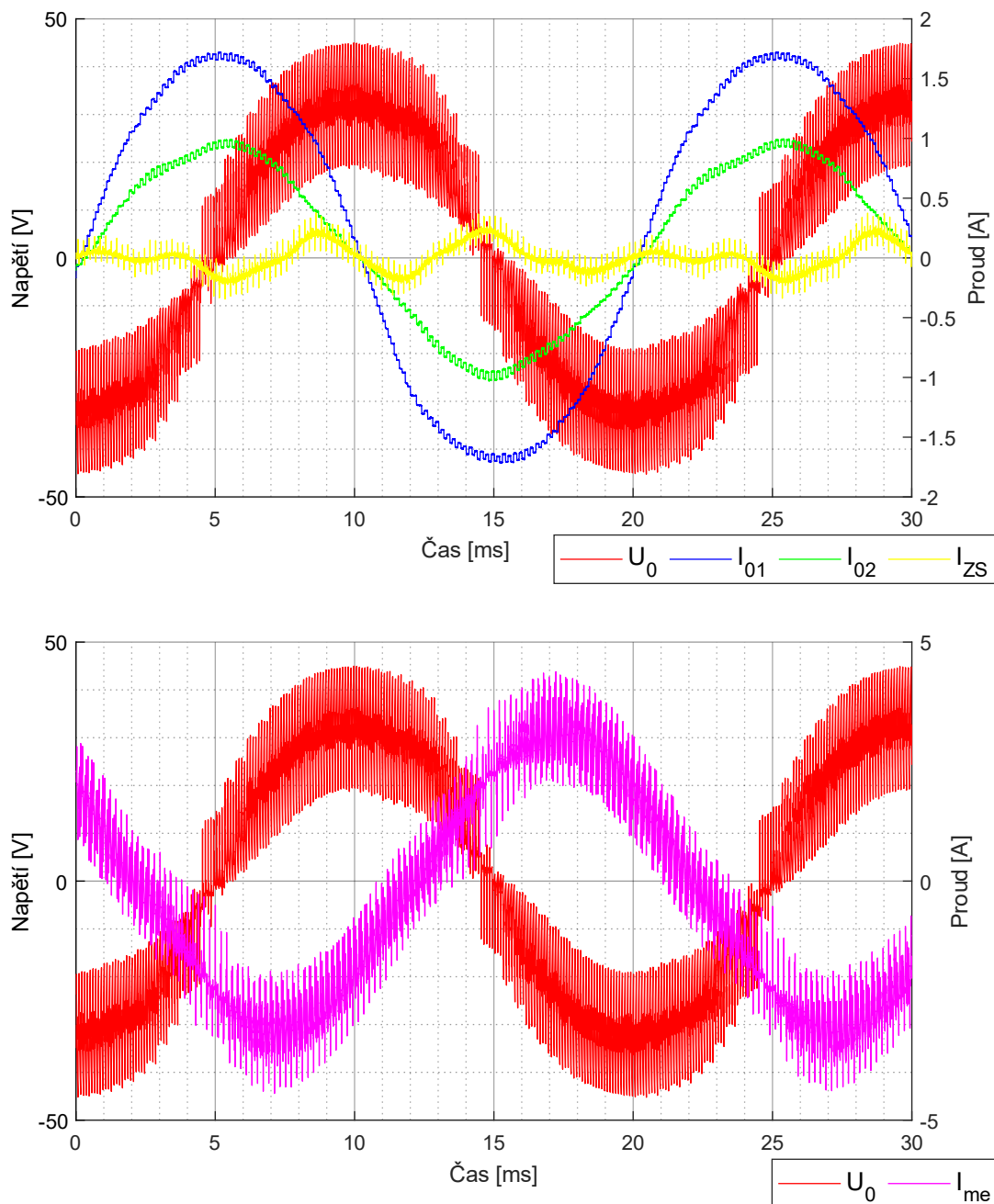


Obr. 36 Výsledky experimentu – kompenzace ZS výkonovým měničem v síti se zesíleným svodem: Fázorové diagramy základních harmonických složek napětí  $U_0$  (zobrazené v měřítku 1:10), proudů vývodů  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ , proudů  $I_{ZS}$  (v měřítku 4:1),  $I_L$  a  $I_{me}$  při kompenzaci ZS měničem s nastavenou amplitudou požadovaného proudu  $I_m = 3,2 \text{ A}$  a různých hodnotách úhlu  $\Delta\varphi$

Z výsledků měření je zřejmé, že pro účinnou kompenzaci je třeba výrazně větší kompenzační proud než v předchozím případě a měnič dodává ještě větší činný výkon. Na obr. 36, kdy je dosaženo optimální kompenzace ZS (při  $\Delta\varphi = -0,8 \text{ rad}$ ), je patrné výrazné vychýlení vektoru kompenzačního proudu do levé poloviny fázorového diagramu tak, aby byla dosažena potřebná velikost činné složky pro kompenzaci zesíleného svodového proudu sítě.

Na obrázku 37 jsou opět zobrazeny průběhy pro optimální kompenzaci výkonovým měničem sítě se zesíleným svodem. Je patrné, že připojením rezistoru  $R_S$  paralelně k primárnímu vinutí se změnil i vliv provozu měniče na deformaci  $U_0$  provozem měniče. Podíl spínací frekvence v  $U_0$  i v  $I_{ZS}$  je viditelně menší.





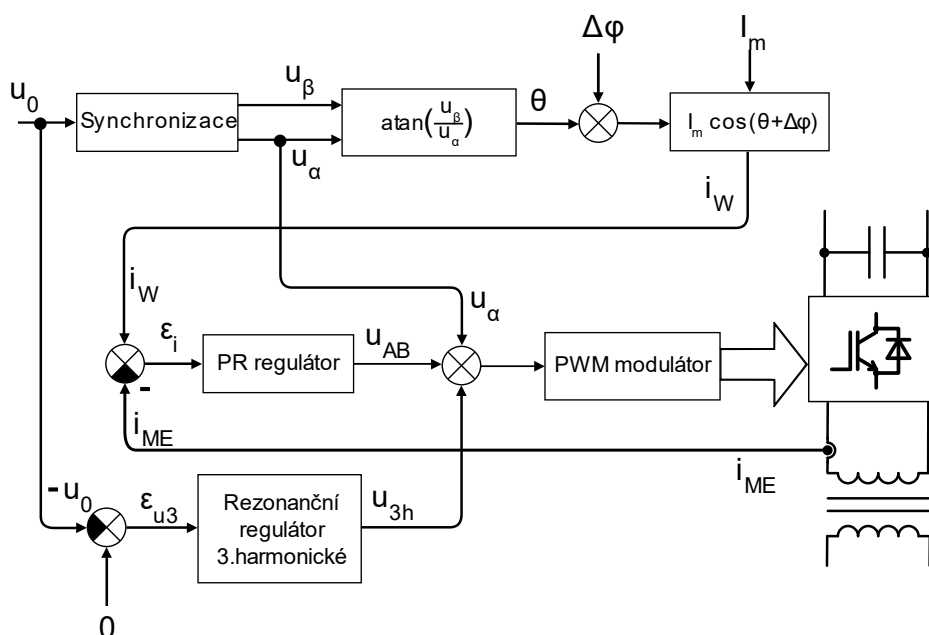
Obr. 37 Výsledky experimentu – kompenzace ZS výkonovým měničem v síti se zesíleným svodem: Průběh napětí  $U_0$ , netočivé složky proudu postiženého vývodu  $I_{01}$  a nepostiženého vývodu  $I_{02}$ , poruchového proudu  $I_{zs}$  a výstupního proudu měniče  $I_{me}$  při dosaženém minimu poruchového proudu

#### 4.5 Kompenzace třetí harmonické

Přítomnost vyšších harmonických složek v poruchovém proudu  $I_{zs}$ , způsobená charakterem fyzického modelu (vývody tvoří čistě kondenzátory, lokální přesycování magnetického obvodu napájecího transformátoru vlivem průchodu netočivé složky) představuje residuální proud reálné sítě, kde se často vyskytuje 3., 5, či 7. harmonická. Pro

kompenzaci byla zvolena třetí harmonická, která byla dominantní složkou zbytkového poruchového proudu.

Zapojení modelu sítě zůstalo stejné jako při předchozím experimentu (viz obrázek 34), ale řídicí software byl doplněn o algoritmus pro kompenzaci třetí harmonické, tedy složky s kmitočtem 150 Hz. Oproti kompenzaci základní harmonické je zvolený princip kompenzace třetí harmonické velmi zjednodušený. Vychází z úvahy, že bude-li netočivá složka napětí soustavy nulová, pak by teoreticky měl být nulový i proud protékající místem zemního spojení. Pro potlačení třetí harmonické složky napětí  $U_0$  byl implementován rezonanční regulátor, jehož úkolem je udržet třetí harmonickou složku napětí  $U_0$  na nízké, v ideálním případě nulové, hodnotě. Na obr. 38 je blokové schéma řízení měniče, které se od předchozího řízení (popsaného v kapitole 3.2) liší pouze přítomností rezonančního regulátoru třetí harmonické, jehož výstupní signál se přičítá k modulačnímu napětí měniče.



Obr. 38 Blokové schéma řízení měniče při kompenzaci třetí harmonické

Rezonanční regulátor je implementován stejným způsobem jako PR regulátor (popsaný v kapitole 3.2.3) s tím rozdílem, že není použita proporcionální složka a rezonanční složka je nastavena na frekvenci 150 Hz. Do regulátoru je přivedena odchylka  $\varepsilon_{u3}$  skutečné hodnoty  $U_0$  od požadované hodnoty třetí harmonické. Jelikož je však tato požadovaná hodnota nulová, platí:

$$\varepsilon_{u3} = -u_0 \quad (4.3)$$

Zesílení regulátoru  $K_R$  bylo nastaveno na  $K_R = 100$ .

Během testování tohoto algoritmu byly vstupní parametry pro kompenzaci základní harmonické nastaveny na hodnoty, které odpovídaly minimu  $I_{zs}$  v předchozím experimentu, tedy  $I_m = 3,2$  A,  $\Delta\varphi = -0,8$  rad. Bylo znovu provedeno měření  $I_{zs}$  při vypnutém měničci, poté při kompenzaci měničcem s původním algoritmem (tedy s kompenzací pouze základní harmonické) a při kompenzaci s měničcem řízeným tímto novým výše popsaným algoritmem, kompenzujícím současně i třetí harmonickou. Výsledky jsou uvedeny v tab. 8.

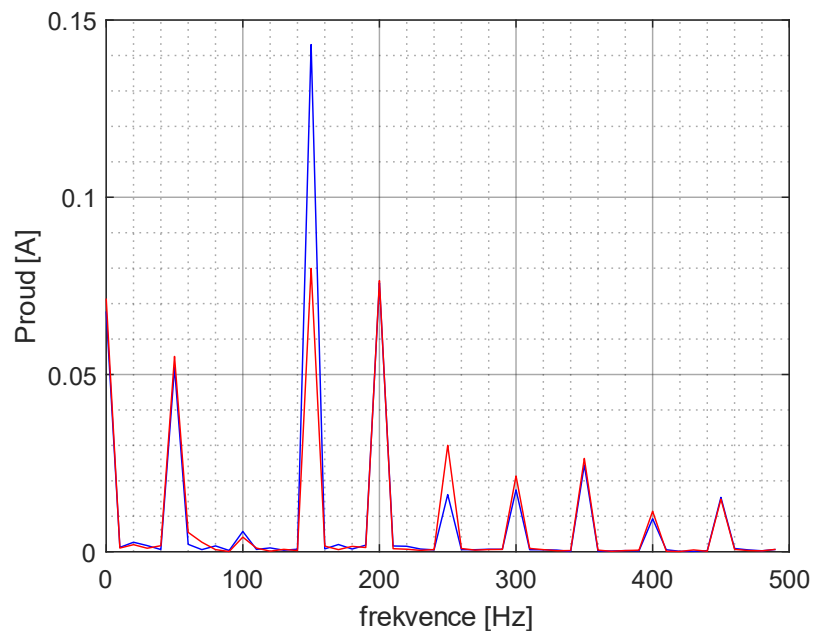
Tab. 8 Výsledky experimentu – kompenzace harmonických složek ZS výkonovým měničcem: Amplituda 1. a 3. harmonické složky poruchového proudu  $I_{zs}$  a) při vypnuté kompenzaci měničcem, b) při kompenzaci pouze 1. harmonické a c) při kompenzaci 1. i 3. harmonické

Kompenzace	Amplituda [A]	
	1. harmonická	3. harmonická
a) Bez kompenzace měničcem	2,734	0,131
b) Kompenzace pouze 1. harmonické	0,052	0,143
c) Kompenzace 1. a 3. harmonické	0,055	0,080

Jak je vidět s použitím algoritmu pro kompenzaci třetí harmonické nám její hodnota poklesla z 143 mA (při kompenzaci pouze základní harmonické) na 80 mA, což je pokles o 44 % původní hodnoty. Navzdory své jednoduchosti tak tento algoritmus výrazně přispěl k jejímu potlačení.

Je ovšem také vidět, že, třetí harmonická při zapnutém měničci s původním algoritmem (tedy při kompenzaci pouze základní harmonické) je o zhruba 8 % vyšší oproti stavu, kdy měnič nepracuje. To může být způsobeno mrtvými časy při spínání měniče, díky kterým je skutečné modulační napětí měniče nepatrně deformováno oproti průběhu  $U_{AB}$ , který do PWM modulátoru odesíláme. Nicméně oproti poklesu podílu třetí harmonické složky při její kompenzaci měničcem se jedná o nepatrný rozdíl.

Pro názornost je na obrázku 39 znázorněno amplitudové spektrum  $I_{zs}$  pro případ kompenzace obou harmonických složek i pro kompenzaci pouze základní harmonické.



Obr. 39 Výsledky experimentu – kompenzace třetí harmonické výkonovým měničem: Amplitudové spektrum poruchového proudu  $I_{ZS}$  při kompenzaci pouze první harmonické (modře) a první i třetí harmonické současně (červeně)

## Zhodnocení a závěr

V rámci této práce byl ověřen princip kompenzace zemního spojení pomocí řízeného zdroje kompenzačního proudu, připojeného k uzlu sítě, a to jak prostřednictvím matematického modelu, tak prostřednictvím experimentů na sestaveném laboratorním prototypu distribuční sítě. Řízeným zdrojem proudu byl polovodičový měnič připojený k uzlu sítě prostřednictvím jednofázového transformátoru, představujícího zhášecí tlumivku s jejím pomocným vinutím. Magnetizační indukčnost tohoto transformátoru se na kompenzaci ZS podílela jen nepatrně.

Poruchový proud v reálné síti je tvořen jalovou a činnou složkou základní harmonické, ale také vyššími harmonickými složkami. Samotná zhášecí tlumivka, coby pasivní prvek, kompenzuje pouze jalovou složku na jedné zvolené frekvenci (obvykle základní harmonické). Měnič může zhášecí tlumivku doplňovat či ji úplně nahradit.

Během provedených experimentů nebyla zhášecí tlumivka naladěna do blízkosti rezonance a jalovou složku poruchového proudu kompenzovala pouze z malé části. Většinu jalové složky kompenzačního proudu dodával měnič.

Současně byla ověřena kompenzace činné složky poruchového proudu, především během experimentu, při kterém byl uměle zesílen svod sítě.

Nakonec byla úspěšně otestována i možnost kompenzace vyšších harmonických složek poruchového proudu, konkrétně pak třetí harmonické, která byla dominantní složkou reziduálního proudu při kompenzaci základní harmonické. Navzdory jednoduchosti algoritmu, použitého pro řízení kompenzace třetí harmonické, se podařilo její amplitudu snížit o 44 % oproti stavu kdy byla měničem kompenzována pouze základní harmonická.

## Použitá literatura

- [1] TLUSTÝ, Josef. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [2] TOMAN, Petr. *Provoz distribučních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04935-8.
- [3] MERTLOVÁ, Jiřina a Lucie NOHÁČOVÁ. *Elektrické stanice a vedení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, Fakulta elektrotechnická, 2008. ISBN 978-80-7043-724-7.
- [4] *Zemní spojení v trojfázových soustavách* [online]. [cit. 2022-12-15]. Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [5] WAKILEH, George J. *Power Systems Harmonics* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001 [cit. 2023-04-17]. Power Systems. ISBN 978-3-642-07593-3. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-662-04343-1
- [6] PEROUTKA, Zdeněk a Ivan MATULJAK. *The apparatus compensating ground currents connected to a transformer neutral point*. European patent application. EP2599179. Uděleno únor 2016.
- [7] PEROUTKA, Zdeněk a Ivan MATULJAK. *The apparatus compensating ground currents connected to phase conductors of a distribution system*. European patent application. EP2599180. Uděleno říjen 2014.
- [8] KOMRSKA, Tomas, Antonin GLAC, Jakub TALLA, Bohumil SKALA, Jan STEPANEK, Lubes STREIT a Zdenek PEROUTKA. *Ground Fault Active Compensation in Emulated Distribution Grid of 10 kV*. In: *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)* [online]. IEEE, 2020, P.1-P.6 [cit. 2023-04-26]. ISBN 978-9-0758-1536-8. Dostupné z: doi:10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215872
- [9] KOŠAN, Tomáš. *MLC interface - vývojový kit pro víceúrovňové měniče s procesorem a FPGA*. Plzeň, 2016. Výzkumná zpráva. Západočeská univerzita v Plzni.
- [10] KOČVARA, Antonín. *Uzemňování elektrických zařízení*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1995. Knižnice Elektro.



