VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

MODERNÍ PROSTŘEDKY PARALELNÍ KOMPENZACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR‘S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAREK LAKOMÝ

BRNO 2012

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Marek Lakomý
Ročník: 3

ID: 120791
Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Moderní prostředky paralelní kompenzace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Teorie toku výkonů, využití paralelní kompenzace
2. Možnosti a technická řešení paralelní kompenzace
3. Sestavení modelů vybraných typů kompenzátorů a simulace jejich provozu ve vybraném simulačním prostředí
4. Návrh a realizace vybraných typů kompenzátorů pro laboratorní fyzikální model NN sítě
5. Ověření funkce realizovaných fyzikálních modelů

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 25.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

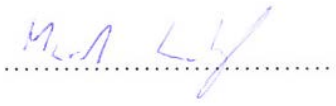
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných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

Bibliografická citace práce:

LAKOMÝ, M. *Moderní prostředky paralelní kompenzace.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 53 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D..

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

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D. za ochotu a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Bakalářská práce

Moderní prostředky paralelní kompenzace

Marek Lakomý

vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2012

Brno

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Bachelor‘s Thesis

Reactive power compensation systems

by

Marek Lakomý

Supervisor: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Brno University of Technology, 2012

Brno

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá kompenzací jalového výkonu, která umožňuje zlepšení účiníku. Teoretická část zahrnuje vysvětlení základních pojmů teorie kompenzace jalového výkonu, základní rozdělení jednotlivých kompenzačních zařízení, jejich popis a základní výpočetní vztahy. V praktické části je provedena simulace kompenzačních zařízení, výroba laboratorních modelů a změření jejich parametrů.

KLÍČOVÁ SLOVA: Kompenzace jalového výkonu; paralelní kompenzace; kompenzátory; regulace jalové kompenzace; chráněné kompenzační sekce; kompenzační filtry; simulace kompenzace;

ABSTRACT

Bachelor‘s thesis deals with the compensation of reactive power, which enables improved power factor correction. The theoretical part includes an explanation of basic concepts of the theory of reactive power compensation, the basic allocation of compensating equipment, their description and basic computational relations. Simulation of compensation devices, making laboratory models and measuring their parameters were realized as the practical part of the thesis.

KEY WORDS: Power factor correction; parallel compensation; compensators; reactive compensation control; protected compensating section; compensating filters; simulation of compensation

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ **9**

SEZNAM TABULEK **11**

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK **12**

ÚVOD **13**

1 PRINCIP KOMPENZACE **14**

1.1 TEORIE VÝKONŮ **14**

1.2 ALTERNATIVNÍ TEORIE VÝKONŮ **17**

1.2.1 DEFINICE VÝKONŮ DLE FRYZE 17

1.2.2 *P-Q* TEORIE 18

1.3 ZÁKLAD KOMPENZACE **19**

1.4 PARALELNÍ KOMPENZACE **20**

1.5 DODRŽOVÁNÍ ÚČINÍKU **22**

2 KOMPENZÁTORY **23**

2.1 PŘIPOJENÍ PARALELNÍ KOMPENZACE **23**

2.1.1 INDIVIDUÁLNÍ 23

2.1.2 SKUPINOVÁ 23

2.1.3 CENTRÁLNÍ 23

2.1.4 KOMBINOVANÁ 23

2.2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY **24**

2.2.1 PROSTÉ KONDENZÁTORY 24

2.2.2 CHRÁNĚNÉ KOMPENZAČNÍ SEKCE 25

2.2.3 KOMPENZAČNÍ FILTRY 27

3 REGULACE KOMPENZÁTORŮ **29**

3.1 STUPŇOVITĚ ŘÍZENÉ KOMPENZÁTORY **29**

3.1.1 KONTAKTNÍ 29

3.1.2 BEZKONTAKTNÍ 29

3.2 PLYNULE ŘÍZENÉ KOMPENZÁTORY **30**

3.2.1 PASIVNÍ 30

3.2.2 AKTIVNÍ 30

4 SIMULACE VLIVU KOMPENZÁTORŮ **31**

4.1 SPÍNÁNÍ KONDENZÁTORŮ **31**

4.1.1 SPÍNÁNÍ VYBITÉHO KONDENZÁTORU PŘI PRŮCHODU NAPĚTÍ NULOU 31

4.1.2 SPÍNÁNÍ VYBITÉHO KONDENZÁTORU PŘI PRŮCHODU AMPLITUDOU NAPĚTÍ 32

4.1.3 SPÍNÁNÍ NABITÉHO KONDENZÁTORU PŘI PRŮCHODU AMPLITUDOU NAPĚTÍ 32

4.2 SIMULACE KOMPENZÁTORŮ **33**

4.2.1 JEDNODUCHÝ KOMPENZÁTOR 33

4.2.2 PLYNULÁ DEKOMPENZACE 36

5 NÁVRH A REALIZACE LABORATORNÍHO MODELU **38**

5.1 MODEL VEDENÍ 38
5.2 MODEL KOMPENZACE 39
5.3 MODEL DEKOMPENZACE 40
5.4 MODEL REGULÁTORU 41
6 MĚŘENÍ NA MODELECH 42
6.1 VÝCHOZÍ STAV 42
6.2 VLIV KOMPENZACE NA MĚŘENÝ OBVOD 44
6.2.1 AUTOMATICKÉ ŘÍZENÍ 45
6.2.2 RUČNÍ ŘÍZENÍ REGULÁTORU 46
6.2.3 VLIV SPÍNÁNÍ KONDENZÁTORŮ NA SÍŤ 47
6.3 MĚŘENÍ DEKOMPENZACE 48
6.3.1 DEMONSTRACE FUNKCE DEKOMPENZACE 49
6.3.2 DEKOMPENZACE PŘEKOMPENZOVANÉHO STAVU 49
7 ZÁVĚR 51
LITERATURA 52

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Čistě činná zátěž *14*
Obrázek 1-2 Čistě kapacitní zátěž *15*
Obrázek 1-3 Trojúhelník výkonů *17*
Obrázek 1-4 Znázornění zdánlivého výkonu s výskytem vyšších harmonických v síti *17*
Obrázek 1-5 Princip snižování zdánlivého proudu *20*
Obrázek 1-6 Schéma paralelní kompenzace *20*
Obrázek 1-7 Fázorový diagram paralelní kompenzace *21*
Obrázek 2-1 Nízkonapěťový kondenzátor firmy Silko s.r.o. [3] *24*
Obrázek 2-2 Chráněná kompenzační sekce *25*
Obrázek 2-3 Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu *25*
Obrázek 2-4 Závislost proudu filtru na kmitočtu *28*
Obrázek 3-1 Základní zapojení plynule řízeného kompenzátoru *30*
Obrázek 4-1 Schéma zapojení - spínání kondenzátoru *31*
Obrázek 4-2 Připojení vybitého kondenzátoru při průchodu napětí nulou *31*
Obrázek 4-3 Připojení vybitého kondenzátoru při průchodu napětí amplitudou *32*
Obrázek 4-4 Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napětí amplitudou *32*
Obrázek 4-5 Schéma zapojení simulace jednoduchého kompenzátoru *33*
Obrázek 4-6 Časový průběh proudu a napětí pro 4-5 ..... *35*
Obrázek 4-7 Fázorový diagram pro 4-6 ..... *35*
Obrázek 4-8 Schéma zapojení simulace dekompenzace *36*
Obrázek 4-9 Průběh okamžitých hodnot pro 4-8 ..... *36*
Obrázek 4-10 Fourierova transformace pro 4-9 ..... *37*
Obrázek 4-11 Fázorový diagram pro 4-9 ..... *37*
Obrázek 5-1 Přední maska modelu vedení *38*
Obrázek 5-2 Schéma zapojení ovládací části modelu vedení *38*
Obrázek 5-3 Přední maska modelu kompenzace *39*
Obrázek 5-4 Přední maska modelu dekompenzace *40*
Obrázek 5-5 Schéma zapojení zesilovače pro RM1E48V25 ..... *40*
Obrázek 5-6 Přední maska modelu regulátoru *41*
Obrázek 6-1 Fotografie zapojení modelů *42*
Obrázek 6-2 Výchozí měření *42*

Obrázek 6-3 Průběh okamžitých hodnot pro stav bez kompenzace *43*
Obrázek 6-4 Fázorový diagram pro 6-3 ..... *43*
Obrázek 6-5 Schéma zapojení měření kompenzace *44*
Obrázek 6-6 Ustálený stav při automatickém řízení regulátoru *45*
Obrázek 6-7 Fázorový diagram pro 6-5 ..... *45*
Obrázek 6-8 Ruční spínání kompenzátoru *46*
Obrázek 6-9 Změření sepnutí kondenzátorů *47*
Obrázek 6-10 Detail přechodného děje připnutí kondenzátoru *48*
Obrázek 6-11 Schéma zapojení měření dekompenzace *48*
Obrázek 6-12 Řízení protékaného proudu přes dekompenzační tlumivku *49*
Obrázek 6-13 Časový průběh při zapnuté dekompenzaci *50*
Obrázek 6-14 Fázorový diagram pro 6-12 ..... *50*

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Cenové přirážky za nedodržení předepsaného účiníku [10] *22*

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

P	Činný výkon	W
Q	Jalový výkon	Var
S	Zdánlivý výkon	VA
D	Deformační výkon	-
R	Odpor	Ω
L	Indukčnost	H
C	Kapacita	F
Z	Impedance	Ω
X	Reaktance	Ω
X_L	Induktivní reaktance	Ω
X_C	Kapacitní reaktance	Ω
φ	Fázový posuv	°
cosφ	Účiník	-
λ	Skutečný účiník	-
f	Frekvence	Hz
ω	Úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
p	Činitel zatlumení	-
k	Koeficient kompenzace	-
n	Řád harmonické	-
U_{ef}	Efektivní napětí	V
U_m	Amplituda napětí	V
I_{ef}	Efektivní proud	A
I_m	Amplituda proud	A
p	Okamžitý reálný výkon	W
q	Okamžitý imaginární výkon	Vai

ÚVOD

Průmyslový odběratel při připojení do distribuční sítě musí plnit řadu požadavků od distributora. Jedním z nich je snížení přenosu jalového výkonu, který je z větší části požadován indukčními zátěžemi. Nedodržení tohoto požadavku vede k zvýšení ztrát na vedení a také sankcemi za nedodržení předepsaného účiníku. Možností pro odběratele, jak odebíraný jalový výkon od distributora snížit na požadovanou mez je paralelní kompenzace. Je to nejjednodušší řešení jak pro distributora, tak pro odběratele a proto je velice často využívána. Samotné řešení, na jaké odběratel přistoupí, závisí na finančních možnostech a znalosti charakteru odebíraného proudu spotřebiči. V práci je uvedeno několik typů paralelní kompenzace, přičemž za univerzální kompenzátor lze uvažovat aktivní plynule řízený kompenzátor, ale zde už hraje roli finanční stránka věci a při odběrech, které jsou v čase neměnné a mají pouze velký fázový posuv a síť nijak nezkreslují, je toto řešení zbytečné.

Práce je rozdělena na jednotlivé kapitoly. Úvodní kapitola se zabývá teorií elektrických výkonů, popis principu kompenzace a také tabulky, dle které se vypočítávají sankce při nedokompenzování odběru. Další kapitola se zabývá umístěním paralelní kompenzace do sítě a také samostatným řešením jednotlivých kompenzátorů. Třetí kapitola je zaměřena na řízení kompenzátorů. Čtvrtá kapitola obsahuje simulace jednotlivých kompenzačních zařízení, pátá popis návrhu a konstrukci laboratorních modelů kompenzace a poslední kapitola se zabývá ověřením funkčnosti vytvořených modelů a porovnáním se simulacemi.

Hlavním cílem bakalářské práce bylo sestrojit laboratorní modely, jejich navrhnuté parametry bylo zapotřebí podložit simulacemi a pro tvorbu simulací bylo nutné znát základní teorii o paralelní kompenzaci. Práce proto obsahuje kapitoly strukturované tak aby bylo možno pochopit danou problematiku.

1 PRINCIP KOMPENZACE

Pro pochopení důvodu použití paralelní kompenzace je vhodné mít základní znalost teorii obvodů. Tato kapitola se snaží vysvětlit proč je paralelní kompenzace potřebná a jakým způsobem funguje.

1.1 Teorie výkonů

Elektrický výkon zdánlivý se rozděluje pro jednodušší pochopení a matematický výpočet na činný a jalový. Činný výkon P se ve spotřebiči mění na jiný druh energie. Může to být energie tepelná, jako ohřev transformátoru vlivem jeho vlastního odporu, energie mechanická (otáčení rotoru) nebo energie světelná. Tento výkon je i pro laika lehce pochopitelný, vysvětluje se jako výkon, který koná práci. Pro sinusový průběh napětí a proudu je okamžitá hodnota činného výkonu rovna:

$$p(t) = U_m \cdot \sin(\omega t) \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \tag{1.1}$$

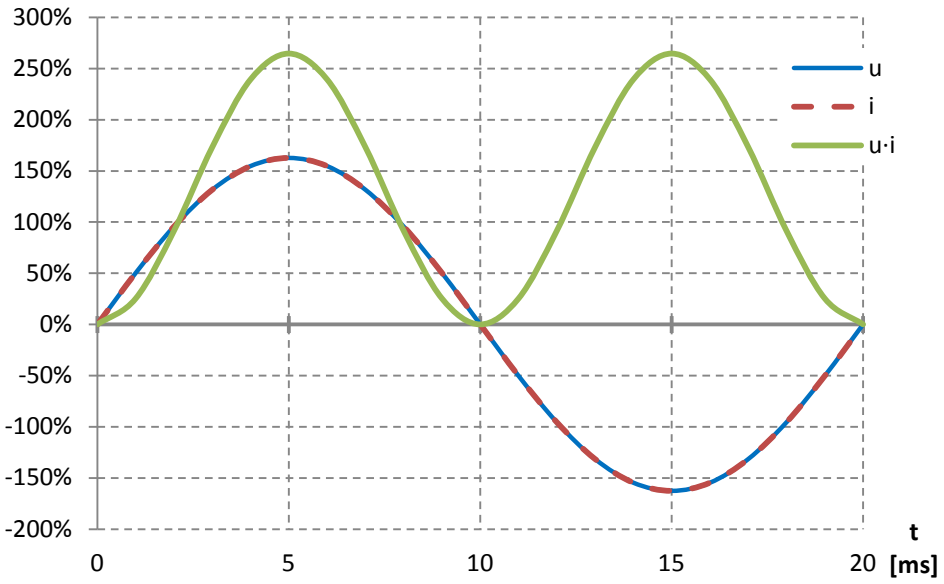
$$\begin{aligned} p(t) = U_m \cdot I_m \cdot \frac{1}{2}[\cos(\varphi) - \cos(2\omega t - \varphi)] = \\ = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t + \varphi)] \end{aligned} \tag{1.2}$$

Kde časově nezávislá složka je činný výkon, který se upraví na známý tvar:

$$P = |U_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot \cos(\varphi) \tag{1.3}$$

Kde U_m představuje amplitudu napětí, U_{ef} efektivní hodnotu napětí, I_m amplitudu proudu, I_{ef} efektivní hodnotu proudu a φ je fázový posuv mezi proudem a napětím.

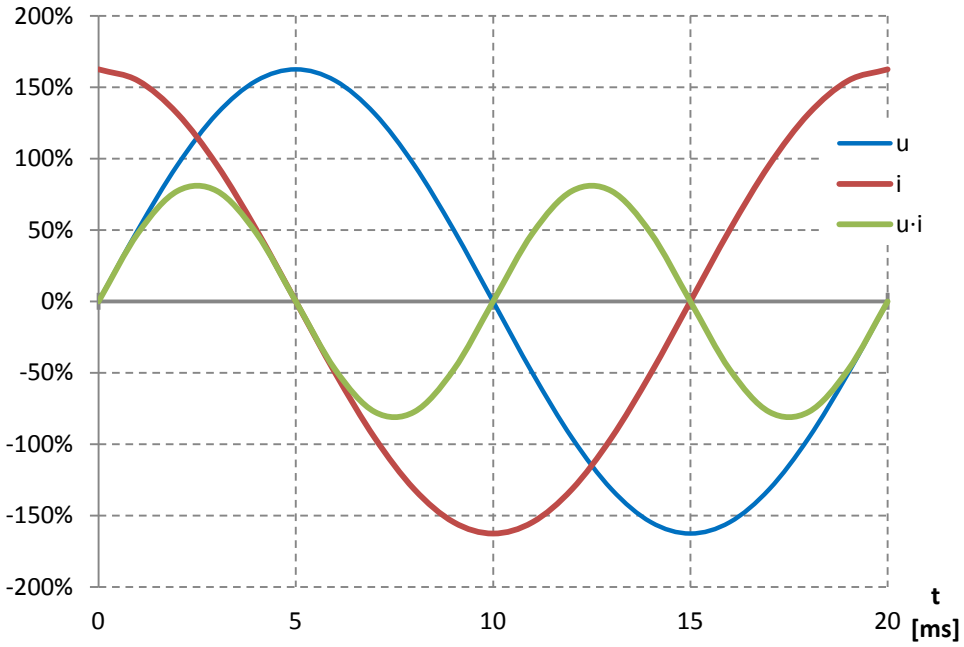
Grafické znázornění vztahu 1.3:



Obrázek 1-1 Čistě činná zátěž

Jalový výkon *Q* se zdá být jako nadbytečný, protože nekoná práci. Nazývá se tak, protože ačkoliv se přenáší mezi zdrojem a spotřebičem, nelze tato energie zužitkovat. Při přenosu však zvyšuje ztráty ve vedení. Tímto výkonem popisujeme vznik magnetického a elektrického pole, které jsou nutné pro korektní funkci například asynchronních motorů, transformátorů nebo kondenzátorů. Pro odlišení od zdánlivého výkonu je jeho jednotkou voltampér reaktanční, zkratkou je *VAr* nebo *var*.

V rovnici 1.2 se objevuje časově závislá a nezávislá složka, časově nezávislá patří k činnému výkonu. Časově závislá složka kmitá s dvojnásobnou frekvencí a její střední hodnota za periodu je nulová, pokud není mezi napětím a proudem žádný fázový posuv a okamžité hodnoty výkonu jsou kladné. Pokud je fázový posuv nenulový, tak účiník (cosφ) je menší než jedna a činný výkon je tedy také menší. V idealizovaném případě, kdy je účiník roven nule, je v obvodu čistě kapacitní nebo induktivní zátěž a činný výkon je proto nulový. Celý výkon se „přelévá“ mezi zdrojem a spotřebičem a za jednu periodu není žádná energie spotřebována.



Obrázek 1-2 Čistě kapacitní zátěž

$$Q = |U_{ef}| \cdot |I_{ef}| \cdot sin\varphi \tag{1.4}$$

Zdánlivý výkon S je celkový přenášený výkon při nulovém fázovém posuvu. Pokud tedy máme čistě odporovou zátěž pak činný výkon je roven zdánlivému a obdobně, když máme čistě zátěž reaktanční.

$$\overline{S} = \overline{U_{ef}} \cdot \overline{I_{ef}} \tag{1.5}$$

Tento výkon lze také vyjádřit fázorově, kde vektorový součet výkonu činného a jalového dává vektor výkonu zdánlivého.

$$\overline{S} = P + jQ \tag{1.6}$$

Zatím byly brány v potaz pouze případy harmonické proudy a napětí. Pro obvody s neharmonickými proudy a napětími platí:

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \ldots + U_k^2} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \tag{1.7}$$

Kde U_h je napětí jednotlivé harmonické složky po rozkladu na Fourierovu řadu. Stejně tak to platí pro proud a následně i výkony.

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \ldots + I_l^2} = \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \tag{1.8}$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \tag{1.9}$$

Činný výkon:

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} P_h = P_0 + \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h cos\varphi_h \tag{1.10}$$

Kde P_0 je stejnosměrná část činného výkonu a P_h je činný výkon h-té harmonické.

Obdobně platí vztah pro jalový výkon.

$$Q = \sum_{h=0}^{\infty} Q_h = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h sin\varphi_h \tag{1.11}$$

U neharmonických průběhů však dochází k nerovnosti:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \tag{1.12}$$

Zavádí se proto deformační výkon, který představuje obdobně jako výkon jalový neužitečnou část výkonu zdánlivého.

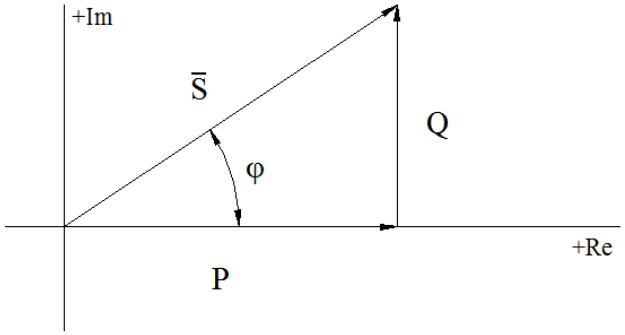
$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \tag{1.13}$$

Místo účiníku $cos\varphi$, který je uvažován pouze pro první harmonickou napětí a proudu se zavádí opravdový účiník, který v sobě zahrnuje i vliv zbylých harmonických.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{1.14}$$

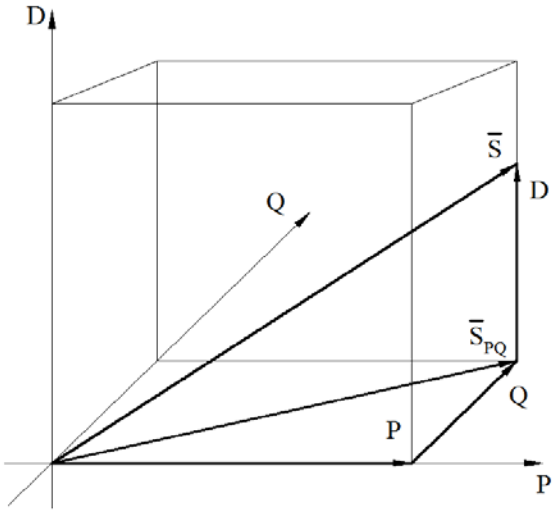
Je nutné podotknout, že v problematice kompenzace jalového výkonu se uvažuje pouze o první harmonické proudu a napětí, tedy je snaha přiblížit se pomocí kompenzace hodnotě $cos\varphi = 1$, nikoliv $\lambda = 1$.

Grafické znázornění vztahu 1.6.:



Obrázek 1-3 Trojúhelník výkonů

Grafické znázornění vztahu 1.13.:



Obrázek 1-4 Znázornění zdánlivého výkonu s výskytem vyšších harmonických v síti

Zde se objevuje veličina $\overline{S}_{PQ}$, která odpovídá klasickému zdánlivému výkonu bez výkonu deformačního.

1.2 Alternativní teorie výkonů

Dosud popsané vztahy jsou běžně používané a pro použití v praxi obyčejně postačují. Jedná se o definici výkonu dle Budeana. Dále jsou zmíněny jiné výklady, než je obvyklá teorie výkonů. Kapitola čerpá z literatury [2].

1.2.1 Definice výkonů dle Fryze

Činný výkon je definován následovně:

$$P_w = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)dt = U_w I = UI_w \tag{1.15}$$

Kde U a I jsou efektivní hodnoty napětí a proudu a U_w je činné napětí a I_w je činný proud. Zdánlivý výkon je definován stejně jako u teorie Budeana, tedy:

$$P_s = U \cdot I \tag{1.16}$$

Činný účiník λ:

$$\lambda = \frac{P_w}{P_s} = \frac{P_w}{UI} \tag{1.17}$$

Jalový výkon P_q:

$$P_q = \sqrt{P_s^2 - P_w^2} = U_q I = U I_q \tag{1.18}$$

Kde U_q a I_q je jalové napětí a proud.

Jalový účiník λ_q:

$$\lambda_q = \sqrt{1 - \lambda^2} \tag{1.19}$$

Činné napětí U_w a proud I_w:

$$U_w = \lambda \cdot U \qquad I_w = \lambda \cdot I \tag{1.20}$$

Jalové napětí U_q a proud I_q:

$$U_q = \lambda_q \cdot U \qquad I_q = \lambda_q \cdot I \tag{1.21}$$

Jalový výkon, dle definice Fryze, obsahuje veškeré složky proudu a napětí, které se nijak nepodílejí na přenosu výkonu činného P_w, který je definován jako střední hodnota výkonu okamžitého. Je možno vypočítat, že není rozdíl mezi činným výkonem definovaným Budeanem a Fryzem a stejně tak zdánlivým výkonem v obou teoriích.

Teorie se liší výkladem jalového výkonu. Fryze ověřil, že činný účiník dosáhne hodnoty jedna, pouze pokud je okamžitá hodnota napětí ve fázi s okamžitou hodnotou proudu. Pokud jsou tyto rovnice použity na třífázové systémy, může se stát, že třífázový činný výkon obsahuje kmitající složku, ačkoliv jsou všechny tři napětí a proudy ve fázi, tedy $\lambda = 1$.

Teorie dle Fryze se oproti klasické nemusí rozkládat Fourierovou řadou na harmonické složky, ale je nutné počítat s efektivními hodnotami proudu a napětí a proto není tato teorie také vhodná pro přechodové děje.

1.2.2 *P-q* teorie

Oproti předešlým teoriím zde není žádná limitace, co se týče tvaru proudu a napětí a umí pracovat i v případě přechodových jevů. Může být aplikována na třífázové soustavy se středním vodičem i bez něj. Zásadní změna oproti předešlým teoriím tkví v uvažování třífázové soustavy jako celku, ne jako superpozici nebo sumu tří jednofázových obvodů.

Matematické vyjádření *p-q* teorie se nachází v literatuře [2]. První změnou je předpoklad převedení okamžitých hodnot napětí a proudu třífázové soustavy na okamžité hodnoty zobrazené

v osách $\alpha\beta 0$ pomocí Clarkovi transformace. Další změnou oproti „klasickým“ teoriím je v oproštění se od klasického činného a jalového výkonu. Tyto výkony nahrazuje okamžitým reálným výkonem p, který značí tok energie od zdroje ke spotřebiči za jednotku času a okamžitým imaginárním výkonem q, který se vysvětluje jako energie vyměněná mezi fázemi bez přenosu energie.

Pro porovnání *p-q* teorie s teorii Budeanovou lze uvést tyto příklady:

1) Ideální třífázový napěťový zdroj dodává energii symetrické třífázové impedanci. Po odvození lze psát:

$$\begin{aligned} p &= 3UI\cos\varphi \\ q &= -3UI\sin\varphi \end{aligned} \tag{1.22}$$

   Oba výkony jsou v tomto případě konstantní a reálný výkon p odpovídá činnému výkonu vypočtenému pomocí klasické teorie, stejně tak imaginární výkon q odpovídá klasickému jalovému výkonu. Ve shodě s běžnou teorií výkonů se znaménko imaginárního výkonu liší dle impedance zátěže. Výkon bude kladný, pokud je zátěž induktivního charakteru nebo záporný, když bude zátěž kapacitního charakteru.
2) Stejný předpoklad jako v 1) s rozdílem použité zátěže, která bude mít čistě kapacitní charakter

$$\begin{aligned} p &= 0 \\ q &= -3\frac{U^2}{X_C} \end{aligned} \tag{1.23}$$

   Kde X_C je reaktance kondenzátoru. Opět stejný výsledek jako při použití klasické teorie.
3) Nyní bude zátěž opět kapacitní, ale jeden kondenzátor zde bude připojen mezi fáze a a b.

$$\begin{aligned} p &= \frac{3U^2}{X_C}\sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \\ q &= -3\frac{U^2}{X_C}\left[1 + \cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{3}\right)\right] \end{aligned} \tag{1.24}$$

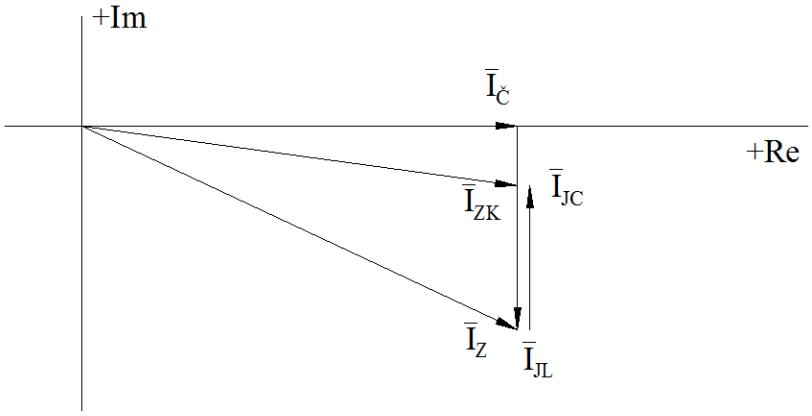
   Z pohledu klasické teorie by činný výkon měl být opět nulový, protože se jedná o čistě jalovou zátěž. Důvod proč reálný výkon není nulový: napětí na svorkách kondenzátoru se sinusově mění, a proto je kondenzátor nabíjen a vybíjen, dochází tedy k dodávce energie od zdroje značenou p. Okamžitý imaginární výkon je obdobný jako v 1.23 s rozdílem kmitající složky způsobenou nesymetrií zátěže.

Teorie okamžitých výkonů lépe popisuje nesymetrii zátěží a harmonické zkreslení. Kompenzace pomocí algoritmu založeného na *p-q* teorii je velmi flexibilní. Pomocí jí lze eliminovat zkreslení a odebírat od zdroje nezkreslený sinusový proud, i když je dodávané napětí nesymetrické nebo obsahuje harmonické složky.

1.3 Základ kompenzace

Protože kromě činné složky proudu prochází elektrizační soustavou také jalová složka proudu, musí být každý prvek konstruován na proud zdánlivý, který je vektorový součet obou

proudů stejně tak, jak je tomu i u výkonů. Činný proud, který chceme odebírat ze sítě, je pevně daný konstrukcí zařízení, které použijeme. Jalový výkon a jemu odpovídající jalový proud však ovlivnit lze a přispěje se tím k tomu, aby celkový zdánlivý proud procházející od zdroje ke spotřebiči byl menší. Dosáhne se tak menších ztrát na vedení a rozvodná sít nemusí být značně naddimenzovaná pro průchod nekompenzovaného zdánlivého proudu. Většina spotřebičů připojených k sítí je induktivního charakteru a odebírají induktivní jalový proud. Abychom tento proud v ideálním případě eliminovali, musíme do obvodu zařadit kondenzátor, který má jalový proud posunut o 180° proti cívkovému jalovému proudu. Tímto se dosáhne zmenšení odběru celkového odebíraného proudu. Názornější vysvětlení může být podáno ve fázorovém diagramu:

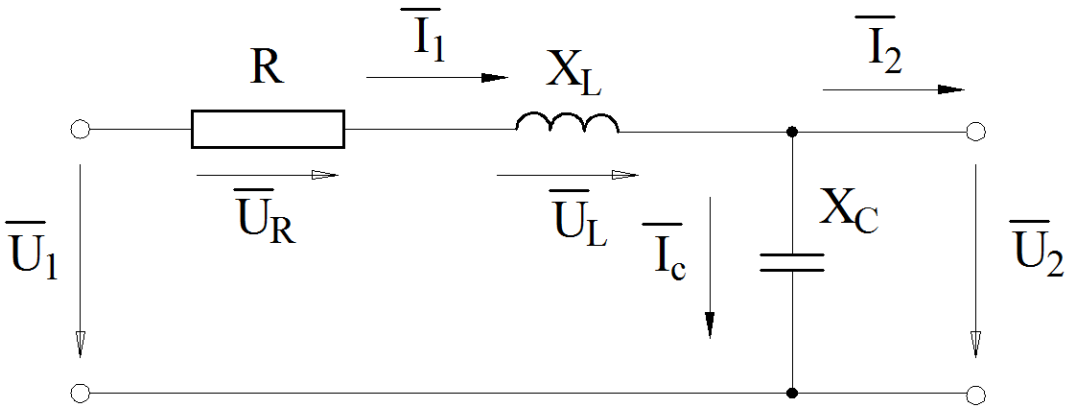


Obrázek 1-5 Princip snižování zdánlivého proudu

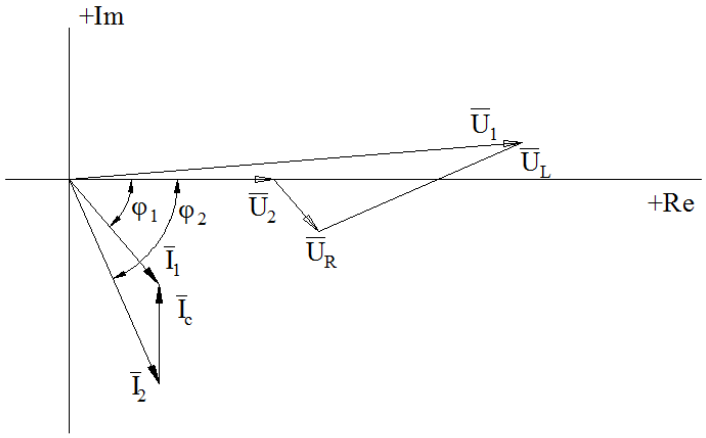
Kde I_{JL} je jalový proud indukčnosti, který se následně sníží připojením kondenzátoru, kterým začne protékat proud I_{JC}. Celkový zdánlivý proud klesne s velikosti I_Z na proud I_{ZK}. Jak jde vidět, tak činný výkon zůstává stále stejný.

1.4 Paralelní kompenzace

Pro snížení ztrát vlivem jalového výkonu se nejčastěji používá paralelní kompenzace. Oproti sériové kompenzaci snižuje přenosové ztráty na vedení a nezvyšuje razantně zkratové proudy.



Obrázek 1-6 Schéma paralelní kompenzace



Obrázek 1-7 Fázorový diagram paralelní kompenzace

Ve schématu znázorňuje rezistivitu vedení odpor R, indukčnost vedení reaktance X_L a připojený kompenzátor reaktance X_C. Proud tekoucí do zátěže je ve fázorovém diagramu značen jako I_2. Po připojení paralelního kondenzátoru začne téci kondenzátorem proud I_C, který v součtu s proudem I_2 dává proud I_1 a tento proud je následně odebírán ze sítě. I_1 má menší velikost než proud I_2 a tedy méně zatěžuje síť. Zmenší se také fázový posuv, a tedy vzroste účiník.

Matematicky řečeno, proud procházející vedením se změní takto:

$$\overline{I_1} = \overline{I_2} + \overline{I_C} \tag{1.25}$$

Pokud činný výkon zůstane stejný, tedy činná složka proudu je stejná, změní se fázový posuv z φ_2 na φ_1. Poměr jalové složky proudu I_{j1} procházející vedením po kompenzaci a jalové složky proudu I_{j2} procházející vedením před kompenzací se nazývá koeficient kompenzace k.

$$k = \frac{I_{j1}}{I_{j2}} = \frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_2} \tag{1.26}$$

Změna úbytku napětí vlivem kompenzace:

$$U_2 = U_1 - (I_{č} \cdot R + I_{j1} \cdot X_L) \tag{1.27}$$

Kde $I_{č}$ je činný proud procházející vedením, R je odpor vedení, I_{1j} je jalový proud procházející vedením po kompenzaci a X_L je reaktance vedení.

Výkon kondenzátoru, který je nutný pro změnu fázového posuvu z φ_2 na hodnotu φ_1 se vypočte jako:

$$Q_c = U_2 \cdot I_c \tag{1.28}$$

Následné ztráty na vedení se sníží o:

$$\delta P_{\Delta} = \Delta P - \Delta P_k = R \cdot |I_2|^2 - R \cdot |I_1|^2 \tag{1.29}$$

1.5 Dodržování účiníku

Z výše uvedené teorie by mělo být zřejmé, že vliv kompenzace je omezen na část vedení od kompenzačního zařízení až po zdroj elektrické energie. Distributor elektrické energie účiník sleduje a za nedodržení jsou odběrateli připsány cenové přirážky k platbě za odebraný výkon. Hodnota tzv. neutrálního účiníku je u nás stanovena v rozmezí $cos\varphi = 0{,}95_{IND}$ až $cos\varphi = 1{,}00_{IND}$. Cenové přirážky jsou uvedeny v Tabulce 1. Pro domácnosti tyto přirážky neplatí, sledují se pouze průmysloví odběratelé. Odběratel může být také pokutován za nevyžádané dodání jalové energie do sítě, které může být zapříčiněno překompenzováním odběru.

Tabulka 1 Cenové přirážky za nedodržení předepsaného účiníku [8]

Rozsah tgφ kVArh / kWh	Účiník cosφ	Přirážka v %	Rozsah tgφ kVArh / kWh	Účiník cosφ	Přirážka v %
0,311 - 0,346	0,95	-	1,008 - 1,034	0,70	37,59
0,347 - 0,379	0,94	1,12	1,035 - 1,063	0,69	39,66
0,380 - 0,410	0,93	2,26	1,064 - 1,092	0,68	41,80
0,041 - 0,440	0,92	3,43	1,093 - 1,123	0,67	43,99
0,441 - 0,470	0,91	4,63	1,124 - 1,153	0,66	46,25
0,471 - 0,498	0,90	5,85	1,154 - 1,185	0,65	48,58
0,499 - 0,526	0,89	7,10	1,186 - 1,216	0,64	50,99
0,527 - 0,553	0,88	8,37	1,217 - 1,249	0,63	53,47
0,554 - 0,580	0,87	9,68	1,250 - 1,281	0,62	56,03
0,581 - 0,606	0,86	11,02	1,282 - 1,316	0,61	58,67
0,607 - 0,632	0,85	12,38	1,317 - 1,350	0,60	61,40
0,663 - 0,659	0,84	13,79	1,351 - 1,386	0,59	64,23
0,660 - 0,685	0,83	15,22	1,387 - 1,423	0,58	67,15
0,686 - 0,710	0,82	16,69	1,424 - 1,460	0,57	70,18
0,711 - 0,736	0,81	18,19	1,461 - 1,494	0,56	73,31
0,737 - 0,763	0,80	19,74	1,495 - 1,532	0,55	76,56
0,764 - 0,789	0,79	21,32	1,533 - 1,579	0,54	79,92
0,790 - 0,815	0,78	22,94	1,580 - 1,620	0,53	83,42
0,816 - 0,841	0,77	24,61	1,621 - 1,663	0,52	87,05
0,842 - 0,868	0,76	26,32	1,664 - 1,709	0,51	90,82
0,869 - 0,895	0,75	28,07	1,710 - 1,755	0,50	94,70
0,896 - 0,922	0,74	29,87			
0,923 - 0,949	0,73	31,72	vyšší než	nižší než	
0,950 - 0,977	0,72	33,63	1,755	0,50	100,00
0,978 - 1,007	0,71	35,58			

2 KOMPENZÁTORY

Tato část se zabývá základním rozdělením jednotlivých typů kompenzačních zařízení.

2.1 Připojení paralelní kompenzace

Kompenzační zařízení lze připojit do sítě různými způsoby. V této kapitole jsou popsané používané druhy připojeni paralelní kompenzace

2.1.1 Individuální

Individuální kompenzace je nejjednodušší způsob snížení jalového výkonu. Kompenzační zařízení je umístěno v přímo na svorky kompenzovaného zařízení a tak se dosáhne zmenšení protékajícího jalového proudu od zdroje až po kompenzovaný spotřebič. Dosáhne se tak nevyšších úspor ztrát, ale využití kompenzace je závislé na provozu kompenzovaného spotřebiče.

Používá se obvykle pro spotřebiče vyšších výkonů, které jsou často v provozu. Jako příklad mohou být asynchronní motory, transformátory, kotelny, zářivková svítidla a jiné.

2.1.2 Skupinová

Pokud je individuální kompenzace neekonomická používá se skupinová kompenzace, kde je skupina spotřebičů kompenzována jedním zařízením. Je to například kompenzace na podružných rozvaděčích v průmyslovém podniku. Skupinovou kompenzaci je nutné navrhovat pro soudobý odebíraný výkon, proto vychází kompenzační výkon menší a je nutné ho regulovat.

2.1.3 Centrální

Jedná se o nečastější způsob kompenzace. Kompenzační zařízení je umístěno v blízkosti hlavního rozvaděče a protéká jím proud celého kompenzovaného výkonu. Nevýhodou centrálního řešení je to, že jalový proud od připojených spotřebičů zůstává stejný.

2.1.4 Kombinovaná

Je to kombinace předchozích případů kompenzace. Je velmi rozšířena ve velkých průmyslových podnicích.

2.2 Statické kompenzátory

V současné době se používají téměř výhradně statické kompenzátory. Lze využít i rotačních kompenzátorů, ale jejich cena a velikost je vytlačila z běžného použití. Proto nejsou v práci více zmíněny.

2.2.1 Prosté kondenzátory

Ke kompenzaci lze použít samotné nechráněné kondenzátory, u kterých je vyžadována tepelná stabilita při vysokém jalovém výkonu, odolnost proti přepětí a spolehlivost provozu. Pokud nejsou kondenzátory nijak hrazené, je nutné zajistit, že je v místě připojení minimální podíl nelineárních zátěží (10 až 15%). Pro jednofázový kondenzátor platí:

$$Q_C = U \cdot I \tag{2.1}$$

Po úpravě dle Ohmova zákona dostanu:

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \tag{2.2}$$

Nebo:

$$Q_C = I^2 \cdot X_C \tag{2.3}$$

Prosté kondenzátory jsou nejčastěji provedené jako třífázové a jsou zapojeny do trojúhelníka nebo do hvězdy. Pro trojfázový kondenzátor zapojený do trojúhelníka platí:

$$Q_{CD} = I^2 \cdot X_{CD} \tag{2.4}$$

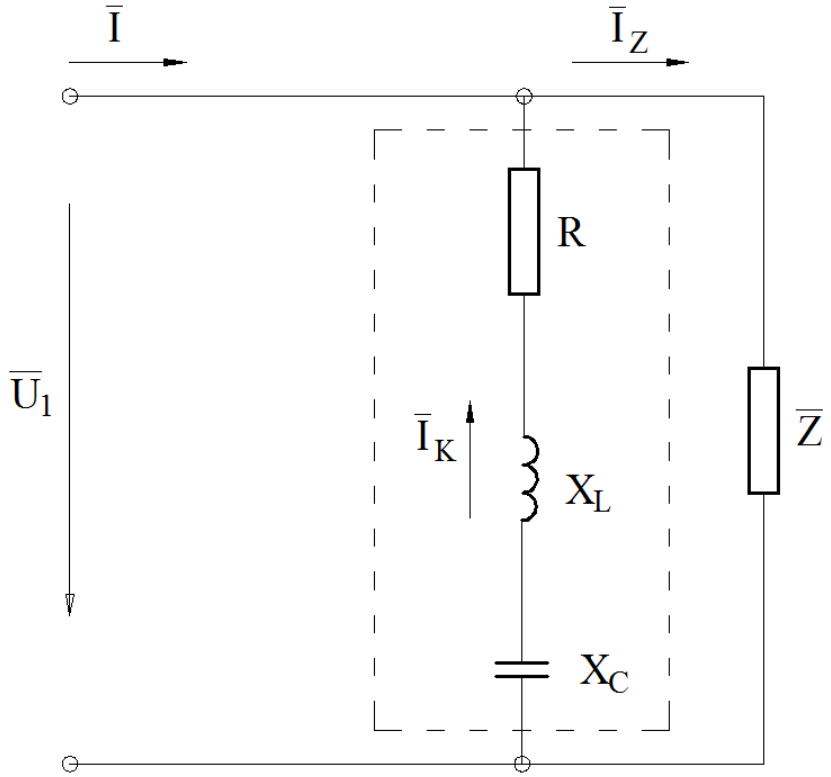
Do hvězdy pak:

$$Q_{CY} = 3 \cdot I^2 \cdot X_{CY} \tag{2.5}$$

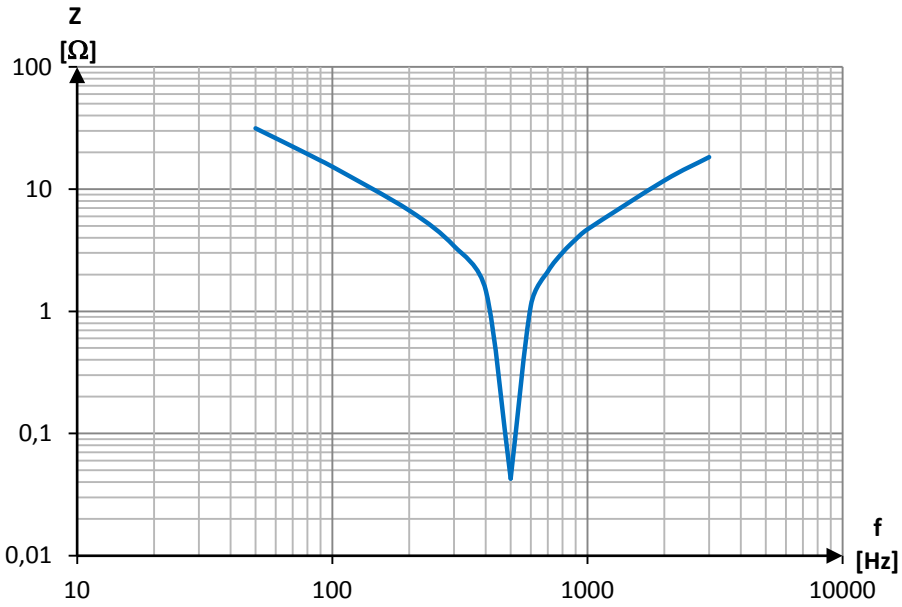
Obrázek 2-1 Nízkonapěťový kondenzátor firmy Silko s.r.o. [3]

2.2.2 Chráněné kompenzační sekce

Prostý kondenzátor není nijak chráněn působení nelinearity v sítí, tedy vyšších harmonických, která zvyšuje protékaný proud kondenzátorem, kterému klesá reaktance se stoupající frekvencí. Samotné kondenzátory by musely potom být značně naddimenzované. Kvůli zamezení působení vyšších harmonických, se ke kondenzátoru přidá tlumivka, se kterou vytvoří kondenzátor rezonanční obvod, který zaručuje potlačení vyšších harmonických proudů.



Obrázek 2-2 Chráněná kompenzační sekce



Obrázek 2-3 Frekvenční charakteristika sériového rezonančního obvodu

Na obrázku 2-2 je jednoduché zapojení chráněné kompenzační sekce paralelně k zátěži, kterou potřebujeme kompenzovat. Jedná se vlastně o jednoduchý sériový rezonanční RLC obvod.

Z frekvenční charakteristiky sériového RLC obvodu je zřejmé, že pro frekvence nižší než je frekvence rezonanční má obvod kapacitní charakter, pro frekvence vyšší má charakter induktivní. Toto chování plyne z Thompsonova vztahu. Pro výpočet induktivní reaktance cívky platí:

$$X_L = \omega L \tag{2.6}$$

Pro kondenzátor platí:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \tag{2.7}$$

Pokud hledáme rezonanční frekvenci f_r , při které si je X_L a X_C rovno, vyjde vztah:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.8}$$

Je nutné volit rezonanční frekvenci tak, aby byla vyšší než frekvence jmenovitá a zároveň nižší než nejnižší harmonická. Tak nevznikne skutečný rezonanční stav. Musí se dále brát v potaz, že po připojení tlumivky bude na kondenzátoru vyšší napětí než síťové. Kondenzátor tedy musí být konstruován tak, aby odolal i vyššímu napětí než na které je připojen.

Pro lepší názornost se zavádí pomocné veličiny:

Řád harmonické n_r. Je to poměr rezonanční f_r a jmenovité frekvence f_n:

$$n_r = \frac{f_r}{f_n} \tag{2.9}$$

Činitel zatlumení p:

$$p = \frac{1}{n_r^2} \tag{2.10}$$

Činitel zatlumení je také definován jako podíl reaktance induktivní X_L a kapacitní X_C:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \tag{2.11}$$

Reaktanci tlumivky dostanu úpravou předešlého vztahu jako:

$$X_L = -p \cdot X_C \tag{2.12}$$

Reaktance kompenzačního článku:

$$X_{LC} = (1 - p) \cdot X_C \tag{2.13}$$

Jak již bylo řečeno, vlivem připojení tlumivky do série s kondenzátorem se zvýší napětí na kondenzátoru. Toto napětí U_C se vypočte ze vztahu:

$$U_C = \frac{U_n}{1-p} \tag{2.14}$$

Kde U_n je jmenovité napětí sítě.

Při návrhu rezonančního obvodu se musí brát na zřetel, že v rozvodné síti se vyskytuje signál HDO a při špatném naladění rezonančního obvodu bychom tento signál mohli značně ztlumit anebo by mohlo nastat při rezonanci nedovolené navýšení napětí tohoto signálu.

2.2.3 Kompenzační filtry

Kompenzační filtry se používají tam, kde je nárůst vyšších harmonických velký do takové míry, kdy není možno použít samotné hrazené kompenzace. Princip spočívá opět ve funkci sériového rezonančního RLC obvodu, který je naladěn na frekvenci harmonické. Je nutné počítat s proudovým namáháním nejenom první harmonické, kde se filtr chová jako kompenzátor ale i s namáháním od ostatních harmonických, na které je filtr naladěn. Zpravidla jsou tyto filtry řešeny jako několik paralelních filtrů, kde každý z nich je naladěn na frekvenci jednotlivé harmonické. Impedance Z jednotlivého filtru je dán vztahem:

$$\overline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \tag{2.15}$$

Činitel jakosti filtru Q je definován jako:

$$Q = \frac{1}{\omega_r \cdot R \cdot C} = \frac{\omega_r \cdot L}{R} \tag{2.16}$$

Kde ω_r je úhlová rychlost odpovídající rezonanční frekvenci.
Udává, kolikrát je větší napětí na cívce nebo kondenzátoru při rezonančním kmitočtu, než je napětí na odporu a něž je celkové napětí.

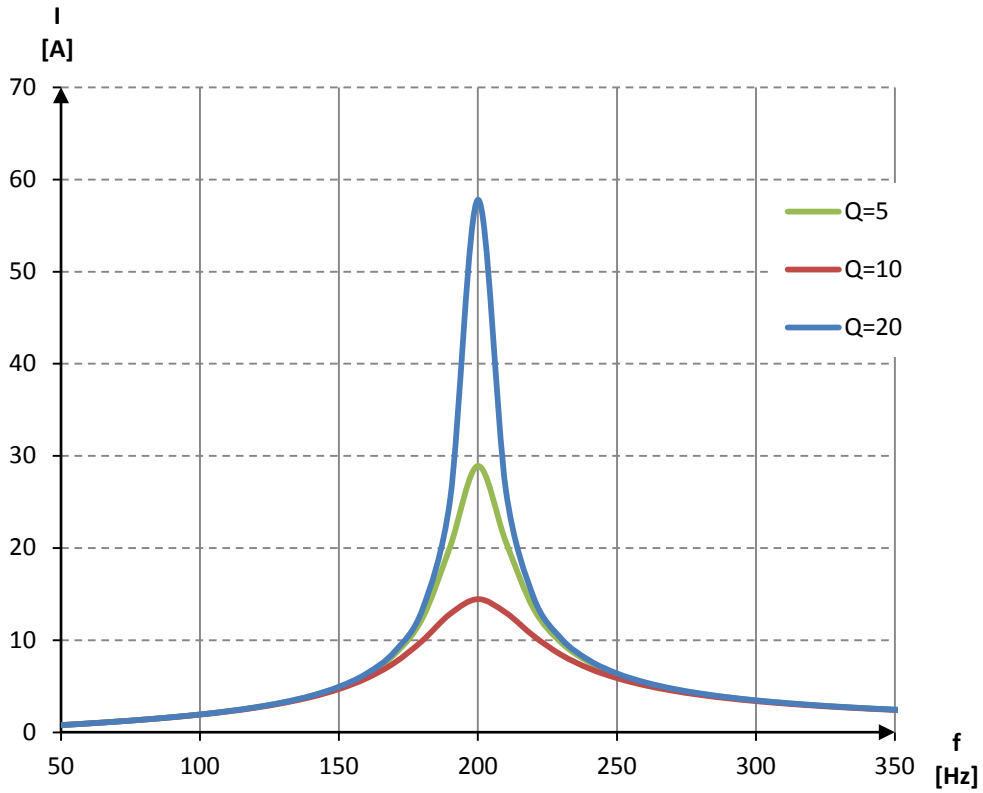
Pokud vztáhneme proud filtru k proudu při rezonanci, dostaneme po úpravě vztahu 2.16 výraz:

$$\frac{I}{I_R} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega}\right)^2 \cdot Q^2}} \tag{2.17}$$

Kde I je celkový proud, I_R je čistě ohmická složka proudu, ω je úhlová rychlost. Pro názorné účely se vztah 2.17 upraví (odvozeno v [1]):

$$I = \frac{2\pi f_r \cdot U \cdot Q \cdot C}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}\right)^2 \cdot Q^2}} \tag{2.18}$$

Grafické vyjádření pro vztah 2.18:



Obrázek 2-4 Závislost proudu filtru na kmitočtu

Lze vidět, že čím větší je činitel jakosti, tím více filtr pohlcuje rezonanční proud. To však není vždy žádoucí z důvodu přetěžování dané kompenzační baterie a proto lze činitel jakosti snížit přiřazením většího sériového odporu a tím snížení amplitudy proudu. Činitel jakosti lze také ovlivnit přiřazením paralelního odporu k tlumivce nebo ke kondenzátoru. Používá se spíše připojení k tlumivce, pak je menší napěťové namáhání rezistoru při základním kmitočtu.

3 REGULACE KOMPENZÁTORŮ

Bez regulace by bylo možno kompenzovat pouze statické zátěže, které se v čase nemění. Takových případů je však minimum, proto je nutné zaručit, aby i při dynamických stavech byl účiník co nejblíže roven předepsané hodnotě.

3.1 Stupňovitě řízené kompenzátory

Problematika rozdílných induktivních zátěží se často řeší pomocí stupňovitých řízených kompenzátorů, které na základě odebíraného proudu připojují nebo odpojují sekce kondenzátorů. Aby platila podmínka $cos\varphi \geq 0{,}95$ nebo $tg\varphi \leq 0{,}33$ musí být pro stupně stejného kompenzačního výkonu splněn vztah:

$$tg\varphi \geq \frac{Q_L - N \cdot Q_{Cn}}{P} \tag{3.1}$$

Kde Q_L je jalový induktivní výkon zátěže, Q_{Cn} reprezentuje jalový výkon jednoho kompenzačního stupně a N je počet stupňů. Pro výpočet potřebných počtu stupňů lze rovnici upravit:

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot tg\varphi}{Q_{Cn}} \tag{3.2}$$

3.1.1 Kontaktní

Spínání jednotlivých kondenzátorů za účelem dosažení cíleného účiníku je značný problém, protože při sepnutí dochází k přechodnému ději. Při spínání kondenzátorů může narůst amplituda nabíjecího proudu až na stonásobek jmenovitého proudu kondenzátoru. Amplituda nabíjecího proudu je omezena impedancí napájecí sítě, tuto impedanci lze uměle navýšit krátkodobým přiřazením odporu v sérii spolu s kondenzátorem a tím se omezí nabíjecí proud, zatímco stálá funkčnost kompenzátoru je nenarušena. U hrazené kompenzace je amplituda navíc omezena v sérii zařazenou tlumivkou, takže amplituda nabíjecího proudu je znatelně menší než u nehrazené kompenzace.

Nevýhodou kontaktního spínání je nedefinovaný okamžik připojení kapacitní zátěže k síti. Takto nastane silný přechodový jev v sítí, který poškozuje kontakty spínačů a také do sítě vkládá impulzní rušení, které nepříznivě působí na provoz výpočetní techniky a jiných elektronických zařízení. Další nevýhodou je malá maximální četnost spínání stykačů za hodinu. S rostoucím výkonem stykačů klesá počet operací za hodinu, což je velmi nevýhodné pro kompenzování větších zátěží.

I přes nevýhody je kontaktní spínání pomocí stykačů nejrozšířenějším způsobem připojování kondenzátorových baterií v rozvaděčích se stupňovitě regulovaným kompenzačním výkonem.

3.1.2 Bezkontaktní

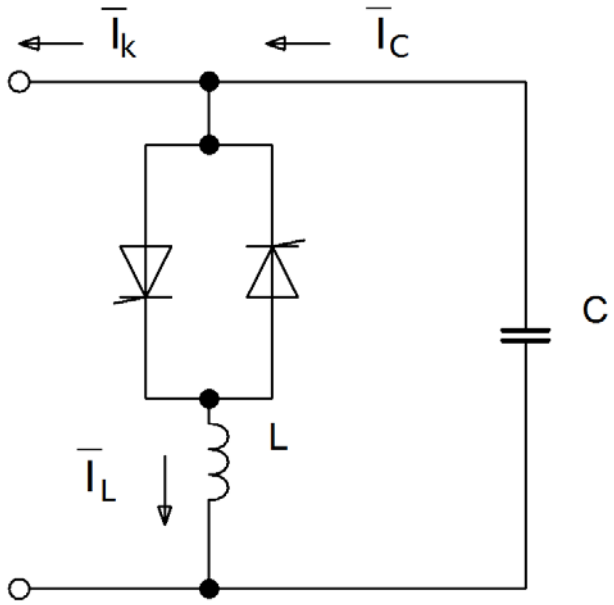
Pokud je požadavek na vyšší rychlost odezvy odebíraného jalového výkonu, lze místo klasických stykačů použít bezkontaktní spínání. Nejčastěji jsou použity tyristorové moduly, které pracují s obdobným algoritmem jako u kontaktního spínání a eliminují nevýhody kontaktního

spínání. Algoritmus pro spínání a odepínání jednotlivých stupňů je obdobný jako při kontaktním spínání, je však znatelně rychlejší.

3.2 Plynule řízené kompenzátory

3.2.1 Pasivní

Pro snížení kompenzačního výkonu je možné paralelně ke kompenzátoru připojit fázově řízený tyristorový spínač v antiparalelním zapojení spolu s tlumivkou. Je to výhodnější řešení oproti odepínání sekcí kondenzátorů, protože tak nenastanou nepříznivé přechodné jevy.



Obrázek 3-1 Základní zapojení plynule řízeného kompenzátoru

Takto jednoduše zapojený obvod je schopen řídit protékající, v ideálním případě čistě induktivní, proud tlumivkou $\overline{I_L}$. Tento proud, protože je v protifázi oproti proudu kondenzátorem $\overline{I_C}$, snižuje celkový proud. Kompenzační proud $\overline{I_k}$ bude nulový, pokud se dosáhne stavu, kdy protéká stejně velký proud tlumivkou a kondenzátorem. Naopak, pokud budou tyristorové spínače po celou dobu nesepnuty, tlumivkou nebude procházet žádný proud a výsledný kompenzační proud se bude rovnat proudu kondenzátorem.

3.2.2 Aktivní

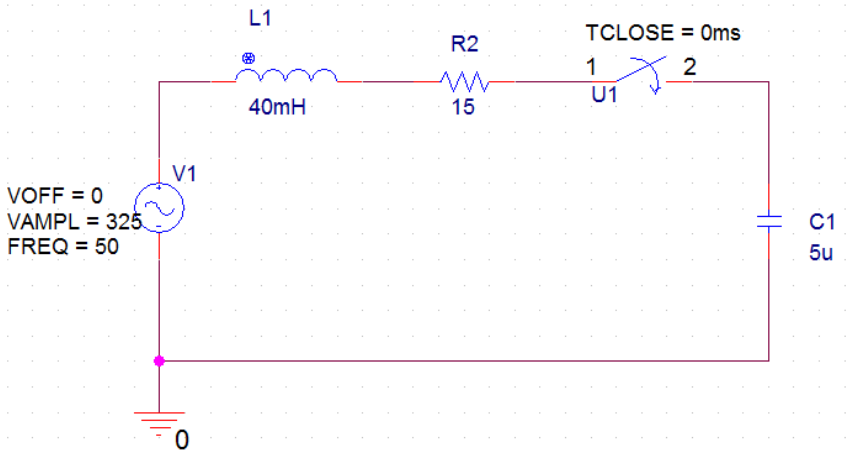
Aktivní filtry jsou paralelně nebo sériově zapojené generátory, které umí filtrovat harmonické složky i v dynamických stavech a to tím způsobem, že pouští do sítě proud opačného směru než je proud analyzovaný. Princip aktivních filtrů většinou staví na IGBT tranzistorech, pomocí kterých je možné realizovat kompenzátor s výkonem řádově jednotek MVA. Spínáním tranzistorů lze dosáhnout požadovaného tvaru tekoucího do filtru, který však obsahuje množství harmonických v řádech kHz. Je nutné zapojit mezi filtr a napájecí sít pasivní filtr fungující jako dolní propust.

4 SIMULACE VLIVU KOMPENZÁTORŮ

Tato kapitola ukazuje vliv kompenzačního zařízení na zatížení sítě a také mezní hodnoty, které mohou nastat. Ve všech případech se uvažuje pouze jednofázově, stejně jak jsou řešeny vytvořené modely. Jako simulační program byl zvolen OrCAD od firmy Cadence Design Systems, Inc.

4.1 Spínání kondenzátorů

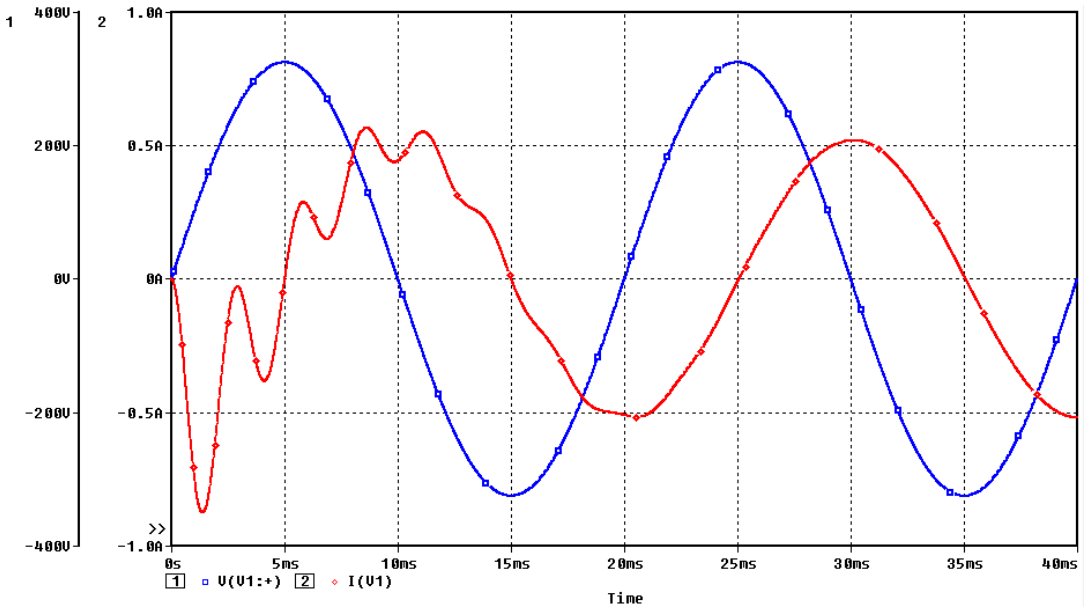
Při připínání kondenzátoru na síť může nastat značný proudový ráz. Velikost a doba proudového rázu závisí na době a stavu nabití kondenzátoru při připojení k síti.



Obrázek 4-1 Schéma zapojení - spínání kondenzátoru

Na tomto jednoduchém schématu lze demonstrovat jednotlivé způsoby připojení kondenzátoru k síti a následné přechodové jevy.

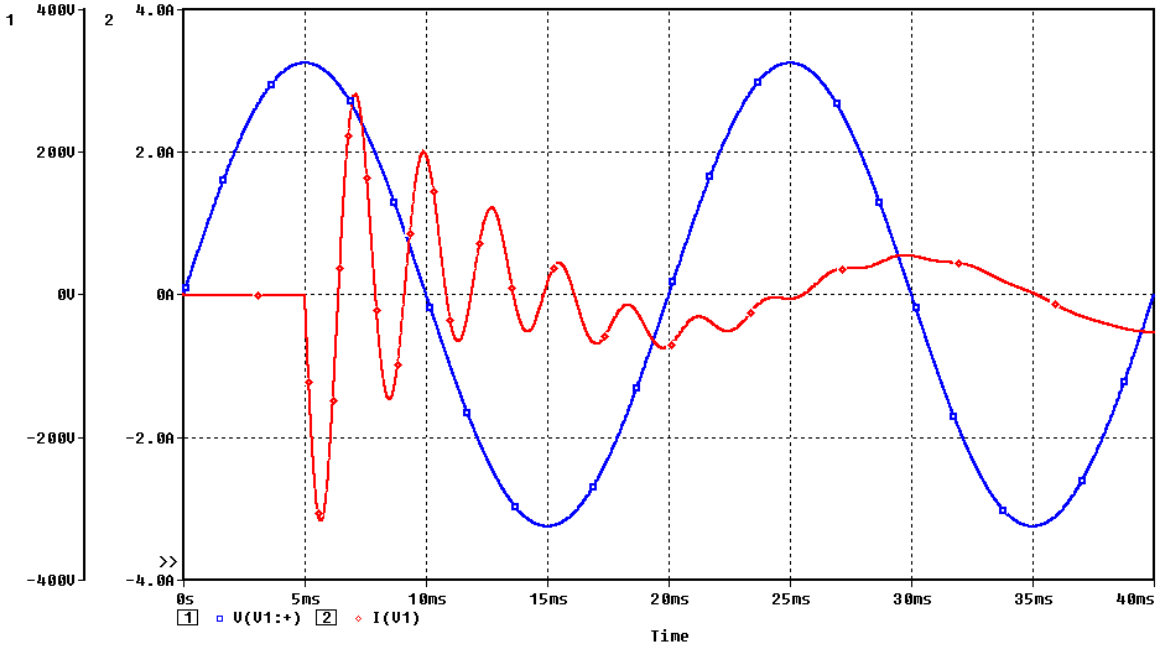
4.1.1 Spínání vybitého kondenzátoru při průchodu napětí nulou



Obrázek 4-2 Připojení vybitého kondenzátoru při průchodu napětí nulou

Lze vidět, že sepnutím dojde k přechodovému jevu, kde amplituda proudu je přibližně o 50% větší než hodnota ustálená. I přes toto navýšení je tento děj nejvhodnější, protože rychle odezní a po jedné periodě už je zkreslení proudu téměř neznatelné.

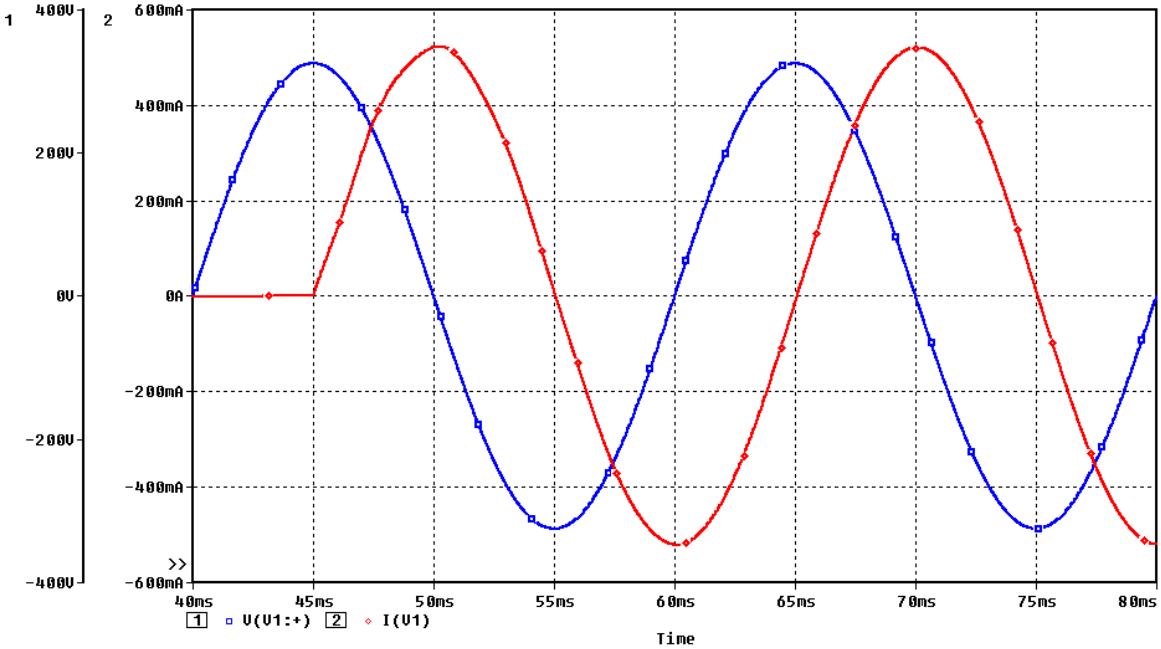
4.1.2 Spínání vybitého kondenzátoru při průchodu amplitudou napětí



Obrázek 4-3 Připojení vybitého kondenzátoru při průchodu napětí amplitudou

Zde je amplituda přechodového jevu až šestkrát větší než ustálená hodnota amplitudy proudu. Je to nejméně vhodný stav pro připojení kondenzátoru k síti. Při tomto připnutí může nastat spékání kontaktů stykačů.

4.1.3 Spínání nabitého kondenzátoru při průchodu amplitudou napětí



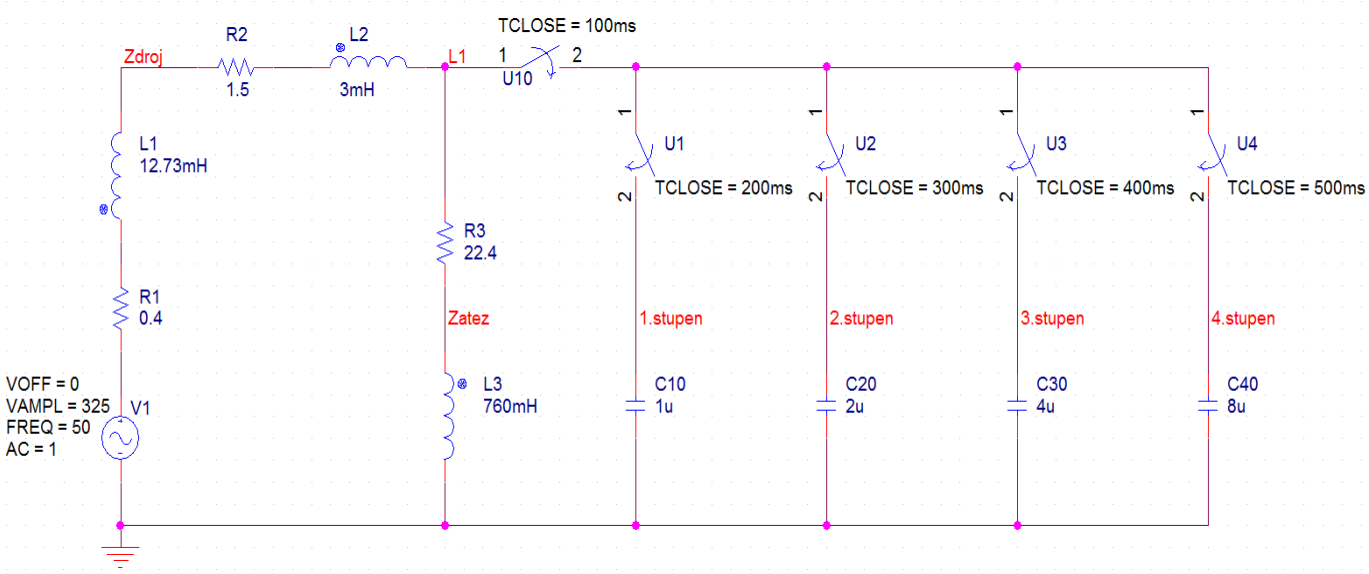
Obrázek 4-4 Připojení nabitého kondenzátoru při průchodu napětí amplitudou

Při tomto spínání přechodový jev nenastane. Jde o ideální případ, avšak kvůli nutnosti nabití kondenzátoru před samotným připnutím k napájecí síti se tento typ spínání nepoužívá tolik jako spínání kondenzátoru při průchodu napětí nulou, které není tak náročné jako spínání při průchodu amplitudou napětí.

4.2 Simulace kompenzátorů

4.2.1 Jednoduchý kompenzátor

Ačkoliv tento typ není nijak chráněný proti vyšším harmonickým, tak v laboratorním modelu, kde není předpoklad značného zkreslení, postačí. Parametry obvodu jsou znázorněny ve schématu.



Obrázek 4-5 Schéma zapojení simulace jednoduchého kompenzátoru

Parametry zdroje představují součástky R1 a L1, parametry vedení R2 a L2 a zátěž R3 a L3. Stupně kompenzátoru pak C10, C20, C30 a C40. Velikosti hodnot R2 a L2 odpovídají skutečným hodnotám zkonstruovaného modelu vedení, stejně tak hodnoty jednotlivých kompenzačních stupňů. Toto je krajní případ kdy proud zdroje bude maximálně $|I_{V1}| = 0{,}94\text{A}$. Hodnoty kondenzátorů jsou voleny tak, aby pokryly co největší rozsah zatížení a to od 1uF po 15uF se stupněm 1uF. Pro názornost účinku kompenzace je zátež téměř čistě induktivního charakteru. Výpočet pro ideální hodnotu kondenzátoru při aktualním zapojení:

$$\begin{aligned}\overline{Z} &= \overline{Z}_{Zdroj} + \overline{Z}_{L1} + \overline{Z}_{Zatez} \\ &= (R_1 + j \cdot 2\pi f L_1) + (R_2 + j \cdot 2\pi f L_2) \\ &\quad + (R_3 + j \cdot 2\pi f L_3) \\ &= (0{,}4 + 4j) + (1{,}5 + 0{,}94j) + (22{,}4 + 238{,}76j) \\ &= (24{,}3 + 243{,}7j) = 244{,}9\angle 84{,}31°\Omega\end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\overline{I_{V1}} = \frac{U}{\overline{Z}} = \frac{230}{24{,}3 + 243{,}7j} = (0{,}093 - 0{,}93j) = 0{,}94\angle -84{,}31°\text{A} \tag{4.2}$$

$$\overline{S} = U \cdot \overline{I_{V1}^{*}} = 230 \cdot (0{,}093 + 0{,}93j) = (21{,}39 + 213{,}9j) = 214{,}96\angle 84{,}31°\text{VA} \tag{4.3}$$

Aby odebíraný proud nebyl zatížen cenovými přirážkami dle kapitoly 1.5., musí být účiník nejméně roven hodnotě 0,95.

$$\begin{aligned} S &= P \pm jQ \\ P &= 21{,}39\text{W} \\ Q &= 213{,}9\text{Var} \end{aligned} \tag{4.4}$$

$$\begin{aligned} cos\varphi_k = 0{,}95, tg\varphi_k = 0{,}33 \\ cos\varphi = 0{,}094, tg\varphi = 10{,}57 \end{aligned} \tag{4.5}$$

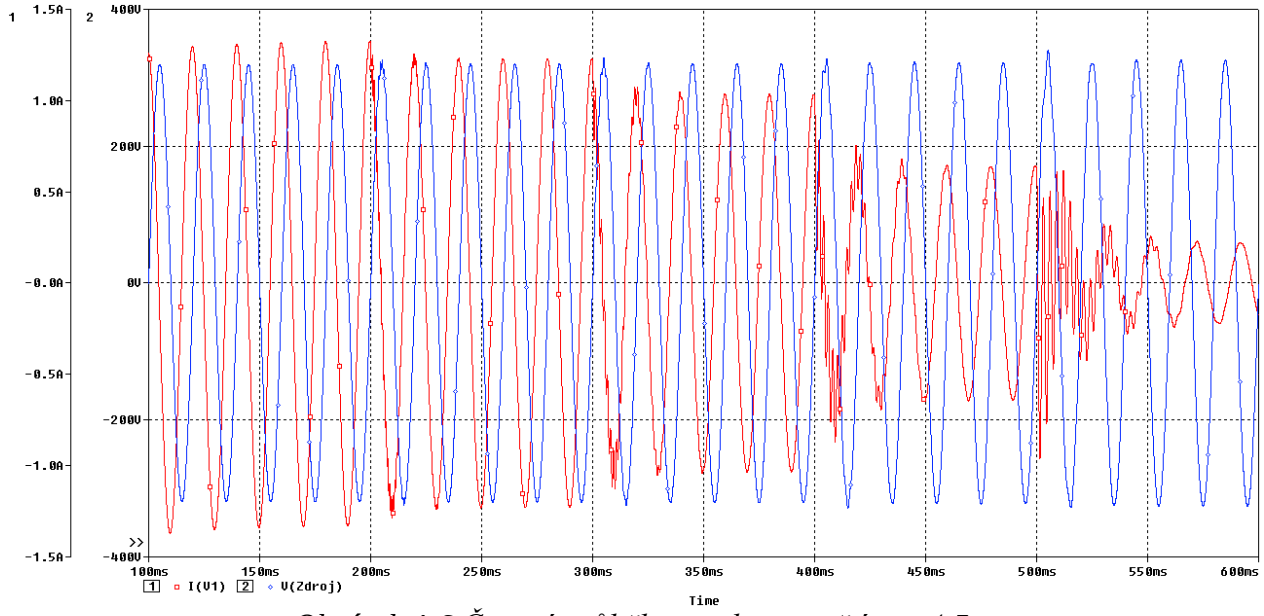
$$\begin{aligned} Q_C &= P(tg\varphi - tg\varphi_k) = 21{,}39 \cdot 10{,}25 = 219{,}22\text{Var} \\ C_{ideal} &= \frac{Q_C}{U^2\omega} = \frac{219{,}22}{230^2 \cdot 2\pi \cdot 50} = 13{,}19\mu\text{F} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Proud odebíraný od zdroje se nyní sníží na:

$$\begin{aligned} \overline{Z_k} = \overline{Z}_{Zdroj} + \overline{Z}_{L1} + \frac{\overline{Z}_{Zatez} \cdot \overline{Z_C}}{\overline{Z}_{Zatez} + \overline{Z_C}} \\ = (R_1 + j \cdot 2\pi f L_1) + (R_2 + j \cdot 2\pi f L_2) \\ + \frac{(R_3 + j \cdot 2\pi f L_3) \cdot \frac{1}{j \cdot 2\pi f C_{ideal}}}{(R_3 + j \cdot 2\pi f L_3) + \frac{1}{j \cdot 2\pi f C_{ideal}}} \\ = (0{,}4 + 4j) + (1{,}5 + 0{,}94j) \\ + \frac{(22{,}4 + 238{,}76j) \cdot (-241{,}33j)}{(22{,}4 + 238{,}76j) - 241{,}33j} \\ = (2568{,}13 + 58{,}04j) = 2568{,}78\angle 1{,}29°\Omega \end{aligned} \tag{4.7}$$

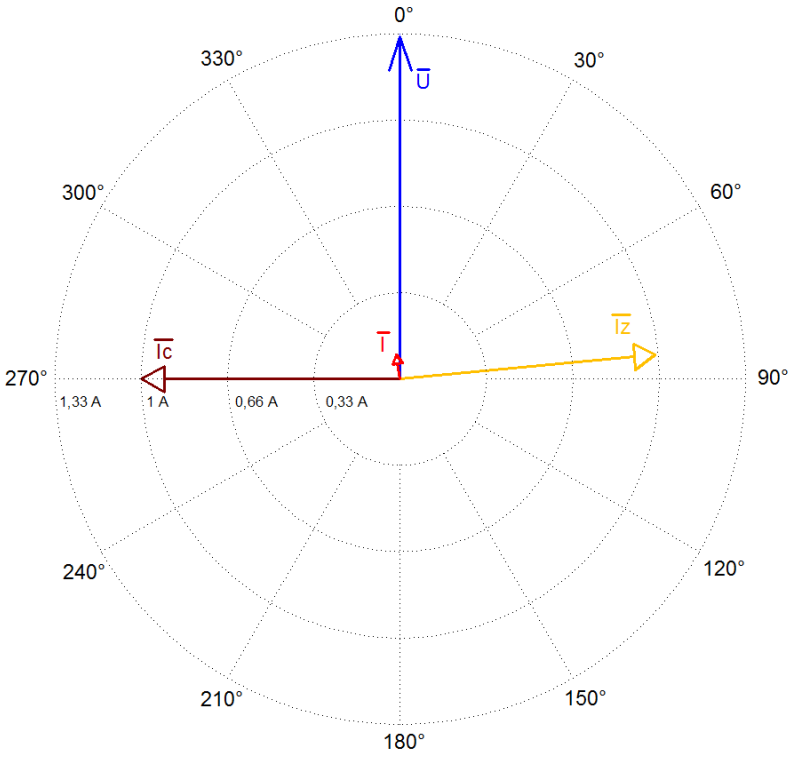
$$\begin{aligned} \overline{I_{V1_k}} = \frac{U}{\overline{Z_k}} = \frac{230}{2568{,}13 + 58{,}04j} = (0{,}0895 - 0{,}002j) \\ = 89{,}5\angle -1{,}29°\text{mA} \end{aligned} \tag{4.8}$$

Proud protékající od zroje k záteži klesne téměř jedenáctkrát a tím také klesne úbytek napětí na vedení (není počítán). Jak již bylo řečeno, jedná se o mezní stav, kdy má zátěž téměř výhradně induktivní charakter. Pokud se do série k indukčnosti L3 přidá odpor, zvyší se činná složka proudu a nebude potřeba celých 13μF na kompenzaci, ale méně.



Obrázek 4-6 Časový průběh proudu a napětí pro 4-5

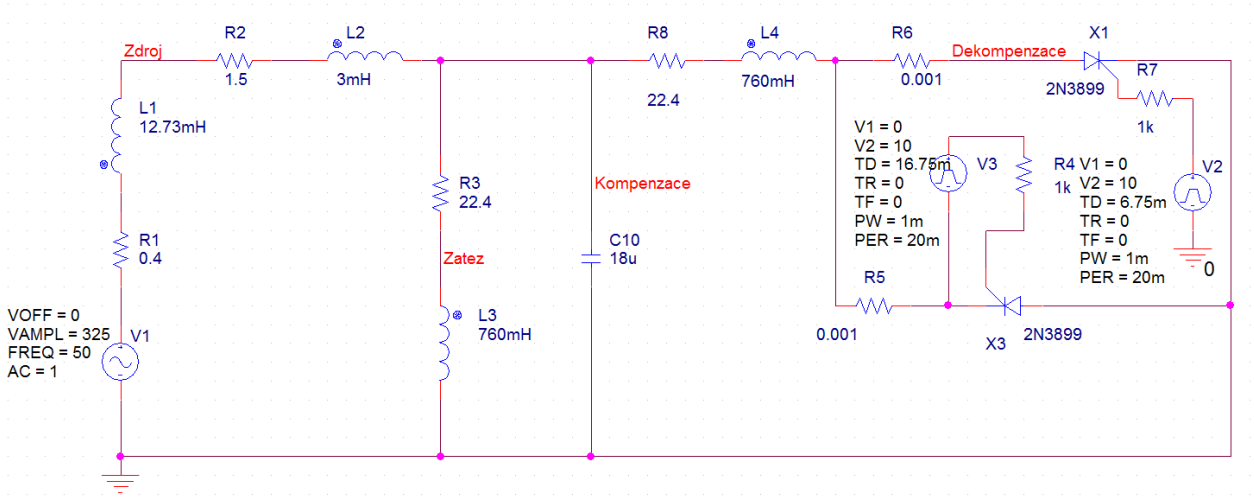
Procházející proud zdrojem (červeně) se při každém připnutí jednotlivé sekce zmenší až na hodnotu $|I_{V1}| = 154{,}86\text{mA}$. Použitý regulátor ve vytvořených modelech nijak nesleduje průchody napětí (modře) nulou nebo maximem, zde jsou však spínány jednotlivé stupně v průchodu napětí nulou. Ačkoliv se procházející proud zmenšil přibližně šestkrát, není to ideální stav kompenzace a ve skutečnosti je v době připnutí poslední sekce překompenzováno. Na obrázku 4-7 je fázorový diagram pro poslední část průběhu, tedy od 500ms, kde $\overline{I_C}$ je proud protékající kompenzační baterií, $\overline{I_Z}$ znázorňuje proud tekoucí zátěží a $\overline{I}$ je proud odebíraný ze sítě.



Obrázek 4-7 Fázorový diagram pro 4-6

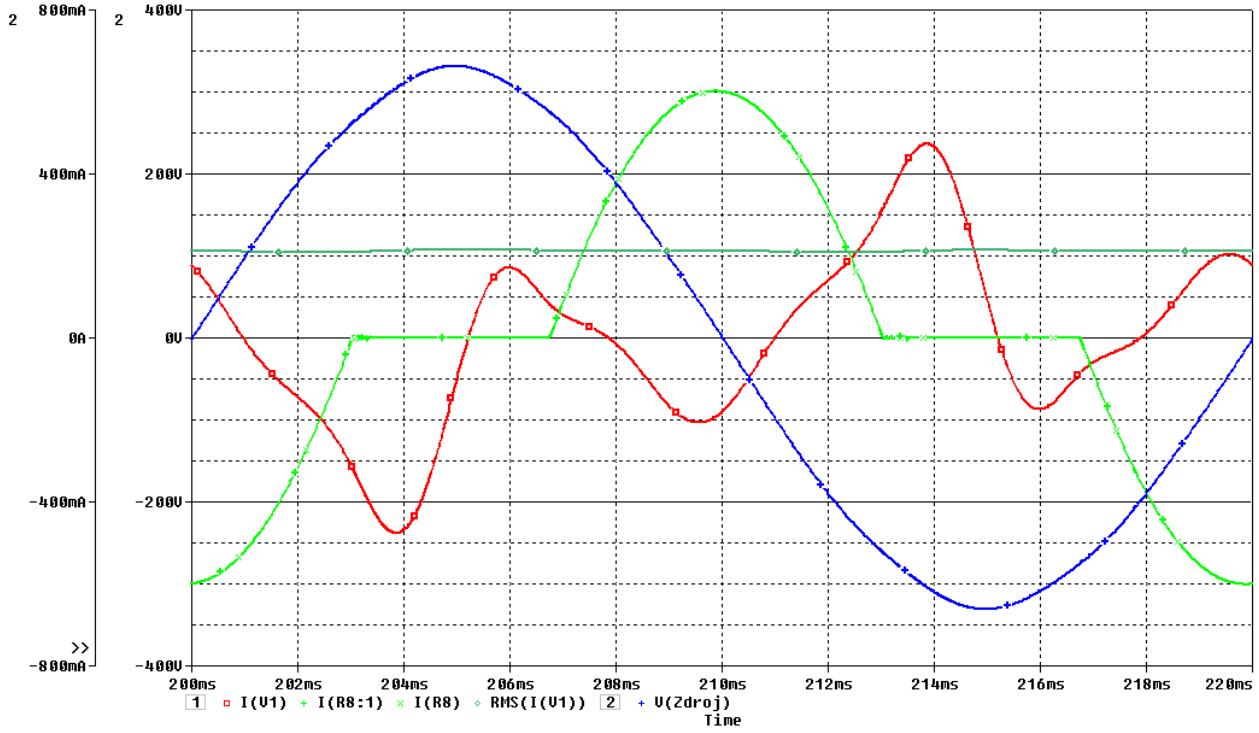
4.2.2 Plynulá dekompenzace

Aby bylo schéma zapojení srozumitelnější, jsou vynechány jednotlivé kompenzační stupně, které nahradil kondenzátor o kapacite 18μF, který představuje větší kompenzační výkon než v předchozím případě. Takto je mírně překompenzováno a lépe se ukáže účinek dekompenzace.



Obrázek 4-8 Schéma zapojení simulace dekompenzace

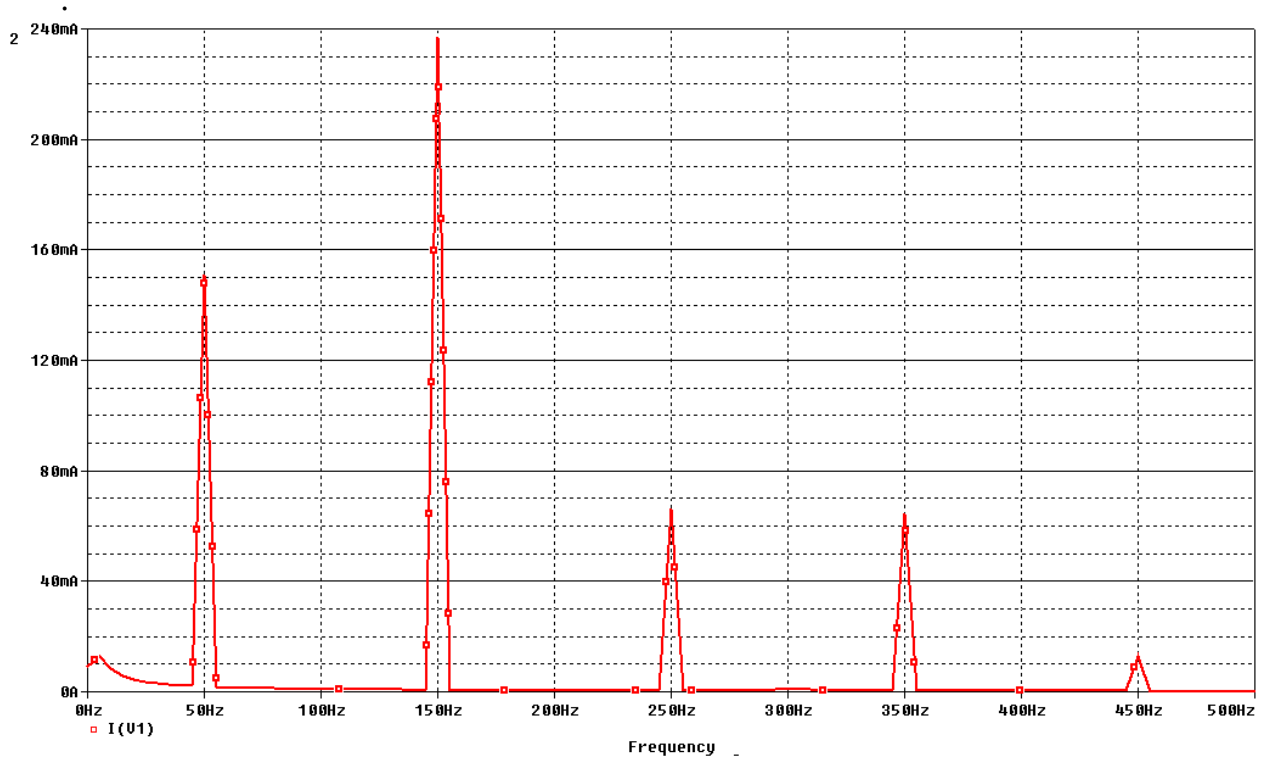
Parametry zdroje, vedení a zátěže jsou stejné jako v předchozím případě. Samotná dekompenzace je v simulaci řízená zdroji napětí, které nezávisle spínají tyristory X1 a X3.



Obrázek 4-9 Průběh okamžitých hodnot pro 4-8

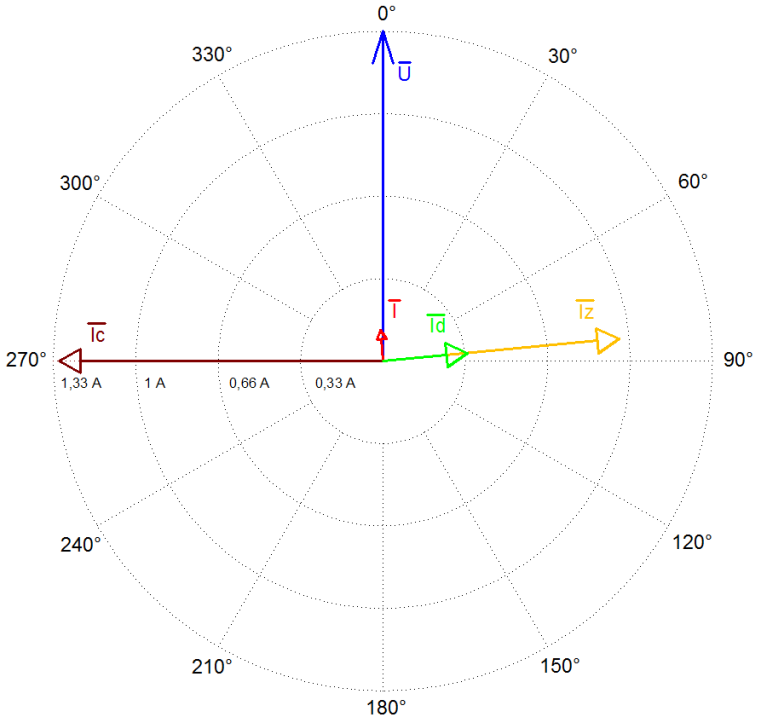
Protékající proud dekompenzací (zeleně) a jeho vliv na odebíraný proud ze sítě je značný (červeně). Jeho efektivní hodnota odebíraného proudu je $|I_{V1}| = 210{,}89\text{mA}$ (tmavě zelená), což je hodnota větší, než v předchozím případě, ale je téměř činného charakteru, jak lze vidět na

obrázku 4-11. Tento způsob jemného dorovnávání má nevýhodu v zanesení vyšších harmonických do sítě. Rozložení frekvenčních složek vstupního proudu je na obrázku 4-10



Obrázek 4-10 Fourierova transformace pro 4-9

Fázorový diagram je obdobný jako 4-7, protože uvažovaná impedance dekompenzace je stejná jako impedance zátěže, takže fázový posuv zátěže a dekompenzace je stejný.



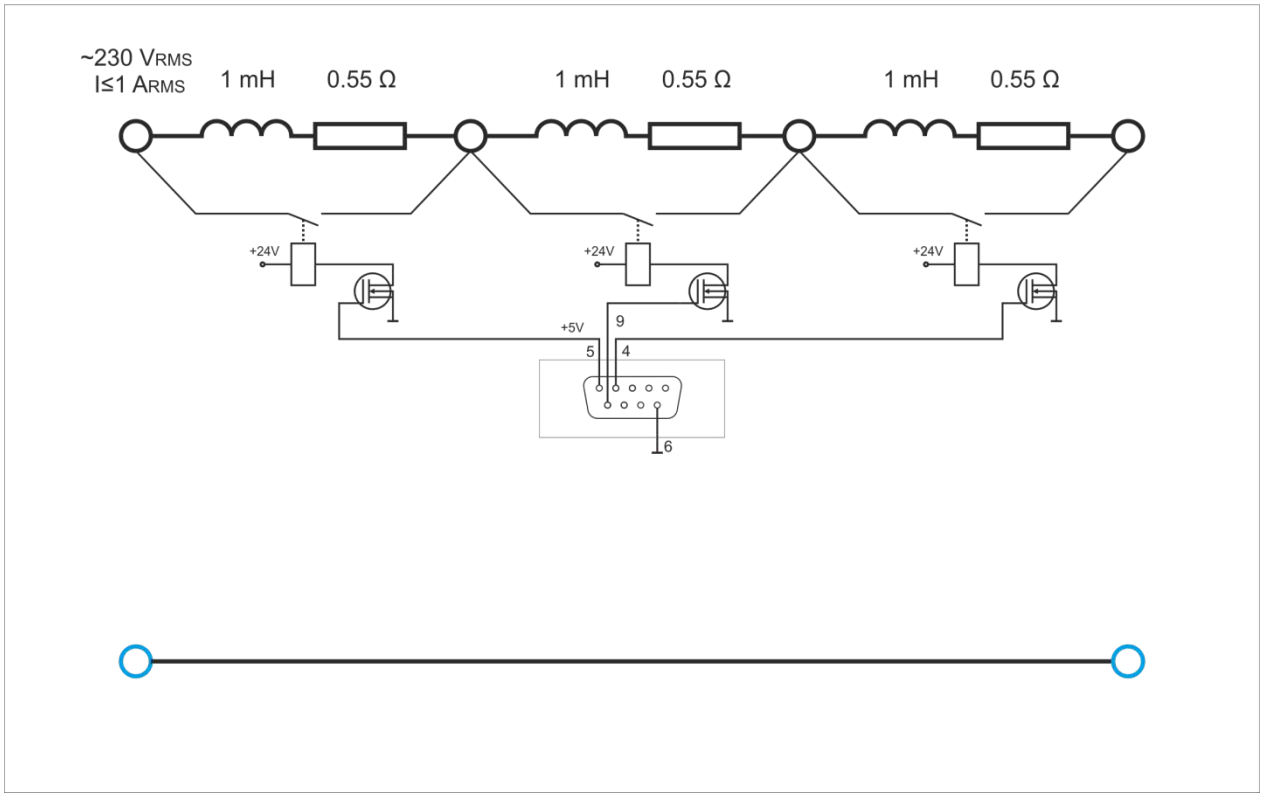
Obrázek 4-11 Fázorový diagram pro 4-9

5 NÁVRH A REALIZACE LABORATORNÍHO MODELU

Na základě provedených simulací jsou navrhnuty a vytvořeny celkem čtyři jednofázové modely. Požadavky byly: $I = 1\text{A}$, $U = 230\text{V}$. Modely jsou ve skříňkách ZPS 16 od firmy Abtech.

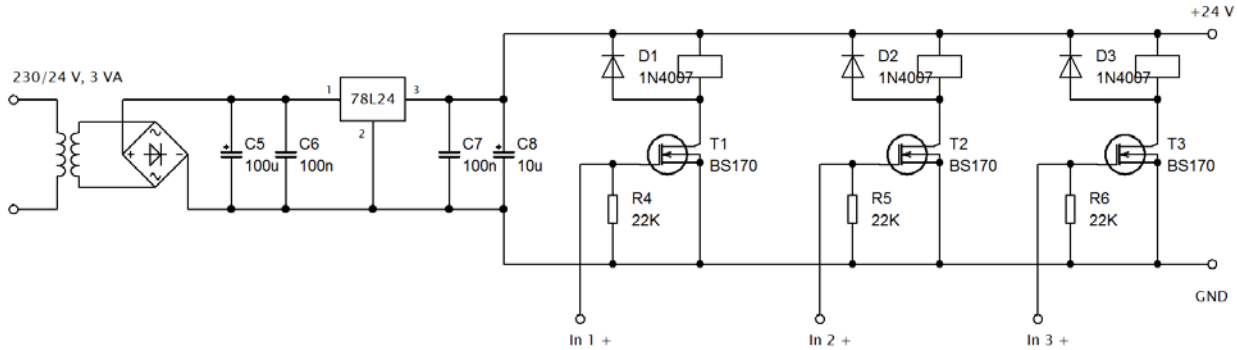
5.1 Model vedení

Model vedení je rozdělen celkem na tři části, aby se dala simulovat různá délka vedení. Parametry jedné sekce je: $R = 0{,}55\Omega$, $L = 1\text{mH}$. Propojení je možné ruční přes bezpečnostní zdířky, nebo pomocí relátek, které jsou řízeny z programu LabView, přes kartu NI USB 6009.



Obrázek 5-1 Přední maska modelu vedení

Karta NI USB 6009 má limitovaný proud, který je schopna dodat do digitálních výstupů a to 8mA při napětí 5V. Proto byl vytvořen zesilovač, který umožňuje spínání silové části i z TTL logiky.

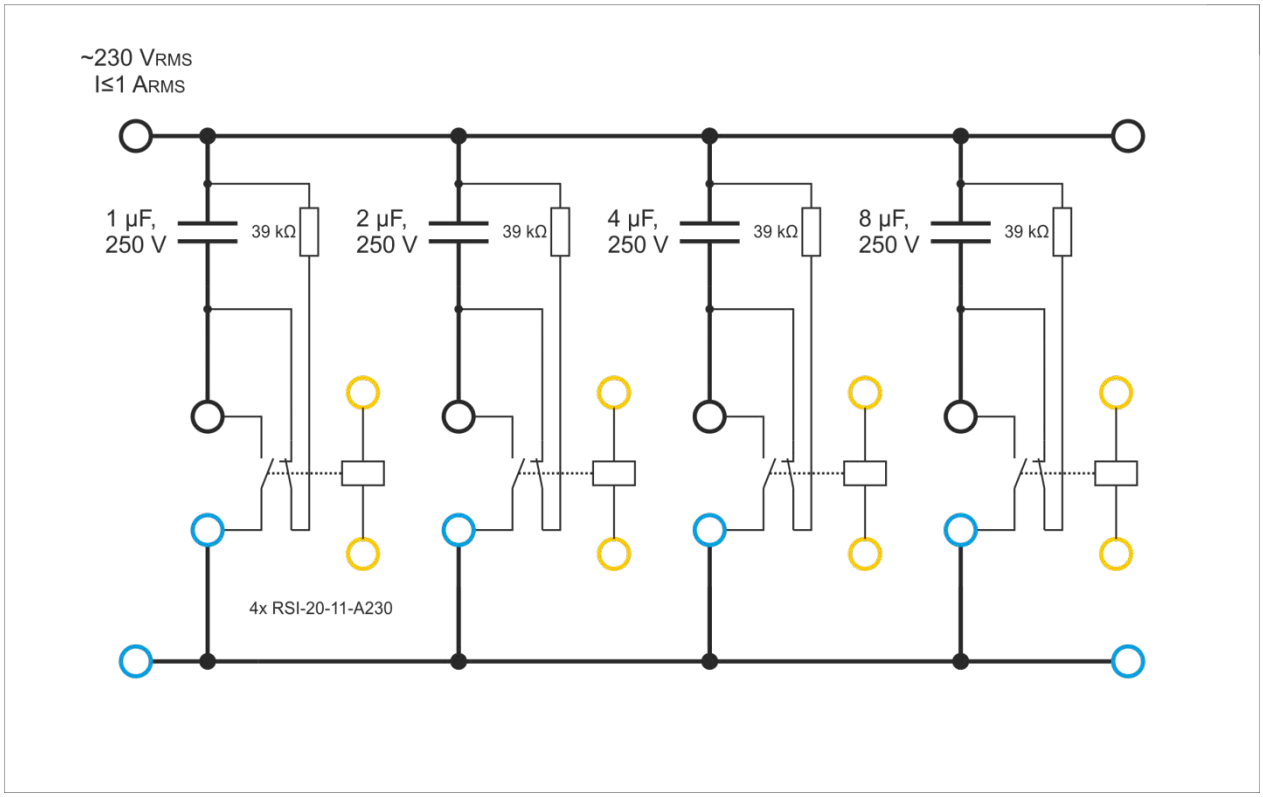


Obrázek 5-2 Schéma zapojení ovládací části modelu vedení

Jedná se o jednoduchý stabilizovaný obvod se stejnosměrným výstupním napětím 24V, který přes tranzistory MOSFET spíná ovládací cívky relé.

5.2 Model kompenzace

Celkem jsou k dispozici čtyři stupně a to s kapacitou $1\mu F$, $2\mu F$, $4\mu F$ a $8\mu F$, lze tedy plynule regulovat od hodnoty 1µF až po celkovou kapacitu 15µF se stupněm 1µF. Maximální kompenzační proud je při sepnutí všech baterii $I_{Cmax} = 1{,}08\text{A}$ a dostačuje tedy pro potřeby modelů, přičemž nejmenší kompenzační proud, který lze vyprodukovat je $I_{Cmin} = 72\text{mA}$.

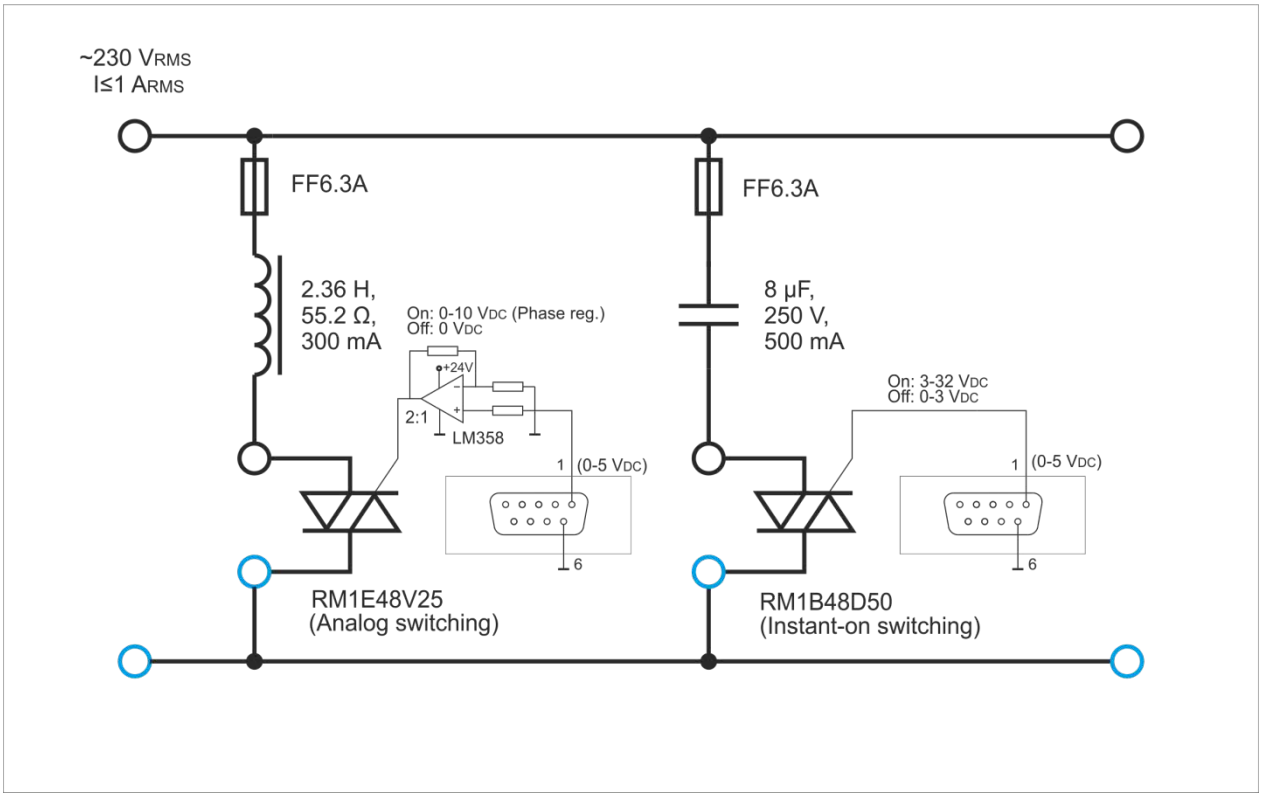


Obrázek 5-3 Přední maska modelu kompenzace

Ke spínání slouží instalační stykače od firmy OEZ s.r.o., které sice nejsou vhodné pro spínání kondenzátorů, ale stykače k tomu určené se vyrábějí pouze třífázové a proto byly zvoleny tyto. Nominální spínací proud stykače pro spínání neinduktivních zátěží je 20A, což by mělo poskytnout dostatečnou rezervu i pro spínání kondenzátorů. Na rozpínací kontakt je přiveden vybíjecí odpor o hodnotě $R = 39\text{k}\Omega$, který nejvyšší hodnotu kondenzátoru vybije přibližně za 300ms a zároveň, pokud se bude spínat jiným prvkem než je zabudovaný stykač, proud protékající přes vybíjecí rezistor je $I_{Rvyb} = 5{,}89\text{mA}$, takže nevnáší do měření velkou chybu. Kontakty pro ovládací cívku stykače jsou vyvedeny do žlutých bezpečnostních zdířek, které jsou standardně myšleny pro propojení s regulátorem Novar 1106, poslouží však libovolný zdroj nebo regulátor s ovládacím napětím 230V~.

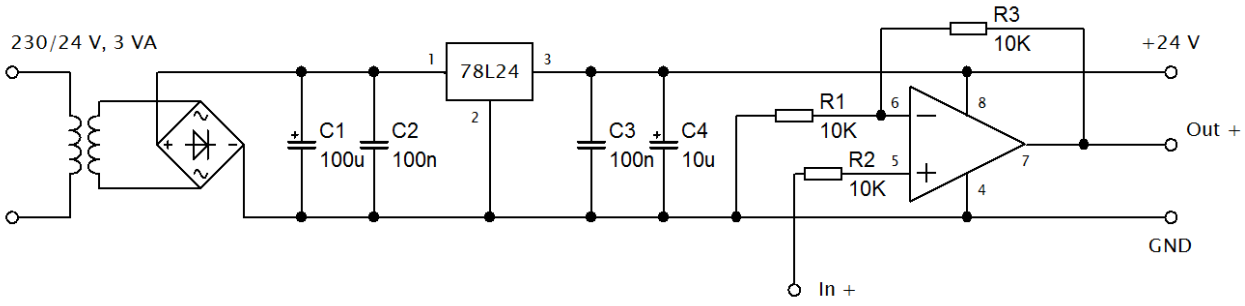
5.3 Model dekompenzace

Tento model je rozdělen na dvě části. První část je samotná dekompenzační tlumivka o hodnotě $L = 2{,}36\text{H}$, $R = 55{,}2\Omega$ a druhou část tvoří kondenzátor o hodnotě $C = 8\mu\text{F}$. Tlumivka je spínaná polovodičovým relátkem RM1E48V25, které je řízeno z počítače z prostředí Labview přes analogový výstup z karty NI USB 6009. Tento typ relé si „hlídá“ průchody napětí nulou a podle řídícího napětí, které má rozsah od 0 do 10V mění řídící úhel a tím se plynule mění proud procházející přes tlumivku. Oproti tomu je spínání kondenzátoru řešeno přes relé RM1B48D50, které se neřídí analogově ale digitálně a sepne v okamžik přivedení impulzu na řídící vstup.



Obrázek 5-4 Přední maska modelu dekompenzace

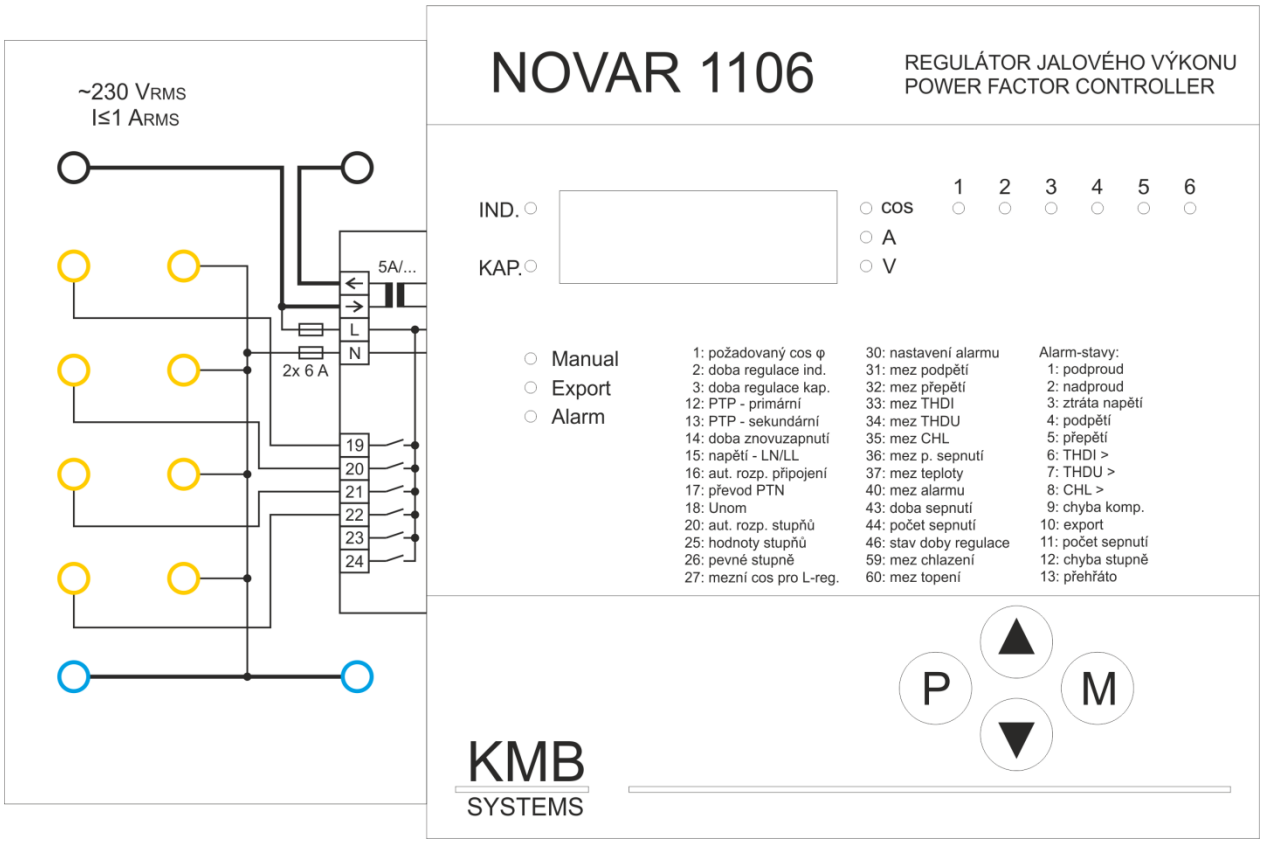
Protože relé RM1E48V25 má rozsah napětí pro řízení 0-10V a karta NI USB 6009 poskytuje pouze 5V, bylo nutné vytvořit obvod se zesilovačem, který umožní dosáhnout 10V.



Obrázek 5-5 Schéma zapojení zesilovače pro RM1E48V25

5.4 Model regulátoru

Jako regulátor byl zvolen typ Novar 1106 od firmy KBH Energy s.r.o. Zvolený typ má celkem šest výstupů na kompenzační stykače a citlivost měření proudu dosahuje 2mA. Ačkoliv Novar 1106 počítá s třífázovým systémem, jeho zapojení je jednofázové a hodnoty dopočítává, takže jeho funkce je zde korektní.

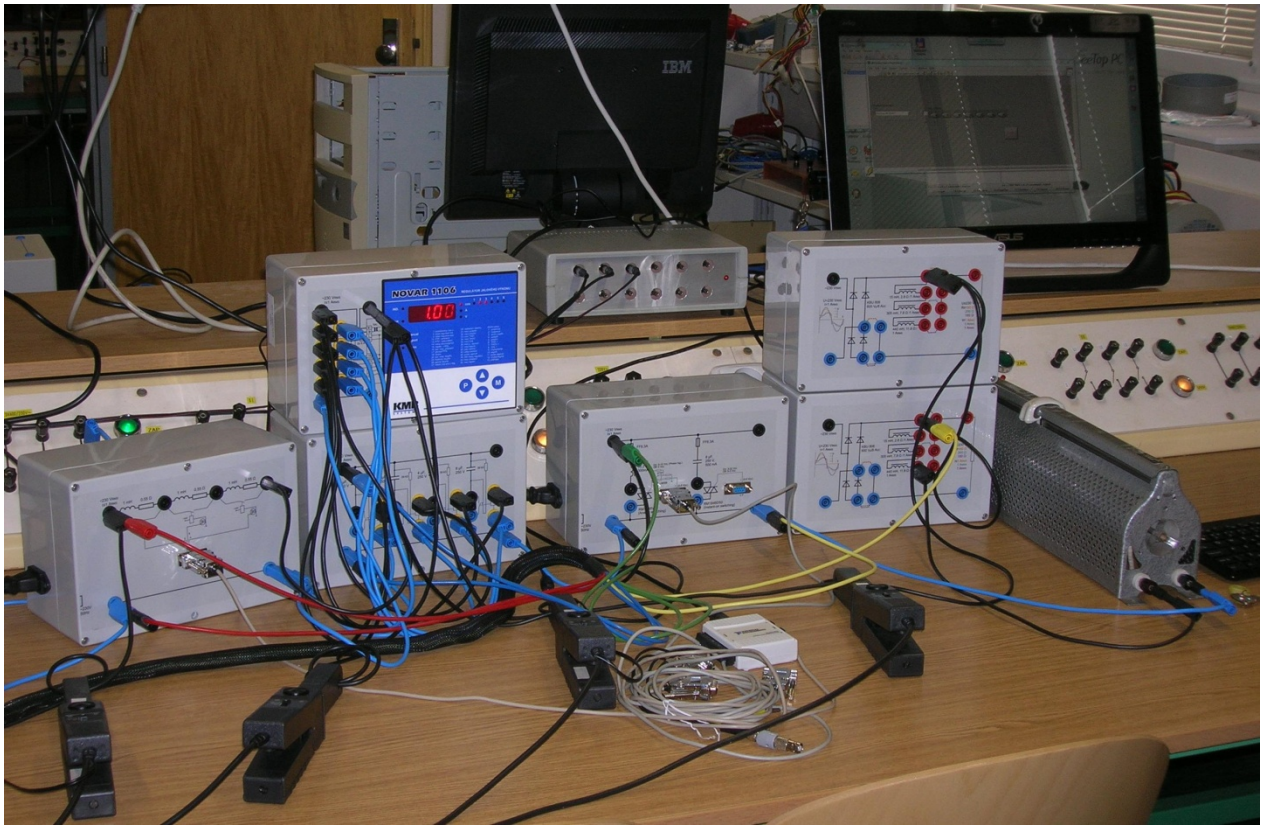


Obrázek 5-6 Přední maska modelu regulátoru

Protože velikost regulátoru značně omezila zbylý prostor, jsou vyvedeny pouze čtyři stupně pro připojení ke kompenzačním stykačům. V tomto případě to stačí, avšak pokud bude regulátor použit v jiných aplikacích, může tento nedostatek omezovat. Novar 1106 se napájí přímo ze sítě, kterou má za úkol regulovat. Jeho proudové vstupy by měly být dle manuálu připojeny přes PTP, které však mají obyčejně převod na 5A nebo 1A. Protože předpokládaný sekundární proud PTP lze nastavit přímo na regulátoru a v modelech není předpoklad proudu vyššího než 1A, je PTP vynechán, regulátor je nastaven tak, aby předpokládal sekundární proud 1A a proto je protékající proud připojen přímo na svorky regulátoru.

6 MĚŘENÍ NA MODELECH

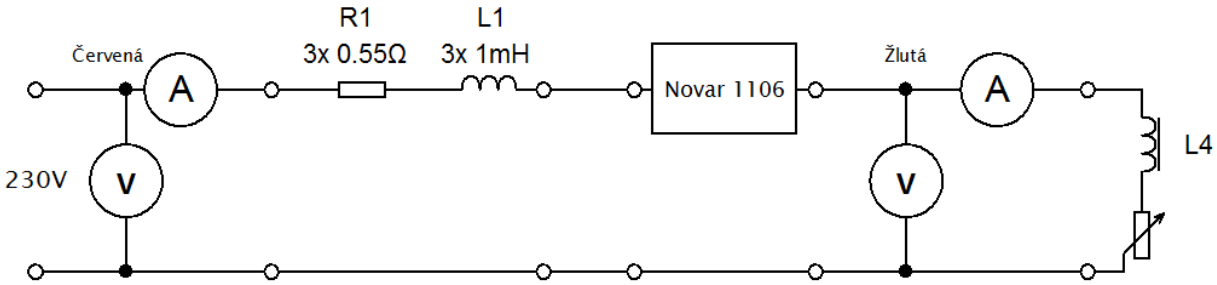
Pro ověření funkčnosti principu a porovnání s teoretickými předpoklady bylo provedeno měření, které má za úkol ukázat chování a vliv modelů na síť a zátěž.



Obrázek 6-1 Fotografie zapojení modelů

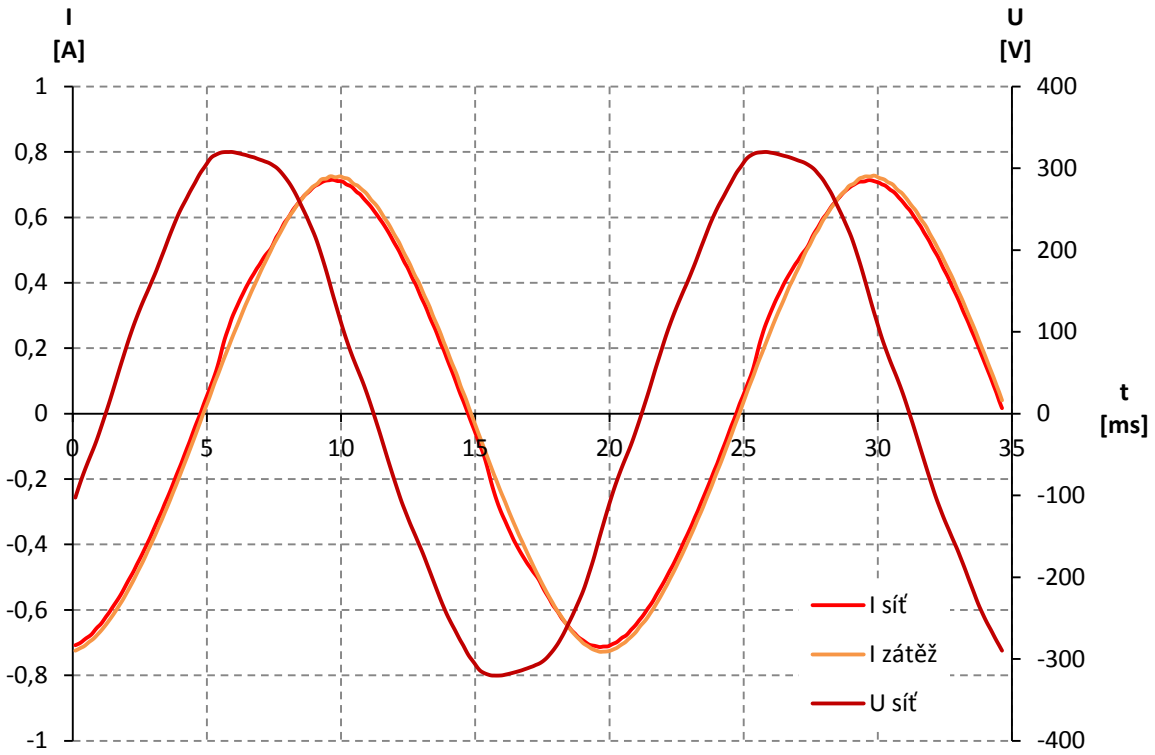
6.1 Výchozí stav

V tomto případě nezasahoval do měření regulátor, ani dekompenzace a jednalo se pouze o určení výchozích parametrů obvodu.



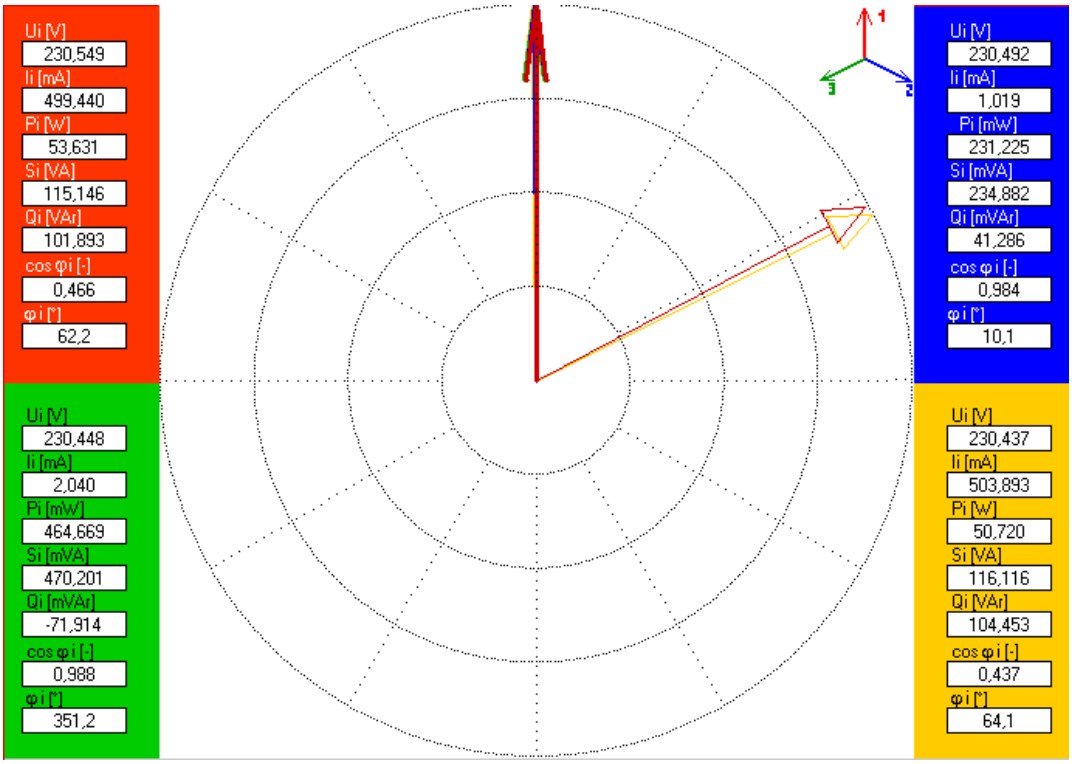
Obrázek 6-2 Výchozí měření

Novar byl přepnut do ručního režimu, takže nezasahoval do měření připínáním kondenzátorů. Naměřený průběh:



Obrázek 6-3 Průběh okamžitých hodnot pro stav bez kompenzace

Fázorový diagram pro tento stav vypadá následně:



Obrázek 6-4 Fázorový diagram pro 6-3

Ve fázorovém diagramu figurují celkem čtyři kanály, použity v tomto měření jsou však pouze dva, a to první červený, který je na vstupu obvodu a žlutý, který měří proud a napětí na zátěži. Z naměřených hodnot jdou vypočítat parametry zátěže:

$$|Z| = \frac{|S|}{|I|^2} = \frac{116{,}116}{503{,}893E-3} = 457{,}31\Omega \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned} R &= |Z| \cdot cos\varphi = 457{,}31 \cdot 0{,}437 = 199{,}84\Omega \\ X_L &= |Z| \cdot sin\varphi = 457{,}31 \cdot 0{,}899 = 411{,}34\Omega \end{aligned} \tag{6.2}$$

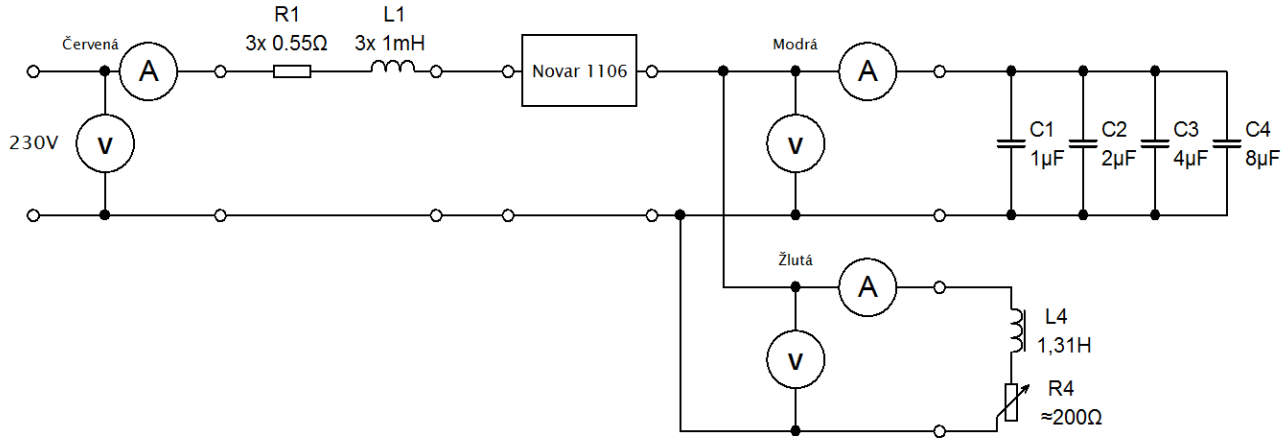
$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{411{,}34}{314{,}16} = 1{,}31\text{H} \tag{6.3}$$

Indukce tlumivky použité v zátěži je tedy 1,31H a celkový činný odpor je 199,84Ω. Tyto hodnoty sice nejsou pro další měření tolik důležité, protože šlo hlavně o vyzkoušení funkčnosti modelů, ale pro informaci je dobré znát parametry měřeného obvodu v klidovém stavu.

Proud bez kompenzace je tedy $|I_1| = 499{,}44\text{mA}$.

6.2 Vliv kompenzace na měřený obvod

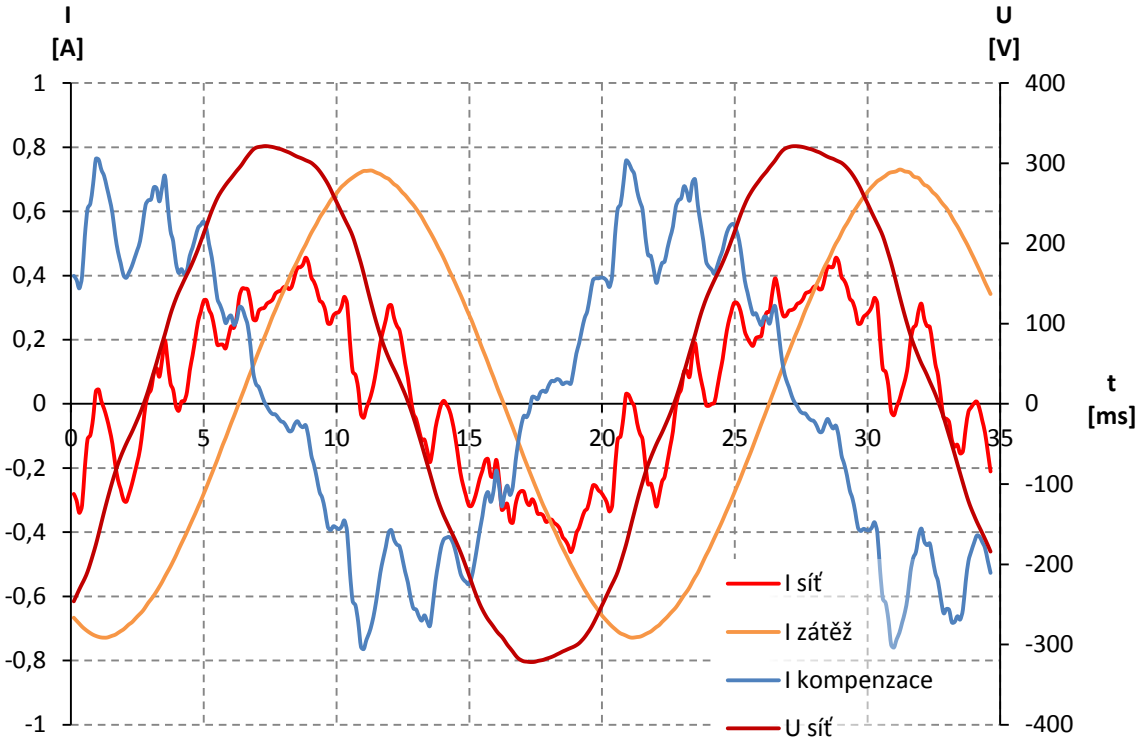
Schéma je obdobné jako v předchozím měření. Navíc je však zapojen model kompenzace. Ve schématu není uvedená ovládací část kompenzátorových stykačů.



Obrázek 6-5 Schéma zapojení měření kompenzace

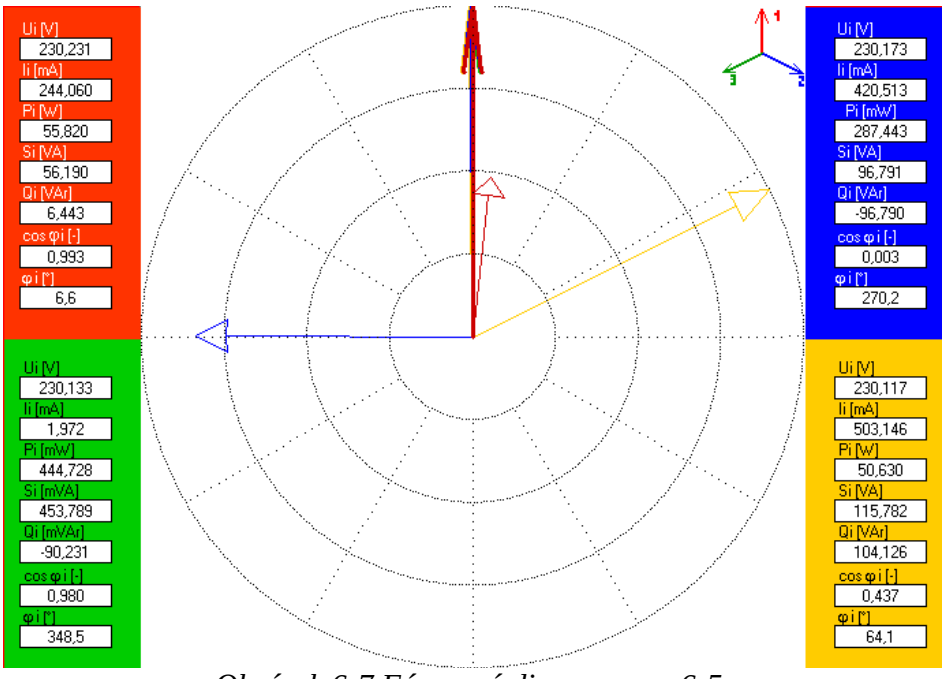
6.2.1 Automatické řízení

Při oživení obvodu a přepnutí regulátoru na automatický režim, provede regulátor změření jednotlivých kompenzačních stupňů a začne regulovat na nastavenou hodnotu $cos\varphi$. V tomto případě byly sepnuty stupně dva a tři, tedy celková kapacita $C = 6\mu F$.



Obrázek 6-6 Ustálený stav při automatickém řízení regulátoru

Deformace vstupního proudu je značná, ale protože měřený účiník platí pouze pro první harmonickou tak velikost $cos\varphi \approx 0{,}99$.



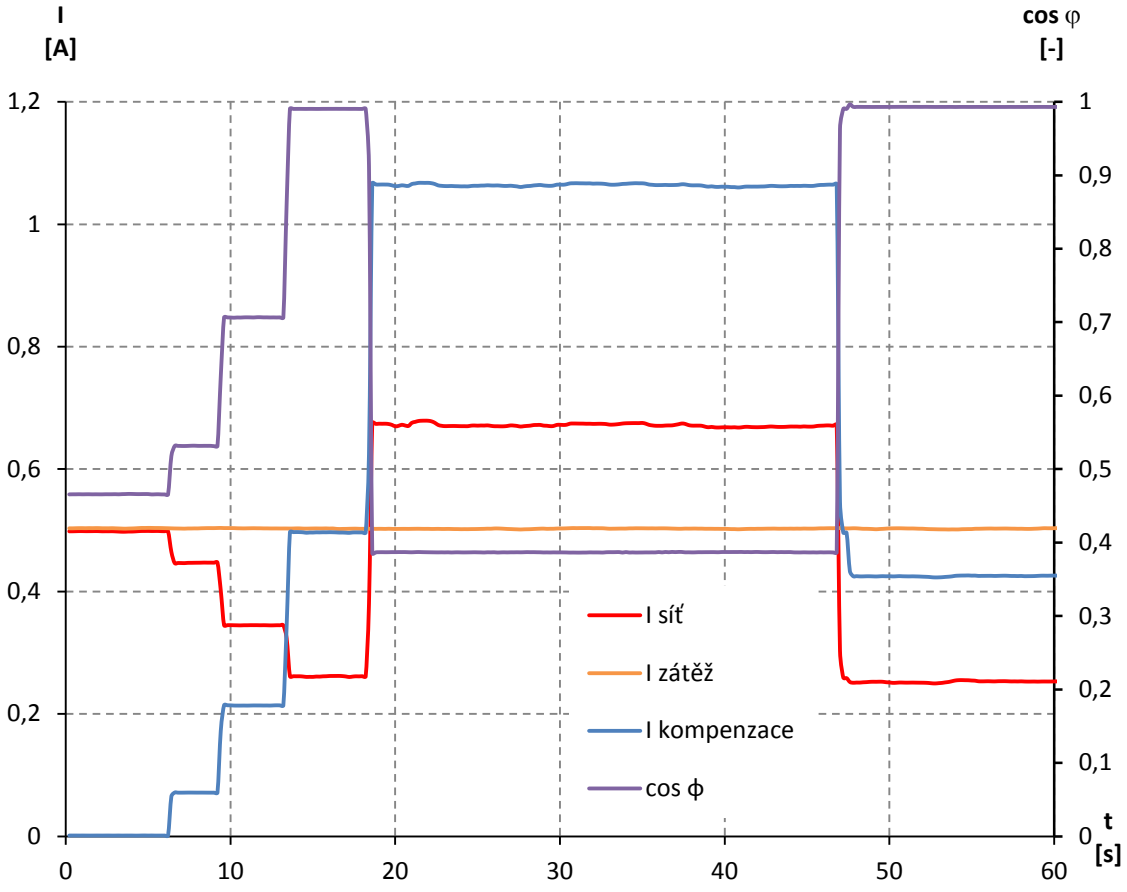
Obrázek 6-7 Fázorový diagram pro 6-5

Lze tvrdit, že regulátor vykompenzoval danou zátěž velmi dobře a to téměř do čistě činného charakteru.

Odebíraný proud ve vykompenzovaném stavu je $|I_1| = 244{,}06\text{mA}$, což je přibližně o 50% méně než bez kompenzace.

6.2.2 Ruční řízení regulátoru

Při přepnutí do manuálního režimu lze spínat jednotlivé kompenzační stupně bez toho, aby regulátor zasahoval do řízení.

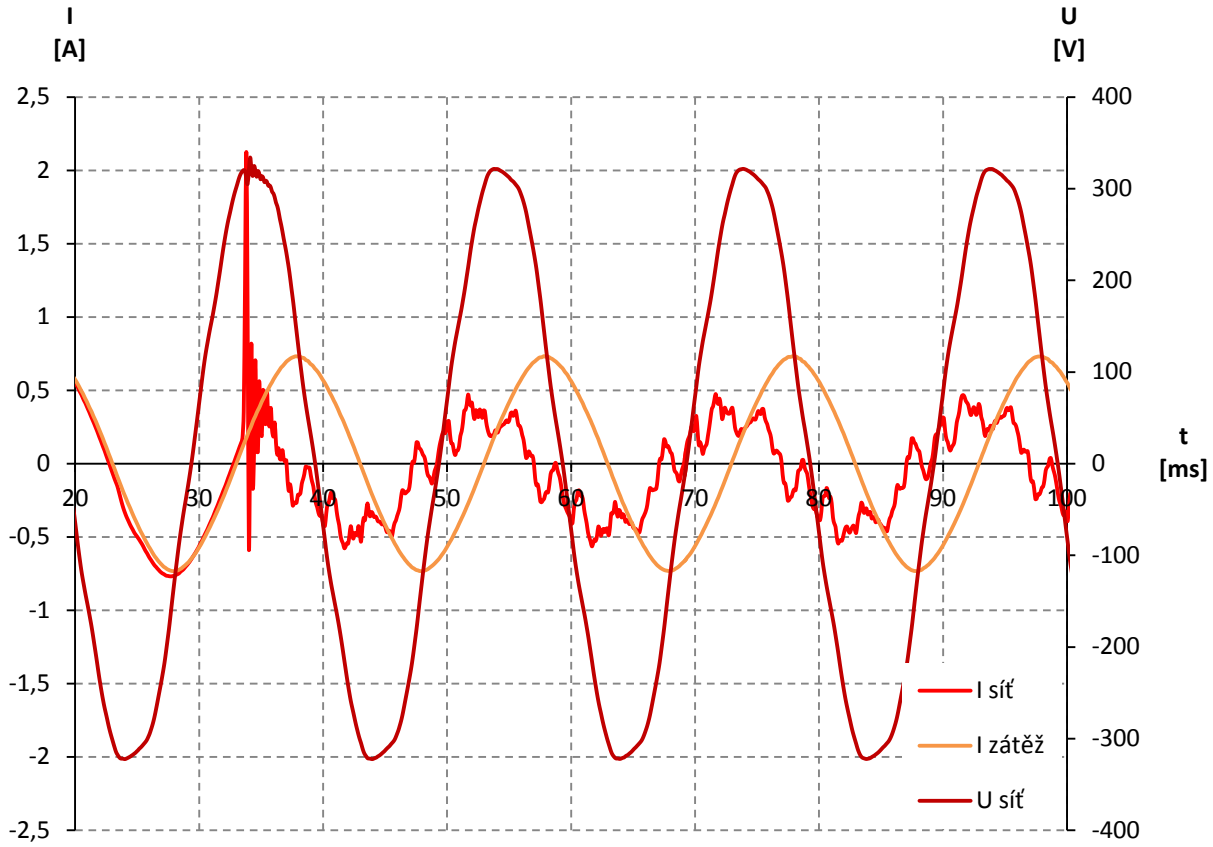


Obrázek 6-8 Ruční spínání kompenzátoru

Na obrázku 6-8 se postupně sepnuly kompenzační stupně 1µF, 2µF, 4µF a 8µF a pak byl regulátor převeden do automatického režimu. Takto lze nastavit libovolná hodnota kompenzačního výkonu. Prakticky se tento režim využívá jenom pro experimentální měření a zjištění reakce regulátoru při nastavení chybných parametrů. Lze vidět, že po přepnutí do automatického režimu se regulátor zachoval správně a téměř ihned nastavil správnou kombinaci kondenzátorů pro dosažení odebíraného proudu s $cos\varphi \approx 1$.

6.2.3 Vliv spínání kondenzátorů na síť

V kapitole 4.1 jsou popsány a nasimulovány momenty sepnutí kondenzátorů na síť. V této podkapitole je tento přechodový děj změřen. Zapojení obvodu stále odpovídá schématu v 6-5.

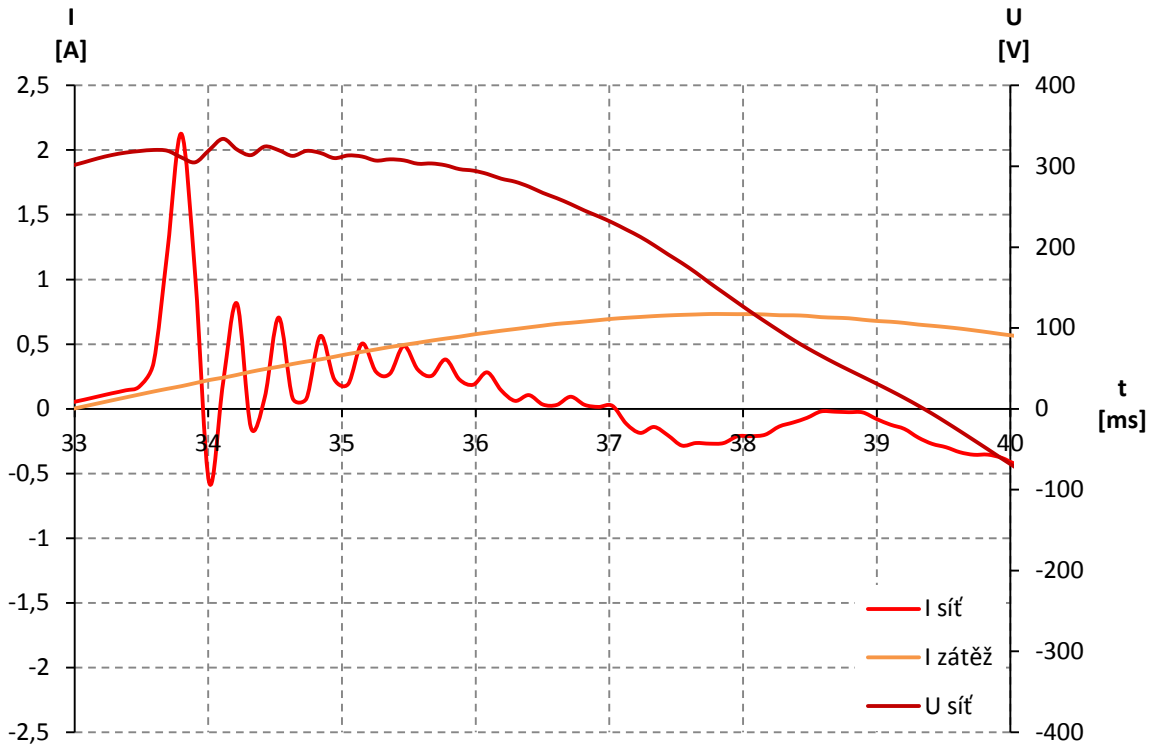


Obrázek 6-9 Změření sepnutí kondenzátorů

V čase $t = 33{,}796\text{ms}$ dojde k sepnutí kondenzátoru o kapacitě $C = 4\mu\text{F}$. Proudová špička vyvolaná touto změnou dosahuje $I_{šp} = 2{,}126\text{A}$. Celý přechodový děj odezní přibližně po jedné sekundě, kdy vymizí stejnosměrná složka proudu (není znázorněno).

Na obrázku 6-10 lze vidět přiblížení pro přechodový děj. K sepnutí dojde téměř v nejhorší možný stav, v momentě, kdy se blíží amplituda napětí. Následně dojde k razantnímu zvýšení hodnoty proudu, který dále kmitá s frekvencí $f_0 = 3205{,}13\text{Hz}$ a utlumí se přibližně po 4ms. Spolu s proudovou deformací dochází k mírnému zvlnění také u napájecího napětí, jehož minimum v přechodovém stavu je o 5% menší než nominální hodnota a maximum o 4% než nominální hodnota.

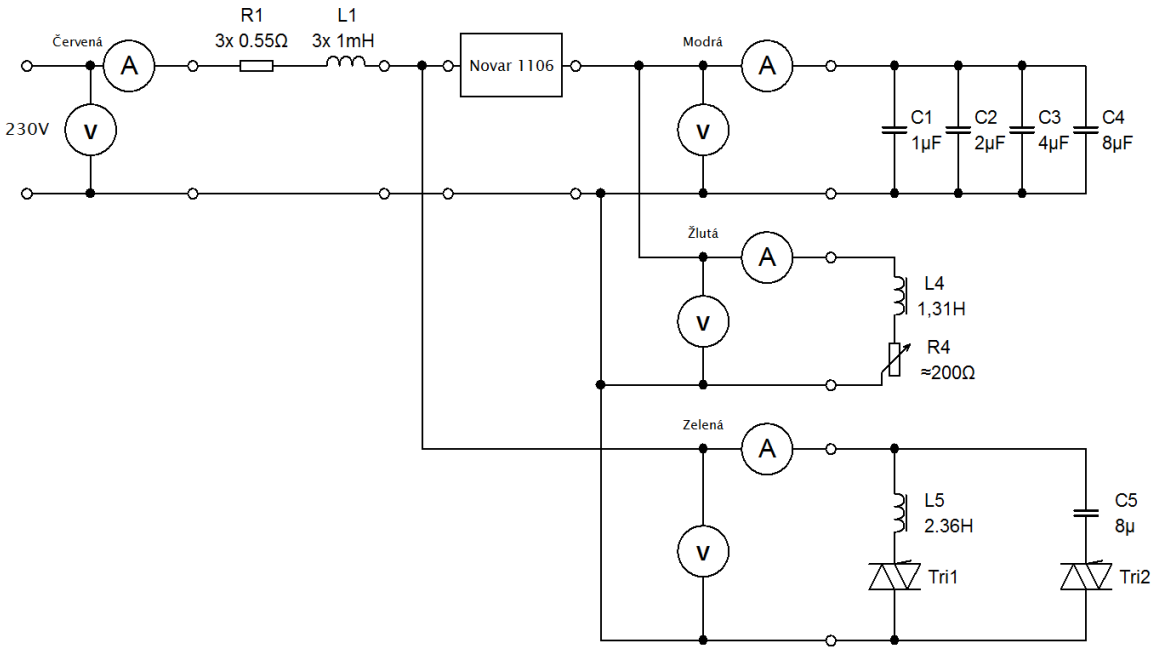
V případě připnutí maximální hodnoty stupně s kondenzátorem o kapacitě $C = 8\mu\text{F}$ by přechodový děj byl ještě razantnější, ale i tak by to nemělo ohrozit funkci použitých komponent.



Obrázek 6-10 Detail přechodného děje připnutí kondenzátoru

6.3 Měření dekompenzace

V poslední části měření byl připojen model dekompenzace, jinak je obvod zapojen stejně jako v 6-4.

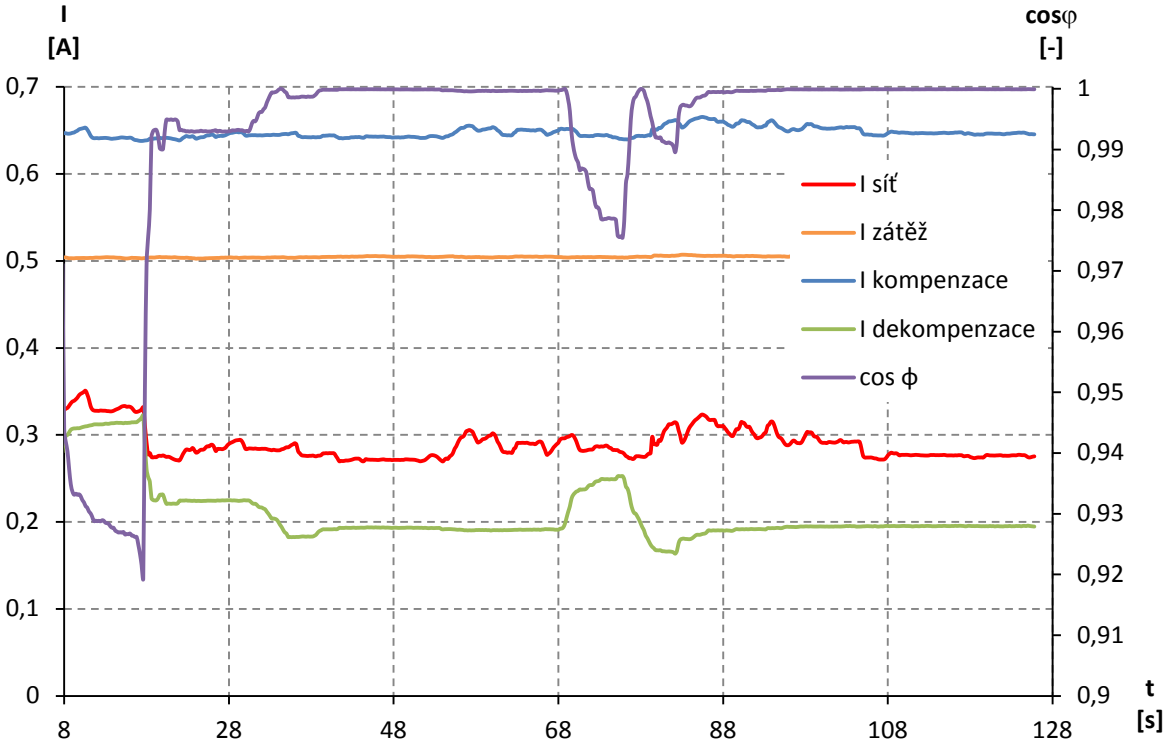


Obrázek 6-11 Schéma zapojení měření dekompenzace

Model dekompenzace byl zapojen před regulátor Novar, aby regulátor neměl snahu o vyrovnání uměle vneseného induktivního proudu dekompenzací.

6.3.1 Demonstrace funkce dekompenzace

Pomocí programu Labview bylo analogově ovládáno polovodičové relé RM1E48V25. Demonstrace funkce relé při různých hodnotách řídícího úhlu:



Obrázek 6-12 Řízení protékaného proudu přes dekompenzační tlumivku

Na začátku, tedy od 8 do 17 sekund bylo relé otevřeno maximálně, pak se hodnoty řídícího úhlu měnily náhodně, cílem bylo demonstrovat funkci relé. Nebylo dosaženo hodnot nižších než přibližně $I_{SSRmin} = 100\text{mA}$, protože pak se relé zavře úplně.

6.3.2 Dekompenzace překompenzovaného stavu

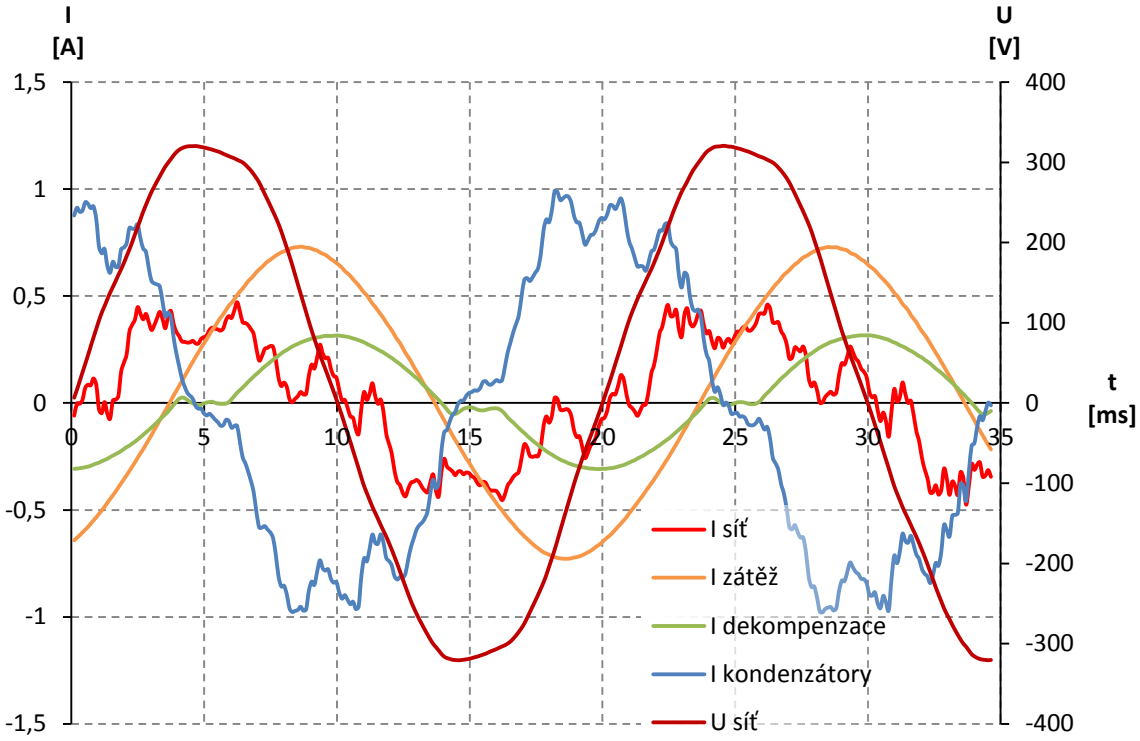
Aby bylo možno nejlépe ukázat vliv dekompenzace, bylo nutné nejdříve mírně překompenzovat a následně dekompenzací tento rozdíl dorovnat. V podkapitole 6.2.1 lze vyčíst, že ideální kapacita pro kompenzaci dané zátěže, za předpokladu neměnného odporu, je $C_{ideal} = 6\mu\text{F}$. Celková kapacita zvolena zde byla $C_{dekomp} = 9\mu\text{F}$, přičemž proudový rozdíl, který nyní musí dekompenzace dodat je:

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_{dekomp} - C_{ideal} = (9-6)E-6 = 3\mu\text{F} \\ \Delta I &= U \cdot \omega \Delta C = 230 \cdot 314{,}16 \cdot 3E-6 = 217{,}77\text{mA} \end{aligned} \tag{6.4}$$

Maximální proud tekoucí přes dekompenzační tlumivku:

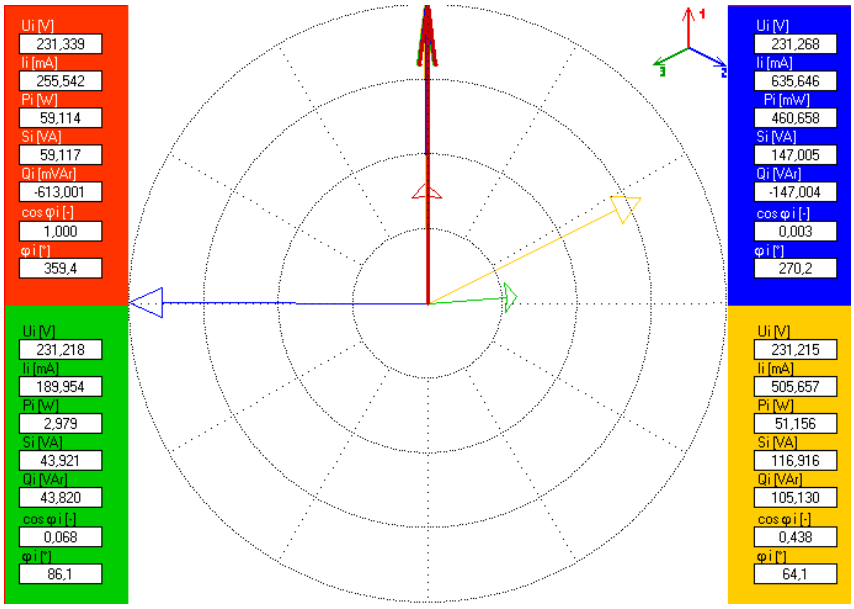
$$\bar{I}_{dekomp} = \frac{U}{R + j\omega L} = \frac{230}{55{,}2 + j314{,}16 \cdot 2{,}36} = 309{,}36\angle -1{,}5°\text{mA} \tag{6.5}$$

Tlumivka tedy dokáže s rezervou takto překompenzovaný stav vyrovnat, a ačkoliv oproti kondenzátorům nemá nezanedbatelnou reálnou část impedance, její fázový posuv je velmi malý a pro dekompenzaci je vhodná.



Obrázek 6-13 Časový průběh při zapnuté dekompenzaci

V průběhu lze vidět, že proud procházející tlumivkou je zdeformovaný přibližně dle simulace v podkapitole 4.2.2. Polovodičové relé tedy funguje korektně a dodává proud v protifázi ke kondenzátorům, načež celková hodnota proudu ze sítě klesne.



Obrázek 6-14 Fázorový diagram pro 6-12

Fázorový diagram zřetelně ukazuje vliv dekompenzace a lze vidět, že jejím vlivem se podařilo dosáhnout ideálního účiníku $cos\varphi = 1$.

7 ZÁVĚR

Kompenzace jalového výkonu nadále zůstává důležitým faktorem jak pro odběratele, tak pro distributory. Rozvodná síť by sice mohla fungovat i při nekompenzování, ale veškeré rozvodné zařízení by musely být značně naddimenzované a to je ekonomicky nevýhodné. Proto distributor při zapojení odběratele požaduje splnění určité hodnoty účiníku, aby mohl redukovat provozní náklady na minimum. Rozsah využití paralelní kompenzace je značný, ale i přes její rozšíření je stále nutné při návrhu postupovat individuálně, protože parametry sítě a charakter odběru se liší u každého odběratele.

V kapitole 4 byly simulovány určité typy kompenzátorů a ukázány jejich parametry, výhody a nevýhody spolu s výpočtem pro ideální kompenzační kapacitu pro uvažovanou zátěž. Za zmínku stojí dekompenzace, která je plynule řízená a dokáže přesně docílit požadovaného účiníku. Její největší nevýhoda je odběr nesinusového proudu.

Dle simulací byly následně navrhnuty celkem čtyři modely. Model vedení je myšlen jako vstupní model před ostatními a má simulovat jednotlivé délky reálného vedení, přičemž tyto úseky jdou dálkově řídit přes kartu z počítače. Model kompenzace vytváří zmenšenou verzi kompenzačního rozvaděče, kde jsou umístěny pouze kondenzátory, nikoliv však jejich řízení. Dále model dekompenzace, který spolu s modelem kompenzace vytváří ideální způsob jemného dorovnávání nežádoucího dodávaného jalového výkonu. Model regulátoru, který měří a řídí spínání jednotlivých stupňů v modelu kompenzace tak, aby se dosáhl co nejlepší účiník.

Sestrojené modely byly změřeny a byly ověřeny jejich parametry a funkčnost. Všechny uvažované požadavky splnily a naměřené hodnoty odpovídají teoretickým předpokladům, dá se proto tvrdit, že jsou zkonstruovány správně a v měření nebo v konstrukci není žádná nežádoucí chyba.

LITERATURA

[1] KORENC, Vladimír; HOLOUBEK, Jiří . *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha : IN-EL, 1999. 123 s. ISBN 80-86230-07-4.

[2] AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. New Jersey : John Wiley & Sons, 2007. 379 s. ISBN 978-0-470-10761-4.

[3] Webové stránky, http://www.odbornecasopisy.cz , článek : Individuální kompenzace jalového výkonu

[4] Webové stránky, http://www.kbhenergy.cz , článek : Chráněná kompenzace

[5] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv. 1, skriptum FEKT, VUT Brno (cs)

[6] BLAŽEK, V., SKÁLA, P. *Distribuce elektrické energie*, Skriptum VUT Brno [elektronický text]

[7] Webové stránky, http://www.cadence.com/products/orcad/pages/default.aspx

[8] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚSTAV: *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č 5/2011*. [online]. 21.12.2011. Dostupné z: http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/2011/ER%20CR%205_2011elektro.pdf

[9] NATIONAL INSTRUMENTS. *NI USB 6009* [online]. Dostupné z: http://sine.ni.com/nips/cds/print/p/lang/en/nid/201987

[10] KMB SYSTEMS. *NOVAR 1xxx Manuál* [online]. Dostupné z: http://www.kmb.cz/index.php/cs/component/phocadownload/category/4-docspfc?download=10:novar-1xxx-manual

[11] ČESKÁ ENERGETIKA S.R.O. *Kompenzace jalového výkonu* [online]. Dostupné z: http://www.ceskaenergetika.cz/kompenzace_jaloveho_vykonu_ucinik_dekompenzace/kompenzace_jaloveho_vykonu_2.html

[12] ČESKÁ ENERGETIKA S.R.O. *Harmonické frekvence a kompenzace* [online]. Dostupné z: http://www.ceskaenergetika.cz/chranena_kompenzace/harmonicke_frekvence_a_kompenzace.html

[13] CADENCE. *Cadence OrCAD Solutions* [online]. Dostupné z: http://www.cadence.com/products/orcad/pages/default.aspx

[14] SEDLÁČEK, M., VALSA, J. *Elektrotechnika II*, Skriptum VUT Brno [elektronický text]