



**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

## **DYNAMICKÁ KOMPENZACE**

DYNAMIC COMPENSATION OF REACTIVE POWER

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. MARTIN HORENSKÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. JIŘÍ DRÁPELA, Ph.D.**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektroenergetika**

**Student:** Bc. Martin Horenský

**ID:** 125224

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

**Dynamická kompenzace**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Výkonové teorie aplikovatelné pro dynamickou (nelineární) zátěž
2. Technické prostředky pro dynamickou kompenzaci
3. Návrh a realizace HW části dynamického kompenzátoru SVC
4. Návrh a realizace řídicího SW s aplikací vybraných algoritmů na bázi virtuální instrumentace v LabVIEW
5. Provedení souboru měření a jejich vyhodnocení

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

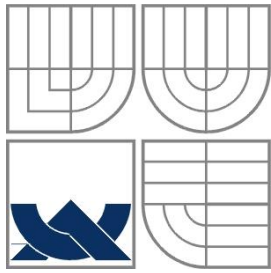
Bibliografická citace práce:

HORENSKÝ, M. Dynamická kompenzace. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 106s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.

Rád bych na tomto místě chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Jiřímu Drápelovi, Ph.D, za cenné rady, připomínky a pomoc. Dále chci poděkovat mé rodině, která mne v průběhu celého studia maximálně podporovala.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

.....



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**



**Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií**  
**Ústav elektroenergetiky**

**Diplomová práce**

# **Dynamická kompenzace**

**Bc. Martin Horenský**

**Vedoucí: doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.**

**Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2014**

**Brno**



**BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

**Faculty of Electrical Engineering and Communication  
Department of Electrical Power Engineering**

**Master's Thesis**

# **Dynamic Compensation of Reactive Power**

by

**Bc. Martin Horenský**

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

**Brno University of Technology, 2014**

**Brno**

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kompenzace jalového výkonu, konkrétně vytvořením demonstračního modelu statického var kompenzátoru (SVC). Hlavní podstatou práce je aplikovat vhodným způsobem toto zařízení pro rychlé vyrovnání dynamických změn odebíraného jalového výkonu. V teoretické části je vybrána a popsána vhodná metoda pro stanovení okamžitého výkonu. Následně je proveden základní popis prostředků používaných ke kompenzaci jalového výkonu. Detailně je popsán kompenzátor typu SVC. V praktické části je proveden návrh kompenzační jednotky a realizace řízení v prostředí LabVIEW. Pro zjištění okamžitého výkonu je implementována pq teorie. V poslední části práce jsou prezentovány výsledky ověřování funkčnosti kompenzátoru.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** kompenzace jalového výkonu, statický var kompenzátor, SVC, pq teorie, LabVIEW

---

## ABSTRACT

This master's thesis is focusing on compensation of reactive power, especially on creating demonstrative model of static var compensation unit (SVC). Main topic of thesis is to apply this device for fast balancing dynamic conversions of received reactive power. In theoretical part is described suitable method for determination of instantaneous power. Next, there is basic description of all means used for compensation of reactive power and detailed description of the SVC compensator. Practical part includes design of compensation unit and control program in LabVIEW. The pq theory is implemented for detection instantaneous power. The results of validating functionality of compensator are presented in the last part of thesis.

**KEY WORDS:** reactive power compensation, static var compensator, SVC, pq theory, LabVIEW

## OBSAH

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>11</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>14</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>15</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>20</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1 CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>21</b>
<b>2 ZÁKLADNÍ VÝKONOVÉ TEORIE .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 VÝKONOVÁ TEORIE PŘI HARMONICKÉM PRŮBĚHU.....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 KOMPLEXNÍ VÝKON A ÚČINÍK.....</b>	<b>23</b>
<b>2.3 VÝKON PŘI NEHARMONICKÝCH PODMÍNKÁCH.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 VÝKONOVÉ DEFINICE PODLE BUDEANU .....	24
2.3.2 VÝKONOVÉ DEFINICE PODLE FRYZEHO .....	27
<b>2.4 ELEKTRICKÝ VÝKON V TŘÍFÁZOVÝCH SYSTÉMECH .....</b>	<b>29</b>
2.4.1 KLASIFIKACE TŘÍFÁZOVÝCH SYSTÉMŮ .....	29
2.4.2 VÝKON V SYMETRICKÉM TŘÍFÁZOVÉM SYSTÉMU .....	30
2.4.3 VÝKON V NESYMETRICKÉM TŘÍFÁZOVÉM SYSTÉMU .....	32
<b>3 TEORIE OKAMŽITÉHO VÝKONU.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 ZÁKLADNÍ MYŠLENKA P-Q TEORIE.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 CLARKE TRANSFORMACE.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3 VÝPOČET VEKTORŮ NAPĚTÍ A PROUDŮ .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4 TŘÍFÁZOVÝ OKAMŽITÝ ČINNÝ VÝKON Z HLEDISKA CLARKEHO TRANSFORMACE.....</b>	<b>37</b>
<b>3.5 P-Q TEORIE PRO STANOVENÍ OKAMŽITÉHO VÝKONU.....</b>	<b>38</b>
<b>3.6 P-Q TEORIE V TŘÍFÁZOVÝCH, TŘÍVODIČOVÝCH SÍTÍCH.....</b>	<b>38</b>
<b>3.7 VYUŽITÍ P-Q TEORIE PRO PARALELNÍ PROUDOVOU KOMPENZACI.....</b>	<b>42</b>
<b>3.8 JEDNOFÁZOVÁ PQ TEORIE .....</b>	<b>44</b>
<b>3.9 PŘÍKLAD VÝPOČTU JEDNOFÁZOVÉHO OKAMŽITÉHO VÝKONU .....</b>	<b>45</b>
<b>4 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU.....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 VYSVĚTLENÍ DŮVODŮ KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU .....</b>	<b>47</b>
4.1.1 NEGATIVNÍ Vlivy JALOVÉHO VÝKONU .....	47
4.1.2 SYSTÉMOVÁ KŘIVKA NAPĚTÍ.....	49
4.1.3 FLIKR .....	52
<b>4.2 KOMPENZACE Z HLEDISKA MÍSTA PŘIPOJENÍ V SÍTI.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3 ROZDĚLENÍ TECHNICKÝCH PROSTŘEDKŮ PRO KOMPENZACI.....</b>	<b>53</b>
4.3.1 ROTAČNÍ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	53
4.3.2 STATICKÉ KOMPENZÁTORY .....	54
<b>5 STATICKÝ VAR KOMPENZÁTOR SVC .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1 OBVODOVÉ USPOŘÁDÁNÍ.....</b>	<b>60</b>

<b>5.2 TYRISTOROVÝ MĚNIČ .....</b>	<b>61</b>
<b>5.3 TCR .....</b>	<b>62</b>
5.3.1 PRINCIP FUNKCE TCR.....	62
5.3.2 VA CHARAKTERISTIKA TCR .....	63
5.3.3 ADMITANČNÍ MODEL TCR.....	65
5.3.4 VLIV ŘÍDÍČÍHO ÚHLU TCR NA KMITOČTOVÉ SPEKTRUM PROUDU.....	65
<b>5.4 TSC .....</b>	<b>68</b>
<b>5.5 SVC.....</b>	<b>69</b>
5.5.1 V-A CHARAKTERISTIKA.....	69
5.5.2 ADMITANČNÍ MODEL SVC.....	70
5.5.3 V-A CHARAKTERISTIKA PARALELNÍ KOMPENZACE S SVC .....	71
<b>5.6 APLIKACE SVC .....</b>	<b>73</b>
5.6.1 DŮVODY VYUŽÍVÁNÍ SVC.....	73
5.6.2 PŘÍKLAD REÁLNÉ APLIKACE .....	73
5.6.3 APLIKACE PRŮMYSL .....	74
<b>6 NÁVRH A REALIZACE HW ČÁSTI DYNAMICKÉHO KOMPENZÁTORU SVC.....</b>	<b>75</b>
<b>6.1 MULTIFUNKČNÍ ZAŘÍZENÍ NI USB-6009.....</b>	<b>75</b>
<b>6.2 MODUL KOMPENZACE .....</b>	<b>76</b>
6.2.1 KOMPENZAČNÍ KONDENZÁTOR .....	76
6.2.2 DEKOMPENZAČNÍ TLUMIVKA .....	77
<b>6.3 PROUDOVÉ A NAPĚŤOVÉ PŘEVODNÍKY.....</b>	<b>77</b>
6.3.1 PROUDOVÝ PŘEVODNÍK.....	78
6.3.2 NAPĚŤOVÝ PŘEVODNÍK .....	78
<b>6.4 ZÁTĚŽ .....</b>	<b>79</b>
<b>6.5 MODEL VEDENÍ .....</b>	<b>80</b>
<b>6.6 CELKOVÁ KONFIGURACE PRACOVNÍHO MÍSTĚ .....</b>	<b>80</b>
<b>7 ŘÍDÍČÍ PROGRAM .....</b>	<b>83</b>
<b>7.1 OBECNĚ O PROGRAMU LABVIEW.....</b>	<b>83</b>
<b>7.2 HLAVNÍ SMYČKA PROGRAMU.....</b>	<b>84</b>
7.2.1 BLOK 1.....	85
7.2.2 BLOK 2.....	85
7.2.3 BLOK 3 .....	86
7.2.4 BLOK 4.....	86
7.2.5 BLOK 5.....	87
7.2.6 BLOK 6.....	88
<b>7.3 VEDLEJŠÍ SMYČKA PROGRAMU.....</b>	<b>90</b>
<b>7.4 OVLÁDACÍ PANEL PROGRAMU .....</b>	<b>90</b>
7.4.1 KARTA INICIALIZACE .....	91
7.4.2 KARTA OVLÁDÁNÍ .....	92
7.4.3 KARTA GRAFY.....	92
<b>8 OVĚŘENÍ FUNKCE KOMPENZÁTORU .....</b>	<b>94</b>
<b>8.1 ZÁZNAMY NAPĚTÍ A PROUDŮ .....</b>	<b>95</b>
<b>8.2 ZÁZNAMY OKAMŽITÝCH VÝKONŮ A ŘÍDÍČÍHO NAPĚTÍ.....</b>	<b>100</b>
<b>8.3 MĚŘENÍ FLIKRU .....</b>	<b>102</b>

---

<b>9 ZÁVĚR.....</b>	<b>103</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>105</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Okamžitý výkon [2]</i> .....	23
<i>Obr. 2-2 Grafické zobrazení výkonů[3]</i> .....	24
<i>Obr. 2-3 Vektorový diagram složek třífázového výkonu[4]</i> .....	27
<i>Obr. 2-4 Příklady třífázových napětí[1]</i> .....	30
<i>Obr. 2-5 Rozklad nesymetrie do složkových soustav [4]</i> .....	30
<i>Obr. 3-1 Clarke transformace [6]</i> .....	36
<i>Obr. 3-2 Fyzické toky okamžitého skutečného a imaginárního výkonu[5]</i> .....	41
<i>Obr. 3-3Komponenty p a q [5]</i> .....	42
<i>Obr. 3-4Základní princip paralelního proudového kompenzátoru[7]</i> .....	43
<i>Obr. 3-5 Princip stanovení potřebného kompenzačního proudu [5]</i> .....	43
<i>Obr. 3-6 Grafické zobrazení vektorů okamžitých veličin</i> .....	44
<i>Obr. 4-1 Vedení s jedním odběrem bez paralelní kompenzace [8]</i> .....	47
<i>Obr. 4-2 Vedení zatížené jedním odběrem s paralelní kompenzací [8]</i> .....	48
<i>Obr. 4-3 Fázorový diagram pro vedení s jedním odběrem a paralelní kompenzací[8]</i> .....	49
<i>Obr. 4-4 Systémová křivka napětí [10]</i> .....	50
<i>Obr. 4-5 Závislost napětí na zatížení[10]</i> .....	51
<i>Obr. 4-6 Kompenzace napětí příčnými prvky [10]</i> .....	51
<i>Obr. 4-7Vliv paralelní reaktivní kompenzace v místě odběru [10]</i> .....	52
<i>Obr. 4-8 Charakteristika vnímání flikru pro napěťové změny aplikované na 60W žárovku[27]</i> ...53	
<i>Obr. 5-1 Základní obvodové uspořádání 1f statického VAr kompenzátoru[10]</i> .....	60
<i>Obr. 5-2 Tyristorový měnič [10]</i> .....	61
<i>Obr. 5-3 Schéma TCR[15]</i> .....	62
<i>Obr. 5-4 Průběh napětí a proudu na indukčnosti u TCR pro <math>\alpha=0^\circ</math>[10]</i> .....	63
<i>Obr. 5-5 Závislost průběhu proudu tlumivkou na řídicím úhlu <math>\alpha</math> [15]</i> .....	63
<i>Obr. 5-6Pracovní oblast TCR a TSR[10]</i> .....	64
<i>Obr. 5-7 VA charakteristika TCR[10]</i> .....	64
<i>Obr. 5-8 Závislost BTCR na řídicím úhlu[10]</i> .....	65
<i>Obr. 5-9 Závislost THD na velikosti řídicího úhlu[4]</i> .....	67
<i>Obr. 5-10 Závislost amplitudy1.harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu[4]</i> .....	67
<i>Obr. 5-11 Závislost amplitud 3. až 11. harmonické proudu[4]</i> .....	68
<i>Obr. 5-12 Připínání TSC na síť při vybíjení kondenzátoru[10]</i> .....	69
<i>Obr. 5-13 Schéma TSC</i> .....	69

<i>Obr. 5-14 SVC kompenzátor a jeho V-A pracovní oblast [10][15]</i> .....	69
<i>Obr. 5-15 Závislost <math>B_{SVC}</math> na řídicím úhlu[10]</i> .....	71
<i>Obr. 5-16 V-A charakteristika SVC</i> .....	72
<i>Obr. 5-17 Schéma SVC Maryland[16]</i> .....	73
<i>Obr. 5-18 Kompenzační SVC stanice Maryland[16]</i> .....	74
<i>Obr. 5-19 Vliv SVC na napětí[16]</i> .....	74
<i>Obr. 6-1 Multifunkční zařízení NI USB-6009 [16]</i> .....	75
<i>Obr. 6-2 Schéma kompenzační jednotky [16]</i> .....	76
<i>Obr. 6-3 Principiální schéma proudového převodníku [16]</i> .....	78
<i>Obr. 6-4 Principiální schéma zapojení napěťového převodníku[16]</i> .....	79
<i>Obr. 6-5 Schéma zátěže</i> .....	79
<i>Obr. 6-6 Schéma modelu vedení</i> .....	80
<i>Obr. 6-7 Kompletní schéma pracoviště</i> .....	81
<i>Obr. 6-8 Fotografie pracoviště</i> .....	82
<i>Obr. 7-1 Příklad předního panelu programu v LabVIEW</i> .....	83
<i>Obr. 7-2 Příklad blokového schématu programu v LabVIEW</i> .....	84
<i>Obr. 7-3 Blokový diagram programu</i> .....	84
<i>Obr. 7-4 Skutečná implementace bloku 2</i> .....	85
<i>Obr. 7-5 Skutečná implementace bloku 3 - proudová část</i> .....	86
<i>Obr. 7-6 Skutečná implementace bloku 4 - proudová část</i> .....	87
<i>Obr. 7-7 Skutečná implementace bloku 5 - PQ teorie</i> .....	87
<i>Obr. 7-8 Skutečná implementace blok 6</i> .....	89
<i>Obr. 7-9 Kompletní podprogram vykreslování grafů</i> .....	90
<i>Obr. 7-10 Celkový pohled na uživatelské rozhraní programu</i> .....	91
<i>Obr. 7-11 Záložka inicializace</i> .....	91
<i>Obr. 7-12 Záložka ovládání</i> .....	92
<i>Obr. 7-13 Záložka grafy</i> .....	93
<i>Obr. 7-14 Záložka expertní nastavení</i> .....	93
<i>Obr. 8-1 Průběhy napětí a proudů - vykompenzováno</i> .....	95
<i>Obr. 8-2 Dynamická změna zátěže – nekompenzováno</i> .....	96
<i>Obr. 8-3 Dynamická změna zátěže – kompenzováno</i> .....	97
<i>Obr. 8-4 Průběh proudu po připnutí kondenzátoru</i> .....	98
<i>Obr. 8-5 Změna protékajícího proudu dekompenzační tlumivkou</i> .....	99
<i>Obr. 8-6 Průběh jalového výkonu a řídicího napětí při kompenzaci</i> .....	100

---

<i>Obr. 8-7 Průběh činného výkonu a účinniku při kompenzaci .....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 8-8 Výsledky měření flickru .....</i>	<i>102</i>

**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 4-1 Porovnání aplikace různých typů filtrů podle velikosti zátěže[4]</i> .....	58
--	----

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

<b>a</b>	operátor natočení	[-]
$\cos\gamma$	faktor zkreslení	[-]
$\cos\phi$	faktor výchytky	[-]
$\cos\varphi$	účinník odběru	[-]
$\cos\varphi_k$	účinník odběru po kompenzaci	[-]
$B_c$	susceptance kondenzátoru	[S]
$B_L$	susceptance tlumivky	[S]
$B_{SVC}$	susceptance SVC	[S]
<b>C</b>	kapacita kondenzátoru	[ $\mu$ F]
<b>D</b>	deformační výkon	[VAdef]
<b>e</b>	vektor okamžité hodnoty napětí	[V]
$f_n$	jmenovitý pracovní kmitočet	[Hz]
$f_r$	rezonanční kmitočet	[Hz]
<b>i</b>	vektor okamžité hodnoty proudu	[A]
<b>i</b>	okamžitá hodnota proudu	[A]
$i_0$	okamžitá hodnota proudu na ose 0	[A]
$i_\alpha$	okamžitá hodnota proudu na ose $\alpha$	[A]
$i_{\alpha p}$	okamžitý činný proud na ose $\alpha$	[A]
$i_{\alpha q}$	okamžitý jalový proud na ose $\alpha$	[A]
$i_{\beta p}$	okamžitý činný proud na ose $\beta$	[A]
$i_{\beta q}$	okamžitý jalový proud na ose $\beta$	[A]
$i_\beta$	okamžitá hodnota proudu na ose $\beta$	[A]
$i_a$	okamžitá hodnota proudu ve fázi a	[A]
$i_b$	okamžitá hodnota proudu ve fázi b	[A]

$i_c$	okamžitá hodnota proudu ve fázi c	[A]
$i_{celk}$	okamžitá hodnota proudu tekoucí na konci vedení	[A]
$I_{komp}$	okamžitá hodnota proudu kompenzátoru	[A]
$i_L$	okamžitá hodnota proudu tlumivkou	[A]
$i_{load}$	okamžitá hodnota proudu tekoucího do zátěže	[A]
$I$	efektivní hodnota proudu	[A]
$I_{L(1)}$	efektivní hodnota první harmonické proudu tlumivkou	[A]
$I$	efektivní hodnota proudu n-té harmonické	[A]
$I_{dv}$	dovolené zatížení vodiče uloženého v prostředí o teplotě q	[A]
$I_c$	efektivní hodnota proudu kondenzátoru	[A]
$I_{celk}$	efektivní hodnota proudu tekoucího na konci vedení	[A]
$I_{Lmax}$	maximální efektivní proud tekoucí kondenzátorem	[A]
$I_{\check{c}}$	efektivní činná složka proudu	[A]
$I_j$	efektivní jalová složka proudu	[A]
$I_k$	efektivní hodnota vykompenzovaného proudu	[A]
$I_{komp}$	efektivní hodnota proudu kompenzátoru	[A]
$I_{Lmax}$	maximální efektivní proud tekoucí tlumivkou	[A]
$I_{load}$	efektivní hodnota proudu tekoucího do zátěže	[A]
$I_{LMAX}$	maximální proud tekoucí tlumivkou	[A]
$I_q$	efektivní hodnota jalového proudu podle Fryzeho	[A]
$I_{max}$	maximální efektivní hodnota činného proudu	[A]
$I_W$	efektivní hodnota činného proudu podle Fryzeho	[A]
$\mathbf{I}$	fázor efektivní hodnoty proudu	[A]
$k_p$	stupeň kompenzace	[-]
$L$	indukčnost tlumivky	[H]
$n$	řád harmonické	[-]

N	počet kompenzačních stupňů	[-]
p	okamžitý činný výkon	[W]
$p_{3\varphi}$	okamžitý činný třífázový výkon	[W]
$p_{\alpha p}$	okamžitý činný výkon na ose $\alpha$	[W]
$p_{\alpha q}$	okamžitý jalový výkon na ose $\alpha$	[W]
$p_{\beta p}$	okamžitý činný výkon na ose $\beta$	[W]
$p_{\beta q}$	okamžitý jalový výkon na ose $\beta$	[W]
P	činný výkon	[W]
$P_2$	výkon odebíraný na konci vedení	[W]
$P_W$	činný výkon podle Fryzeho	[W]
$P_S$	zdánlivý výkon podle Fryzeho	[VA]
$P_{st}$	krátkodobá míra vjemu flikru	[%]
$P_{lt}$	dlouhodobá míra vjemu flikru	[%]
$\Delta P$	ztráty činného výkonu	[W]
$\Delta P_z$	zmenšení ztrát kompenzací	[W]
q	okamžitý jalový výkon	[VAr]
Q	jalový výkon	[VAr]
$Q_c$	jalový výkon kondenzátoru	[VAr]
$Q_{c1}$	jalový výkon jednoho kompenzačního stupně	[VAr]
$Q_L$	jalový induktivní výkon zátěže při činném výkonu P	[VAr]
R	odpor	[ $\Omega$ ]
s	okamžitý zdánlivý výkon	[VA]
S	zdánlivý výkon	[VA]
<b>S</b>	komplexní dánlivý výkon	[VA]
<b>S<sub>PQ</sub></b>	komplexní zdánlivý výkon podle Budenau	[VA]
u	okamžitá hodnota napětí	[V]

$u_0$	okamžitá hodnota napětí na ose 0	[V]
$u_\alpha$	okamžitá hodnota napětí na ose $\alpha$	[V]
$u_\beta$	okamžitá hodnota napětí na ose $\beta$	[V]
$u_a$	okamžitá hodnota napětí fáze a	[V]
$u_b$	okamžitá hodnota napětí fáze b	[V]
$u_c$	okamžitá hodnota napětí fáze c	[V]
$U_+$	fázor sousledné složky napětí	[V]
$U_-$	fázor zpětné složky napětí	[V]
$U_0$	fázor nulové složky napětí	[V]
$U_a$	fázor efektivní hodnoty napětí fáze a	[V]
$U_b$	fázor efektivní hodnoty napětí fáze b	[V]
$U_c$	fázor efektivní hodnoty napětí fáze c	[V]
$\Delta U$	úbytek napětí	[V]
$\Delta U_k$	úbytek napětí po kompenzaci	[V]
$U_n$	efektivní hodnota napětí n-té harmonické, jmenovité napětí	[V]
$U_w$	efektivní hodnota jalového napětí podle Fryzeho	[V]
$U_w$	efektivní hodnota činného napětí podle Fryzeho	[V]
$U$	fázor efektivní hodnoty napětí	[V]
$U_w$	činné napětí podle Fryzeho	[V]
$X_C$	reaktance kondenzátoru	[ $\Omega$ ]
$X_f$	fiktivní reaktance	[ $\Omega$ ]
$X_L$	reaktance tlumivky	[ $\Omega$ ]
$Y_L$	admitance tlumivky	[S]
$Y_{SVC}$	admitance SVC	[S]
$t$	čas	[s]
$T$	perioda	[s]

---

$\alpha$	řídící úhel	[°]
$\lambda$	faktor výkonu	[-]
$\lambda_q$	jalový faktor výkonu	[-]
$\varphi$	fázový posun mezi napětím a proudem	[°]
$\varphi$	fázový posun napětím a proudem n-té harmonické	[°]
$\varphi_I$	fázový posun proudu	[°]
$\varphi_U$	fázový posun napětí	[°]
$\varphi_{U+}$	fázový posun napětí	[°]
$\omega$	úhlová frekvence	[rad·s <sup>-1</sup> ]

**SEZNAM ZKRATEK**

AC	Alternating Current
DC	Direct Current
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
LV	LabVIEW
RMS	Root Mean Square
SSR	Solid State Relay
SVC	Static VAR Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
THD	Total Harmonic Distortion
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSR	Thyristor Switched Reactor

# 1 ÚVOD

Vzhledem k trvalým trendům zvyšování spotřeby elektrické energie, ochraně životního prostředí, volného trhu s elektřinou a připojování zařízení s citlivou elektronikou do elektrických sítí nabývá na stále větší důležitosti zajištění dostatku kvalitní elektrické energie. Rostoucí poptávka po elektrické energii, mění se skladba odběrů, otevření trhu s elektrickou energií, integrace nových zdrojů do elektrizační soustavy a zároveň nutnost respektovat životní prostředí udržení. [4]

S problematikou udržení kvality elektrické energie souvisí i kompenzace jalového výkonu. Jalový výkon ovlivňuje výrazně napěťové poměry v síti, proto je používán jako základní regulační veličina pro udržování napětí ve stanovených mezích. V souvislosti s kolísáním napětí v krátkém časovém intervalu může dojít k blikání světelných zdrojů. Toto blikání má nepříznivý vliv především pro psychologickou pohodu člověka. Kromě vlivu na napěťové poměry má kompenzace jalového výkonu vliv i na ztráty elektrické energie při přenosu, tím pádem i na přenosovou kapacitu. V přenosových sítích může například zvýšit stabilitu přenosu.

## 1.1 Cíle práce

Výsledkem práce by měl být demonstrační model plynule řízené kompenzační jednotky typu SVC. Pro potřeby zjištění okamžitého výkonu bude nutné vybrat vhodnou, aplikovatelnou metodu. V další části by mělo být seznámení s teorií kompenzace jalového výkonu, podrobněji potom s kompenzací typu SVC.

Po získání teoretických znalostí problematiky bude možné začít navrhovat praktickou část realizace dynamického kompenzátoru. Postupnou optimalizací řídicího SW vytvořeného v prostředí tzv. virtuální instrumentace programu LabVIEW by mělo být dosaženo co nejrychlejší vykompenzování změny účinníku odběru.

V poslední části budou prezentovány výsledky ověření funkce kompenzátoru, shrnuty získané poznatky a případně navrženy další možnosti vylepšení.

## 2 ZÁKLADNÍ VÝKONOVÉ TEORIE

Definice pro jednofázové systémy s harmonickým napětím jsou výchozím bodem pro začátek odvozování složitějších tří fázových systémů [1].

### 2.1 Výkonová teorie při harmonickém průběhu

V ideálním jednofázovém systému se sinusovým napětím zdroje a lineární (odporově-indukčním zatížením) lze okamžité hodnoty napětí a proudu popsat [1]:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.2)$$

Kde  $U$  a  $I$  představují efektivní hodnoty napětí a proudu,  $\omega$  je úhlová frekvence. Okamžitý výkon je dán součinem okamžité hodnoty napětí a proudu, proto platí [1]:

$$\begin{aligned} p(t) = u(t) \cdot i(t) &= 2 \cdot U \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) = \\ &= U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Rovnice (2.3) ukazuje, že okamžitý výkon jednofázového systému není konstantní. Má oscilační složku rovnu dvojnásobku základní frekvence, která je přidána k průměrné dané vztahem  $U \cdot I \cdot \cos\varphi$ . Rozložením a úpravou je odvozen vztah [1]:

$$\begin{aligned} p(t) = \underbrace{U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \cdot [1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)]}_{(I)} - \\ - \underbrace{U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)}_{II} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dvě části vztahu (2.4) lze interpretovat jako:

Část I: má průměrnou hodnotu rovnající se  $U \cdot I \cdot \cos\varphi$  a k ní přidanou měnící se složku kmitající s dvojnásobkem základní frekvence. Tato část není nikdy negativní (za předpokladu, že  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ ). A proto představuje jednosměrný tok energie od zdroje k zátěži [1].

Část II: má charakter čistě oscilační složky při dvojnásobné frekvenci ( $2 \cdot \omega$ ) a má maximální hodnotu rovnou  $U \cdot I \cdot \sin\varphi$ . Je zřejmé, že tato část má nulovou střední hodnotu [1].

Okamžitý výkon uvedený v přechodném vztahu je zastoupen třemi konstantami: činný, jalový a zdánlivý výkon. Jednotlivé výkony lze popsat následovně [1]:

Činný výkon: průměrná hodnota části I je definována jako činný výkon  $P$ . Jednotka, ve které se uvádí činný výkon, je Watt (W) [1]:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (2.5)$$

Jalový výkon: je definován jako špičková hodnota části II. Jednotka, ve které se uvádí jalový výkon je, Volt Ampér reaktanční (VAr) [1]:

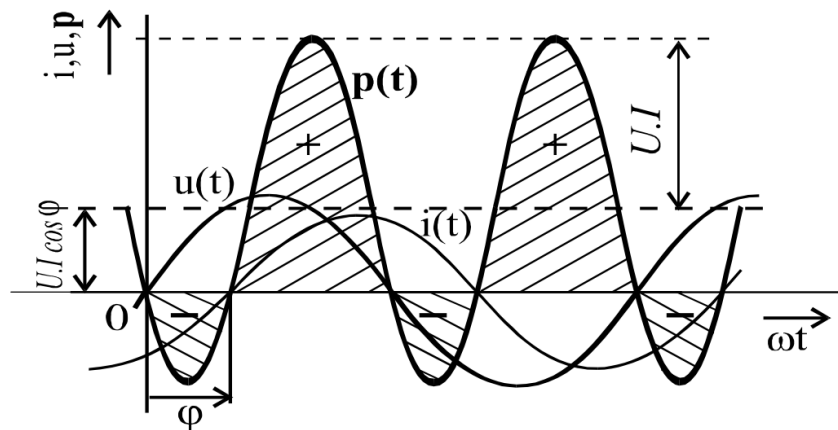
$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (2.6)$$

Úhel  $\varphi$  mezi napětím a proudem je dán charakterem zátěže. V případě induktivního charakteru má úhel kladné znaménko, v případě kapacitního charakteru má úhel záporné znaménko [1].

Jalový výkon je konvenčně definován jako výkon s nulovou střední hodnotou. Nicméně, toto tvrzení není kompletní, jak bude uvedeno později. Tento popis jalového výkonu byl zaveden v době, kdy reaktivními zařízení byly jen kondenzátory a cívky. V době, kdy neexistovala žádná zařízení výkonové elektroniky, která jsou schopna vytvářet jalový výkon bez prvků pro skladování energie. Toto téma bude projednáno dále [1].

Nyní lze zapsat okamžitý výkon  $p(t)$  jako [1]:

$$p(t) = \underbrace{P[1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)]}_{(I)} - \underbrace{Q \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)}_{(II)} \quad (2.7)$$



Obr. 2-1 Okamžitý výkon [2]

A poslední z výkonů používaných k definování příkonu elektrických zařízení je zdánlivý výkon definovaný jako [1]:

$$S = U \cdot I \quad (2.8)$$

Jednotkou zdánlivého výkonu je VoltAmpér (VA). Tento výkon je obvykle chápán jako maximální dosažitelný činný výkon při účinníku rovném jedné. Definice účinníku je uvedena v následující části [1].

## 2.2 Komplexní výkon a účinník

Komplexní výkon  $S$  je definován jako součin fázorů napětí a proudů. Aby platilo, že úhel  $\varphi$  je rozdíl úhlu napětí a proudu, dosazuje se do vztahu komplexně sdružená hodnota proudu [1].

Komplexní zdánlivý výkon je definován jako [1]:

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{U} \cdot \bar{I}^* = (U \angle \varphi_U) \cdot (I \angle -\varphi_I) = \\ &= \underbrace{U \cdot I \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)}_P + j \cdot \underbrace{U \cdot I \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)}_Q \end{aligned} \quad (2.9)$$

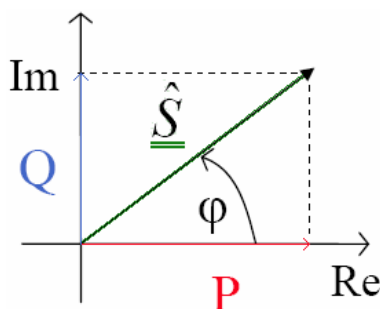
Absolutní hodnota komplexního výkonu je rovna zdánlivému výkonu stanovenému v (2.8) [1]:

$$|\bar{S}| = \sqrt{[U \cdot I \cdot \cos(\varphi_U - \varphi_I)]^2 + [U \cdot I \cdot \sin(\varphi_U - \varphi_I)]^2} = S = U \cdot I \quad (2.10)$$

Člen  $\cos\varphi$  odpovídá poměru činného výkonu  $P$  a zdánlivého výkonu  $S$ . Je označován jako účinník v případě že je počítán pouze z prvních harmonických, respektive jako PF (power faktor neboli faktor výkonu) pokud je počítán ze všech harmonických. Platí [1]:

$$\lambda = PF = \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (2.11)$$

Význam komplexního účinníku může být graficky znázorněn na známém trojúhelníku výkonů, jak je znázorněno na Obr. 2-2. Pokud zátěž není čistě odporová, jalový výkon  $Q$  není nula a činný výkon  $P$  je menší než zdánlivý výkon  $S$ . To znamená, že účinník  $\lambda$  je menší než jedna. [1]



Obr. 2-2 Grafické zobrazení výkonů[3]

Vztahy v kapitolách 2.1 a 2.2 jsou běžně používány k charakterizaci elektrických zařízení motorů, transformátorů atd. Je však nutno podotknout, že platí pouze u čistě harmonických napětí a proudů [1].

## 2.3 Výkon při neharmonických podmínkách

Metody určení výkonu v neharmonických podmínkách nejsou jedinečné, jsou odlišné a vedou v některých aspektech k rozdílným výsledkům. Dva odlišné soubory výkonových definic jsou běžně používány, jedna je stanovena ve frekvenční oblasti a druhá v časové oblasti. Obě metody jsou popsány dále. Jsou zde uvedeny nesrovnalosti a taky popsáno proč jsou nevhodné pro neharmonické podmínky [1].

### 2.3.1 Výkonové definice podle Budeanu

Soubor výkonových definic uvedl v roce 1927 pan Budeanu. Tyto definice jsou stále velmi důležité pro analýzu energetických systémů ve frekvenční oblasti. Zavedl definice, které jsou platné pro obecné průběhy napětí a proudu. Vzhledem k tomu, jak jsou definovány ve frekvenční oblasti, mohou být použity pouze v ustáleném stavu [1].

U jednofázového střídavého obvodu s obecným zatížením a zdrojem v ustáleném stavu lze napětí a proudy rozložit do Fourierovy řady. Pak může být stanoven odpovídající fázor pro každou harmonickou složku. A můžou být odvozovány následující definice [1].

Zdánlivý výkon  $S$  je definován jako [1]:

$$S = U \cdot I \quad (2.12)$$

Zdánlivý výkon je v zásadě shodný s údaji v (2.8). S tím rozdílem, že  $U$  a  $I$  jsou dány součtem efektivních hodnot jednotlivých harmonických složek. Průběhy napětí a proudu, které jsou vypočteny jako [1]:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (2.13)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.14)$$

Zde  $U_n$  a  $I_n$  odpovídají efektivním hodnotám  $n$ -té složky harmonické Fourierovy řady.  $T$  je perioda základní složky. V této analýze není uvažována přítomnost stejnosměrné složky. Úhel posunutí každého páru  $n$ -té harmonické složky napětí a proudu je reprezentován  $\varphi_n$ . [1]

Budeanu definoval činné a jalové výkony [1].

Činný výkon  $P$  [1]:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (2.15)$$

Jalový výkon  $Q$  [1]:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n \quad (2.16)$$

V ustáleném stavu při neharmonických podmínkách však jalový ani zdánlivý výkon uspokojivě necharakterizují problematiku kvality elektrické energie nebo účinnost přenosu. Vztah pro činný (2.15) ani pro jalový výkon (2.16) nerespektuje vliv mezi napětím a proudem rozdílných frekvencí. Kromě toho vztah pro jalový výkon (2.16) zahrnuje algebraický součet jednotlivých harmonických jalového výkonu, které jsou pozitivní, negativní, nebo se dokonce vzájemně ruší, v závislosti na úhlu  $\varphi_n$ . [1]

Ztrátu kvality elektrické energie v neharmonických podmínkách lépe vystihuje deformační výkon  $D$ , který byl zaveden Budeanuem. Tento zkreslující výkon doplňuje výše uvedený soubor výkonových definic [1].

Deformační výkon  $D$  je definován jako [1]:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (2.17)$$

Vztahy definované v (2.13) až (2.17) jsou dobře známé a široce používané při analýze obvodových systémů pracujících při neharmonických podmínkách. Avšak pouze činný výkon  $P$ , jak je definován v (2.15) má jasný fyzikální význam, a to nejen v případě harmonických, ale také v neharmonických podmínkách. Činný výkon představuje průměrnou hodnotu přenosu energie mezi dvěma elektrickými subsystémy. V porovnání, jalový a zdánlivý výkon, jenž zavedl Budeanu jsou jen matematické formulace, které jsou rozšířením definic pro harmonické průběhy, avšak bez jasných fyzikálních významů. Další nevýhodou je, že společný nástroj pro měření výkonu na základě výkonových definic uvedených ve frekvenční oblasti nedokáže jednoduše stanovit ztráty kvality elektrické energie v praktických případech. [1]

### 2.3.1.1 Výkonový čtyřstěn a zkreslující faktor

Vzhledem k přítomnosti deformačního výkonu v neharmonických podmínkách je výkon graficky znázorněn na trojrozměrné vztahné soustavě, namísto trojúhelníku výkonů uvedeného na Obr. 2-2. Obr. 2-3 znázorňuje nové grafické znázornění výkonu, které je známé jako výkonový čtyřstěn [1].

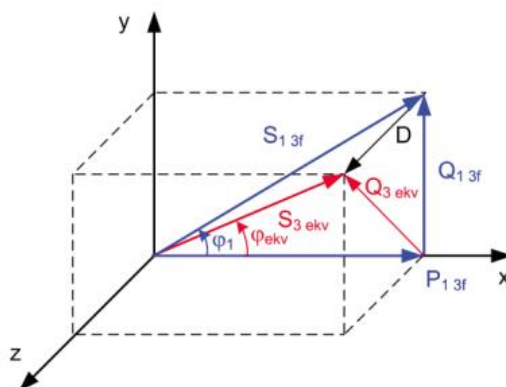
Za neharmonických podmínek, zdánlivý výkon definovaný v (2.8) a (2.12) se liší od komplexního výkonu definovaného v (2.9). V důsledku toho mezi nimi již neplatí ekvivalence, jako je uvedeno v (2.10). Komplexní výkon  $\overline{S_{PQ}}$  může vycházet ze vztahů (2.15) a (2.16), které odpovídají činnému a jalovému výkonu definovaného Budeanuem. Tento nový komplexní výkon  $\overline{S_{PQ}}$  je definován jako [1]:

$$\begin{aligned}\overline{S_{PQ}} = P + jQ &= \sum_{n=1}^{\infty} P_n + j \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n + j \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \sin\varphi_n\end{aligned}\quad (2.18)$$

Vztah mezi zdánlivým výkonem  $\bar{S}$  a komplexním výkonem  $\overline{S_{PQ}}$  je dán [1]

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} = \sqrt{|\overline{S_{PQ}}|^2 + D^2}\quad (2.19)$$

Faktor výkonu  $\lambda$  je definován v (2.11) jako poměr činného ke zdánlivému výkon. Nyní  $\lambda$  odpovídá  $\cos\varphi$  ve výkonovém čtyřstěnu na Obr. 2-3. [1]



Obr. 2-3 Vektorový diagram složek třífázového výkonu[4]

Jak lze vidět v (2.19) absolutní hodnota komplexního výkonu  $\overline{S_{PQ}}$  je rozdílná od zdánlivého výkonu  $S$  z neharmonického prostředí. Poměr mezi  $P$  a  $|\overline{S_{PQ}}|$  je definována jako faktor výchylky ( $\cos\phi$ ), což je faktor výkonu při harmonických podmínkách. Další termín je faktor zkreslení ( $\cos\gamma$ ) definován jako poměr mezi komplexním výkonem  $|\overline{S_{PQ}}|$  a zdánlivým výkonem  $S$ . [1]

Tyto faktory jsou uvedeny níže.

Faktor výchylky  $\cos\phi$  [1]:

$$\cos\phi = \frac{P}{|\overline{S_{PQ}}|} \quad (2.20)$$

Faktor zkreslení  $\cos\gamma$  [1]:

$$\cos\gamma = \frac{|\overline{S_{PQ}}|}{S} \quad (2.21)$$

Faktor výkonu  $\lambda$  [1]:

$$\lambda = \cos\phi = \frac{P}{S} = \cos\phi \cdot \cos\gamma \quad (2.22)$$

### 2.3.2 Výkonové definice podle Fryzeho

Začátkem třicátých let 19.století navrhl Fryze sadu výkonových definic založených na efektivních hodnotách napětí a proudu. Základní rovnice v souladu s metodou Fryzeho je uvedena níže [1].

Činný výkon [1]:

$$P_W = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = U_W \cdot I = U \cdot I_W \quad (2.23)$$

kde  $U$  a  $I$  jsou efektivní hodnoty napětí a proudu  $U_W$  a  $I_W$  jsou činné napětí a proud definovány níže. Efektivní hodnoty napětí a proudu jsou vypočteny, jak je uvedeno v (2.13) a

(2.14). Spolu s činným výkonem  $P_W$  tvoří efektivní hodnoty základ Fryzeho metody. Z nich mohou být všechny ostatní parametry definovány a vypočítají se takto [1]

Zdánlivý výkon  $P_S$  [1]:

$$P_S = U \cdot I \quad (2.24)$$

Aktivní faktor výkonu  $\lambda$  [1]:

$$\lambda = \frac{P_W}{P_S} = \frac{P_W}{U \cdot I} \quad (2.25)$$

Jalový výkon  $P_q$  [1]:

$$P_q = \sqrt{P_S^2 - P_W^2} = U_q \cdot I = U \cdot I_q \quad (2.26)$$

kde  $U_q$  je jalové napětí a  $I_q$  jalový proud, jak je definováno dále [1].

Jalový faktor výkonu  $\lambda_q$  [1]:

$$\lambda_q = \sqrt{1 - \lambda^2} \quad (2.27)$$

Činné napětí  $U_w$  [1]:

$$U_w = \lambda \cdot U \quad (2.28)$$

Činný proud  $I_w$  [1]:

$$I_w = \lambda \cdot I \quad (2.29)$$

Jalové napětí  $U_q$  [1]:

$$U_q = \lambda_q \cdot U \quad (2.30)$$

Jalový proud  $I_q$  [1]:

$$I_q = \lambda_q \cdot I \quad (2.31)$$

Fryze definoval jalový výkon tak, že zahrnuje všechny části mezi napětím a proudem, který nepřispívá k činnému výkonu  $P_W$ . Činný výkon  $P_w$  je definován jako průměrná hodnota okamžitého činného výkonu. Toto pojetí činného a jalového výkonu je dobře přijímána v dnešní době. Například Czarnecki ještě vylepšil tento přístup, když rozdělil jalový výkon  $P_Q$  do čtyř dílčích částí v závislosti na jejich původu v elektrických obvodech. [1]

Lze prokázat, že neexistuje žádný rozdíl mezi činným a zdánlivým výkonem definovaným Fryzem v časové oblasti a Budeanuem ve frekvenční oblasti. Vztahy pro výpočet činného výkonu (2.15) a (2.23) jsou shodné. Shodné jsou taky vztahy pro výpočet zdánlivého výkonu (2.12) a (2.24). Nicméně jalový výkon uvedený v (2.16) Budeanuem se liší od toho v (2.26) definovaného Fryzem [1].

## 2.4 Elektrický výkon v třífázových systémech

Výše uvedené definice uvažovaly pro zjednodušení pouze jednofázové obvody. V praxi se ovšem používají vícefázové obvody – třífázové. Jednoduchým přechodem na třífázové systémy může být prostý součet tří jednotlivých systémů. Toto zjednodušení lze použít v obvodech bez napájení elektronických přístrojů nebo nelineární zátěže. Celkový činný, jalový a zdánlivý výkon v třífázových obvodech mohou být vypočteny jako třikrát výkon jednofázového výkonu, nebo součet výkonů ve třech jednofázových, oddělených obvodech. Třífázové soustavy vykazují některé vlastnosti, které se u jednofázových nevyskytují. Tyto vlastnosti budou reprezentovány v této kapitole [1].

### 2.4.1 Klasifikace třífázových systémů

Třífázové systémy mohou být uzemněny nebo neuzemněny. Pokud je třífázový systém uzemněn na více než jednom místě za normálního provozu (bez poruchy nebo zkratu), může zem poskytnout další vodivou cestu. Třífázový systém může tedy mít čtvrtý vodič nazvaný nulový vodič. V obou případech je systém klasifikován jako třífázový, čtyřvodičový. Není-li k dispozici zem, nebo je uzemněn jen jeden uzel v celé podsíti, je systém klasifikován jako třífázový, třívodičový systém [1].

Zatím byly popsány a klasifikovány jednofázové systémy při harmonickém nebo neharmonickém průběhu. Dále byl popsán pojem zkreslení při neharmonickém průběhu. Třífázové systémy – v harmonických podmínkách mají zvláštní vlastnost, pokud jde o amplitudu a úhel každého fázového napětí (nebo proudu). Pokud jsou si amplitudy rovny a úhly mezi fázemi jsou rovny  $2\pi/3$ , je třífázový systém souměrný nebo symetrický. V opačném případě je třífázový systém nevyvážený nebo nesymetrický. Výše uvedené klasifikace jsou znázorněny na Obr. 2-4, kde jsou uvedeny tři příklady třífázových napětí [1].

Obr. 2-4 (a) a Obr. 2-4 (b) ukazují příklady třífázového symetrického a nesymetrického napětí, na Obr. 2-4 (c) se jedná o třífázové zkreslené a nevyvážené napětí, které jsou získané superpozicí harmonických složek na nesymetrické napětí uvedené na Obr. 2-4 (b) [1].

Nesymetrické veličiny mohou být lépe srozumitelné, pokud jsou rozloženy do jednotlivých symetrických složek. Tři nesymetrické fázory –  $U_a, U_b, U_c$  jsou transformovány do tří dalších fázorů: sousledná složka  $U_+$ , zpětná složka  $U_-$  a nulová složky  $U_0$ . Jsou stanoveny jako [1]:

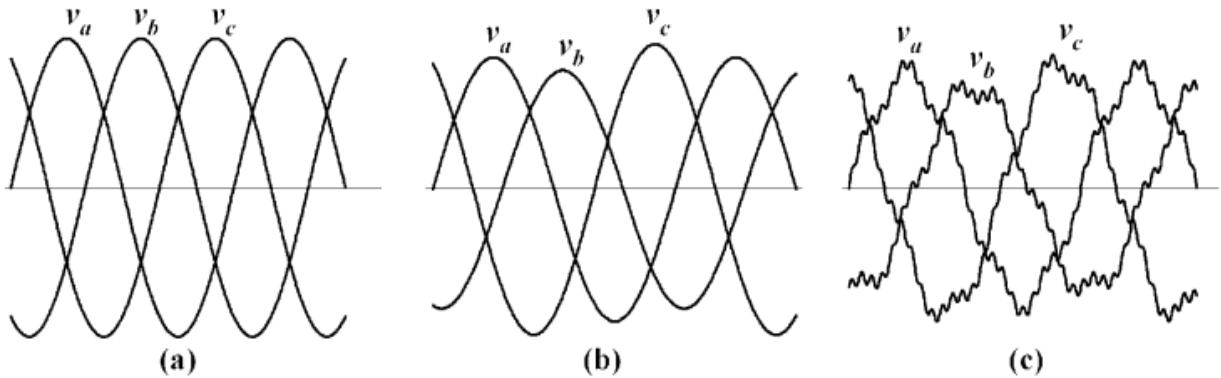
$$\begin{bmatrix} \overline{U_0} \\ \overline{U_+} \\ \overline{U_-} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & a^2 \\ 1 & a^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U_a} \\ \overline{U_b} \\ \overline{U_c} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

konstanta  $a$  je komplexní číslo, které slouží jako operátor natočení [1]:

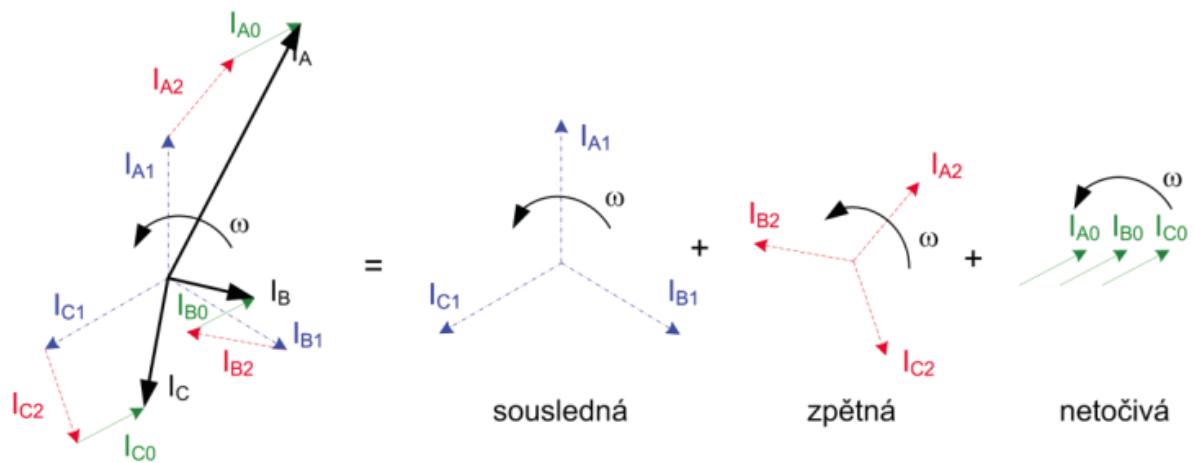
$$\bar{a} = 1 \angle 120^\circ = e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.33)$$

Opačná transformace je [1]:

$$\begin{bmatrix} \overline{U}_a \\ \overline{U}_b \\ \overline{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \frac{1}{a^2} & \frac{1}{\bar{a}} \\ 1 & \bar{a} & \frac{1}{a^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{U}_0 \\ \overline{U}_+ \\ \overline{U}_- \end{bmatrix} \quad (2.34)$$



Obr. 2-4 Příklady třífázových napětí [1]



Obr. 2-5 Rozklad nesymetrie do složkových soustav [4]

Obr. 2-5 ukazuje fázory se stejnou úhlovou frekvencí  $\omega$ , odpovídající rozkladu nevyváženého třífázového systému do symetrických složek. Výše uvedená analýza je platná pro libovolně zvolené hodnoty  $\omega$ . Každou harmonickou lze rozdělit na dané složky [1].

#### 2.4.2 Výkon v symetrickém třífázovém systému

V třífázovém vyváženém systému, celkový třífázový činný, jalový a zdánlivý výkon mohou být vypočteny jako třikrát jednofázový výkon. V případě, že je matematický výklad pro činný, jalový a zdánlivý výkon v obou jednofázových i třífázových systémech stejný, měla by být uvedena alespoň jedna poznámka týkající se jalového výkonu  $Q$ . Jalový výkon nevystihuje stejný jev ve třífázových a jednofázových obvodech. Bude odvozeno níže [1].

Třífázové napětí a proudy, které obsahují pouze souslednou základní složku (sinusový a vyvážený systém) jsou dány [1]:

$$\begin{aligned}
u_a(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin(\omega t + \varphi_{U_+}) \\
u_b(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_{U_+} - \frac{2\pi}{3}\right) \\
u_c(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_{U_+} + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{2.35}$$

$$\begin{aligned}
i_a(t) &= \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \sin(\omega t + \varphi_{I_+}) \\
i_b(t) &= \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_{I_+} - \frac{2\pi}{3}\right) \\
i_c(t) &= \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \sin\left(\omega t + \varphi_{I_+} + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{2.36}$$

Symbole  $U_+$ ,  $I_+$ ,  $\varphi_{U_+}$ , a  $\varphi_{I_+}$  s indexem „+“ jsou použity ke zdůraznění toho, že jsou zde pouze sousledné složky [1].

Pro třífázový systém s nebo bez nulového vodiče, trojfázový okamžitý činný výkon  $p_{3\varphi}(t)$  popisuje celkový okamžitý tok energie za jednotku času mezi dvěma subsystemy, a je dán [1]:

$$\begin{aligned}
p_{3\varphi}(t) &= u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) + u_c(t) \cdot i_c(t) = \\
&= p_a(t) + p_b(t) + p_c(t)
\end{aligned} \tag{2.37}$$

Dosažením (2.35) a (2.36) do (2.37) vznikne [1]:

$$\begin{aligned}
p_{3\varphi}(t) &= \\
&= U_+ \cdot I_+ \left[ \begin{aligned} &\cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) - \cos(2\omega t + \varphi_{U_+} + \varphi_{I_+}) + \\ &+ \cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) - \cos\left(2\omega t + \varphi_{U_+} + \varphi_{I_+} + \frac{2\pi}{3}\right) + \\ &+ \cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) - \cos\left(2\omega t + \varphi_{U_+} + \varphi_{I_+} - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \tag{2.38}$$

$$p_{3\varphi}(t) = 3 \cdot U_+ \cdot I_+ \cdot \cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) = 3P \tag{2.39}$$

Součet tří časově závislých podmínek v (2.38) je vždy roven nule. Proto okamžitý činný třífázový elektrický výkon  $p_{3\varphi}(t)$  je konstantní, což znamená, že je časově nezávislý. V porovnání, jednofázový elektrický výkon definovaný v (2.3) obsahuje časově závislou část. Tento vztah byl rozložen do dvou dílčích částí v (2.4), ze kterého byl definován činný výkon  $P$  a jalový výkon  $Q$ . Zde třífázový okamžitý činný výkon je konstantní a rovná se  $3P$  (tříkrát jednofázový činný výkon). V souladu s definicemi uvedenými v jednofázových systémech je třífázový činný výkon  $P_{3\varphi}$  definován jako [1]:

$$P_{3\varphi} = 3 \cdot P = 3 \cdot U_+ \cdot I_+ \cdot \cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) \tag{2.40}$$

Pro třífázové symetrické systémy, může trojfázový zdánlivý výkon být odvozen z fázorů napětí a proudu, podobně jako u jednofázového systému. Vzhledem k tomu, že třífázový obvod je vyvážený, může být přijata myšlenka, že třífázový obvod lze považovat za tři jednofázové obvody. Dále lze použít úvahu, že co se děje v dané fázi také se stane v další fázi, o 1/3 základní periody později, a tak dále. Proto je třífázový zdánlivý výkon  $S_{3\varphi}$  definován jako [1]:

$$S_{3\varphi} = 3 \cdot S = 3 \cdot U_+ \cdot I_+ \quad (2.41)$$

Dále je třífázový komplexní výkon  $S_{3\varphi}$  definován jako trojnásobek jednofázového komplexního výkonu definovaného v (2.12). Definici třífázového střídavého jalového výkonu  $Q_{3\varphi}$  lze odvodit z imaginární části definice třífázového komplexního výkonu takto[1]

$$\begin{aligned} \overline{S_{3\varphi}} &= 3 \cdot \overline{U_+} \cdot \overline{I_+^*} = 3 \cdot U_+ \angle \varphi_{U_+} \cdot I_+ \angle \varphi_{I_+} = \\ &= \underbrace{3 \cdot U_+ \cdot I_+ \cdot \cos(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+})}_{P_{3\varphi}} + j \underbrace{3 \cdot U_+ \cdot I_+ \cdot \sin(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+})}_{Q_{3\varphi}} \end{aligned} \quad (2.42)$$

Třífázový jalový výkon[1]

$$Q_{3\varphi} = 3 \cdot Q = 3 \cdot U_+ \cdot I_+ \cdot \sin(\varphi_{U_+} - \varphi_{I_+}) \quad (2.43)$$

Jalový výkon  $Q_{3\varphi}$  uvedený v (2.42) nebo (2.43) je jen matematická definice bez přesného fyzikálního významu. Jinými slovy, okamžitý výkon třífázového obvodu (2.39) neobsahuje oscilující složku na rozdíl od jednofázového okamžitého výkonu uvedeného v (2.4). Neexistuje tedy žádná jednosměrná část výkonu, ze které by šel určit činný výkon definovaný jako  $P = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$ , ani oscilující výkon, který nekoná práci  $Q = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$  [1].

Například třífázový ideální generátor poskytuje symetrické napětí, k němu připojený ideální kondenzátor neprodukuje žádnou mechanickou práci, případné ztráty jsou zanedbány. V tomto případě je každý fázor napětí kolmý k odpovídajícímu fázoru proudu a  $P_{3\varphi}$  je roven nule. Generátor nedodává žádný činný výkon, v ideálním případě. Na druhé straně jednofázový ideální generátor napájející ideální kondenzátor má kmitavý mechanický točivý moment v důsledku přítomnosti oscilační části činného výkonu, jak je popsáno v (2.4). Proto není správné posuzovat třífázový jalový výkon reprezentující oscilační složku mezi zdrojem a zátěží jako tři jednofázové obvody, ale jako jeden třífázový. Nicméně výše uvedené jednofázové definice jsou užitečné, pokud jde o zjednodušení analýzy energetických systémů, které mohou být přizpůsobeny tak, aby byly vyvážené a sinusové [1].

### 2.4.3 Výkon v nesymetrickém třífázovém systému

Tradiční pojetí zdánlivého a jalového výkonu je v rozporu, pokud se použije na nesymetrickou nebo zkreslenou trojfázovou síť. Oba přístupy Budeanu a Fryze nejsou dostatečné pro popsání situace v těchto systémech [1].

Na základě efektivních hodnot napětí a proudu, jsou běžně používány následující dvě definice třífázového zdánlivého výkonu [1].

Výpočet po jednotlivých fázích [1]:

$$S_{3\varphi} = \sum_k S_k = \sum_k U_k \cdot I_k, \quad k = (a, b, c) \quad (2.44)$$

Celková efektivní hodnota [1]:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_k U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_k I_k^2}, \quad k = (a, b, c) \quad (2.45)$$

Zde  $U_a, U_b, U_c$  a  $I_a, I_b, I_c$  jsou efektivními hodnotami fázových napětí a fázových proudů, jak stanovil Budeanu v (2.13) a (2.14) [1].

Je možné dokázat, že pro symetrické a harmonické případy, zdánlivý výkon v (2.44) a (2.45) jsou ekvivalentní. Nicméně při nesymetrických a neharmonických podmínkách je výsledek vždy  $S_{\Sigma} < S_{3\varphi}$ . Výkon  $S_{\Sigma}$  a  $S_{3\varphi}$  jsou matematické definice bez jasně fyzikálního významu. Někteří autoři však používají vztah (2.45) pro stanovení maximálního dosažitelného činného výkonu při jednotkovém faktoru výkonu [1].

V (2.45) se používá označení celkové napětí a proud. Schering poukázal na to, že Buchholz představil koncept celkového napětí a proudu v roce 1919 k tomu, aby definoval zdánlivý výkon pro obecné zatížení. Celkové efektivní napětí a proud jsou dány [1]:

$$U_{\Sigma} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} \quad (2.46)$$

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (2.47)$$

Celkové napětí ve vztahu (2.46), které se počítají z efektivních hodnot fázových napětí  $U_a, U_b$  a  $U_c$  dává efektivní hodnotu napětí v síti v případě, že systém je harmonický a vyvážený. Stejná situace nastane v celkovém proudu, který se vypočítá z efektivních hodnot fázových proudů  $I_a, I_b$  a  $I_c$ . Kromě toho může být pojem celkové napětí být užitečné i při výpočtu okamžitých hodnot fázových napětí. Například takto [1]:

$$\begin{aligned} u_a(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin(\omega t + \varphi_{U_+}) \\ u_b(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin(\omega t + \varphi_{U_+} - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c(t) &= \sqrt{2} \cdot U_+ \cdot \sin(\omega t + \varphi_{U_+} + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$u_{\Sigma} = \sqrt{u_a^2(t) + u_b^2(t) + u_c^2(t)} = \sqrt{3} \cdot U_+ \quad (2.49)$$

U třífázových nevyvážených / zkreslených systémů mají okamžitá celková napětí oscilační část, která je superponována na základní stejnosměrný signál viz.(2.49) [1].

Není možné vytvořit pevné definice pro činný výkon, jalový výkon, účinník atd. ze zdánlivého výkonu uvedeného v (2.44), (2.44) nebo (2.45). Jak již bylo uvedeno výše, opět by vznikly definice bez jasně fyzikálního významu. Proto bude v následující kapitole popsána metoda analýzy okamžitého činného výkonu[1].

### 3 TEORIE OKAMŽITÉHO VÝKONU

Jak je popsáno v předchozí kapitole, výzkum výpočtů a fyzikálních interpretací toku energie v elektrickém obvodu, se datuje do 20. let minulého století. Je zajímavé, že již z té doby lze najít vynikající teorie, které se zabývají většinou důležitých aspektů. Avšak všechny teorie se týkaly činného výkonu nebo efektivní hodnoty napětí a proudu. Koncept, který navrhl Fryze využívá efektivní hodnoty pro analýzu výkonu, zachází však třífázový obvodem jako jednotkou, nikoliv superpozicí tří jednofázových obvodů [1].

Rozvoj silových elektronických zařízení a jejich přidružených zařízení přinesl nové problémy vznikající v elektrické síti. Měníče se chovají jako nelineární zatížení a v současné době představují značné množství energie ve srovnání s tradičními lineárními zátěžemi. Rychlé reakce těchto měničů způsobují, že generují jalový výkon a harmonické složky, a proto je zřejmé, že konvenční přístupy k analýze síly nejsou dostatečné. Nelze totiž uvažovat průměrné nebo efektivní hodnoty proměnných. Proto byla pro pochopení fyzikální podstaty toku energie v nelineárním obvodu vyvinuta analýza v časové oblasti. Tato kapitola je věnována analýze v časové oblasti energie v třífázovém elektrickém obvodu [1].

Teorie, které se zabývají okamžitým výkonem, mohou být zařazeny především do následujících dvou skupin. První z nich je vyvinuta na základě transformace ABC fází do tří kolmých os, a druhá je založena přímo na ABC fázích. První se nazývá je p-q teorie, a je založena na transformaci fází ABC do systému  $\alpha\beta 0$ . Druhá metoda nemá přesný název ale vzhledem k tomu, že je založena na ABC fázích tak bude nazývána ABC teorie. [1]

#### 3.1 Základní myšlenka p-q teorie

P-q teorie je založena na okamžitých výkonech definovaných v časové oblasti. Bez omezení průběhů napětí nebo proudu může být aplikován na třífázové systémy s nulovým nebo bez nulového vodiče. To platí nejen v ustáleném stavu, ale také v přechodném stavu. Jak půjde vidět v následujících kapitolách, tato teorie je velmi efektivní a flexibilní při navrhování regulátorů pro zařízení používaných v energetice ke zlepšení poměrů v síti [1].

P-q teorie nejdříve transformuje napětí a proudy z ABC do systému  $\alpha\beta 0$  souřadnic, a poté definuje okamžitý výkon na těchto souřadnicích. Proto, tato teorie vždy považuje třífázový systém jako celek, ne jako superpozici nebo součet tří jednofázových okruhů [1].

#### 3.2 Clarke transformace

$\alpha\beta 0$  neboli Clarke transformace převádí třífázové okamžité napětí ve fázích ABC fázích  $u_a$ ,  $u_b$  a  $u_c$ , na okamžité napětí na  $\alpha\beta 0$ -osách  $u_\alpha$ ,  $u_\beta$ , a  $u_0$ . Clarke transformace a její inverzní transformace pro třífázové obecné napětí daná [1]:

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Podobně, třífázový obecné okamžité proudy  $i_a$ ,  $i_b$ , a  $i_c$  mohou být převedeny na  $\alpha\beta 0$ -osy [1]:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

A inverzí transformace je [1]:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Jednou z výhod použití  $\alpha\beta 0$  transformace je oddělení nulové složky z ABC – fází.  $\alpha$  a  $\beta$  osy nijak nepřispívají k nulové složce. Žádná nulová složka proudu neexistuje v třífázové, třívodičové soustavě, proto může být složka  $i_0$  odstraněna z výše uvedených rovnic a tím pádem dojde ke zjednodušení. Pokud jsou třífázová napětí v čtyřvodičové soustavě souměrná a není nulová složka napětí přítomna, lze  $u_0$  odstranit. Nicméně pokud jsou přítomny nulové složky napětí a proudu, musí být brány v úvahu kompletní transformace. [1]

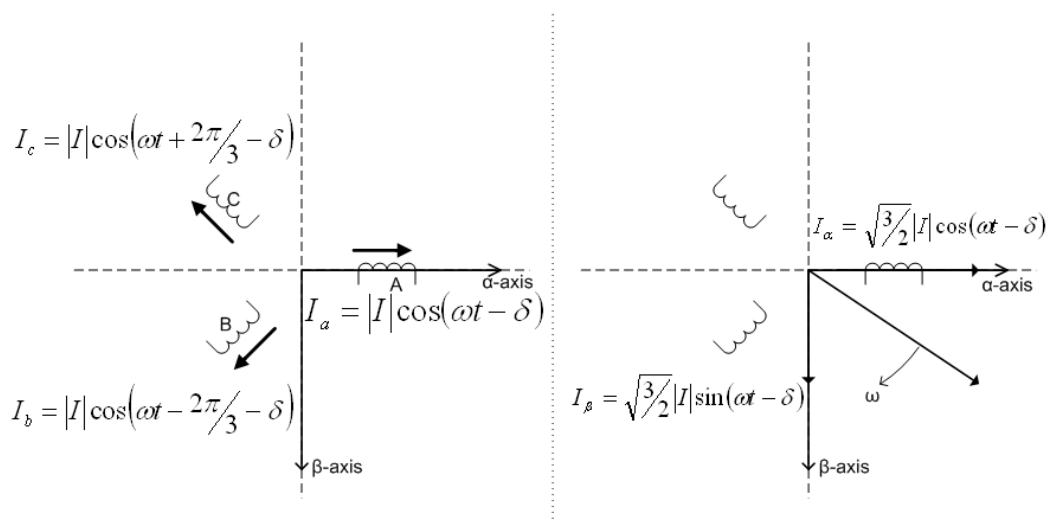
Pokud může být složka  $u_0$  odstraněna z transformačních matic, Clarke transformace a inverzní verze bude [1]

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Obdobné rovnice platí i pro proudy.

Matice uvedené v (3.5) a (3.6) představují transformaci mezi dvěma systémy os, jak je znázorněno na Obr. 2-1. Jsou to stacionární osy a neměly by být zaměňovány s pojmy napěťových nebo proudových fázorů na časové ose. Zde jsou okamžité hodnoty fázových napětí a proudů abc a jsou transformovány na osy  $\alpha\beta$  a naopak. Abc osy jsou vzájemně posunuty o  $2\pi/3$  rad, zatímco  $\alpha$  a  $\beta$  osy jsou kolmé. Osa  $\alpha$  je rovnoběžná s osou  $\alpha$ . [1]



Obr. 3-1 Clarke transformace [6]

### 3.3 Výpočet vektorů napětí a proudů

Pokud lze  $u_0$  zanedbat, vektor okamžitého napětí je definována na základě okamžitých  $\alpha$  a  $\beta$  komponent.[1]

$$\bar{e} = u_\alpha + ju_\beta \quad (3.7)$$

Stejně tak v případě, že lze zanedbat  $i_0$ , vektor okamžitého proudu je definován jako [1]:

$$\bar{i} = i_\alpha + ji_\beta \quad (3.8)$$

Výše uvedené okamžité vektory mohou být zastoupeny v komplexní rovině, kde reálná osa je osa  $\alpha$ , a imaginární osa je osa  $\beta$  osa Clarke transformace. Je třeba poznamenat, že výše definované vektory jsou funkcemi času, protože se skládají z Clarke složek okamžitých fázových napětí a fázových proudů v třífázové soustavě. Proto by neměly být nesprávně chápány jako fázory. Užitečnost tohoto vektoru je definována v následujícím příkladu. Později budou použity také k definici nové koncepce okamžitého komplexního zdánlivého výkonu [1].

Harmonické a symetrické fázové napětí a proudy třífázového lineárního obvodu [1]:

$$\begin{cases} u_a(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi_U) \\ u_b(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi_U - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi_U + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} i_a(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t + \varphi_I) \\ i_b(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t + \varphi_I - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \cos(\omega t + \varphi_I + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.10)$$

Úhly  $\varphi_U$  a  $\varphi_I$ , jsou fáze napětí a proudu, vzhledem k dané referenci. Výše uvedená napětí a proudy se skládají z jedné symetrické součásti v základní sousledné složce viz. Obr. 2-5. Proto jsou harmonické a symetrické. Tato napětí a proudy mohou být transformovány na referenční  $\alpha \beta$  systém pomocí (3.5) a obdobně pro proudové rovnice. Výše uvedené tři fázová napětí a proudy transformovány do systému  $\alpha\beta$  potom [1]:

$$\begin{cases} u_\alpha = \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\omega t + \varphi_U) \\ u_\beta = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi_U) \end{cases} \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos(\omega t + \varphi_I) \\ i_\beta = \sqrt{3} \cdot I \cdot \sin(\omega t + \varphi_I) \end{cases} \quad (3.12)$$

Nyní je odvozen vektor napětí  $\bar{e}$  a vektor proudu  $\bar{i}$  [1]:

$$\bar{e} = u_\alpha + j u_\beta \Rightarrow \begin{cases} \bar{e} = \sqrt{3} \cdot U \cdot [\cos(\omega t + \varphi_U) + j \sin(\omega t + \varphi_U)] \\ \bar{e} = \sqrt{3} \cdot U \cdot e^{j(\omega t + \varphi_U)} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$\bar{i} = i_\alpha + j i_\beta \Rightarrow \begin{cases} \bar{i} = \sqrt{3} \cdot I \cdot [\cos(\omega t + \varphi_I) + j \sin(\omega t + \varphi_I)] \\ \bar{i} = \sqrt{3} \cdot I \cdot e^{j(\omega t + \varphi_I)} \end{cases} \quad (3.14)$$

### 3.4 Třífázový okamžitý činný výkon z hlediska Clarkeho transformace

Clarke transformace a její inverzní transformace uvedené v (3.1) až (3.4) mají tu vlastnost, že jsou neměnné s výkonem. Tato vlastnost je velmi vhodná, když je kladen důraz na analýzu okamžitého výkonu v třífázových systémech. Všechny tradiční definice výkonu, které jsou popsány v kapitole 2 jsou platné pouze za podmínky, kdy je systém v ustáleném stavu. Třífázový okamžitý činný výkon má jasný a všeobecně přijímaný fyzikální význam, a platí i při přechodových stavech. [1]

Okamžitý činný výkon  $p_{3\varphi}(t)$  popisuje okamžitý celkový tok energie mezi dvěma subsystémy. Platí pro třífázový systém s nebo bez nulového vodiče. [1]

Třífázový okamžitý činný výkon  $p_{3\varphi}(t)$ , je vypočten z okamžitých fázových napětí a proudů[1]:

$$p_{3\varphi}(t) = u_a(t)i_a(t) + u_b(t)i_b(t) + u_c(t)i_c(t) \quad (3.15)$$

$$p_{3\varphi} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \quad (3.16)$$

Kde  $u_a, u_b$  a  $u_c$  jsou okamžité fázové napětí a  $i_a, i_b, i_c$  okamžité proudy. V třífázovém systému bez nulového vodiče se měří od společného referenčního bodu  $u_a, u_b$  a  $u_c$ . Někdy se nazývá země nebo fiktivní střední bod. Nicméně, tento referenční bod může být nastaven na libovolně určeném napětí a výkon  $p_{3\varphi}(t)$  vychází stále stejný. Například, pokud fáze b je vybrána jako referenční bod, a třífázový okamžitý činný výkon  $p_{3\varphi}(t)$ , se vypočítá jako[1]:

$$\begin{aligned} p_{3\varphi} &= (u_a - u_b) \cdot i_a + (u_b - u_b) \cdot i_b + (u_c - u_b) \cdot i_c = \\ &= u_{ab} i_a + u_{cb} i_c \end{aligned} \quad (3.17)$$

To vysvětluje, proč je možné použít (n-1) wattmetrů pro měření činného výkonu v n-vodičovém systému. Třífázový okamžitý činný výkon může být vypočten na základě složek  $\alpha\beta 0$  za použití vztahů (3.2) a (3.4) k nahrazení abc proměnných ve vztahu (3.16) [1]

$$p_{3\varphi} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \Leftrightarrow u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta + u_0 i_0 \quad (3.18)$$

### 3.5 P-q teorie pro stanovení okamžitého výkonu

P-q teorie je definována v třífázových systémech s nulovým nebo bez nulového vodiče. Tři okamžité výkony - okamžitá nulová složka výkonu  $p_0$ , okamžitý reálný výkon  $p$  a okamžitý imaginární výkon  $q$  jsou definovány z okamžitých fázových napětí a fázových proudů na  $\alpha\beta 0$  osách jako[1]:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0 & 0 & 0 \\ 0 & u_\alpha & u_\beta \\ 0 & u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

V třífázovém třívodičovém systému nejsou žádné nulové složky proudu ( $i_0 = 0$ ). V tomto případě, existují pouze okamžité výkony definované na osách  $\alpha\beta$ , protože součin  $u_0 i_0$  ve vztahu (3.18) je vždy roven nule. V třífázovém třívodičovém systému představuje okamžitý reálný výkon  $p$  celkový tok energie za jednotku času v systému  $\alpha\beta$ . V tomto případě,  $p_{3\varphi}(t)=p$ . Okamžitý fiktivní výkon  $q$  má netradiční fyzikální význam, který bude vysvětlen později[1].

### 3.6 P-q teorie v třífázových, třívodičových sítích

Jiný způsob, jak představit p-q teorii pro třífázové, třívodičové systémy je použití okamžitých vektorů napětí a proudů definovaných v (3.7) a (3.8). Konvenční koncepce komplexního výkonu definovaného v (2.9) používá fázor napětí a komplexně sdružený fázor proudu. To platí pouze pro systém v ustáleném stavu s pevnou frekvencí. Nová definice okamžitého komplexního výkonu je možná, pomocí okamžitých vektorů napětí a proudů. Okamžitý komplexní výkon  $S$  je definován jako součin napětí vektoru  $e$  a komplexně sdruženého vektoru proudu  $i^*$ , uvedeny ve formě komplexních čísel[1]:

$$\begin{aligned} \bar{s} &= \bar{e} \cdot \bar{i}^* = (u_\alpha + j u_\beta) \cdot (u_\alpha + j u_\beta) = \\ &= \underbrace{(u_\alpha \cdot u_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta)}_p + j \underbrace{(u_\beta \cdot i_\alpha - u_\alpha \cdot i_\beta)}_q \end{aligned} \quad (3.20)$$

Okamžitý činný i jalový výkon definované v (3.19) jsou součástí komplexního okamžitého výkonu  $S$ , definovaného v (3.20). Vzhledem k tomu, že jsou použity okamžité napětí a proudy, nemá  $S$  žádná omezení, a může být použit u ustálených stavů i během přechodných jevů. Pro  $p$  a  $q$  platí[1]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Rovnice (3.19) a (3.21) platí pro analýzu a návrh stejným způsobem. Nicméně bude používána (3.19), protože kladná hodnota okamžitého jalového výkonu  $q$  v (3.19) odpovídá součinu pozitivní složky napětí a zaostávající (induktivní) sousledné složce proudu, v souladu s klasickým pojetím jalového výkonu. [1]

V následujícím vysvětlení budou proudy  $i_\alpha$  a  $i_\beta$  stanoveny jako funkce napětí a činného a jalového výkonu  $p$  a  $q$ . Jedná se o velmi názorný vztah pro lepší vysvětlení fyzikálního významu výkonů definovaných v p-q teorii. Z (3.19), je možné odvodit[1]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Pravá strana může být rozšířena[1]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ -u_\beta & u_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \\ &\cong \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Výše uvedeným rozkladem byly stanoveny jednotlivé proudové složky.

Okamžitý činný proud na ose  $\alpha$   $i_{\alpha p}$ [1]:

$$i_{\alpha p} = \frac{u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p \quad (3.24)$$

Okamžitý jalový proud na ose  $\alpha$   $i_{\alpha q}$ [1]:

$$i_{\alpha q} = \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q \quad (3.25)$$

Okamžitý činný proud na ose  $\beta$   $i_{\beta p}$ [1]:

$$i_{\beta p} = \frac{u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p \quad (3.26)$$

Okamžitý jalový proud na ose  $\beta$   $i_{\beta q}$  [1]:

$$i_{\beta q} = \frac{-u_\alpha}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q \quad (3.27)$$

Okamžité výkony na  $\alpha$  a  $\beta$  souřadnicích jsou definovány jako  $p_\alpha$  a  $p_\beta$ . Jsou počítány z okamžitých napětí a proudů na  $\alpha$  a  $\beta$  osách takto[1]:

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \cdot i_\alpha \\ u_\beta \cdot i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha \cdot i_{\alpha p} \\ u_\beta \cdot i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \cdot i_{\alpha q} \\ u_\beta \cdot i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

V třífázovém, třívodičové soustavě třífázový okamžitý činný výkon z hlediska Clarke složek v (3.18) se rovná skutečnému výkonu definovanému (3.19). Ze vztahů (3.28) a (3.19) může být odvozen reálný výkon jako součet  $p_\alpha$  a  $p_\beta$ . [1]

$$\begin{aligned} p &= u_\alpha \cdot i_{\alpha p} + u_\beta \cdot i_{\beta p} + u_\alpha \cdot i_{\alpha q} + u_\beta \cdot i_{\beta q} \\ &= \frac{u_\alpha^2}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p + \frac{u_\beta^2}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p + \frac{u_\alpha \cdot u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q + \\ &\quad + \frac{-u_\alpha \cdot u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q \end{aligned} \quad (3.29)$$

Ve výše uvedené rovnici existují dva důležité body. Jedním z nich je, že okamžitý reálný výkon  $p$  je dán pouze[1]:

$$u_\alpha \cdot i_{\alpha p} + u_\beta \cdot i_{\beta p} = p_{\alpha p} + p_{\beta p} = p \quad (3.30)$$

Druhým je, že existuje následující vztah, který se zabývá imaginárním výkonem  $q$ :

$$u_\alpha \cdot i_{\alpha q} + u_\beta \cdot i_{\beta q} = p_{\alpha q} + p_{\beta q} = 0 \quad (3.31)$$

Výše uvedené rovnice je možné dále separovat a rozepsat na jednotlivé části uvedené níže.

Okamžitý činný výkon na ose  $\alpha$   $p_{\alpha p}$ [1]:

$$p_{\alpha p} = v_\alpha \cdot i_{\alpha p} = \frac{u_\alpha^2}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p \quad (3.32)$$

Okamžitý jalový výkon na ose  $\alpha$   $p_{\alpha q}$ [1]:

$$p_{\alpha q} = u_\alpha \cdot i_{\alpha q} = \frac{u_\alpha \cdot u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q \quad (3.33)$$

Okamžitý činný výkon na ose  $\beta$   $p_{\beta p}$ [1]:

$$p_{\beta p} = u_\beta \cdot i_{\beta p} = \frac{u_\beta^2}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot p \quad (3.34)$$

Okamžitý jalový výkon na ose  $\beta$   $p_{\beta q}$ [1]:

$$p_{\beta q} = v_\beta \cdot i_{\beta q} = \frac{-u_\alpha \cdot u_\beta}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} \cdot q \quad (3.35)$$

Je třeba poznamenat, že watt [W] může být použit jako jednotka všech výkonů,  $p_{\alpha p}$ ,  $p_{\alpha q}$ ,  $p_{\beta p}$  a  $p_{\beta q}$ , protože každý výkon je definován jako součin okamžitého proudu a okamžitého napětí na stejné ose [1].

Výše uvedené rovnice vedou k následujícím důležitým závěrům [1].

Okamžitý proud  $i_\alpha$  se dělí na okamžitou činnou složku  $i_{\alpha p}$  a okamžitou jalovou složku  $i_{\alpha q}$  jak je znázorněno na (3.24) a (3.25). Stejně rozdělení platí i pro proudy na ose  $\beta$  [1].

Součet složky okamžitého činného výkonu  $p_{\alpha p}$ , uvedeného v (3.32) a okamžitého činného výkonu  $p_{\beta q}$  uvedeného v (3.34) odpovídá okamžitému skutečnému výkonu  $p$  [1].

Součet  $p_{\alpha q}$  a  $p_{\beta q}$  je vždy roven nule. Proto nemůže přispět k okamžitému ani průměrnému toku energie mezi zdrojem a zátěží v třífázovém obvodu. To je důvod proč jsou tyto výkony nazývané okamžité jalové na osách  $\alpha$  a  $\beta$ . Okamžitý jalový výkon  $q$  je veličina, která udává velikost pomocí  $p_{\alpha q}$  a  $p_{\beta q}$  [1].

Protože součet  $p_{\alpha q}$  a  $p_{\beta q}$  je vždy nulový, pro jejich kompenzaci není potřeba žádné úložiště elektrické energie [1].

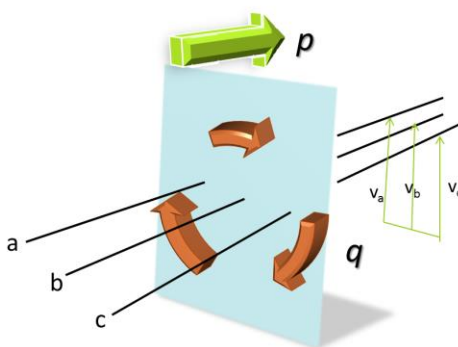
Pokud jsou proměnné  $\alpha\beta$  okamžitého jalového výkonu  $q$  jak jsou definovány v (3.19) nahrazeny jejich ekvivalentními výrazy do abc systému pomocí (3.5) a podobně pro proudy, tento vztah lze vztah upravit na [1]:

$$\begin{aligned} q &= u_{\beta} \cdot i_{\alpha} - u_{\alpha} \cdot i_{\beta} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_a - u_b) \cdot i_c + (u_b - u_c) \cdot i_a + (u_c - u_a) \cdot i_b] = \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} (u_{ab} \cdot i_c + u_{bc} \cdot i_a + u_{ca} \cdot i_b) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Ve vztahu (3.36) si lze všimnout, že  $q$  je definováno jako součin napětí a proudů na rozdílných osách. Jak bylo ukázáno, imaginární výkon  $q$  nepřispívá k celkovému toku energie mezi zdrojem a zátěží, a naopak. Imaginární výkon  $q$  je nová veličina a je potřeba ji odlišit od tradičního jalového výkonu. Autoři používají jednotku volt - ampér imaginární a zkratku vai, což je analogické s jednotkou volt - ampér reaktivní [1].

Imaginární výkon  $q$  je přímo úměrný množství energie, které se vyměňuje mezi fází systému a nepřispívá k přenosu energie mezi zdrojem a zátěží [1].

Obr. 3-2 shrnuje výše uvedené vysvětlení o skutečném a imaginárním výkonu. Je důležité poznamenat, že konvenční výkonové teorie definují jalový výkon jako část okamžitého činného výkonu, avšak s průměrnou hodnotou rovnou nule. Zde tomu tak není. Imaginárním výkonem se rozumí součet částí okamžitých třífázových napětí a proudů, které nepřispívají k přenosu energie mezi dvěma subsystemy. Z důvodu, že imaginární výkon a okamžitý jalový výkon mají stejný fyzikální význam je možné je považovat za synonyma [1].



Obr. 3-2 Fyzické toky okamžitého skutečného a imaginárního výkonu[5]

Okamžitý skutečný i imaginární výkon lze dále rozdělit do dvou složek [1].

Pro reálný výkon [1]:

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

Imaginární výkon [1]:

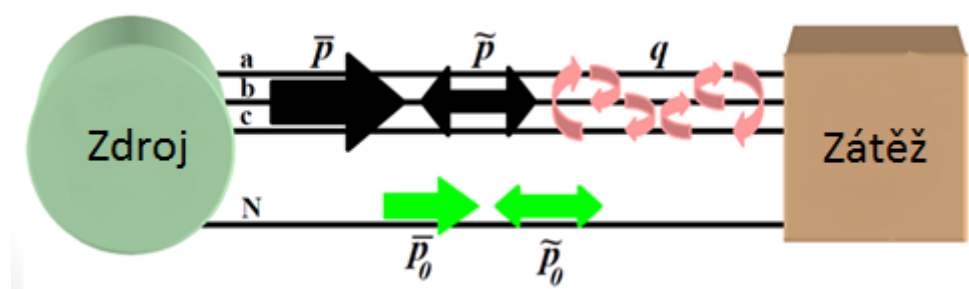
$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Kde  $\bar{p}$  představuje střední hodnotu okamžitého výkonu přenášeného od zdroje k zátěži prostřednictvím vyvážených fází a-b-c. A zahrnuje pouze žádoucí výkon vyvolaný v důsledku činného proudu [5].

$\tilde{p}$  je střídavá hodnota okamžitého činného výkonu. Energie je vyměňována mezi zdrojem a zátěží prostřednictvím fází a-b-c. Nepřenáší žádnou energii a tato složka by měla být kompenzována. Vzniká v důsledku harmonických proudů [5].

$\bar{q}$  je střední hodnota okamžitého imaginárního výkonu. Energie je vyměňována mezi jednotlivými fázemi a nepřispívá k přenosu energie. Volba kompenzace souvisí s kompenzací jalového výkonu. Vzniká v důsledku jalového proudu [5].

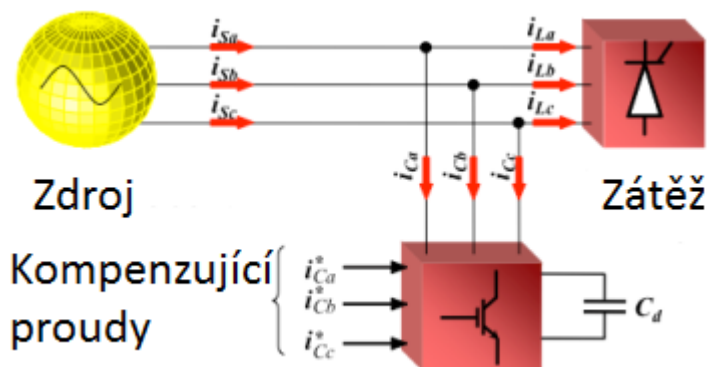
$\tilde{q}$  je střídavá hodnota okamžitého imaginárního výkonu. Energie je vyměňována mezi jednotlivými fázemi a nepřispívá k přenosu energie. Složka by měla být kompenzována. Vzniká v důsledku harmonických proudů [5].



Obr. 3-3 Komponenty  $p$  a  $q$  [5]

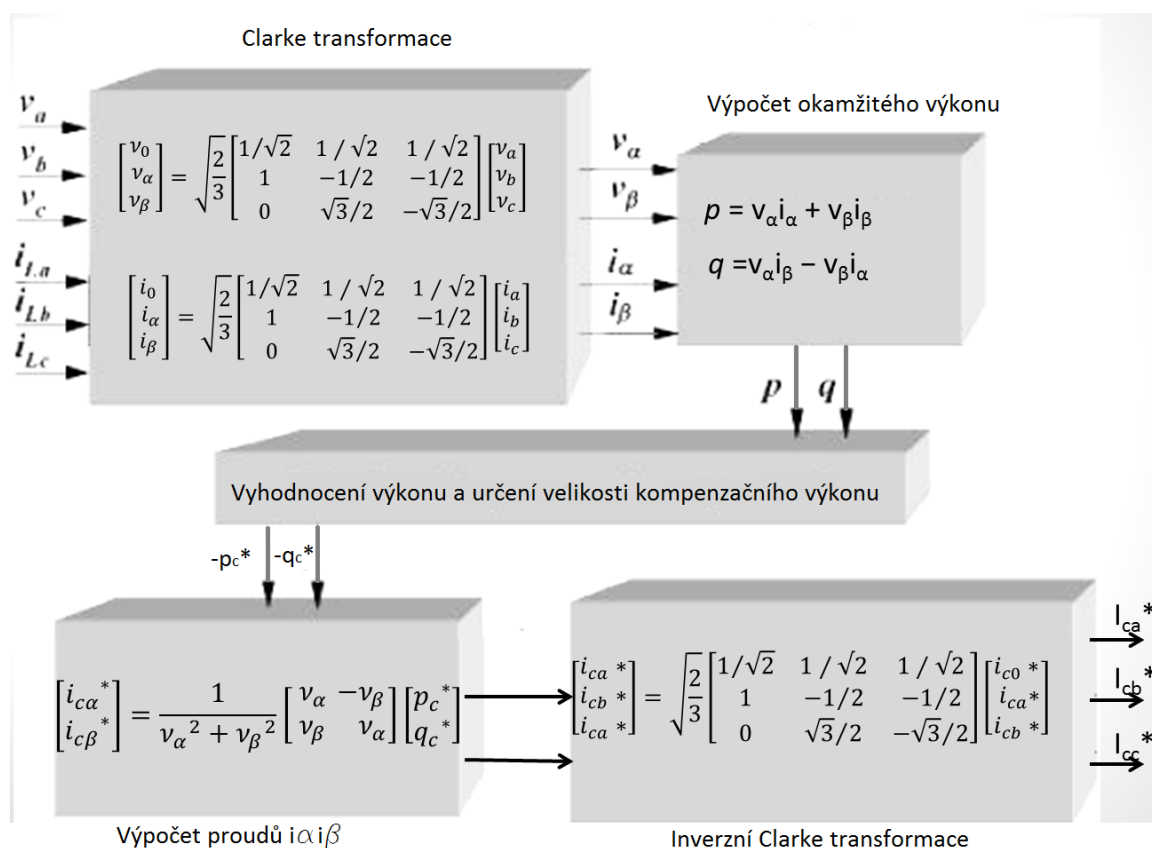
### 3.7 Využití p-q teorie pro paralelní proudovou kompenzaci

Jednou z nejdůležitějších aplikací je kompenzace nežádoucích proudů. Obr. 3-4 ukazuje základní princip paralelní kompenzace proudu. Je zde zdroj elektrické energie, který je vedením spojen s nelineární zátěží. Paralelně na vedení je připojen aktivní filtr. Pro zjednodušení lze aktivní filtr brát jako zařízení, které odebírá nebo dodává proud. Tento filtr je řízen proudy  $i^*_{Ca}$ ,  $i^*_{Cb}$  a  $i^*_{Cc}$ . Tyto proudy jsou stanoveny pomocí p-q metody [1].



Obr. 3-4 Základní princip paralelního proudového kompenzátoru [7]

Obr. 3-5 ukazuje obecnou metodu řízení, která může být použita v regulátoru aktivního filtru. Nejdříve jsou vstupní hodnoty napětí a proudů převedeny do systému  $\alpha\beta$ . Následně jsou stanoveny okamžité výkony. Vypočtený skutečný výkon  $p$  může být rozdělen na střední a střídavý. Stejně tak imaginární výkon  $q$  může být rozdělen na střední a střídavý. Poté jsou vybrány nežádoucí části ze skutečného a imaginárního výkonu, které mají být kompenzovány. Výkony, které mají být kompenzovány, jsou označeny  $-p_c^*$  a  $-q_c^*$ . Dále jsou stanoveny proudy v systému  $\alpha\beta$ , ze kterých jsou v posledním bloku inverzní transformací stanoveny kompenzační proudy. Celý systém na Obr. 3-5 je pouze na úrovni zpracování signálů, které jsou předány do výkonové části filtru. Tato výkonová část potom zajistí dodání skutečných kompenzačních proudů.



Obr. 3-5 Princip stanovení potřebného kompenzačního proudu [5]

### 3.8 Jednofázová PQ teorie

Demonstrační model dynamické kompenzace je realizován jako jednofázový. Pro tento účel bylo nutné výše popsanou pq teorii, která byla původně určena pro třífázové (tří a čtyřvodičové) systémy upravit pro použití v jednofázovém systému.

Aby byla zachována původní myšlenka PQ teorie je nutné změřené napětí a proudy transformovat do systému os  $\alpha\beta$ . Nepoužívá se však Clarke transformace. Změřené hodnoty napětí a proudů jsou položeny do jedné osy. Druhá osa je vytvořena fázovým posuvem změřených hodnot o  $\pi/2$ . Tím jsou vytvořeny hodnoty pro druhou osu. Nezáleží na tom, jestli jsou posunuté hodnoty o  $\pi/2$  před, nebo o  $\pi/2$  za skutečnými změřenými hodnotami [16].

Pro přepočítání měřeného napětí platí [16]:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(\omega t) \\ u_\beta(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u(\omega t) \\ u\left(\omega t + \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

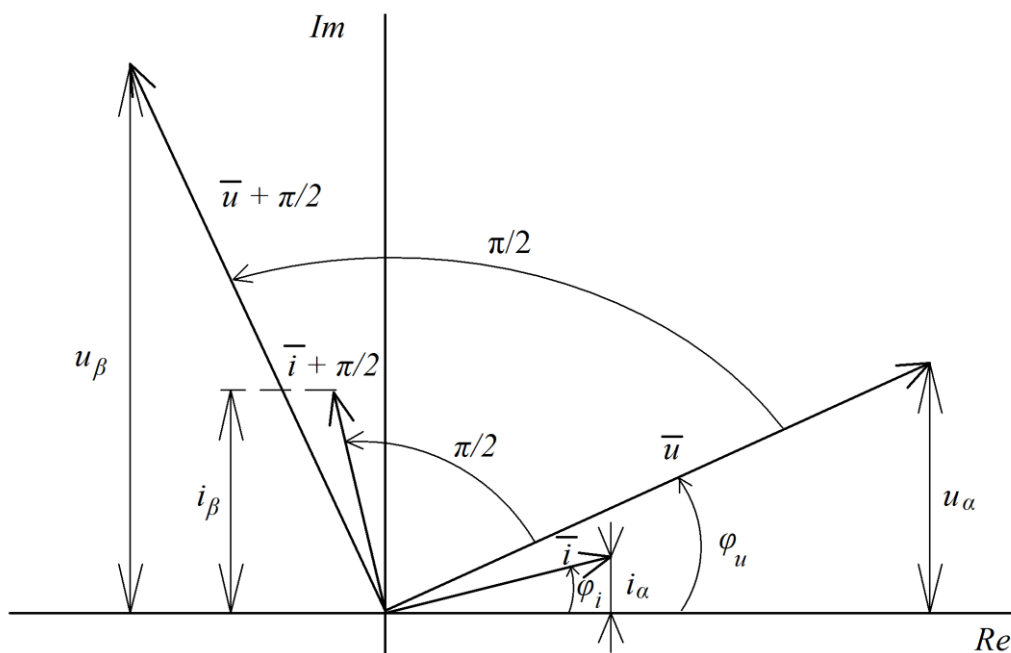
Pro proud potom platí [16]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(\omega t) \\ i_\beta(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(\omega t + \varphi) \\ i\left(\omega t + \varphi + \left(\frac{\pi}{2}\right)\right) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Pro okamžitý jednofázový činný a jalový výkon platí stejný vztah jako pro třífázový systém [16].

$$\begin{bmatrix} p(\omega t) \\ q(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha(\omega t) & u_\beta(\omega t) \\ -u_\beta(\omega t) & u_\alpha(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha(\omega t) \\ i_\beta(\omega t) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Na Obr. 3-6 jsou znázorněny změřené hodnoty, jejich úhly a taky posun hodnot o  $90^\circ$ . Osy  $\alpha\beta$  však nejsou totožné s osami Im a Re.



Obr. 3-6 Grafické zobrazení vektorů okamžitých veličin

### 3.9 Příklad výpočtu jednofázového okamžitého výkonu

Pro demonstraci způsobu výpočtu okamžitého činného a jalového výkonu bude proveden příklad výpočtu. Výpočet tímto způsobem je aplikován v programu pro každou změřenou hodnotu.

Výchozí parametry:

- změřené napětí  $u=123,159$  V
- změřený proud  $i=0,22058$  A
- vypočtený úhel napětí  $\varphi_u=23,255^\circ$
- vypočtený úhel proudu  $\varphi_i=17,786^\circ$

Změřené hodnoty napětí a proudu jsou nejdříve filtrovány, aby byla určena pouze první harmonická (50 Hz) a následně je k nim dopočítáván daný úhel. Úhel je nutný k tomu, aby mohla být změřená hodnota posunuta o  $90^\circ$ .

V komplexní rovině lze změřené hodnoty chápat jako imaginární část fázoru. Změřené hodnoty lze tedy přiřadit ose  $\alpha$ . Dle Obr. 3-6 je tedy možné psát:

$$u_\alpha = u = 123,159 \text{ V} \quad (3.40)$$

$$i_\alpha = i = 0,22058 \text{ A} \quad (3.41)$$

Pro získání hodnot na osách  $\beta$  je nutné otočení změřených hodnot o  $\pi/2$  neboli  $90^\circ$ . Ze změřených hodnot jejich úhlů jsou stanoveny nejdříve absolutní hodnoty. Absolutní hodnoty odpovídají maximálním hodnotám napětí a proudů (pro daný měřený okamžik).

$$U = \frac{u}{\sin(\varphi_u)} = \frac{123,159}{\sin(23,255^\circ)} = 311,934 \text{ V} \quad (3.42)$$

$$I = \frac{i}{\sin(\varphi_i)} = \frac{0,22058}{\sin(17,786^\circ)} = 0,72218 \text{ A} \quad (3.43)$$

Pro fázory tedy platí:

$$\bar{U} = 311,934 \angle 23,255^\circ \text{ V} = (286,591 + i123,159) \text{ V} \quad (3.44)$$

$$\bar{I} = 0,72218 \angle 17,786^\circ \text{ V} = (0,687603 + i0,22058) \text{ A} \quad (3.45)$$

Pro posun o  $90^\circ$  a tedy pro hodnoty na ose  $\beta$  platí:

$$\begin{aligned} \bar{U}_\beta &= 311,934 \angle 23,255^\circ \cdot 1 \angle 90^\circ = 311,934 \angle 113,255^\circ \\ &= (-123,159 + i286,591) \text{ V} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_\beta &= 0,72218 \angle 17,786^\circ \cdot 1 \angle 90^\circ = 0,72218 \angle 107,786^\circ \\ &= (-0,22060 + i0,68766) \text{ A} \end{aligned} \quad (3.47)$$

Pro hodnoty napětí a proudů na ose  $\beta$  budou opět použity imaginární části výše vypočtených fázorů.

$$u_\beta = \text{Im}\{\overline{U}_\beta\} = 286,591 \text{ V} \quad (3.48)$$

$$i_\beta = \text{Im}\{\overline{I}_\beta\} = 0,68766 \text{ A} \quad (3.49)$$

Pro okamžitý maximální činný výkon potom platí:

$$\begin{aligned} p_{max} &= u_\alpha \cdot i_\alpha + u_\beta \cdot i_\beta = \\ &= 123,159 \cdot 0,22058 + 286,591 \cdot 0,68766 = \\ &= 224,243 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Pro činný výkon:

$$p = \frac{p_{max}}{2} = \frac{224,243}{2} = 112,122 \text{ W} \quad (3.51)$$

Pro okamžitý maximální jalový výkon potom platí:

$$\begin{aligned} q_{max} &= -u_\beta \cdot i_\alpha + u_\alpha \cdot i_\beta = \\ &= -286,591 \cdot 0,22058 + 123,159 \cdot 0,68766 = \\ &= 21,475 \text{ VAr} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Pro jalový výkon:

$$q = \frac{q_{max}}{2} = \frac{21,475}{2} = 10,738 \text{ VAr} \quad (3.53)$$

## 4 KOMPENZACE JALOVÉHO VÝKONU

Většina spotřebičů potřebuje ke své funkci vedle činného i jalový výkon na vytvoření magnetického pole ve svém obvodu. Nepříznivý vliv jalové induktivní složky proudu v prvcích rozvodné soustavy je možné zmírnit dodávkou jalového výkonu přímo v místě spotřeby připojením kondenzátoru ke svorkám spotřebiče. Tuto úpravu jalové složky proudu pomocí proudu kondenzátoru nazýváme paralelní kompenzací [8].

Mezi hlavní spotřebiče jalového výkonu patří:

- asynchronní motory
- asynchronní generátory
- transformátory
- střídavé elektrické obloukové pece, pánvové pece, indukční pece
- výkonové polovodičové měniče
- venkovní a kabelová vedení
- výbojková a zářivková svítidla [9]

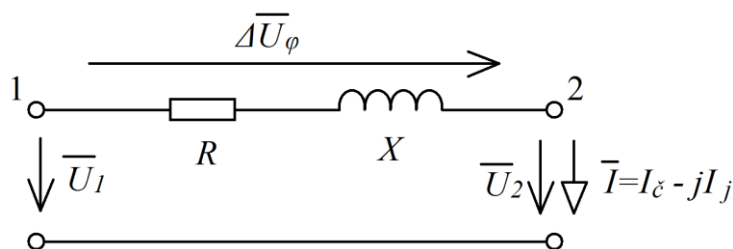
### 4.1 Vysvětlení důvodů kompenzace jalového výkonu

#### 4.1.1 Negativní vlivy jalového výkonu

Na vedení s jedním odběrem Obr. 4-1 jsou ztráty výkonu a úbytek napětí při čistě činné zátěži ( $\cos\varphi_2=1$ ) [8].

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot I_{\xi}^2 \quad (4.1)$$

$$U \cong R \cdot I_{\xi} \quad (4.2)$$



Obr. 4-1 Vedení s jedním odběrem bez paralelní kompenzace [8]

Zhoršení účinníku odběru (induktivní nebo kapacitní zátěží) má za následek následující problémy [8]:

1. Větší ztráty přenášeného výkonu [8]:

$$\Delta P_{\varphi} = 3 \cdot R \cdot (I_{\xi}^2 + I_j^2) = 3 \cdot R \cdot \frac{I_{\xi}^2}{\cos^2\varphi} > \Delta P \quad (4.3)$$

2. Větší úbytek napětí na vedení [8]:

$$\Delta U_{\varphi} \cong R \cdot I_{\xi} + X \cdot I_j = R \cdot I_{\xi} + X \cdot I_{\xi} \cdot \operatorname{tg}\varphi > \Delta U \quad (4.4)$$

3. Snižuje se zatížitelnost zařízení činným výkonem. Mez zatížitelnosti je daná dovoleným oteplením a účinníkem [8]:

$$I_{dv} \geq \frac{P_m}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos\varphi_m} \quad (4.5)$$

Nepříznivý vliv jalové induktivní složky proudu v prvcích rozvodné soustavy je možné zmírnit dodávkou jalového výkonu přímo v místě spotřeby připojením kondenzátoru ke svorkám spotřebiče – Obr. 4-2. Tuto úpravu jalové složky proudu pomocí proudu kondenzátoru nazýváme paralelní kompenzací. Fázorový diagram pro vedení zatížené jedním odběrem s paralelní kompenzací ukazuje Obr. 4-3 [8].

Pro následující vtahy platí, že napětí  $U_2$  bude před i po použití kompenzace stejné. Bude-li stejný přenášený výkon [8]:

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k \quad (4.6)$$

Pak proud v prvku soustavy klesne při kompenzaci na hodnotu [8]:

$$I_k = I \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_k} \quad (4.7)$$

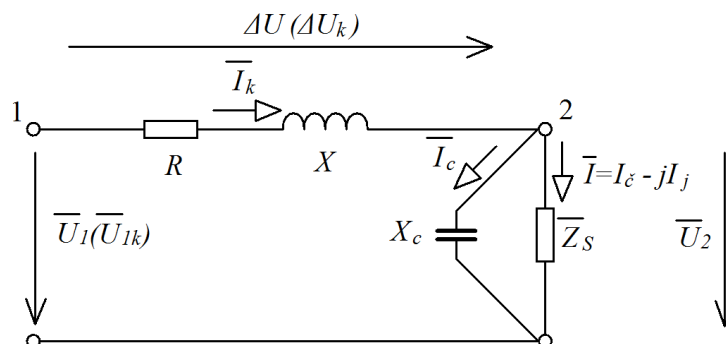
Úbytek napětí po kompenzaci je s použitím (4.7) [8]:

$$\Delta U_k \cong R \cdot I_k \cdot \cos\varphi_k + X \cdot I_k \cdot \sin\varphi_k = R \cdot I \cdot \cos\varphi_k + X(I_j - I_c) \quad (4.8)$$

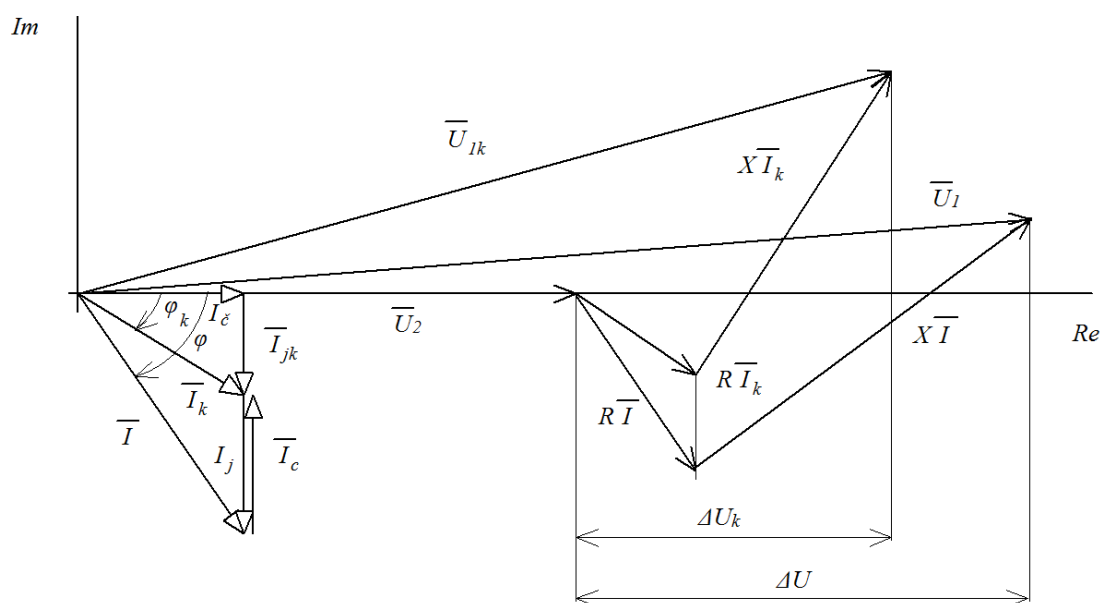
Kde  $I_c = I_j - I_{jk}$  je proud kondenzátoru.

Zmenšení úbytku napětí po kompenzaci je podle (4.4) a (4.8) [8]:

$$\Delta u = \Delta U_\varphi - \Delta U_k = X \cdot I_c \quad (4.9)$$



Obr. 4-2 Vedení zatížené jedním odběrem s paralelní kompenzací [8]



Obr. 4-3 Fázorový diagram pro vedení s jedním odběrem a paralelní kompenzací [8]

Ztráty výkonu po kompenzaci jsou [8]:

$$\Delta U_k = 3 \cdot R \cdot I_k^2 = 3 \cdot R \cdot I \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k} = 3 \cdot R \cdot I_c^2 + 3 \cdot R \cdot (I_j - I_c)^2 \quad (4.10)$$

Stupněm kompenzace se u tohoto druhu kompenzace rozumí podíl jalového proudu po kompenzaci  $I_{jk}$  a jalového proudu před kompenzací  $I_j$  [8].

$$k_p = \frac{I_{jk}}{I_j} = 1 - \frac{I_c}{I_j} \quad (4.11)$$

Zmenšení ztrát po kompenzaci je [8]:

$$\begin{aligned} \Delta P_z &= \Delta P - \Delta P_k = 3 \cdot R \cdot I^2 - 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k} = \\ &= 3 \cdot R \cdot I^2 \cdot \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi}{\cos^2 \varphi_k}\right) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Je-li stupeň kompenzace  $k_p=0$ , tj.  $I_c=I_j$ ,  $\cos \varphi_k=1$ , pak se dosáhne největší úspora ztrát výkonu i úbytku napětí. [8]

Z ekonomických a provozních důvodů se odběry kompenzují na účinník přibližně  $\cos \varphi_k=0,9$ . V oblasti účinníku  $\cos \varphi_k=0,95-1,00$  již vzniklé úspory na ztrátách výkonu a energie uhradí pořizovací náklady na kondenzátory za velmi dlouhou dobu. Při odpojení indukčního motoru, jehož jalový výkon byl zcela kompenzován kondenzátorem, vzniká nebezpečí proudových a mechanických rázů, které jsou důsledkem rezonance při doběhu [8].

#### 4.1.2 Systémová křivka napětí

Toky, odběry a dodávky činného i jalového výkonu mívají významný vliv na úroveň napětí v daných uzlech soustavy. Úroveň napětí je nutné ale dle technických standardů udržovat ve

stanovených mezích, aby byl zajištěn bezpečný a spolehlivý chod sítě i spotřebičů. Úroveň napětí je taky jedním z bodů kvalita elektrické energie [10].

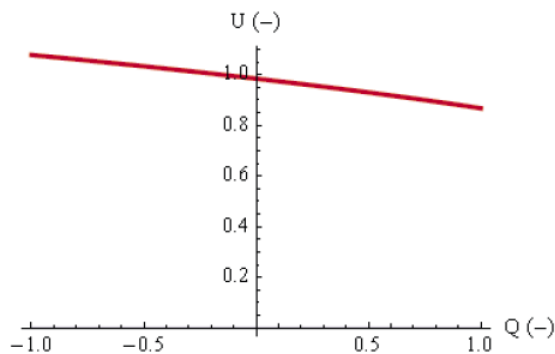
Vztah pro úbytek napětí na vedení lze zapsat taky [10]:

$$\Delta \bar{U} = \bar{Z} \cdot \bar{I} = (R + jX) \cdot \frac{P - jQ}{\bar{U}_2} = \frac{R \cdot P + X \cdot Q + j(X \cdot P - R \cdot Q)}{\bar{U}_2} \quad (4.13)$$

Pro napětí na začátku vedení pak platí [10]:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 + \Delta \bar{U} = \bar{U}_2 + \frac{R \cdot P + X \cdot Q + j(X \cdot P - R \cdot Q)}{\bar{U}_2} \quad (4.14)$$

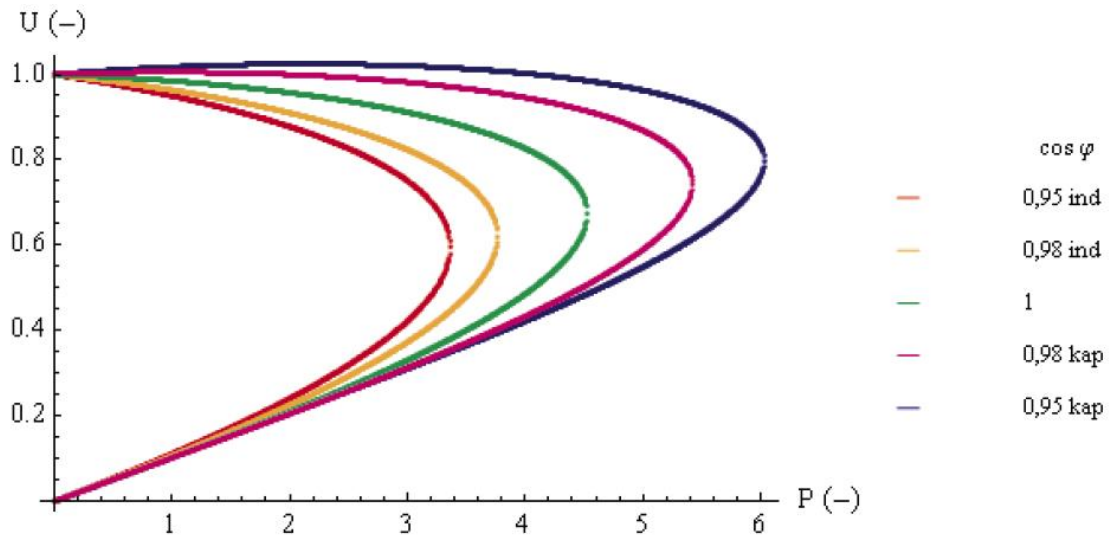
Pro známou impedanci soustavy a konstantní odběr činného výkonu lze poté stanovit závislost napětí na dodávaném nebo odebíraném jalovém výkonu. Na následujícím obrázku je příklad systémové křivky napětí, která vznikne dosazením poměrných hodnot ( $U_1=1; R=0,1; X=1; P=1$ ) do vztahu (4.14). Kladné hodnoty jalového výkonu odpovídají induktivní zátěži, záporné kapacitní [10].



Obr. 4-4 Systémová křivka napětí [10]

Z charakteristiky jasně vyplývá, že induktivní odběr napětí snižuje a kapacitní odběr napětí zvyšuje. Pro kapacitní odběr lze získat na konci vedení získat stejné napětí jako na jeho začátku nebo obecně v soustavě. Nutno ale podotknout, že čistě reaktivním regulátorem nelze zajistit zároveň jmenovité napětí i účinník v místě připojení [10].

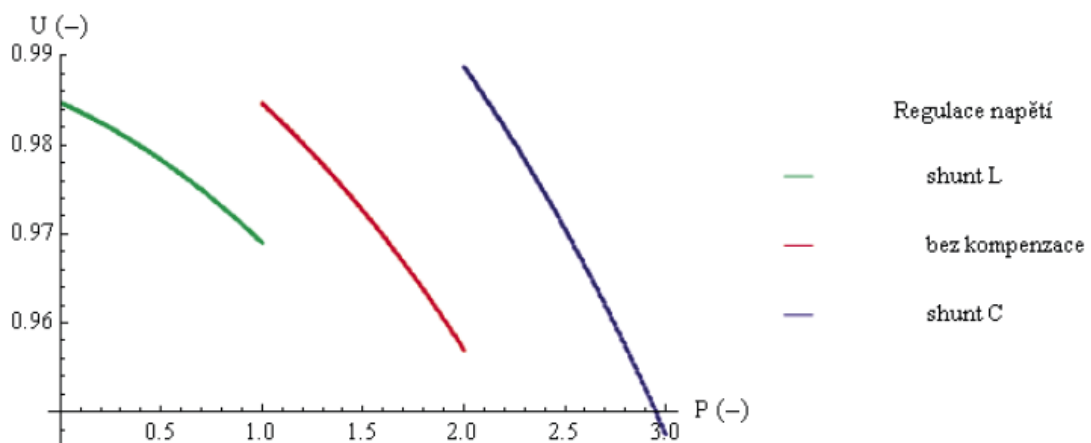
Obdobně jako závislost napětí v uzlu na jalovém výkonu lze dle (4.14) stanovit závislost napětí na odběru činného výkonu. Závislost je stanovena pro známou impedanci soustavy a konstantní účinník odběru. S činným výkonem se tak adekvátně mění i výkon jalový. Vzniklé závislosti jsou důležité pro stanovení maximálního možného zatížení v uzlech s ohledem na napěťovou stabilitu [10].



Obr. 4-5 Závislost napětí na zatížení [10]

Pro každé zatížení kromě maximálního existují dvě možná napětí. Pro běžný chod jsou však přípustné pouze vyšší hodnoty, které se blíží jmenovitým. Pro všechny účinnky existuje oblast výkonů, pro něž začne napětí strměji klesat s rostoucím zatížením, až je dosaženo bodu zvratu. Vysoká strmost  $dU/dP$  vede při zvýšení odebíraného výkonu k prudkému poklesu napětí. Tento pokles se nazývá napěťový kolaps [10].

Hrubou regulaci napětí v případě proměnlivého zatížení lze provádět připojováním paralelních reaktančních prvků v místě odběru. Při nízkém odebíraném výkonu, když je napětí vyšší je připojena indukčnost. Při vyšších odběrech napětí klesá, tak je připojena paralelně kapacita [10].

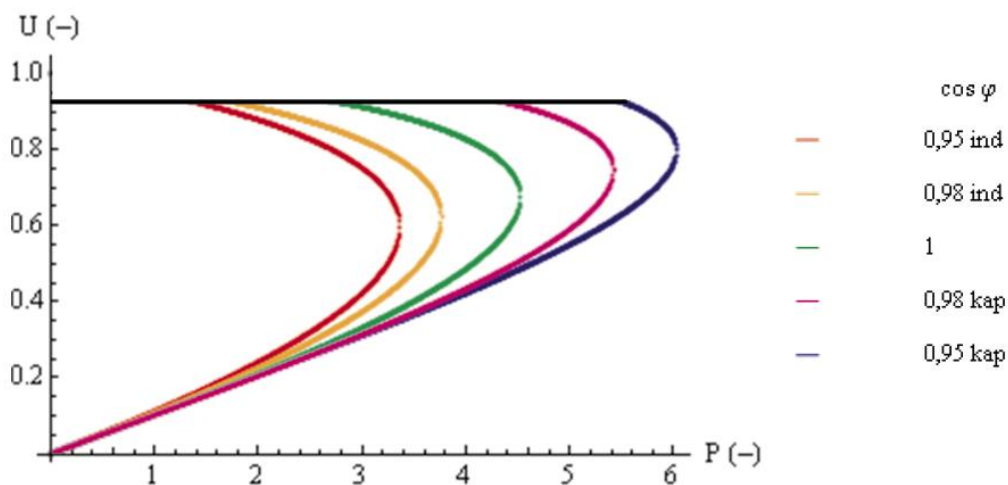


Obr. 4-6 Kompenzace napětí příčnými prvky [10]

Zátěž je ponechána bez kompenzace pro činný výkon v rozsahu 1 až 2 (-), pro nižší výkony je připojena indukčnost a pro vyšší výkony je připojena kapacita [10].

Paralelním připojením reaktančních prvků je tak možné udržet napětí ve výrazně užším pásmu. Rostoucí strmost křivky napětí pro vyšší odebírané výkony však zůstává. Spojitou změnou jalového výkonu dodávaného kompenzačním zařízením v místě odběru (např. SVC nebo STATCOM) je možné udržet napětí konstantní i pro dynamický odběr činného výkonu, neboť celkový účinník je spojitě měněna pracovní bod se pohybuje po přímkové charakteristice, kdy napětí je v ideálním případě stále konstantní. Bod potenciálního napěťového kolapsu se na

charakteristice vyskytuje pro minimální dovolený kapacitní účinník. Tento bod bude v praxi záviset na výkonu kompenzátoru [10].



Obr. 4-7Vliv paralelní reaktivní kompenzace v místě odběru [10]

### 4.1.3 Flickr

Flickr je důsledkem kolísání napětí, které mohou být způsobeny rušením v procesu výroby, přenosu a distribuce elektrické energie. Toto rušení bývá způsobeno proměnlivou zátěží. Flickr je vyjádřením nestálosti vizuálního vnímání vyvolaného světelnými popudy, jejichž jas nebo spektrální křivka se mění v čase. Nejčastějším projevem flickru jsou cyklické změny svítivosti světelných zdrojů vlivem kolísání napájecího napětí [26].

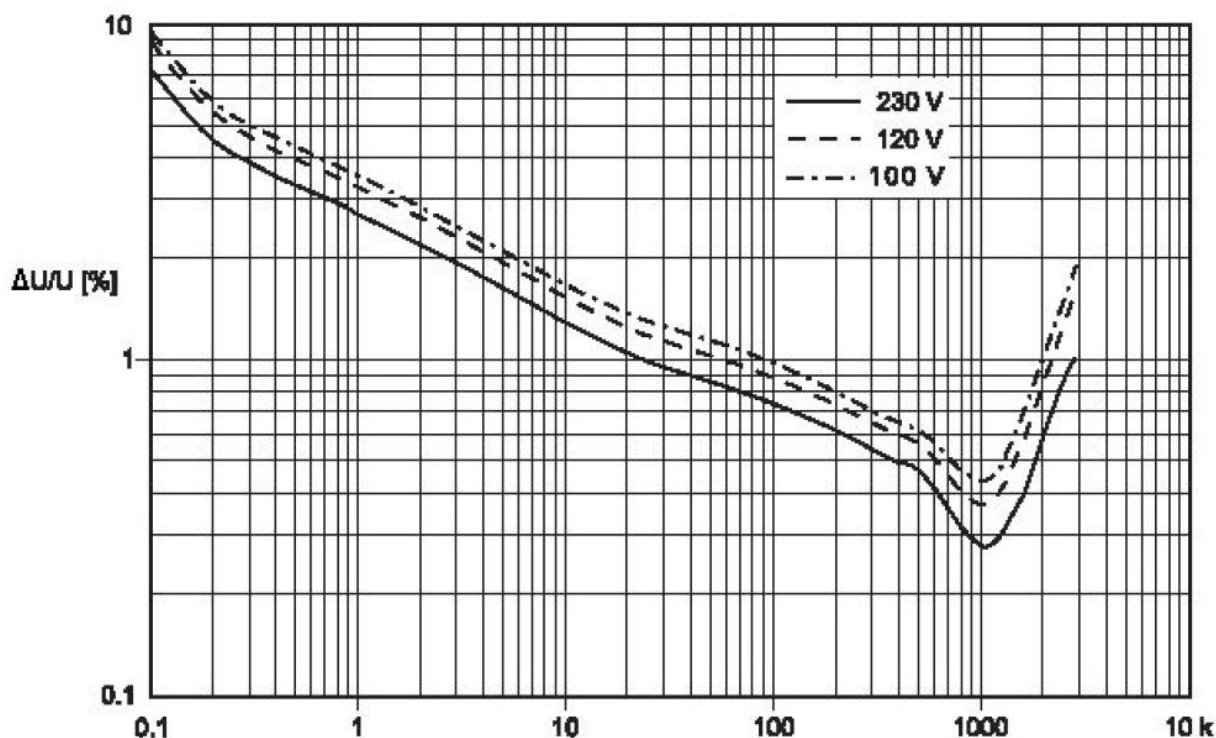
Na základě experimentů fyziologů a psychologů bylo popsány podobnosti mezi citlivostí lidského oka na světelný popud a frekvenční charakteristikou elektrického analogového signálu. Práce demonstrují, že odezva lidského oka má charakteristiku širokopásmového filtru mezi 0,5 Hz a 35 Hz s maximální citlivostí na světelný tok na frekvenci okolo 8-9 Hz. Pro žárovky jsou na této frekvenci detekovány hodnoty kolísání napětí o střední hodnotě 0,3%. Fyzilogické efekty závisí na amplitudě změn světelného toku, frekvenčním spektru a na době trvání rušení. Kolísání napětí produkující vnímatelný flickr je nezávislé na typu napájecího napětí světelného zdroje [26].

Pro měření flickru se dříve používaly zařízení s typickou žárovkou 60W, 230V, snímačem světelného toku a analogový model pro simulaci lidské reakce. Na žárovce je vjem flickru nejlépe pozorovatelný. V současné době jsou již používány plně elektronické přístroje. Jsou odvozeny dva výsledky, jeden pro krátkodobou míru vjemu flickru  $P_{st}$ , měřený v desetiminutových intervalech a druhý pro dlouhodobou míru vjemu flickru  $P_{lt}$ , který je klouzavým průměrem hodnot  $P_{st}$  ve dvouhodinovém časovém okně [27].

V normě IEC 61000-3-3 pojednávající o kolísání napětí a flickru jsou stanoveny mimo jiné tyto požadavky [27]:

- hodnota parametru krátkodobé míry vjemu flickru  $P_{st} \leq 1,0$
- hodnota parametru dlouhodobé míry vjemu flickru  $P_{lt} \leq 0,65$

Obr. 4-8 vykresluje práh vnímání flickru pro procentuální napěťovou změnu a počet změn. Tam, kde velikost a frekvence změn leží nad křivkou, dochází pravděpodobně k rušení lidského pozorovatele, zatímco pod křivkou je účinek pravděpodobně nevnímatelný. Čárkované křivky jsou pro wolframové žárovky s jiným jmenovitým napětím [27].



Obr. 4-8 Charakteristika vnímání flickru pro napěťové změny aplikované na 60W žárovku[27]

## 4.2 Kompenzace z hlediska místa připojení v síti

Individuální kompenzace – kompenzační zařízení je v tomto případě připojeno na přímo na svorky spotřebiče, nebo v jeho blízkosti. Tím je odlehčeno celé vedení od zdroje po spotřebič. Dosažené úspory jsou nejvyšší, hospodárnost kompenzace však závisí na využití spotřebiče. Individuální kompenzace je typická pro stále provozovanou zátěž s konstantním příkonem např. kompenzace asynchronních motorů, transformátorů, zářivek a výbojek atd [11].

Skupinová kompenzace – kompenzační zařízení je připojeno na přípojnicích rozvaděče pro skupinu spotřebičů, například kompenzace na hlavních rozvaděčích v průmyslových závodech. V tomto případě je odlehčen úsek vedení od tohoto rozvaděče ke zdroji. Vlivem nesoudobosti provozu spotřebičů vychází kompenzační výkon menší než při individuální kompenzaci každého spotřebiče a je již nutná jeho regulace [11].

Centrální kompenzace – je typická pro rozsáhlé elektrické systémy s měnící se zátěží, obvykle je připojena v hlavní rozvodně závodu na přípojnicích vstupní trafostanice. Vlivem nesoudobosti spotřebičů opět klesá potřebný kompenzační výkon, rovněž je nutná regulace. Kondenzátorové baterie jsou spínány regulátorem podle aktuálního požadavku kompenzačního výkonu [11].

Kombinovaná kompenzace – představuje kombinaci předchozích variant [11].

## 4.3 Rozdělení technických prostředků pro kompenzaci

### 4.3.1 Rotační kompenzační zařízení

Do této skupiny lze zařadit synchronní kompenzátory a synchronní motory. Synchronní stroje se vyznačují na rozdíl od asynchronních tím, že magnetizační energie je dodávána

samostatným budícím vinutím napájeným ze stejnosměrného zdroje. S měnicí se velikostí budícího proudu při stálém zatížení, momentu a frekvenci zůstává stálý i činný výkon synchronního motoru. Změnou budícího proudu se však změní účinník odběru motoru, a to v oblasti induktivní i kapacitní. Tuto skutečnost lze vyjádřit graficky pomocí tzv. V-křivek stroje [11].

Vhodným řízením budícího proudu stroje lze dosáhnout stálého účinníku při různých zatíženích stroje. Osazením regulátoru se dosáhne při měnicím se zatížení konstantního účinníku nebo jalového výkonu [11].

Tyto vlastnosti lze úspěšně použít ke kompenzaci jalového výkonu v síti. Takové zařízení se potom nazývá synchronní kompenzátor. Jedná se synchronní stroj pracující naprázdno resp. s minimálním činným výkonem, ale velkým rozsahem regulace jalového výkonu [11].

Synchronní kompenzátory jsou převážně konstruovány pro kompenzaci vyšších jalových výkonů a jsou tedy konstruovány pro sítě velmi vysokých napětí. Řízení budících souprav synchronních kompenzátorů je provedeno rychlými řízenými usměrňovači avšak i přesto je odezva na potřebu jalového výkonu zatížena jistým zpožděním. Synchronní stroje jsou tedy zcela nevhodné ke kompenzaci spotřebičů, jejichž potřeba jalového výkonu se dynamicky mění, jako například u obloukových pecí, dynamicky řízených rezervačních stejnosměrných pohonů apod. V těchto případech dochází v době, než synchronní stroj díky zpoždění zvýší svůj kompenzační výkon, k nedokompenzování, zatímco ještě po jistou dobu, kdy již potřeba kompenzačního výkonu pominula, dále tento výkon dodává. To má negativní vliv na výsledné kolísání napětí, které na změnách jalového výkonu přímo závisí [11].

Svým velkým výkonem jsou synchronní kompenzátory používány jako centrální kompenzační zařízení ve velkých průmyslových sítích, případně v rozvodnách VN/NN [11].

Výhody:

- vysoký jednotkový výkon
- plynulá regulace jalového výkonu [11]

Nevýhody:

- pomalá regulace jalového výkonu
- odběr činného výkonu
- údržba
- vyšší nároky na obestavěný prostor [11]

## 4.3.2 Statické kompenzátory

### 4.3.2.1 Prosté kondenzátory napevno připojené ke spotřebiči

Jalové výkony induktivního charakteru lze kompenzovat paralelním zapojením kondenzátoru. Na výkonový kondenzátor určený pro zlepšení účinníku jsou kladeny zvláště tyto nároky:

- tepelná odolnost při vysokém jalovém výkonu
- odolnost proti přepětí
- spolehlivost a bezpečnost provozu [11]

Hlavní vlastností kondenzátorů pro kompenzaci jalového výkonu je jejich výkon. Ten lze stanovit z proudu kondenzátorem, napětí a frekvence [11]:

$$Q_c = \frac{I^2}{\omega \cdot C} \quad (4.15)$$

Ve skutečnosti jsou však kondenzátory prodávány přímo s označením jmenovitého napětí a výkonu, nikoliv s označením kapacity [11].

Výhody:

- nízká cena
- pro zařízení s konstantním odběrem vyhovuje [11]

Nevýhody:

- bez možnosti odpojení nebo jakékoliv regulace
- náchylnost na přetěžování vyššími harmonickými vyskytujícími se v síti [11]

#### 4.3.2.2 Stupňovitě spínané prosté kondenzátory

Stupňovitě spínaná kompenzační zařízení jsou stejně jako na hladinách nízkého napětí nejrozšířenějšími kompenzačními zařízeními i pro hladiny 6 a 22kV. U stupňovitého řízení je důležitá volba počtu a velikosti stupňů. Volba počtu stupňů závisí na reálné velikosti jednoho stupně, celkovém potřebném kompenzačním výkonu a na žádané hodnotě vykompenzování, obvykle  $\cos\varphi_0 > 0,95$  neboli  $\operatorname{tg}\varphi_0 < 0,33$ . Pak musí pro stupně se stejným kompenzačním výkonem platit následující vztah [11]:

$$\frac{Q_L - N \cdot Q_{C1}}{P} \leq \operatorname{tg}\varphi_0 \quad (4.16)$$

Z předchozího vztahu je možno určit vztah pro počet stupňů kompenzátoru N [11]:

$$N \geq \frac{Q_L - P \cdot \operatorname{tg}\varphi_0}{Q_{C1}} \quad (4.17)$$

Z principu stupňovitého spínání jednotlivých kompenzátorů vyplývá, že není možné vykompenzovat jalový výkon na přesně stanovenou hodnotu. Míra nevykompenzování je nepřímo úměrná změně velikosti odebíraného činného výkonu a přímo úměrná počtu připnutých stupňů. [11]

Rovnice pro změnu  $\cos\varphi$  v závislosti na odebíraném činném výkonu, jalovém výkonu a počtu připínaných stupňů [11]:

$$\cos\varphi = \cos \operatorname{arctg} \left( \frac{Q_L - Q_{C1} \cdot N}{P} \right) \quad (4.18)$$

Je zřejmé, že míra nevykompenzování klesá při nárůstu počtu připínaných stupňů. Z této skutečnosti vyplývají podmínky pro stanovené velikosti kompenzačního stupně a podmínky pro vlastnosti regulátoru jalového výkonu. V praktických aplikacích stupňovitě řízených kompenzátoů nemusí být jednotlivé připínané stupně stejně velké. Výše uvedené úvahy a odvození platí pro určení nejmenšího spínaného stupně, přičemž další stupně jsou voleny jako jeho násobky [11].

O řízení spínání jednotlivých kondenzátorů se v praxi stará regulátor jalového výkonu. Tyto přístroje jsou plně automatické a umožňují optimální řízení účinníku. Přístroje jsou vybaveny

přesným měřením napětí a proudů. Po digitálním zpracování naměřených signálů provede regulátor regulační zásah vhodným sepnutím kombinace kondenzátorů. Dále může regulátor kontrolovat míru zarušení sítě vyššími harmonickými, stav kompenzačních kondenzátorů atd [12].

Výhody:

- možnost řízení účinníku
- cenově dostupné řešení [11]

Nevýhody:

- regulace není plynulá
- náchylnost na přetěžování vyššími harmonickými vyskytujícími se v síti [11]

### 4.3.2.3 Chráněná kompenzace

Chráněné kompenzace jsou určeny především do sítí s vyšším podílem nelineárních zátěží (s výskytem harmonických frekvencí), a do prostředí, kde hrozí nebezpečí vzniku rezonance kompenzační kapacity s indukčností zátěže. Kapacitní reaktance kondenzátoru klesá se zvyšujícím se kmitočtem. Celkový efektivní proud protékající kondenzátorem s přítomností vyšších harmonických proto roste. Tento proud potom přetěžuje kondenzátor, ale i části sítě mezi kondenzátorem a zdrojem vyšších harmonických. Metodou pro zabránění vzniku rezonančních jevů je vřazení tlumivky do série s kondenzátorem. Tlumivka posune rezonanční jev na nižší frekvenci, kde se nenachází žádný harmonický proud. Vzniklý obvod je stále rezonanční, ale rezonanční frekvence je nižší, než např. (3. harmonická) [13].

Ladicí frekvence je vyjádřena tzv. činitelem zatlumení  $p$ , který se vypočte [13]:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100 = \frac{1}{\left(\frac{f_r}{f_n}\right)^2} \cdot 100 \quad (4.19)$$

Pro 3. řád harmonické (150 Hz) se zpravidla volí frekvence 134 Hz, tomu odpovídá zatlumení  $p=14\%$ . Pro 5. řád harmonické (250Hz) to je zpravidla 189 Hz ( $p=7\%$ ) nebo 210 Hz ( $p=5,67\%$ ), zde je nutno brát v úvahu přítomnost signálu HDO 216,6Hz nebo 183,3Hz aby kompenzace neodsávala tento užitečný ovládací signál. Chráněná sekce kompenzace potom může i částečně filtrovat dominantní harmonickou a tím snižovat celkové zkreslení napětí THD [13].

Tlumivky musí být voleny s ohledem na indukčnost a schopnost vést dostatečné proudy. Po sériovém připojení tlumivky ke kondenzátoru bude na kondenzátoru vyšší napětí než síťové. Toto napětí je dáno vztahem [13]:

$$U_c = \frac{U_n}{\left(1 - \frac{p}{100}\right)} \quad (4.20)$$

Výhody:

- možnost řízení účinníku
- pro zařízení s konstantním odběrem vyhovuje
- kondenzátory jsou chráněny před přetěžováním harmonickými proudy
- částečné odsávání harmonických proudů [11]

Nevýhody:

- regulace není plynulá
- nutno použít kondenzátory na vyšší napětí než je jmenovité v síti [11]

#### 4.3.2.4 Plynule řízené – pasivní

Plynulé řízení jalového výkonu pomocí regulace proudu tlumivkou. Do této skupiny spadá SVC (statický var kompenzátor), kterému se bude věnovat celá kapitola 5. SVC lze zařadit do skupiny zařízení zkratkou nazývané FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) což jsou systémy používané přenosových vedeních pro zlepšení řízení a využití přenosových vedení[4][11].

Výhody:

- snadná konstrukce
- dobré zkušenosti
- snadné naladění, ale na místě
- levné oproti aktivním filtrům [11]

Nevýhody:

- velké nároky na prostor
- velké rušení do sítě [11]

#### 4.3.2.5 Plynule řízené – aktivní

Zařízení spadající taky do skupiny FACTS. Aktivní filtr sestává z výkonových obvodů a vícefázových polovodičových můstek se stejnosměrným meziobvodem. Filtry lze zapojit sériově či paralelně ke spotřebiči [11].

##### **Paralelní aktivní filtr**

Je tvořen řízeným generátorem proudu, který je zapojen paralelně k zátěži. Měřicí jednotka filtru měří průběh proudu, který je potřeba zbavit vyšších harmonických případně kompenzovat. Následně je vygenerován proud shodné složky proudu vyšší harmonické, ale opačné fáze. Tento proud je potom zaveden do sítě. Výsledný proud je potom zbaven daných harmonických. Tímto se odstraní i deformace napětí. V případě, kdy bude filtr generovat jalovou složku první harmonické je dosaženo velmi rychlé kompenzace. Případným generováním sousledných a nesousledných složek lze upravovat nesymetrickou zátěž tak, aby se pro síť tvářila jako symetrická [11].

##### **Sériový aktivní filtr**

Je tvořen řízeným generátorem napětí, který je vřazen mezi svorky sítě a spotřebiče. Pomocí tohoto filtru je možné upravit přiváděné napětí na požadovaný tvar. Filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, odstraňovat harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí, dodávat energii při výpadku napájecího napětí (v případě, že je filtr napájen nezávislým zdrojem) [11].

##### **Hybridní, kombinovaný aktivní filtr**

Z výše uvedeného popisu vyplývá, že paralelní filtry upravují rušivé účinky zátěže a sériové filtry dodávají kvalitnější napětí. Oba filtry (paralelní a sériový) lze zkombinovat do jednoho celku [11].

Výkon zátěže	Pasivní filtr	Paralelní aktivní filtr	Hybridní aktivní filtr
< 500 kVA	Nejhorší řešení	Nejlepší řešení	Možné řešení
500 kVA až 5 MVA	Možné řešení	Nevhodné velká spotřeba	Nejlepší řešení
>5 MVA	Nejlepší řešení min. cena	Nevhodné velká spotřeba	Nevhodné

Tab. 4-1 Porovnání aplikace různých typů filtrů podle velikosti zátěže[4]

Výhody:

- rychlá kompenzace všech nežádoucích jevů
- plynule říditelné [4]

Nevýhody:

- produkce vyšších harmonických
- cena [4]

#### 4.3.2.6 Kontaktní spínání kompenzačních stupňů

Kontaktní spínání kondenzátorů, případně chráněných kompenzačních sekcí je prováděno pomocí stykačů. Stykače jsou nejrozšířenějšími spínacími prvky v kompenzačních. Tyto stykače za dobu používání v této aplikaci prošly značným počtem změn. Změny spočívají především v úpravách kontaktů a doplněním zařízení pro omezení proudových nárazů při spínání kondenzátorů [11].

Připnutí kondenzátoru je vždy doprovázeno přechodovým jevem, který se vyznačuje kmitavým průběhem, jehož amplituda a kmitočet jsou dány velikostí napětí sítě, kapacitou kondenzátoru, okamžikem sepnutí a impedancí obvodu mezi připínaným kondenzátorem a zdrojem napětí. Nejnepríznivější jev nastane, pokud je připojen vybitý kondenzátor v době, kdy napětí prochází maximem. Okamžik připnutí kondenzátoru k síti pomocí stykače v rámci průběhu periody nelze přesně stanovit. Nabíjecí proud kondenzátoru je omezen pouze impedancí sítě. Výpočtem, ale i měřením na reálném zařízení lze dokázat, že amplituda přechodového děje může přesahovat i stonásobek jmenovitého proudu kondenzátoru a to při kmitočtu nad 10kHz. Tento jev má za následek značné opotřebování kontaktů stykače, přetěžování kondenzátorů, jistících prvků a v neposlední řadě vzniká impulsní rušení do sítě [11].

Omezení amplitudy a frekvence přechodových jevů lze zajistit zvýšením impedance mezi připínaným a již připnutým kondenzátorem. Trvalé zvýšení impedance lze realizovat tlumivkami. Přechodné zvýšení impedance bývá realizováno vřazením sériového odporu, který je po jistém časovém intervalu vyřazen. Toto opatření lze realizovat dvojicí stykačů, z nichž jeden spíná elektrický obvod s vřazeným odporem, zatímco druhý s jistým časovým zpožděním tento odpor vyřadí. Mnohem elegantnějším řešením je však použití stykače se dvěma sadami kontaktů, z nichž jedna sada obsahuje v sérii odpory a druhá sada tyto odpory vzápětí po připnutí překlene [11].

Garantovaná četnost spínání stykačů s odporovým spínáním bývá v rozmezí od 100 do 250 spínacích operací za hodinu a udávaná životnost se pohybuje mezi  $10^5$  až  $2,5 \times 10^5$  sepnutí [11].

Výhody:

- příznivá cena
- pro kompenzování pomalých změn jalového výkonu dostačující [11]

Nevýhody:

- omezený počet sepnutí za hodinu
- nedefinovaný okamžik připnutí kondenzátoru [11]

#### **4.3.2.7 Bezkontaktní spínání kompenzačních stupňů**

Bezkontaktní spínače jsou určeny pro okamžité spínání kondenzátorů v tzv. rychlých kompenzátorech. Jejich předností je řízený okamžik sepnutí v okolí průchodu napětí na spínači nulou, spínání probíhá bez přechodného proudového děje a umožňuje opakované sepnutí v časech jedné periody síťového kmitočtu (20ms) při regulaci rychlých pulzních odběrů. Podrobněji o těchto spínačích bude pojednáno v následující kapitole [9].

Výhody:

- rychlá odezva
- přesně řízený okamžik zapnutí
- možnost častého spínání bez přechodového děje
- pro kompenzování pomalých změn jalového výkonu dostačující [9][11]

Nevýhody:

- vyšší cena
- vyšší nároky na řízení [9][11]

## 5 STATICKÝ VAR KOMPENZÁTOR SVC

Na počátku 70. let byl na základě dostupnosti tyristorové technologie vynalezen SVC.

Statický VAr kompenzátor (static VAr compensator = SVC) je kombinace pevných kondenzátorů (BSC), tyristorově spínaných kondenzátorů (thyristor-switched capacitor = TSC), tyristorově spínaných tlumivek (thyristor-switched reactor = TSR) a tyristorově řízených tlumivek (thyristor-controlled reactor = TCR) připojených paralelně k soustavě většinou přes zvyšovací transformátor. TCR je realizována jako pevná tlumivka obvykle se vzduchovým jádrem spojená do série s dvojsměrným tyristorovým ventilem, který pomocí fázového řízení mění proud protékající tlumivkou. Konstrukce TSR a TSC je podobná TCR, ale tyristorový modul není regulován plynule, nýbrž připíná a odpíná tlumivku, resp. kondenzátor po celých násobcích půlperiod napětí. V tomto případě nejsou tedy reaktanční prvky řízeny fázově, ale jsou připínány jejich celé jmenovité hodnoty. Výhodou TSR a TSC oproti TCR je fakt, že tyristorové měniče neprodukují žádné vyšší harmonické proudů. Je vhodné poznamenat, že v obvodech TSC je v sérii s kondenzátorem a tyristorovým ventilem ještě tlumivka, která omezuje proudy v případě mimořádných podmínek a zároveň může sloužit k ladění filtru na příslušnou frekvenci [10].

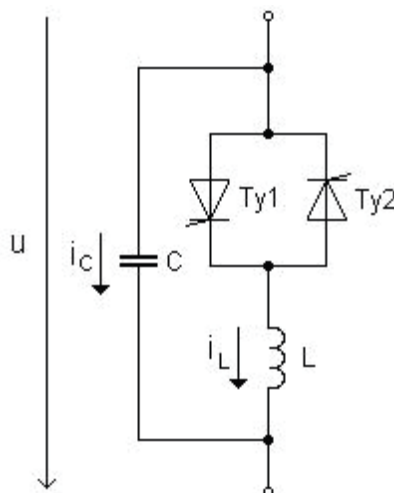
SVC bývá instalováno za účelem:

- dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
- vyrovnávání dynamického zatížení
- podpora napětí v ustáleném stavu[10]

Pro pochopení funkci celého systému SVC budou nejdříve vysvětleny jednotlivé komponenty zařízení.

### 5.1 Obvodové uspořádání

Výchozí uspořádání jednofázového SVC kompenzátoru uvedeno na Obr. 5-1.



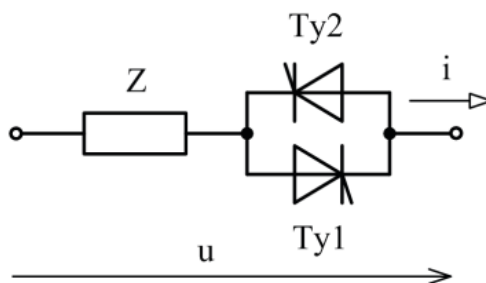
Obr. 5-1 Základní obvodové uspořádání  $I_f$  statického VAr kompenzátoru[10]

Proud kondenzátoru  $i_C$  má konstantní amplitudu a průběh. Pro 1. harmonickou celkového proudu platí [10] :

$$I_{L(1)} = I_{LMAX} \cdot \left( 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin(2 \cdot \alpha) \right) - I_{Cmax} \quad (5.1)$$

## 5.2 Tyristorový měnič

Spojením dvou tyristorů antiparalelně do každé fáze trojfázového systému lze získat řízený spínač, který má schopnost řízeně spínat příslušnou část obvodu. Tyristory lze řízeně zapnout, ovšem k vypnutí dojde, až když proud prochází nulou. V případě, že je spínána indukčnost, lze protékající proud regulovat od nuly do jeho maximální hodnoty změnou řídicího úhlu tyristorů a to v rozsahu  $90^\circ$  až  $180^\circ$ . První harmonická proudu indukčností je fázově posunuta o  $90^\circ$  proti fázoru napětí. Řídicí úhel lze chápat jako zpoždění sepnutí tyristoru od průchodu napětí nulou. Při běžném režimu pracují oba tyristory střídavě po půlperiodách a se shodným řídicím úhlem [10].



Obr. 5-2 Tyristorový měnič [10]

Popsaný typ měniče může k síti obecnou zátěž  $Z$  připínat buď po celých periodách, nebo může plynule měnit vlastnosti zátěže v závislosti na řídicím úhlu [10].

Mezi tyristorově spínané prvky lze zařadit:

- TSR (tyristorově spínaná indukčnost)
- TSC (tyristorově spínaná kapacita) [10]

Mezi tyristorové řízené prvky lze zařadit:

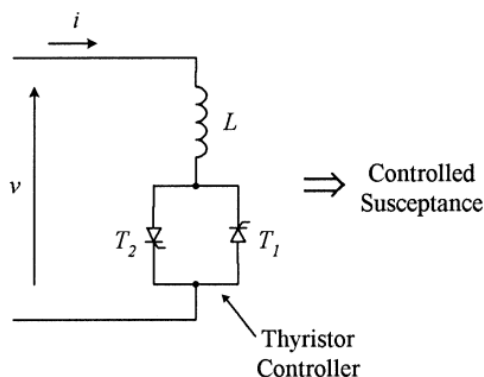
- TCR (tyristorově řízená indukčnost) [10]

## 5.3 TCR

### 5.3.1 Princip funkce TCR

V případě TCR dochází k plynulému řízení proudu tlumivkou.

Základní obvodové schéma TCR [10] :



Obr. 5-3 Schéma TCR[15]

Níže bude odvozen proud tekoucí přes tlumivku  $L$  v závislosti na velikosti řídicího úhlu tyristoru alfa. První harmonická proudu  $i_L$  je fázově posunuta o  $90^\circ$  proti fázoru napětí. Fázovým řízením TCR dochází ke změně amplitudy 1. harmonické proudu, která je fázově zpožděna o  $90^\circ$  vůči napájecímu napětí v celém rozsahu řídicích úhlů, tj.  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ . (U reálné tlumivky by fázový posun zmenšila činná složka proudu rozsahu jednotek procent jalové složky.) [4] [10]

Pro  $i_L$  tedy platí [4]:

$$i_L = I_{LMAX} \cdot \left[ \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right], \omega \cdot t \in \langle \alpha; 2\pi - \alpha \rangle \quad (5.2)$$

kde pro maximální proud tlumivkou platí [4]:

$$I_{LMAX} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L} \quad (5.3)$$

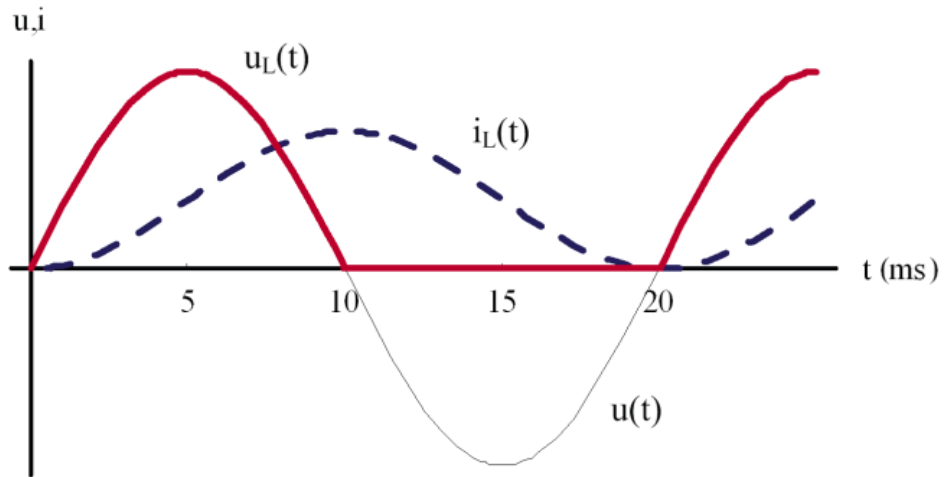
Amplituda 1.harmonické proudu  $i_L$  je určena pomocí Fourierova rozvoje[4]:

$$I_{L(1)} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_L \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot d(\omega \cdot t) \quad (5.4)$$

Po dosazení z předchozí rovnice[4]:

$$I_{L(1)} = I_{LMAX} \cdot \left( 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin(2 \cdot \alpha) \right) \quad (5.5)$$

V případě, že by docházelo k dalšímu zmenšování řídicího úhlu, byla by doba vedení jednoho tyristoru delší než  $\pi$  a druhý tyristor by přestal spínat. V extrémním případě pro  $\alpha=0$  by tyristorem i induktivní zátěží protékal proud jedné polaroty po celou dobu periody. Napětí na indukčnosti by potom odpovídalo jednocestně usměrněnému napětí. Proto řídicí obvody zajišťují, aby byl řídicí úhel minimálně  $\alpha=\pi/2$ . Tento minimální úhel se nazývá taky kritický úhel tyristoru. V případě tohoto minimálního úhlu protéká indukčností proud celou periodu bez přerušení [10].



Obr. 5-4 Průběh napětí a proudu na indukčnosti u TCR pro  $\alpha=0^\circ$ [10]

Na následujícím obrázku jsou uvedeny dva průběhy proudu pro různé řídicí úhly  $\alpha$ .

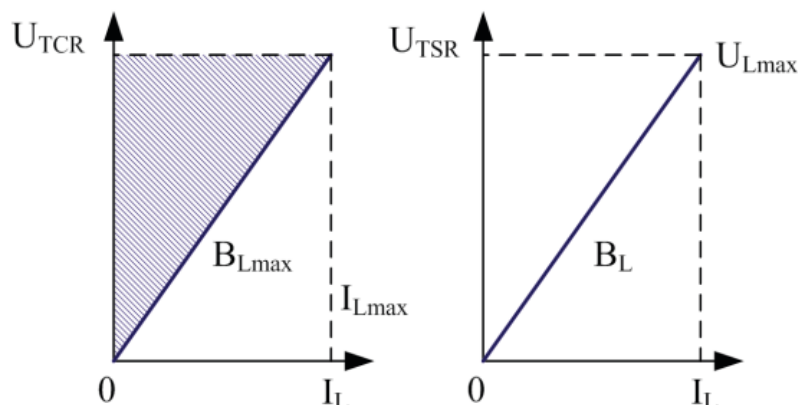


Obr. 5-5 Závislost průběhu proudu tlumivkou na řídicím úhlu  $\alpha$  [15]

### 5.3.2 VA charakteristika TCR

Na následujícím obrázku jsou V-A charakteristiky TCR a TSR. U TCR je pracovní oblast plošná, indukční susceptance tedy odpovídá jak přiloženému napětí tak na řídicím úhlu tyristorů.

Pracovní oblast TCR je dána pouze přímkou, kdy indukční susceptance je dána pouze přiloženému napětí [10].



Obr. 5-6 Pracovní oblast TCR a TSR [10]

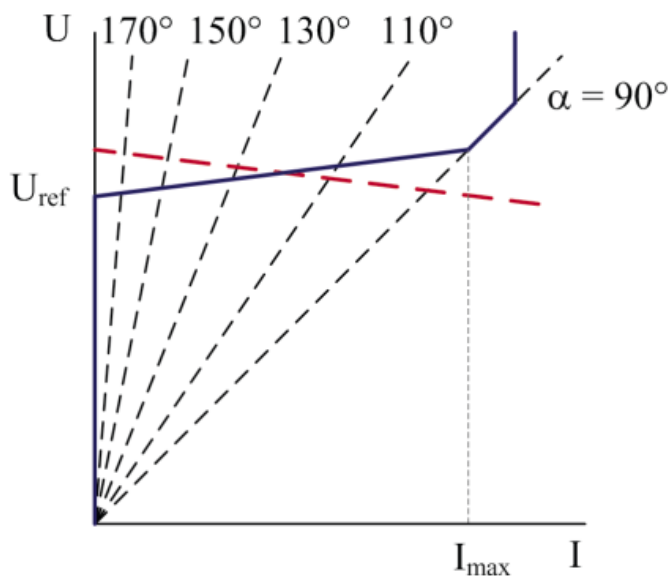
VA – charakteristika spolu se systémovou křivkou napětí určí pracovní bod v uzlu připojení TCR. Jedna z možností jak může průnik dvou charakteristik vypadat je na Obr. 5-7 VA charakteristika TCR. Konkrétní tvar charakteristik závisí na systémové křivce napětí, nastavení regulátoru a dimenzování TCR. Aby bylo napětí udržováno v požadovaných mezích, je nutné měnit celkovou efektivní reaktanci tlumivky podle okamžitých podmínek a požadavků. Charakteristiku pak lze popsat vztahem:

$$U = U_{ref} + j \cdot X_f \cdot I \quad 0 < I < I_{max} \quad (5.6)$$

Kde :

$X_f$  představuje fiktivní reaktanci určující sklon

$I_{max}$  maximální proud



Obr. 5-7 VA charakteristika TCR [10]

### 5.3.3 Admitanční model TCR

Připojení indukčnosti L do sítě odpovídá připojení admitance [10]:

$$\bar{Y}_L = \frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L} = jB_L = \frac{\bar{I}_L}{\bar{U}_L} \quad (5.7)$$

V případě připojování indukční zátěže bude fázový posun mezi fázory napětí a proudu  $90^\circ$ . Pro susceptanci indukčnosti platí [10]:

$$B_L = -\frac{I_{L1}}{U_{L1}} = -\frac{I_{max}}{U_{max}} = -\frac{1}{\omega L} \quad (5.8)$$

Na základě (5.5) lze psát pro susceptanci TCR v závislosti na řídicím úhlu následující [10]:

$$B_{TCR}(\alpha) = -\frac{I_{max} \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}}{U_{max}} = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (5.9)$$

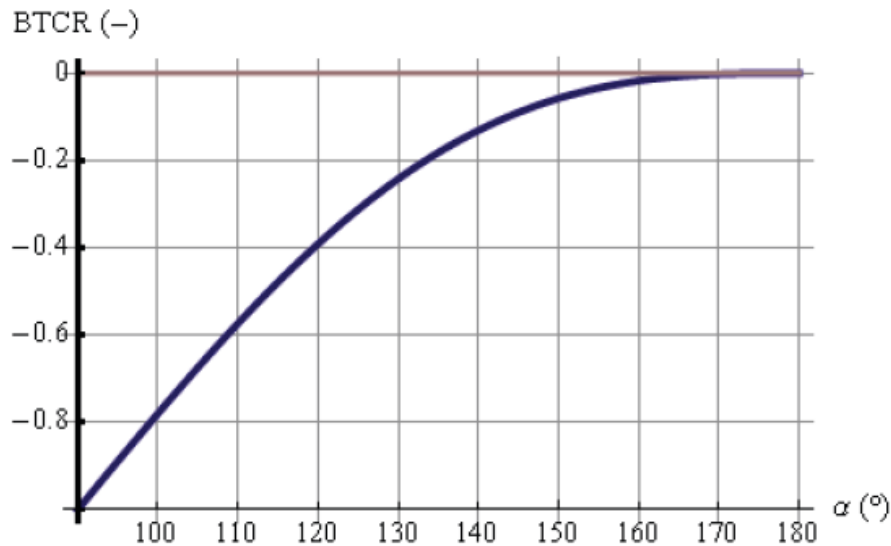
Admitance je pak [10]:

$$\bar{Y}_{TCR} = jB_{TCR} \quad (5.10)$$

Pro limitní hodnoty pak platí [10]:

$$B_{TCRmax} = B_L \text{ pro } \alpha = 90^\circ$$

$$B_{TCRmin} = 0 \text{ pro } \alpha = 180^\circ$$



Obr. 5-8 Závislost  $B_{TCR}$  na řídicím úhlu [10]

### 5.3.4 Vliv řídicího úhlu TCR na kmitočtové spektrum proudu

TCR může být dost významným zdrojem vyšších harmonických. Časový průběh proudu indukčností je lichá funkce a proto se skládá ze sinusových složek. Pro rozklad na jednotlivé harmonické bude použito Fourierova rozvoje. Dalším rozkladem se dojde k závěru, že jednotlivé harmonické jsou pouze liché násobky základní frekvence proudu 50Hz [4].

Pro amplitudu první harmonické proudu platí [4]:

$$I_{TCR_1} = I_{Lmax} \cdot \left( 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (5.11)$$

Pro amplitudy vyšších harmonických proudu platí [4]:

$$I_{TCR_k} = I_{Lmax} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[ \begin{array}{c} \frac{\sin\{(k+1) \cdot \alpha\}}{2 \cdot (k+1)} + \frac{\sin\{(k-1) \cdot \alpha\}}{2 \cdot (k-1)} - \\ - \cos(\alpha) \cdot \frac{\sin(k \cdot \alpha)}{k} \end{array} \right] \quad (5.12)$$

Zpětný výpočet časového průběhu proudu TCR [4]:

$$i_{TCR}(t) = \sum_{k=1}^n I_{TCR_k} \cdot \sin \left( (2 \cdot k - 1) \cdot \left( \omega \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right) \quad (5.13)$$

Z výše uvedených vztahů lze odvodit následující charakteristiky:

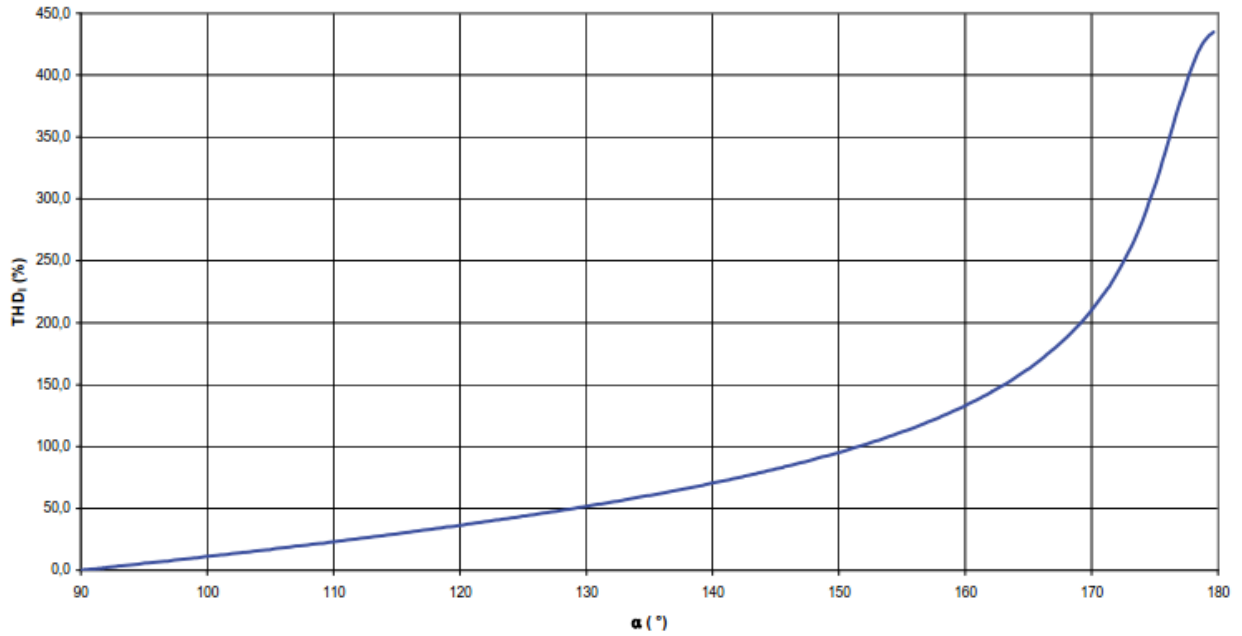
- kmitočtové spektrum proudu TCR pro daný řídicí úhel
- závislost amplitud jednotlivých harmonických na velikosti řídicího úhlu
- závislost činitele harmonického zkreslení proudu na velikosti řídicího úhlu [4]

Pro hodnocení míry zarušení vyššími harmonickými je vhodné zavést tzv. činitel harmonického zkreslení proudu THD (total harmonic distortion). Tento činitel se v normách počítá až do 40. harmonické. Pro THD platí vztah [4]:

$$THD_1 = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100$$

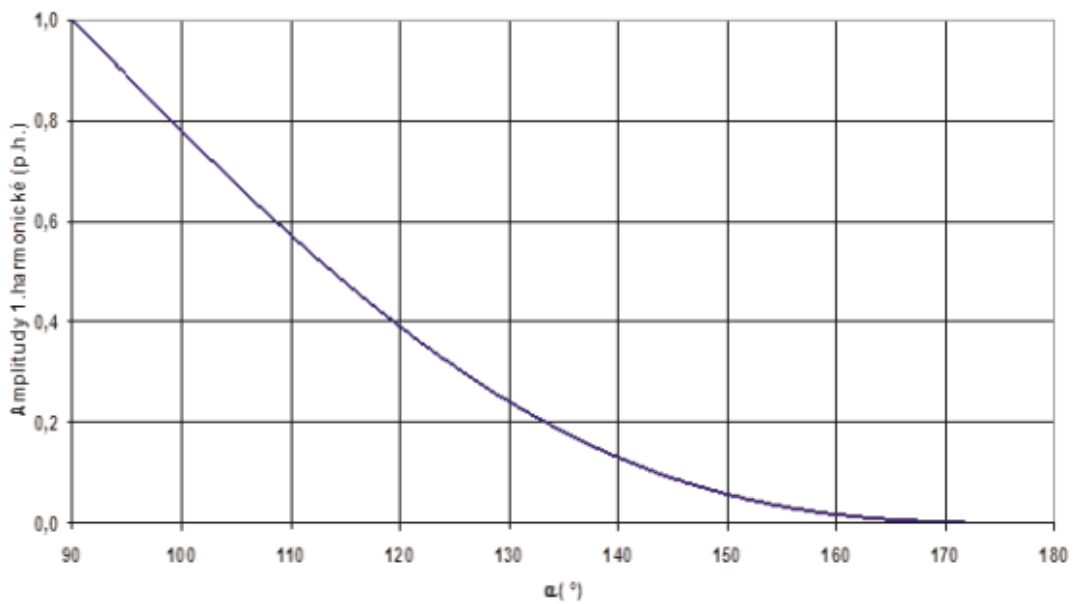
Pokud výše uvedené vztahy budou promítnuty do grafického zobrazení lze vypořadovat, že:

- S narůstající hodnotou řídicího úhlu výrazně rostou amplitudy vyšších harmonických proudu, které při vyšších řídicích úhlech mohou dosahovat amplitudy 1. harmonické.
- Činitel harmonického zkreslení roste se zvyšujícím se řídicím úhlem  $\alpha$  (Obr. 5-9) [4].



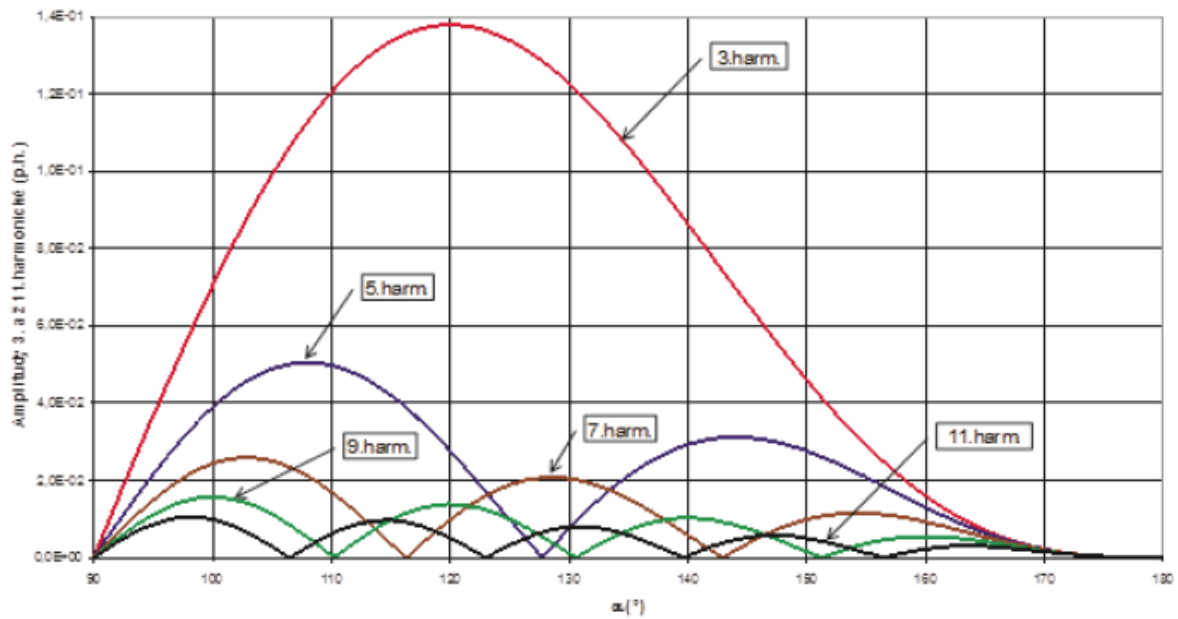
Obr. 5-9 Závislost THD na velikosti řídicího úhlu[4]

Na Obr. 5-10 je vynesena závislost amplitudy 1. Harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu.



Obr. 5-10 Závislost amplitudy 1. harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu[4]

Na Obr. 5-11 Závislost amplitud 3. až 11. harmonické proudu[4] jsou vyneseny závislosti amplitud 3. až 11. harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu.

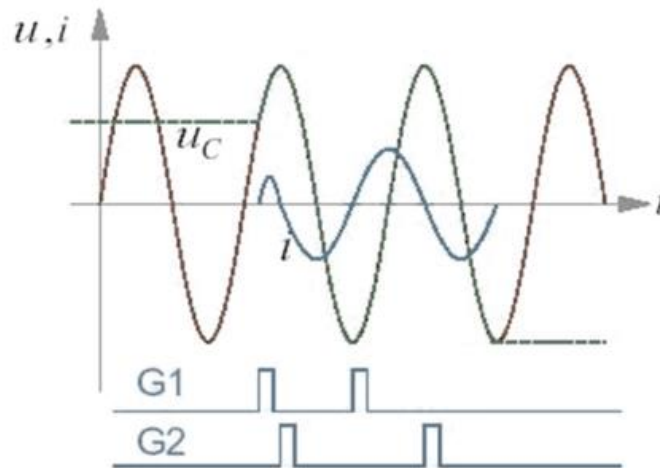


Obr. 5-11 Závislost amplitud 3. až 11. harmonické proudů[4]

Z charakteristik na Obr. 5-10 a Obr. 5-11 jednoznačně plyne, že pro řídicí úhly nad  $170^\circ$  se amplitudy vyšších harmonických začnou vyrovnávat. Tento jev je z hlediska řízení a rušení nepříznivý. Pro potlačení nepříznivého vzniku vyšších harmonických je vhodné se pohybovat v rozsahu řídicího úhlu  $\alpha=90^\circ$  až  $150^\circ$ . U kompenzátorů bývají z důvodu produkce vyšších harmonických proudů instalovány filtry, které tyto proudy odsávají. [4]

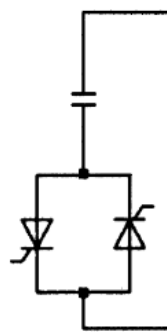
## 5.4 TSC

Bude-li tyristorový měnič spínat kapacitní zátěž (TSC: paralelně připojená tyristorově spínaná kapacita, jejíž efektivní reaktance je skokově nastavitelná pomocí plné nebo nulové vodivosti tyristorových ventilů; rovněž obsahuje malou tlumivku pro omezování přechodných proudů), je toto realizováno po celých půlperiodách v přirozené nule proudu a maximum (minimum) síťového napětí obdobně jako v případě TSR. Při odpínání v nule proudu je tedy kondenzátor nabit na  $U_{max}$  nebo  $U_{min}$ . Při spínání TSC je třeba zaručit, že okamžitá hodnota síťového napětí odpovídá předchozímu nabití kondenzátoru (napětí na tyristorovém ventilu je nulové nebo minimální). Není-li toto zajištěno, dojde po okamžiku připojení k přechodným oscilacím napětí i proudu. Kdyby nedocházelo k samovolnému vybíjení kondenzátorů, neprodukuje tento režim spínání žádné vyšší harmonické. Skokovou změnu celkové kapacitní reaktance je rovněž možné provádět současným spínáním více kapacit v každé fázi, je-li jich instalován větší počet paralelně [10].



Obr. 5-12 Připínání TSC na síť při vybíjení kondenzátoru[10]

Vzhledem k vybíjení kondenzátorů přes jejich svodové odpory a tím exponenciálnímu poklesu napětí nelze vždy připínat TSC na síť v extrému síťového napětí. V tom případě musí synchronizační obvod zajistit sepnutí v okamžiku rovnosti napětí sítě a kondenzátoru, k čemuž potom nedojde v celém násobku půlperiody viz. Obr. 5-12 [10].

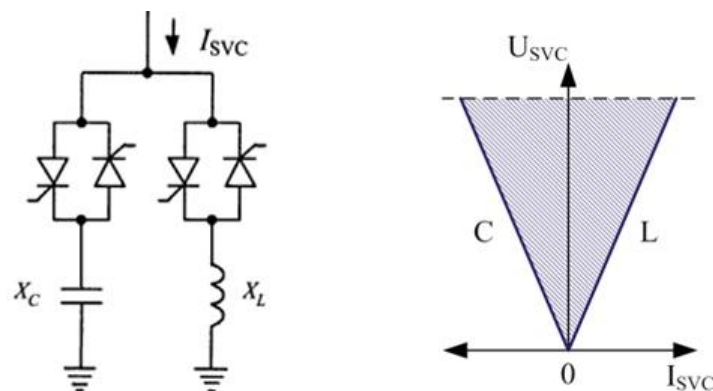


Obr. 5-13 Schéma TSC

## 5.5 SVC

### 5.5.1 V-A charakteristika

Jak již bylo uvedeno v úvodu spojením TCR a TSC vzniká SVC kompenzátor.



Obr. 5-14 SVC kompenzátor a jeho V-A pracovní oblast [10][15]

Pracovní rozsah SVC je určen impedancemi tlumivek, kondenzátorů a případných zvyšovacích transformátorů. Voltampérová pracovní oblast paralelně připojeného zařízení obsahuje jednu polaritu napětí, ke kterému je zařízení připojeno a díky možnému dvojímu charakteru impedance obsahuje obě polarity kompenzačního jalového proudu. V-A pracovní oblast charakteristika je na Obr. 5-14. Uvnitř řídicího rozsahu je napětí regulovatelné s přesností danou sklonem charakteristiky. Vně řídicího rozsahu se jedná o charakteristiku čisté kapacity pro nízká napětí a čisté indukčnosti pro velká napětí, tj. konstantní admitance příslušného typu. Maximální kompenzační proud je tedy přímo úměrný napětí sítě a dodávaný, resp. absorbovaný jalový výkon je úměrný kvadrátu napětí [10].

Variabilním připínáním a odpínáním kapacitních sekcí lze dosáhnout rozšíření V-A charakteristiky. Aby byla zachována bilance jalového výkonu při přepnutí kapacitních sekcí, jsou řídicí úhly tyristorů u TCR okamžitě změněny tak, že induktivní jalový výkon TCR spolu s kapacitním výkonem C je roven celkovému jalovému výkonu před změnou (pokud tuto spojitost umožňuje dimenzování TCR a C sekcí a předchozí pracovní bod). Kapacity mohou být spínány mechanicky nebo tyristorově (TSC) [10].

Pro 3f sítě se používá zapojení tří 1f kompenzátorů, zapojených do trojúhelníku. Takto zapojený kompenzátor umožňuje kompenzovat i nesymetrické zatížení jednotlivých fází nastavením různých řídicích úhlů pro každý z kompenzátorů [4].

### 5.5.2 Admitanční model SVC

SVC se chová jako paralelně připojená admitance, která buď dodává, nebo spotřebovává jalový výkon za účelem regulace napětí. Celkový charakter obvodu SVC (skládajícího se z jednoho napevno připojeného kondenzátoru a jednoho TCR) je v celém rozsahu ovlivňován řídicím úhlem  $\alpha$  jestliže [10]:

$$\omega \cdot L < \frac{1}{\omega \cdot C} \approx |B_L| > B_C \quad (5.14)$$

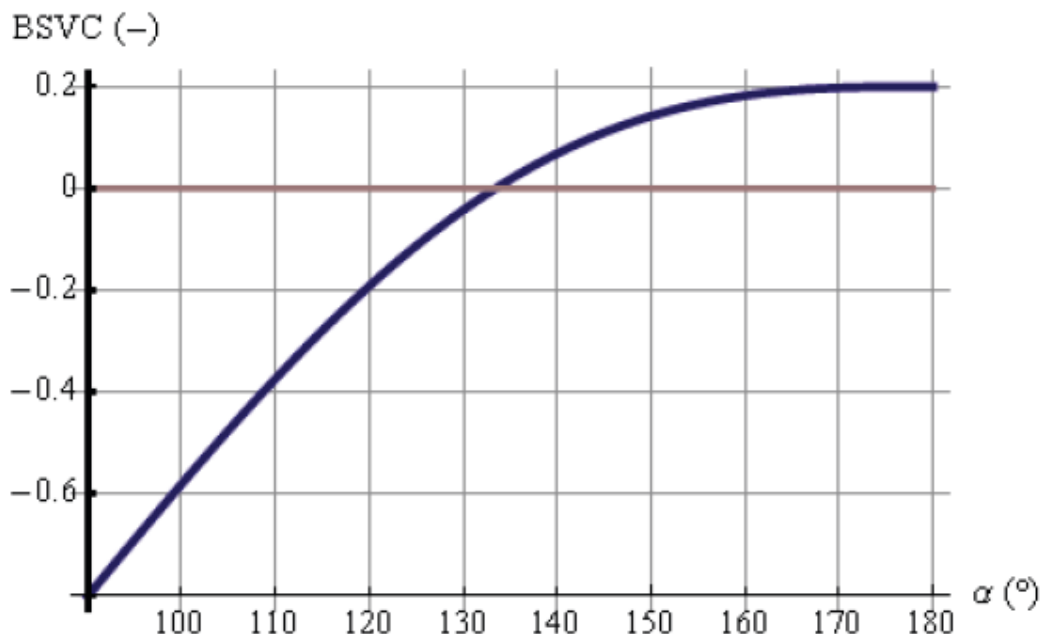
Dále lze pro základní obvod SVC předpokládající spojení fixního kondenzátoru a TCR uvést vztahy pro celkovou admitanci a susceptanci SVC [10]:

$$\bar{Y}_{SVC} = j \cdot \omega \cdot C + j \cdot B_{TCR} = j \cdot (B_{TCR} + B_C) = j \cdot B_{SVC} \quad (5.15)$$

$$B_{SVC}(\alpha) = B_L \cdot \frac{2 \cdot \pi - 2 \cdot \alpha + \sin(2 \cdot \alpha)}{\pi} + B_C \quad (5.16)$$

Na Obr. 5-15 je uveden příklad závislosti susceptance na řídicím úhlu.

Jsou uvažovány  $B_L = -1(-)$  a  $B_C = 0,2(-)$ .



Obr. 5-15 Závislost  $B_{SVC}$  na řídicím úhlu [10]

### 5.5.3 V-A charakteristika paralelní kompenzace s SVC

Při pohledu na V-A charakteristiku paralelního kompenzátoru SVC modře na Obr. 5-16. Jde vidět, že lineární část charakteristiky vykazuje sklon obdobně, jako tomu bylo u samostatného TCR (5.6). Tento sklon je pro účely kompenzátoru výhodnější než použití ideálního regulátoru napětí, který by udržoval konstantní hodnotu. Při provozu je tak udržováno napětí v určitém rozsahu, který vyhovuje požadavkům a nezpůsobuje žádné provozní komplikace. V případě že by přímka měla malý, nebo žádný sklon mohlo by dojít k nepřesnému stanovení pracovního bodu a možným oscilacím mezi více variantami [10].

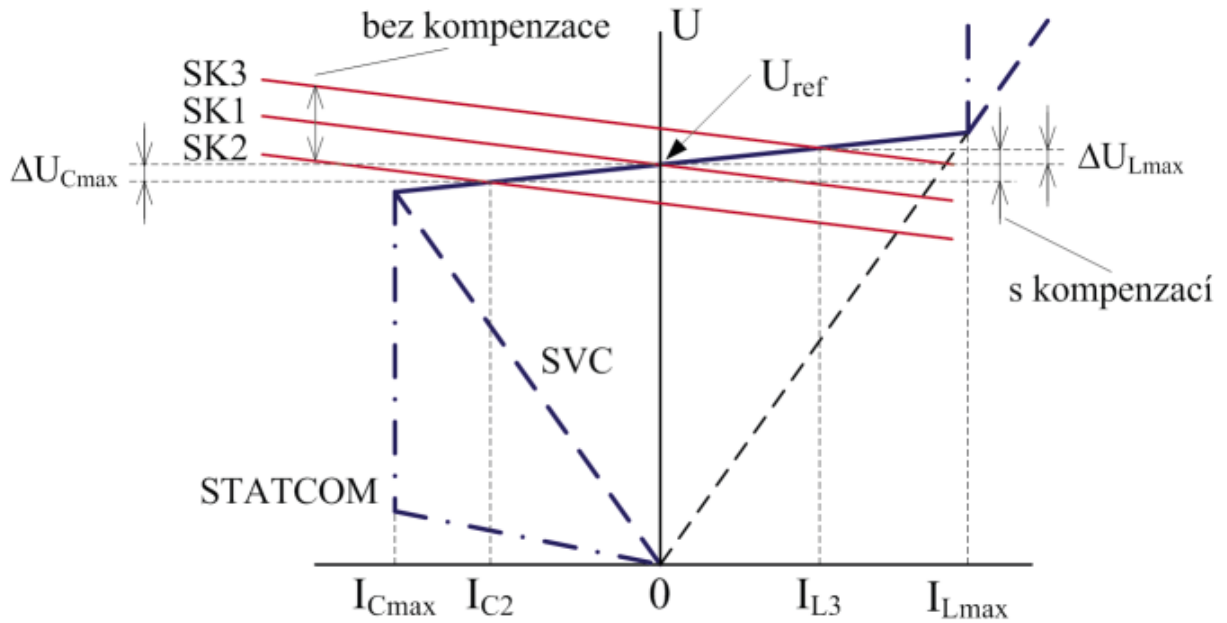
Na rozdíl od TCR může SVC dodávat i kapacitní výkon. Pro výsledné napětí lze potom psát podobně jako ve vztahu (5.6) [10]:

$$U = U_{ref} + j \cdot X_f \cdot I \quad - I_{Cmax} < I < I_{Lmax} \quad (5.17)$$

Kde pro fiktivní reaktanci  $X_f$  lze z limitů proudového dimenzování ( $I_{Cmax}$ ,  $I_{Lmax}$ ) zjistit odchylky napětí pro kapacitní i induktivní kompenzaci ( $\Delta U_{Cmax}$ ,  $\Delta U_{Lmax}$ ) [10]

$$X_f = \frac{\Delta U_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta U_{Lmax}}{I_{Lmax}} \quad (5.18)$$

Oproti stavu bez kompenzace ( $U_{ref}$ ) dochází při kapacitním kompenzačním proudu k poklesu napětí a při induktivním kompenzačním proudu k nárůstu napětí [10].



Obr. 5-16 V-A charakteristika SVC

Na Obr. 5-16 je typická V-A charakteristika SVC kompenzátoru spolu se systémovými křivkami napětí. V případě, že systémová křivka SK1 protíná charakteristiku v referenčním napětí, je výstup nulový. Když je systémová křivka situována do nižších napětí (SK2, např. výpadek generátoru) průsečík s V-A charakteristikou SVC vznikne v oblasti kapacitního proudu  $I_{C2}$ . Opačným případem může být zvýšení systémové křivky (SK3, např. výpadek významné zátěže), kdy průsečík vznikne v oblasti induktivního kompenzačního proudu  $I_{L3}$ . Průsečíky systémových křivek s napěťovou osou určují odchylku napětí při stavu bez kompenzace. Při kompenzaci je odchylka výrazně nižší, ale pouze za předpokladu, že průsečíky leží na lineární části charakteristiky dané sklonem  $X_f$ .

## 5.6 Aplikace SVC

### 5.6.1 Důvody využívání SVC

V přenosových soustavách bývá instalován za účelem:

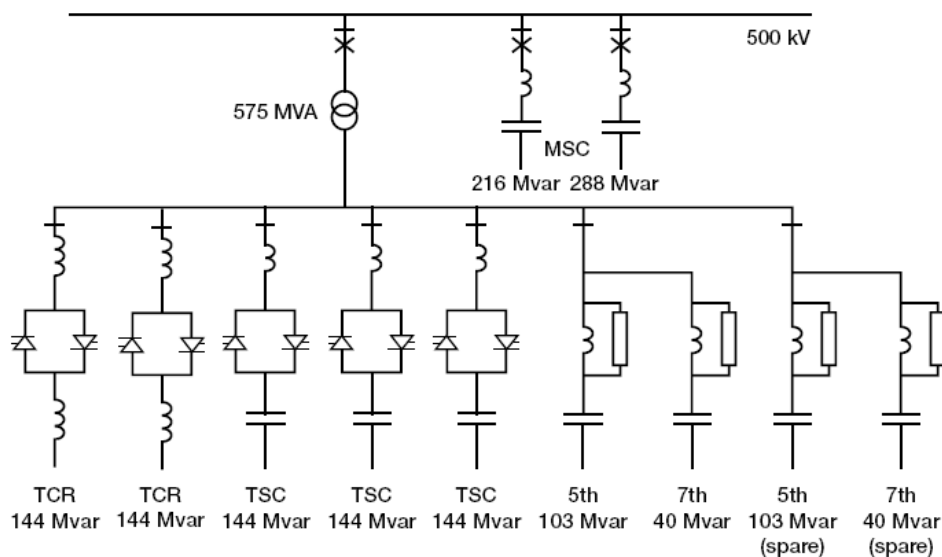
- stabilizace napětí ve slabých sítích, po poruše
- snížení přenosových ztrát
- zvýšení přenosových schopností
- zvýšení dynamické stability
- regulace napětí
- tlumení výkonových oscilací

V distribučních soustavách:

- stabilizace napětí v místech odběru
- snížení jalového odběru, nižší ztráty
- symetrizace odběrů, nižší ztráty
- snížení kolísání napětí a flickr
- snížení harmonického zkreslení [16]

### 5.6.2 Příklad reálné aplikace

Skutečné kompenzační zařízení typu SVC sestává z kombinace TCR, TSR, TSC dále filtrů vyšších harmonických proudů, do sítě může být obvykle připojen přes vazební transformátor. Jak může takové kompenzační zařízení vypadat je uvedeno v jednopólovém schématu na Obr. 5-17. Jedná se o zařízení stojící v Marylandu (USA). Kde celkový kompenzační výkon je -145/575MVar (-L/+C) při napětí 500kV. Důvodem instalace v tomto případě je hlavně obnova napětí po poruše a dále zvýšení přenosové schopnosti (podpora napětí na konci vedení, nebo při výpadku jednoho z paralelních vedení) [16].



Obr. 5-17 Schéma SVC Maryland[16]

Na Obr. 5-18 je pak fotografie výše popisované rozvodny.

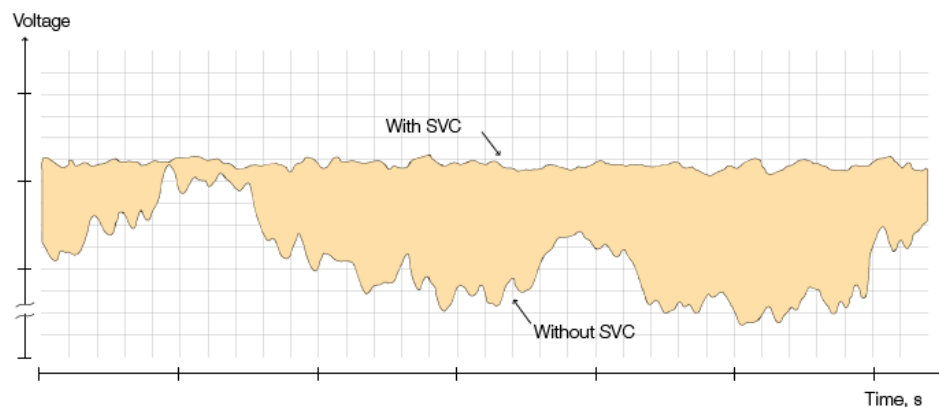


Obr. 5-18 Kompenzační SVC stanice Maryland[16]

### 5.6.3 Aplikace průmysl

V průmyslu se SVC často používá ke stabilizaci provozu elektrických obloukových pecí. Důvody jsou opět obdobné:

- stabilizace napětí (kratší doba tavení, nižší ztráty, menší opotřebení elektrod, omezení flikru)
- kompenzace účinníku
- symetrizace, redukce harmonických (vlivy na DS) [16]



Obr. 5-19 Vliv SVC na napětí[16]

## 6 NÁVRH A REALIZACE HW ČÁSTI DYNAMICKÉHO KOMPENZÁTORU SVC

Hardwarové části kompenzátoru vycházejí částečně s již dříve vytvořených výukových modulů. Na některých modulech byla provedena optimalizace, jiné moduly byly dokončeny a zabudovány do plastových skříněk.

### 6.1 Multifunkční zařízení NI USB-6009

Celé zařízení je řízeno pomocí software LabView prostřednictvím multifunkční karty od firmy National Instruments, která měří a nastavuje požadované veličiny. Karta komunikuje s počítačem pomocí rozhraní USB.



Obr. 6-1 Multifunkční zařízení NI USB-6009 [16]

Zařízení poskytuje celkem 8 analogových vstupů, 2 analogové výstupy, 12 digitálních kanálů a 32-bitový čítač [16].

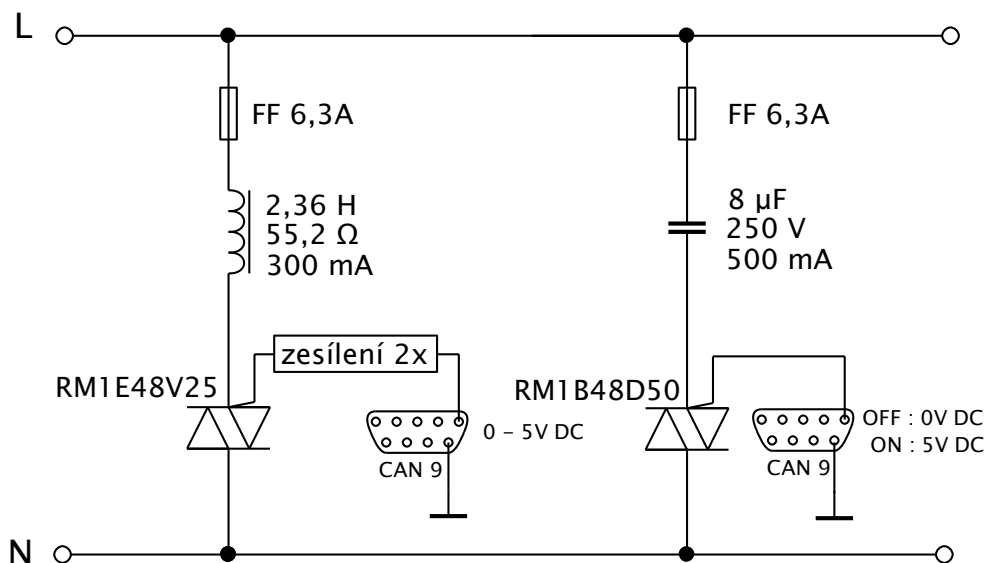
Pro účely konstrukce kompenzátoru lze vybrat několik důležitých parametrů:

- vzorkovací frekvence karty 48kS/s
- analogové vstupy lze konfigurovat jako diferenciální
- vstupní rozsah diferenciálního analogového vstupu je až  $\pm 20$  V
- rozsah analogových výstupů je 0 – 5 V (max. 5mA)
- vše napájeno pouze z USB
- kompatibilní s LabView [16]

Z výše uvedeného popisu je zřejmé, že pro měření a nastavování veličin je nutné použít patřičné převodníky na měřené napětí a proudy resp. zesilovače pro ovládání kompenzátoru.

## 6.2 Modul kompenzace

Jednofázový modul kompenzace typu SVC se skládá ze dvou částí – spínaný kondenzátor a plynule říditelná tlumivka.



Obr. 6-2 Schéma kompenzační jednotky [16]

### 6.2.1 Kompenzační kondenzátor

Kondenzátor má kapacitu 8  $\mu\text{F}$ . Proud kondenzátorem při jmenovitém napětí je cca. 500mA. Ovládání kondenzátoru je zajištěno pomocí polovodičového relé (tzv.SSR) Carlo Gavazzi RM1B48D50.

Důležité vlastnosti relé:

- pracovní napětí 480 V AC
- pracovní proud 50 A AC
- spíná okamžitě po příchodu řídicího signálu („instant on switching“)
- galvanicky oddělený vstup pro řídicí signál
- řídicí napětí pro vypnutý stav 0 – 3 V DC
- řídicí napětí pro zapnutý stav 3 – 32 V DC
- vestavěný ochranný varistor
- galvanicky oddělený řídicí obvod
- použití pro kapacitní, odporovou i induktivní zátěž [16]

Dle parametrů je zřejmé, že relé je pro daný kondenzátor značně předimenzováno. Relé není uzpůsobeno pro spínání v průchodu napětí nulou, kdy nastává nejmenší přechodný jev. Proto musí být spínání v průchodu nulou řešeno programově s přesným načasováním doby sepnutí. Vzhledem k tomu, že kompenzační jednotka nebude vždy řízena přes program a taky pro případy testování je relé dimenzováno tak, aby vydrželo bez poškození i sepnutí kondenzátoru v nejhorším možném okamžiku – průchodu napětí svým maximem. Při měření bylo zjištěno, že nevhodným sepnutím kondenzátoru může krátkodobě procházet maximální proud odpovídající až cca. 20 ti násobku jmenovitého proudu kondenzátoru. Velikost proudu taky závisí na parametrech předřazených modelů vedení, které mohou přechodný jev zmírnit. Na druhou stranu při přechodném jevu může vzniknout rezonance mezi kapacitou kondenzátoru a indukčností modelů

vedení. Tato rezonance se projeví zvýšením napětí na kondenzátoru. Proto je preventivně zvoleno relé na jmenovitou hodnotu napětí 480V.

Potřebný řídicí signál je schopna dodat karta NI-6009 bez dodatečných úprav tudíž je analogový výstup karty zaveden přímo na řídicí svorky relé.

### 6.2.2 Dekompenzační tlumivka

Tlumivka má parametry  $L = 2,36 \text{ H}$ ,  $R = 55,2 \Omega$ , a jmenovitý proud cca. 300 mA. Plynulé řízení průchodu proudu tlumivkou je zajištěno pomocí polovodičového relé Carlo Gavazzi RM1E48V25.

Důležité vlastnosti relé:

- pracovní napětí 480 V AC
- pracovní proud 25 A AC
- řídicí napětí 0 – 10 V DC
- plynule řiditelný úhel sepnutí
- minimální procházející proud 150mA
- galvanicky oddělený vstup pro řídicí signál
- vestavěný ochranný varistor [16]

Toto relé je opět předimenzováno. Na rozdíl od relé, které spíná kondenzátor, je toto plynule řiditelné, kdy napětí 0V odpovídá nulovému a 10 V maximálnímu výkonu. Relé vypíná vždy při průchodu nulou a zapíná v závislosti na vstupním řídicím napětí. V této aplikaci je ovšem jedno velké omezení, kdy relé potřebuje pro svou funkci minimální procházející proud. Hodnota tohoto minimálního proudu je dle katalogových údajů 150mA, po reálném změření je tento proud ještě vyšší. Bylo zjištěno, že pro spolehlivou funkci je minimální procházející proud cca. 185mA, což odpovídá řídicímu napětí 8,5 V. V momentě, kdy je řídicí úhel velmi malý (odpovídá řídicímu napětí cca. 9,7V) již relé přestává vypínat a tyristor vede úplně. Tomuto řídicímu napětí odpovídá proud cca. 255 mA. S těmito omezeními je regulační rozsah indukčnosti pouze 70mA, kde je měřením ověřeno, že relé reguluje plynule. To vše při napájecím napětí 230V.

Plynule řiditelné relé RM1E48V25 potřebuje externí napájení (24V). Řídicí napětí je 0 – 10V, což není schopno zařízení NI USB-6009 poskytnout. Z tohoto důvodu je u relé umístěn modul napájecího zdroje a operačního zesilovače, který je nastaven na zesílení 2.

### 6.3 Proudové a napěťové převodníky

Jako proudové a napěťové převodníky jsou použity produkty výrobce LEM. Převodníky pracují na principu Hallova jevu. Magnetický tok vytvářený primárním proudem je vyrovnáván opačným magnetickým tokem vinutí kolem magnetického obvodu. Každá odchylka od nulového vyvážení vede ke vzniku Hallova napětí. Elektronický obvod ihned dodá sekundární proud  $I_S$  potřebný ke kompenzaci magnetického pole. Tento proud poté protéká rezistorem, na kterém je následně měřen úbytek napětí. [16]

Mezi společné vlastnosti použitých převodníků patří:

- měřený signál a převedený výstupní signál jsou galvanicky odděleny
- velký frekvenční rozsah měření
- linearita < 0,2%
- napájecí napětí  $\pm 15 \text{ V}$

- velká odolnost proti externím rušivým vlivům [16]

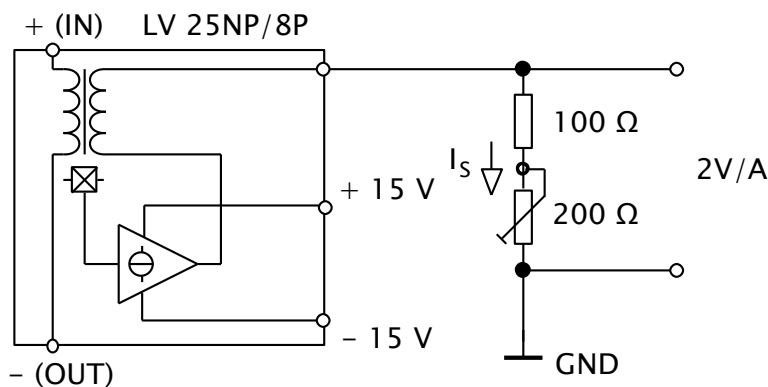
### 6.3.1 Proudový převodník

Pro měření proudu jsou použity proudové převodníky LA 25-NP/SP8.

Důležité vlastnosti relé:

- nominální primární proud 2 A RMS
- měřicí rozsah  $0 \dots \pm 3$  A
- přesnost převodníku  $\pm 0,5$  % [16]

V jedné plastové krabičce jsou umístěny dva proudové převodníky. Dále je zde umístěn napájecí zdroj  $\pm 15$  V. Pro přesné nastavení výstupního napětí převodníku je na výstupu zařazen do série s rezistorem ještě precizní trimr. Proudové převodníky jsou nastaveny na převod 2V/A. Například procházejícím proudem o velikosti 1 A tedy na výstupu vznikne napětí 2 V. Schéma zapojení proudového převodníku je na Obr. 6-3.



Obr. 6-3 Principiální schéma proudového převodníku [16]

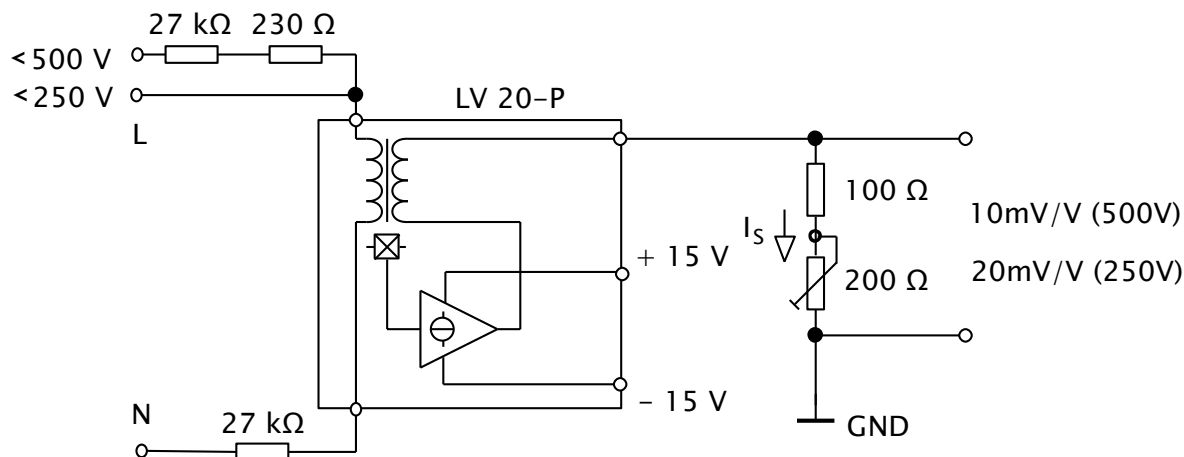
### 6.3.2 Napěťový převodník

Pro měření napětí jsou použity proudové převodníky LV 20-P.

Důležité vlastnosti relé:

- nominální primární proud 10 mA RMS
- měřicí rozsah  $0 \dots \pm 14$  mA
- přesnost převodníku  $\pm 1$  % [16]

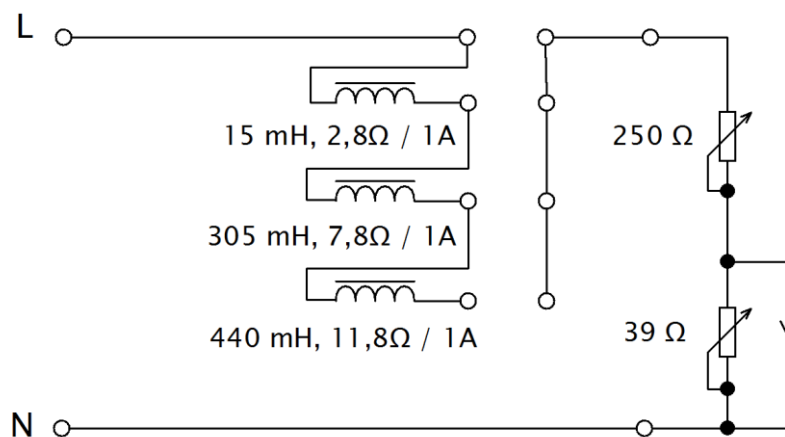
Stejně jako u proudových převodníků jsou umístěny dva napěťové převodníky v jedné krabičce včetně napájecího zdroje. Pro přesné nastavení převodu je opět v sérii s rezistorem precizní trimr. Jak vyplývá z vlastností, primární veličinou je proud. Proto je nutné zařadit do série s primárním vinutím rezistor, kterým bude dle přiloženého napětí protékat proud maximálně 14 mA. Převodníky jsou zkonstruovány jako dvou rozsahové – jeden rozsah 250 V a druhý rozsah 500 V. Dvou rozsahů je dosaženo použitím dvou rezistorů o stejné hodnotě (27 k $\Omega$ ) v sérii. Na Obr. 6-4 je schéma zapojení napěťového převodníku. Rezistor o s odporem 230  $\Omega$  nahrazuje na vyšším rozsahu odpor vinutí převodníku a zajišťuje tak správné měření na obou rozsazích. Převod na rozsahu 250 V je 20 mV/V, na rozsahu 500 V je to potom převod 10mV/V.



Obr. 6-4 Principiální schéma zapojení napěťového převodníku [16]

## 6.4 Zátěž

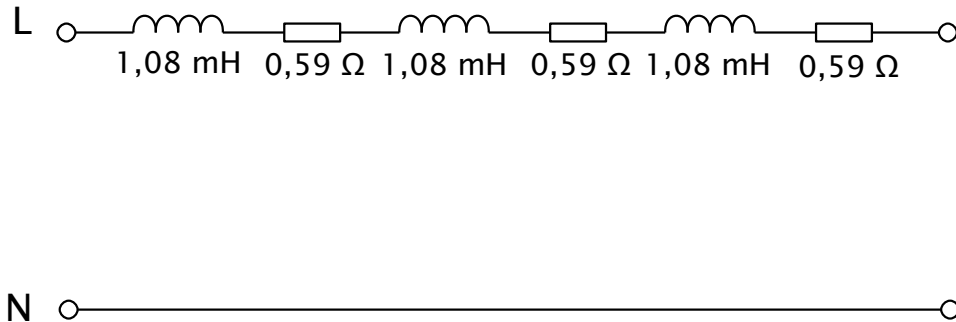
Zátěž je tvořena sériovým spojením výkonových rezistorů a cívek, které lze dle potřeb překonfigurovat. Pro simulování skokové změny odebíraného jalového výkonu je v obvodu umístěn spínač, který přemostňuje jeden z výkonových rezistorů. Celá soustava je nastavena tak, aby bylo možné doregulovat změnu odebíraného jalového výkonu vyrovnat dekompenzační jednotkou popsanou v kapitole 7.3. Schéma zátěže je uvedeno na Obr. 6-5. V modelu je možno zapojit tři různé indukčnosti. Uvedené hodnoty výkonových potenciometrů jsou hodnoty nominální. Konkrétní nastavení bude uvedeno u celkového schématu pracoviště.



Obr. 6-5 Schéma zátěže

## 6.5 Model vedení

Vzhledem k tomu, že experimentálním měřením je odebírán relativně malý výkon, nebylo by možné pozorovat žádné úbytky při připojení přímo k síti. Pro zvýraznění vlivu kompenzace na úbytek napětí na vedení jsou proto před model kompenzace zapojeny modely vedení. Na Obr. 6-6 je znázorněn jeden model vedení. Pro měření bude těchto modulů použito více.



Obr. 6-6 Schéma modelu vedení

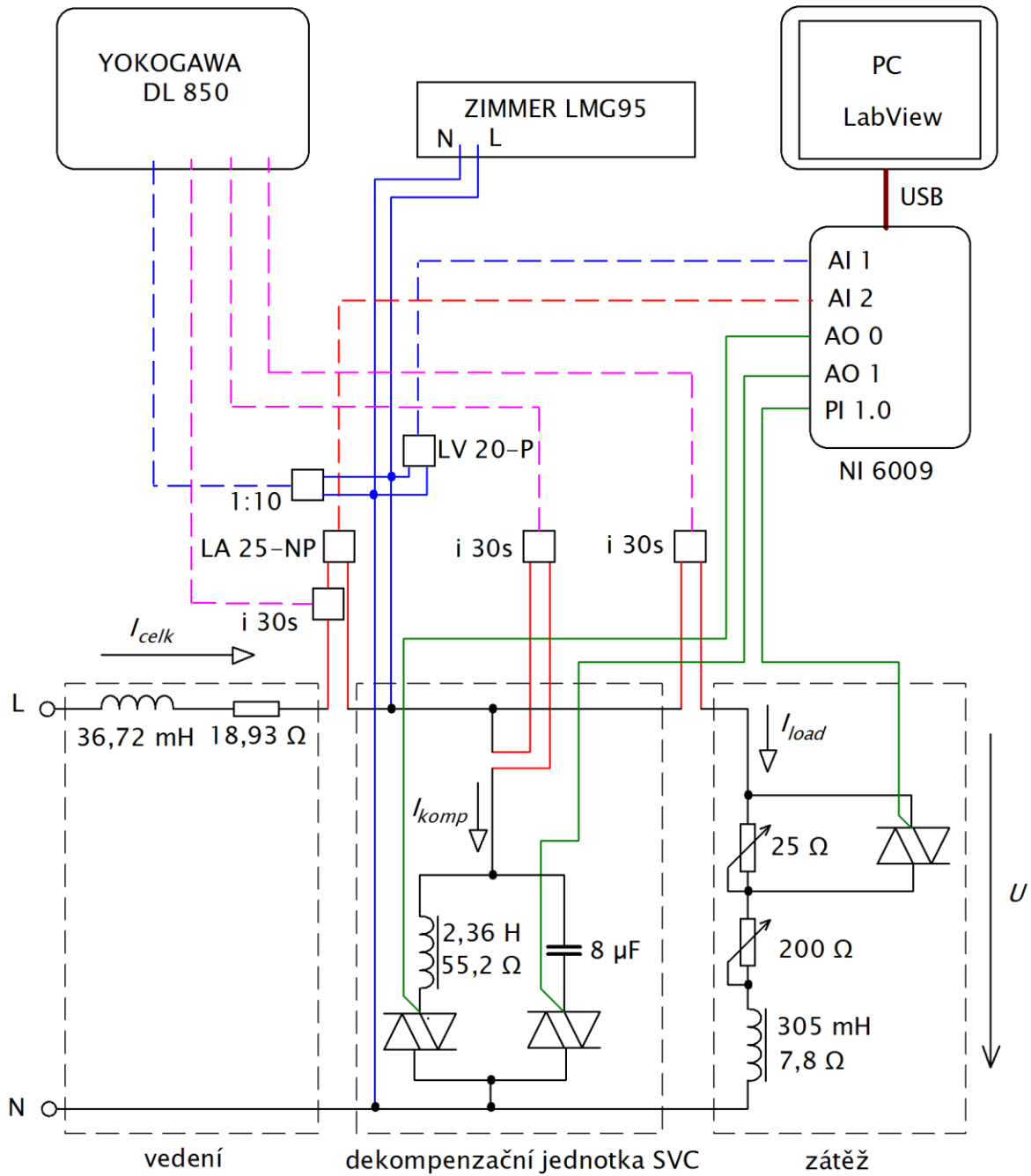
## 6.6 Celková konfigurace pracoviště

Na Obr. 6-7 je kompletní schéma obsahující všechny prvky nutné pro provoz a otestování vlastností vytvořené dynamické kompenzace. Části schématu, které slouží k zaznamenávání měřených veličin a měření flikru, budou popsány v následující kapitole. Čárkovaně jsou ve schématu vedeny signály, které byly nejdříve upraveny pomocí převodníků.

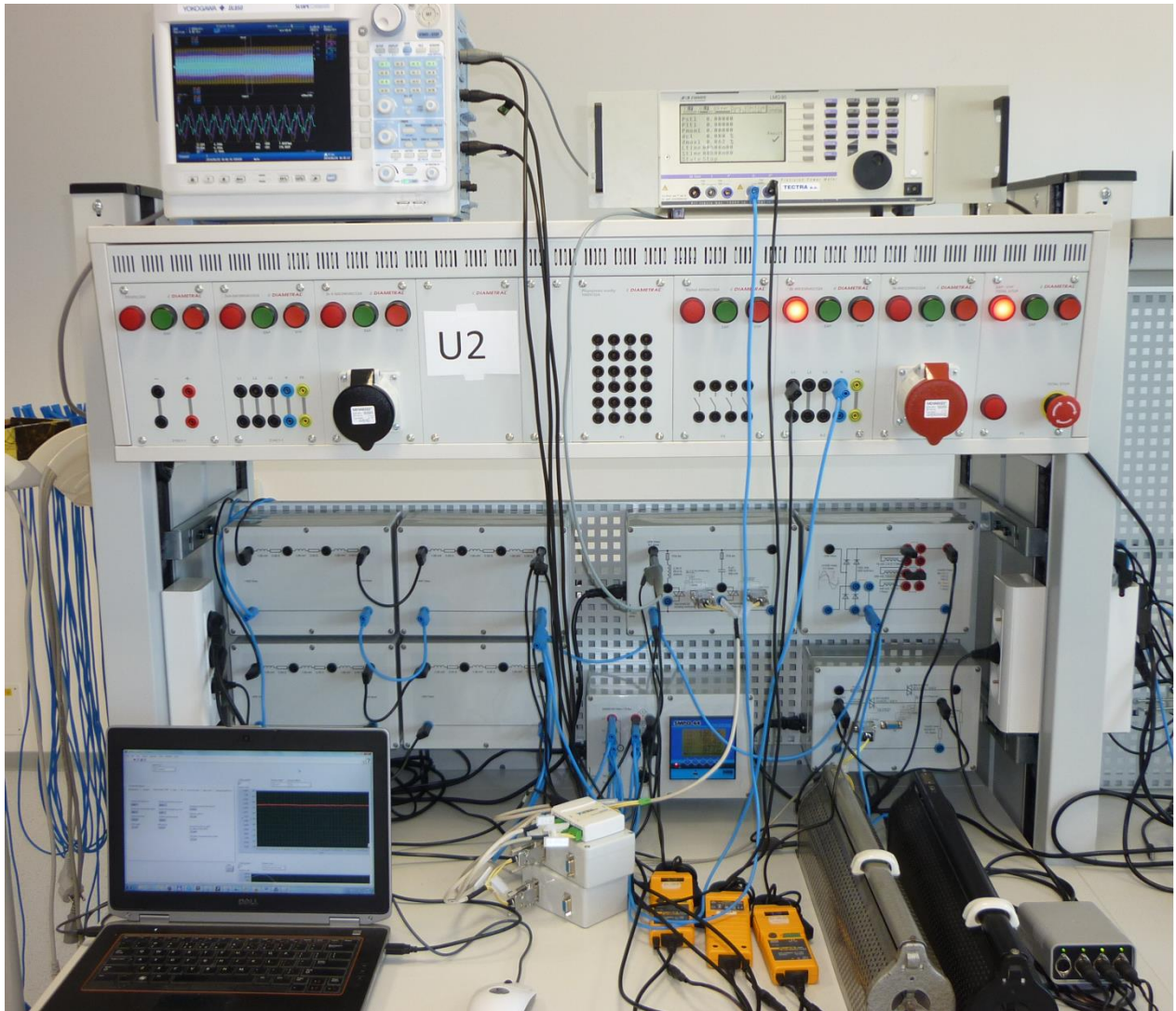
Celková indukčnost napájecího vedení poskládaného z dříve popsaných modulů je 36,72 mH odpor potom 18,93  $\Omega$ .

Na konci vedení je měřen proud tekoucí do zátěže a kompenzační jednotky. Tento proud je měřen převodníkem LA 25-NP/SP8. Signál z tohoto převodníku je veden do karty NI-6009, konkrétně do vstupu AI 2, který je konfigurován jako diferenciální. V místě připojení zátěže a dekompenzační jednotky je dále umístěno měření napětí opět pomocí převodníku LV-20 P. Signál je veden do karty na vstup AI 1, který je opět konfigurován jako diferenciální. Ovládání tlumivky je připojeno na analogový výstup karty AO 0. Ovládání kondenzátoru je připojeno na druhý analogový výstup karty, kterým je AO 1.

Na dynamické zátěži je použita tlumivka s indukčností 305 mH a činným odporem 7,8  $\Omega$ . V sérii s tlumivkou jsou zapojeny výkonové potenciometry, které jsou nastaveny na hodnotu 25  $\Omega$  a 200  $\Omega$ . Potenciometr 25  $\Omega$  je „zkratován“ pomocí polovodičového relé RP1A23D3. Tím vznikne skoková změna odebíraného výkonu. Relé je připojeno k digitálnímu výstupu PI 1.0 karty NI-6009 a ovládané jednoduchým podprogramem, kdy je relé cyklicky spínáno a rozpínáno. Tento program je samozřejmě nezávislý na hlavním programu ovládajícím kompenzátor. Toto řešení je pouze provizorní pro účely měření flikru a konečný program nebude tento podprogram obsahovat.



Obr. 6-7 Kompletní schéma pracoviště



Obr. 6-8 Fotografie pracoviště

Fotografie celého pracoviště je uvedena na Obr. 6-8. Na levé straně stolu je umístěn notebook s ovládacím SW LabView, vedle jsou na sobě poskládány převodníky a karta NI-6009. Dále jsou zde 3 žluté proudové převodníky pro zaznamenávání průběhů na osciloskop. Vedle proudových převodníků potom jsou výkonové potenciometry tvořící část dynamické zátěže.

Na stěně laboratorního stolu jsou zleva umístěny 4 modely vedení. Použito je však ještě dalších 9 modelů, které jsou z druhé strany stolu a nejsou na fotografii zachyceny. Vedle modelů vedení je umístěna kompenzační jednotka a pod ní model s panelovým analyzátozem kvality elektrické energie SMPQ44. V pravém horním je druhá část dynamické zátěže – modul s tlumivkami. Pod tímto modulem je v levém dolním rohu modul s polovodičovým relé RP1A23D3, který slouží ke spínání zátěže.

Záznamový osciloskop YOKOGAWA je umístěn nad ovládacím panelem stolu na levé straně. Analyzátor ZES ZIMMER LMG95 pro měření flikru je na pravé straně od osciloskopu.

## 7 ŘÍDÍCI PROGRAM

Program pro řízení kompenzátoru je realizován na bázi virtuální instrumentace v programovém prostředí LabVIEW.

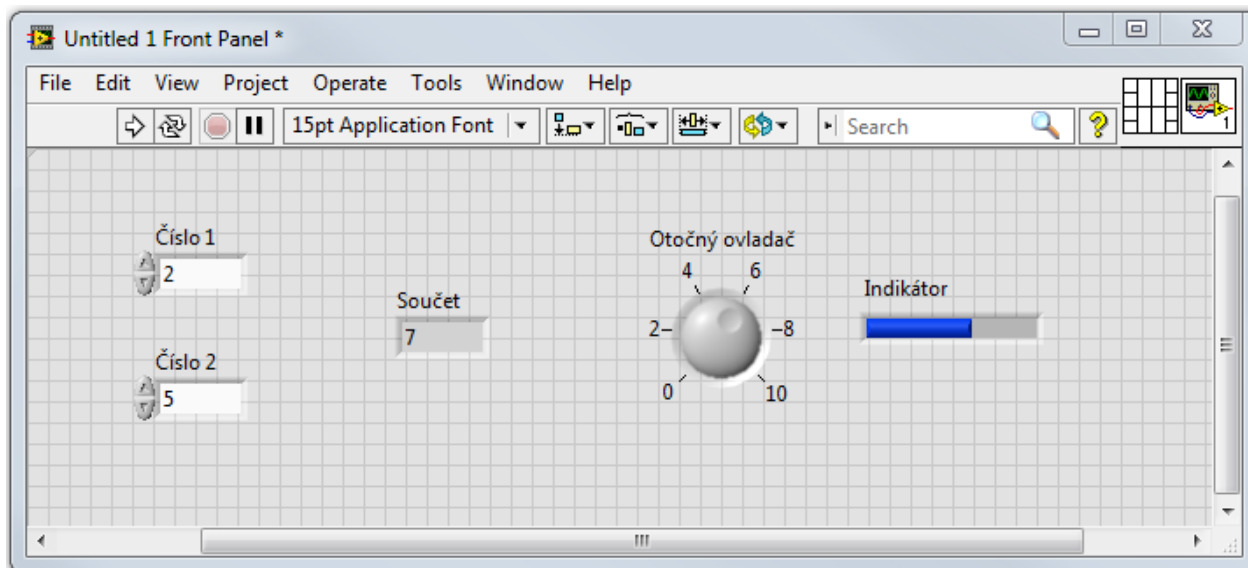
### 7.1 Obecně o programu LabVIEW

LabVIEW zkráceně LV je plně vybavený programovací jazyk, který je produktem firmy National Instruments. Jedná se o grafický jazyk, který je unikátní ve způsobu, jakým je kód konstruován i ukládán. Programování neprobíhá psaním textových příkazů, ale schematicky pomocí funkcí, které jsou propojovány pomocí „vodičů“. Takový způsob programování přispívá v neposlední řadě k jednoduššímu pohledu na tok procházejících dat. [16]

Programy vytvořené v LV se nazývají virtuální instrumenty (VI), protože jejich vzhled a provoz může připomínat fyzické nástroje, jako jsou například osciloskopy nebo multimetry. LV obsahuje komplexní sadu nástrojů pro získávání, analýzu, zobrazování a ukládání dat, stejně jako nástroje pro ladění programu a odstraňování chyb. [16]

Programování probíhá ve dvou částech. První je přední panel (front panel), ve kterém je tvořeno uživatelské rozhraní programu. Zde jsou vytvořeny ovládací prvky a indikátory. Ovládací prvky jsou tlačítka, vypínače, voliče hodnot atd. Indikátory jsou grafy, LED diody a další zobrazovače. Druhým je blokové schéma (block diagram), ve kterém je vytvářena funkcionality programu. Uživatel hotového programu pracuje tedy pouze s předním panelem a o blokové schéma se nemusí zajímat. [16]

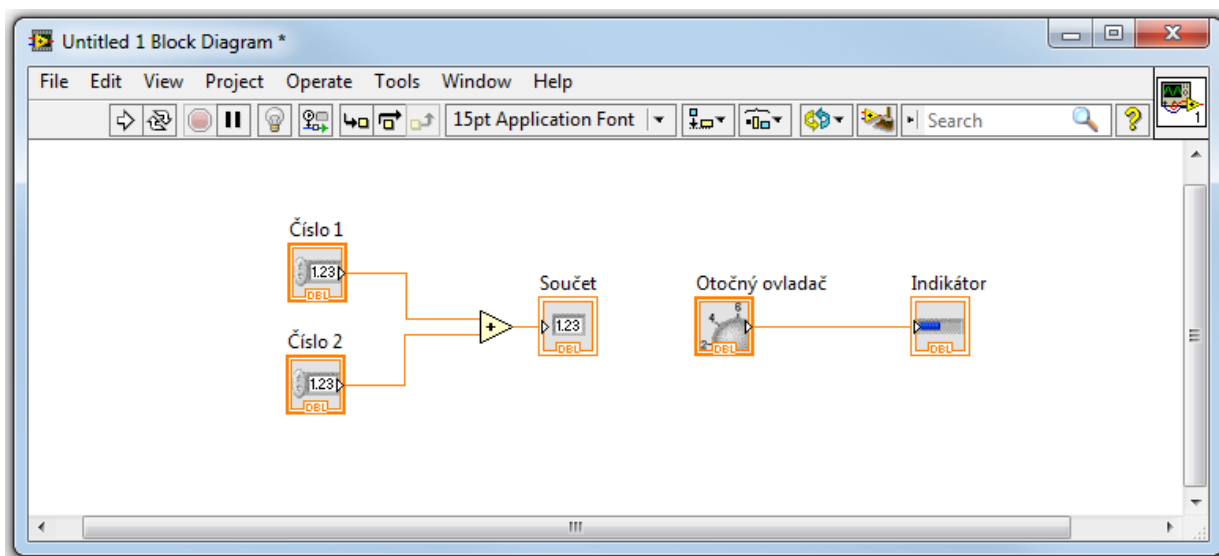
Na Obr. 7-1 je příklad čelního programu v LabVIEW. Pro jednoduchou demonstraci propojení předního panelu a blokového schématu je zde proveden součet dvou čísel. Dále je zde otočný ovladač, který je propojen přímo na indikátor.



Obr. 7-1 Příklad předního panelu programu v LabVIEW

Na Obr. 7-2 je příklad blokového schématu. Indikátory i ovládací prvky mají popisy, podle kterých jsou identifikovány. Po změně popisu v jedné části programu se automaticky změní název i v druhé části. Na jednoduchém součtu dvou čísel lze taky jednoduše demonstrovat snadnou kontrolu nad posloupností vykonávání programu v případě vzájemného propojení. V tomto případě se provede součet, až budou dostupná obě čísla (číslo 1 a číslo 2). Po provedení

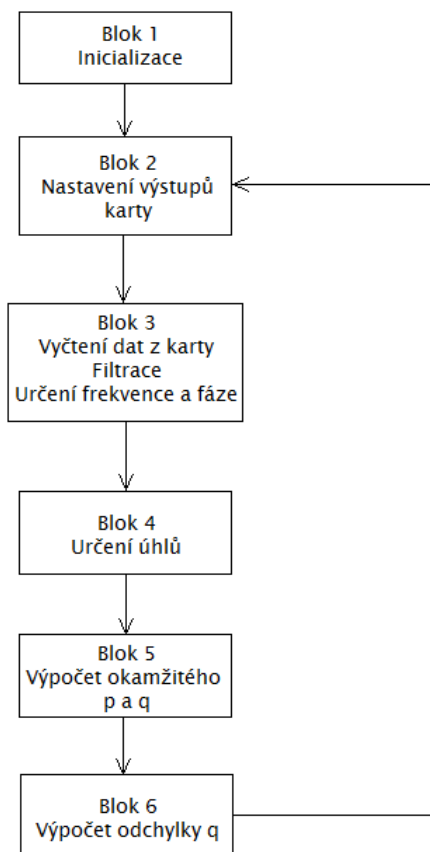
součtu bude hodnota vypsána na zobrazovač s názvem součet. V druhém případě nelze stanovit, jestli se nejdříve přenese hodnota z otočného ovladače na indikátor, nebo vykoná součet dvou čísel..



Obr. 7-2 Příklad blokového schématu programu v LabVIEW

## 7.2 Hlavní smyčka programu

Hlavní smyčka programu je sestavena v několika oknech, které se vykonávají v pořadí jaké je uvedeno na Obr. 7-3.



Obr. 7-3 Blokový diagram programu

### 7.2.1 BLOK 1

V bloku 1 nazvaném inicializace se do programu nahrají výchozí potřebné parametry pro běh programu, s tím že některé je možné uživatelsky měnit. Po spuštění programu již není možné tyto parametry měnit.

Mezi tyto parametry patří:

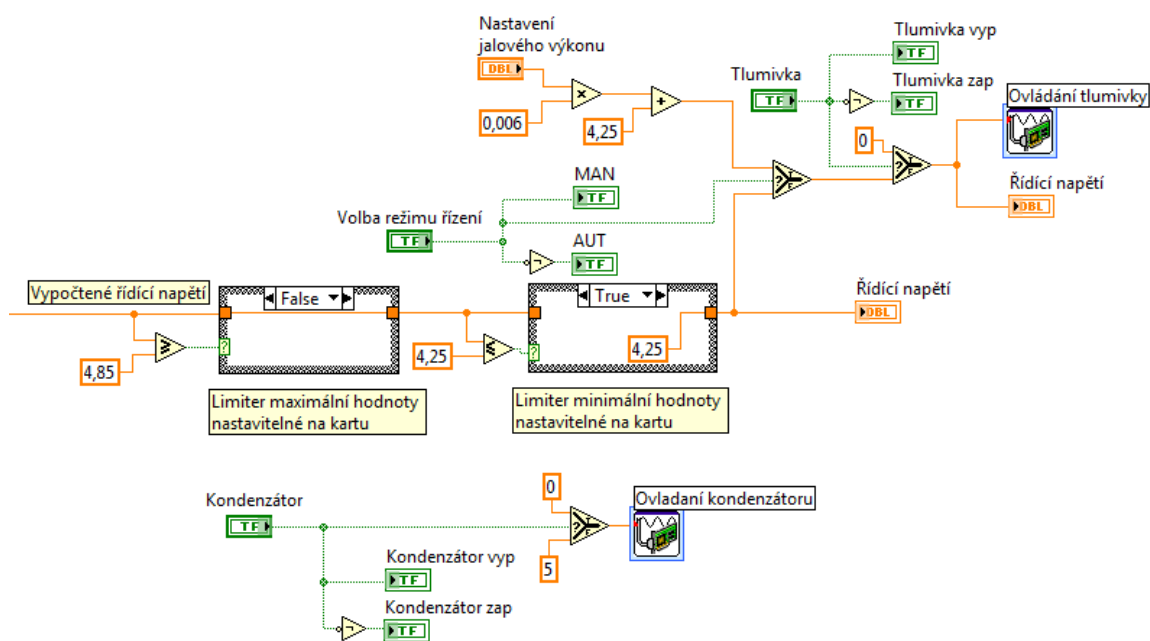
- vzorkovací frekvence
- počet načítaných vzorků
- převod napěťového převodníku
- převod proudového převodníku
- délka záznamů grafických zobrazovačů

U některých parametrů je omezen rozsah zadávaných hodnot. Tento blok programu se vykoná pouze jednou a to hned po spuštění

### 7.2.2 BLOK 2

V tomto bloku je umístěna funkce volby mezi automatickým a manuálním řízením kompenzátoru, kdy po přepnutí do manuálního režimu je možnost nastavovat pevně hodnotu jalového výkonu.

Dále jsou v tomto bloku do karty NI - USB6009 předávány parametry pro nastavení řídicího úhlu tyristoru. Do tohoto bloku jsou předávány hodnoty, které jsou vypočteny v průběhu programu, proto jsou zde po spuštění nastaveny výchozí hodnoty. Programově je zde ošetřeno, aby byla nastavena hodnota pro řízení tyristoru taková, kdy je zabezpečena předem definovaná reakce tyristoru (rozsah regulace 70 mA) viz. kapitola o dekompenzační jednotce. Pokud se do tohoto bloku dostane hodnota jiná, než je dovolená, zajistí limity, aby byla nastavena hodnota maximální nebo naopak minimální možná. Dále je zde umístěno ovládání kompenzačního kondenzátoru, který je ovládán pouze tlačítkem. Spínání kondenzátoru v průchodu napětí nulou se nepodařilo spolehlivě realizovat. Na Obr. 7-4 je zobrazen blok 2 tak, jak je vytvořen v LabVIEW.



Obr. 7-4 Skutečná implementace bloku 2

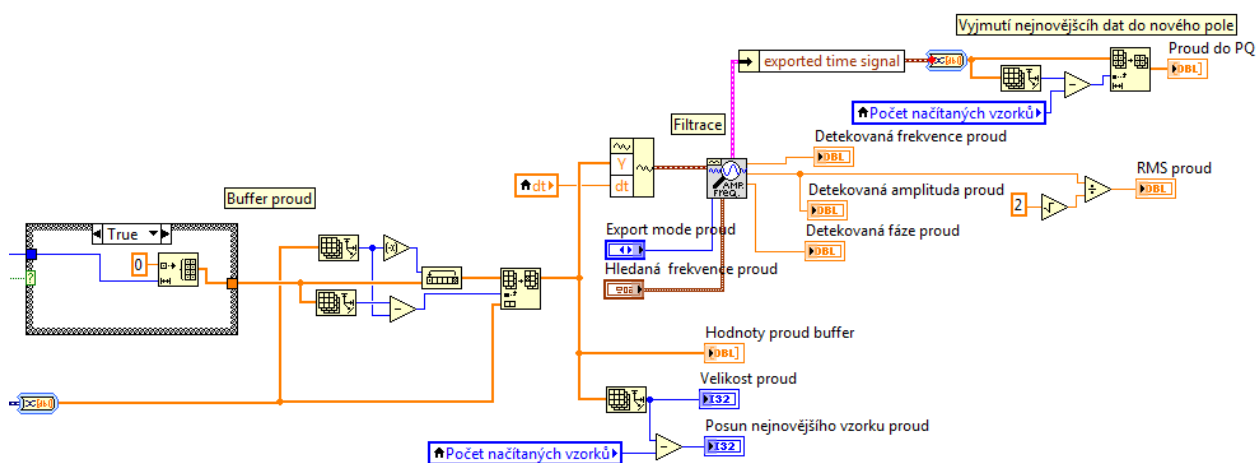
### 7.2.3 Blok 3

Zde probíhá vyčítání – předávání naměřených dat z karty. Signál je upraven na skutečné hodnoty vynásobením převodu převodníků.

Signál musí dále být filtrován, protože měřené průběhy mohou být značně zkreslené. Z důvodu filtrace signálu – určení první harmonické (50 Hz), určení frekvence, amplitudy a hlavně fáze je zde použita funkce Extract Single Tone Information. Tato funkce ovšem pro správnou funkci potřebuje pracovat s několika periodami signálu. Počet načítaných vzorků je standardně nastaven na 150, což při vzorkovací frekvenci 20 kS/s dává délku jednoho načteného záznamu 7,5ms. Při frekvenci 50 Hz je perioda 20 ms. Počet načítaných vzorků lze bez problémů zvýšit, celý proces určení okamžitého výkonu by se však značně zpomalil. Z tohoto důvodu je ponechána krátká délka záznamu a pro dosažení více period pro určení parametrů je vytvořen zásobník. V zásobníku jsou uchovávána data z posledních několika načtených bloků. Zásobník se po příchodu nových dat orotuje a nejnovější data jsou přidána na konec zásobníku. Nejstarší data jsou odstraněna. Z tohoto zásobníku, který už má např. 45ms může již být signál přiveden do funkce Extract Single Tone Information. Po průchodu filtrem jsou pro další výpočty použita pouze nejnovější data. V praxi je nutnost tohoto zásobníku velmi omezujícím faktorem pro „rychlost“ regulátoru. Informace o změřených úhlech napětí je získávána až se zpožděním délky zásobníku. Regulační zásahy musí být tedy velmi plynulé, kvůli opožděné informaci o „zpětné vazbě“.

V tomto bloku jsou dále vypočteny délky zásobníku v milisekundách pro informaci obsluhy a taky pro další zpracování dat.

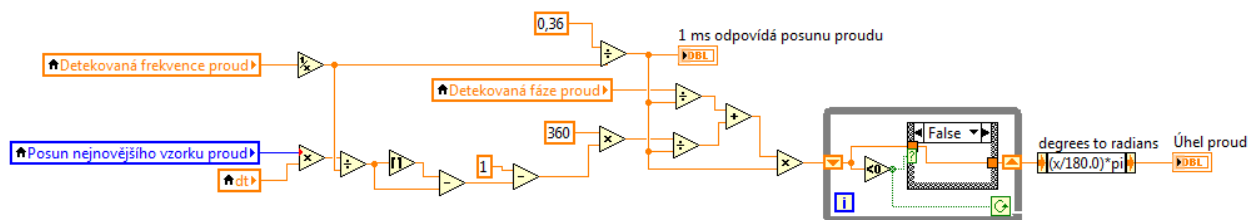
Na Obr. 7-5 je skutečná implementace části bloku 3. Konkrétně se jedná o část, kde je zpracováván signál proudu. Napěťová část je totožná, avšak má jinou délku zásobníku. Dále zde není uvedeno vyčítání z karty. Filtrovaná data z této části programu vystupují v poli hodnot označeném „Proud do PQ“



Obr. 7-5 Skutečná implementace bloku 3 - proudová část

### 7.2.4 Blok 4

V předchozím bloku byla určena fáze (úhel) načítaného signálu (konkrétněji prvního vzorku celého zásobníku). Vzhledem k tomu, že zpracováváný signál byl v zásobníku na konci, je nutné stanovit správný úhel těchto dat. Skutečná implementace v programu je uvedena na Obr. 7-6. Opět je zde zobrazena proudová část. Výstupem z tohoto bloku je úhel prvního vzorku proudu.



Obr. 7-6 Skutečná implementace bloku 4 - proudová část

### 7.2.5 Blok 5

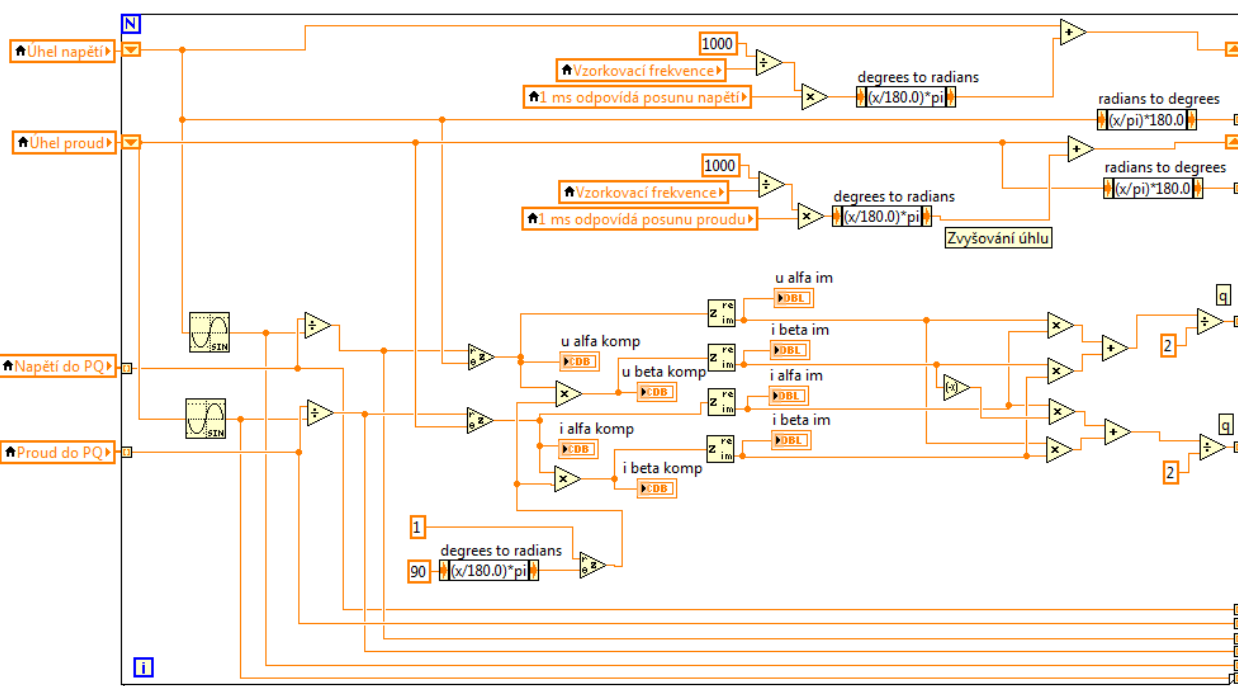
Zde je proveden výpočet okamžitých výkonů způsobem popsaným v kapitole o implementaci jednofázové PQ teorie. Vzhledem k tomu, že výpočet je nutný vypočítat pro každou změřenou hodnotu, je zde použita smyčka typu For Loop. Při správném nastavení se tato smyčka vykonává právě tolikrát, jak velké je pole přiváděných hodnot. Do tohoto bloku vstupují veličiny:

- naměřená data proudu
- naměřená data napětí
- úhel prvního vzorku proudu
- úhel prvního vzorku napětí

Při každém oběhu smyčky For Loop je zadávána další hodnota proudu a napětí, a zároveň je zvyšován úhel prvotního vzorku (opět vypočten na základě frekvence měřeného signálu a frekvence vzorkovací).

Výstupní hodnoty p a q jsou opět v poli. Následně jsou data filtrována dolno-propustným filtrem prvního řádu. Filtr je zde zařazen pro vyhlazení signálu. Pro filtr je použita funkce IIR Filter.

Na Obr. 7-7 je uvedeno skutečné provedení části bloku 5 konkrétně výpočet výkonů.



Obr. 7-7 Skutečná implementace bloku 5 - PQ teorie

### 7.2.6 Blok 6

Vypočtené hodnoty  $p$  a  $q$  jsou zde přivedeny jako pole hodnot. Pro případ řešeného kompenzátoru je však takové množství hodnot zbytečné. Polovodičové relé je schopné změnit nastavení pouze jednou za půl periody (10 ms). Z tohoto důvodu je zde pole hodnot zredukováno – průměrováním na jedinou hodnotu.

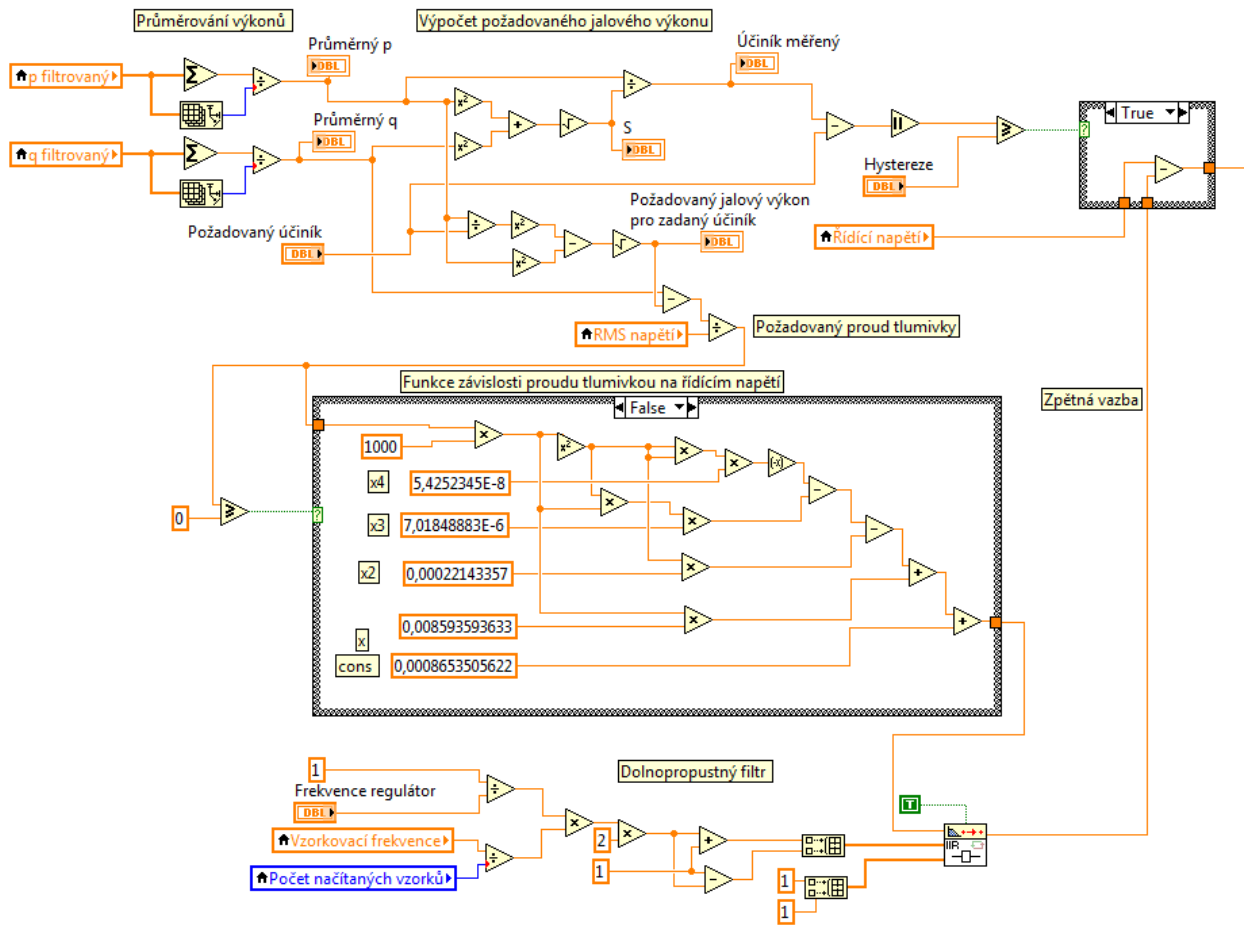
Od toho momentu již není pracováno s polem hodnot, ale pouze jedinou hodnotou. Ze změřeného činného výkonu a požadovaného účinníku je vypočítán požadovaný zdánlivý výkon. Z hodnoty změřeného činného výkonu a požadovaného zdánlivého výkonu je vypočten potřebný jalový výkon. Tento jalový výkon je porovnán se změřeným jalovým výkonem. Z odchylky je následně vypočtena odchylka potřebná k doregulování. Tato odchylka je přepočtena na řídicí napětí, které je nastavováno na výstup karty. Je nutné vyzdvihnout, že kompenzátor reguluje na hodnotu požadovaného účinníku, nikoliv na požadovaný jalový výkon, nebo síťové napětí.

Aby bylo zajištěno přesné nastavení proudu tlumivkou (nastaveném jalovém výkonu) v závislosti na řídicím napětí, byla tato závislost změřena. Pro tuto závislost byla stanovena funkce, podle které je vypočteno přesné řídicí napětí v závislosti na potřebném proudu tlumivkou.

Řídící napětí je dále filtrováno dolno-propustným filtrem kvůli nutnosti plynulejšího regulačního zásahu.

Dále je zde v tomto bloku implementována hystereze – necitlivost kompenzátoru v případě malé změny účinníku. Standardně je tato hodnota nastavena na 0,002. V praxi to znamená, že v případě požadované hodnoty účinníku 0,98 se skutečný účinník bude pohybovat mezi 0,978 a 0,982.

Skutečná implementace celého bloku 6 je na Obr. 7-8.

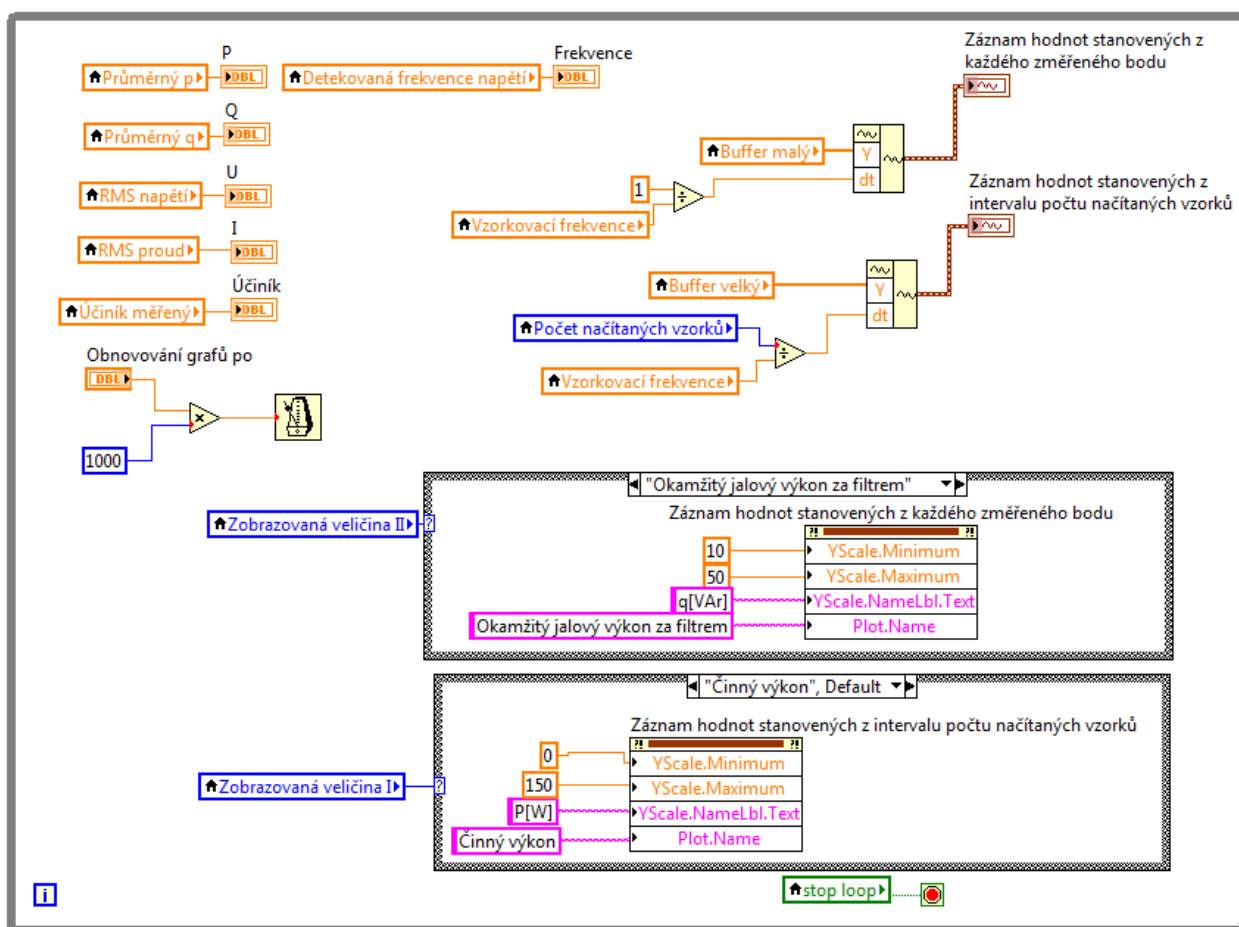


Obr. 7-8 Skutečná implementace blok 6

### 7.3 Vedlejší smyčka programu

Aby nebyl zpomalován běh hlavní (výpočetní) smyčky programu, je vypisování grafů řešeno jako paralelně běžící smyčka. Tato smyčka se vykonává jednou za nastavitelný čas 100 ms až 0,5 s. Do tohoto okna jsou předávána data z hlavní smyčky, kde jsou data ukládány do zásobníků.

Celkem lze vypisovat změřené údaje ve dvou grafech. Jeden slouží k vypisování aktuálně změřených dat – z bloku, kde se vypočítává okamžitý činný a jalový výkon. Délka zobrazeného záznamu je zde maximálně 0,5 s. V druhém okně je možné vypisovat hodnoty měřeného činného výkonu, jalového výkonu, řídicího napětí tlumivky a účinníku. U grafů jsou automaticky měněny rozsahy, popisy os a názvy křivek.

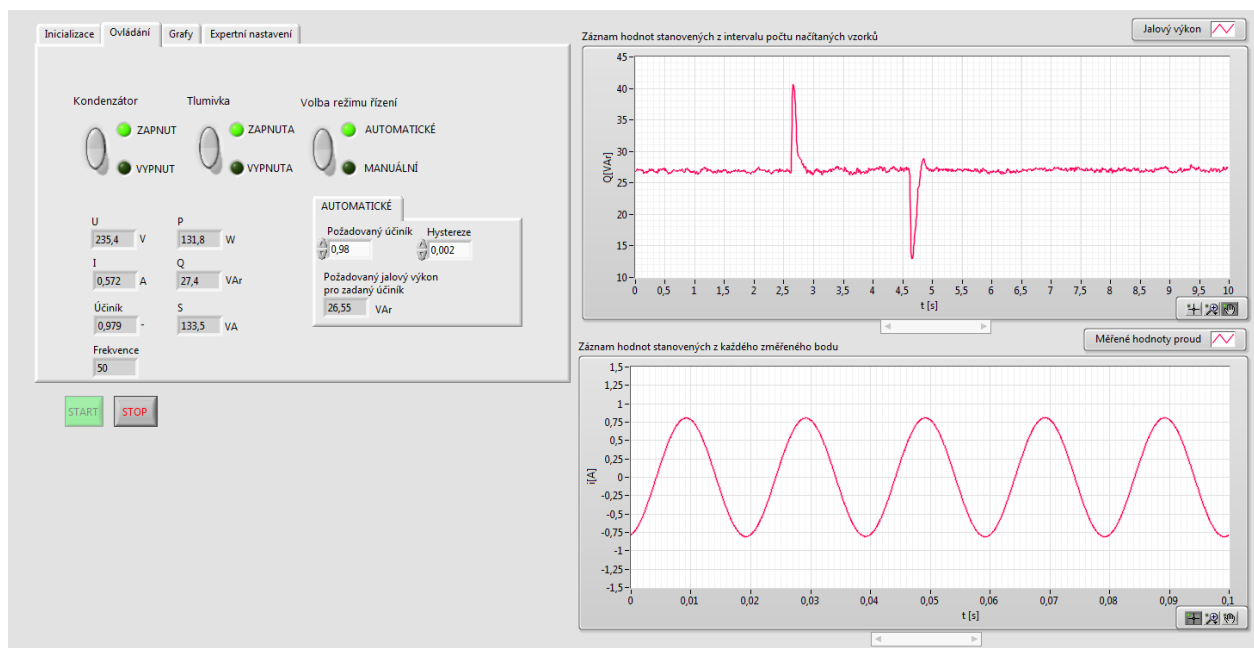


Obr. 7-9 Kompletní podprogram vykreslování grafů

### 7.4 Ovládací panel programu

Postupně budou popsány jednotlivé funkce uživatelského rozhraní. Program je nastaven tak, aby byla regulace jalového výkonu co nejrychlejší při zachování potřebné stability. Při spuštění programu tedy není nutné zadávat žádné parametry a kompenzátor bude po stisknutí tlačítka START regulovat automaticky na hodnotu účinníku 0,98. V případě požadavku změny parametru je nutné v některých případech tuto změnu provést ještě před stisknutím tlačítka START.

Uživatelské rozhraní programu je uvedeno na Obr. 7-10. Na levé straně jsou umístěny v záložkách jednotlivé ovládací a nastavovací prvky. Na pravé straně potom jsou dva grafické zobrazovače. Běh hlavního programu se spouští tlačítkem START a ukončuje tlačítkem STOP.



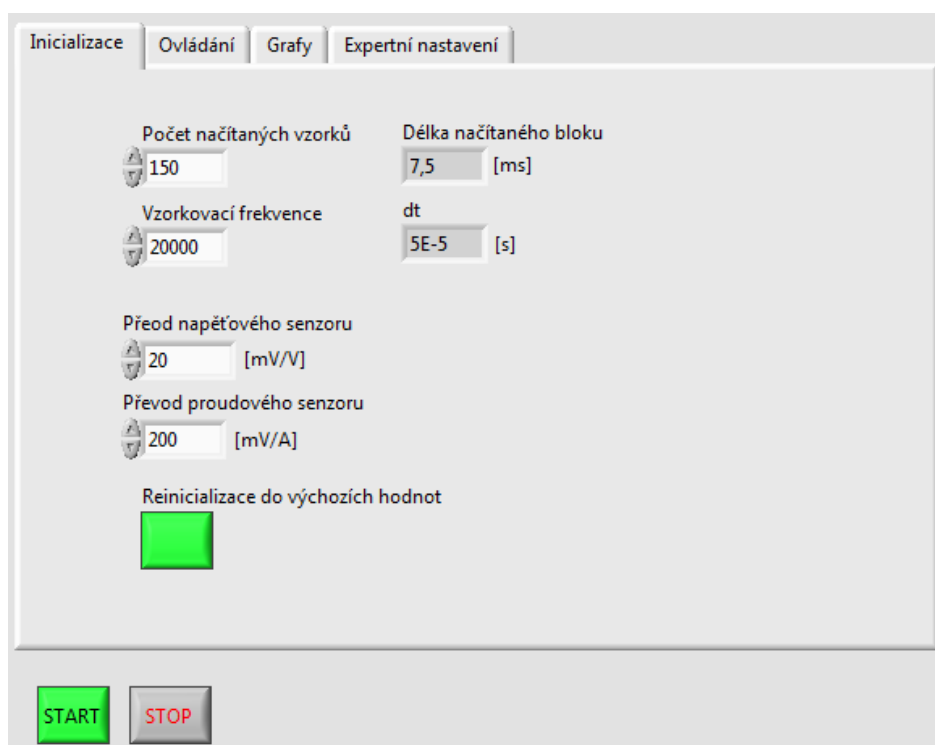
Obr. 7-10 Celkový pohled na uživatelské rozhraní programu

### 7.4.1 Karta inicializace

V záložce inicializace je možno nastavit vzorkovací frekvenci a počet vzorků načítaných z karty. Po spuštění programu se zde zobrazí, jaký časový interval odpovídá stanovenému počtu vzorků. Dále je zde zobrazen časový interval mezi jednotlivými měřeními vzorky.

Napětí a proudy jsou měřeny přes převodníky, proto je zde možnost nastavit odpovídající převody. Tlačítko reinicializace slouží k nastavení přednastavených hodnot do celého programu.

Po stisknutí tlačítka START již není možné jakoukoliv hodnotu z této záložky měnit.



Obr. 7-11 Záložka inicializace

## 7.4.2 Karta ovládání

V tomto místě je možné spínat kompenzační kondenzátor i dekompenzační tlumivku. Kompenzační jednotka může fungovat i ve statickém režimu – pevně nastaveném jalovém výkonu kompenzátoru. Proto je zde umístěna možnost mezi automatickým a manuálním způsobem řízení. Při automatickém režimu řízení je možnost zadat požadovaný účinník a hysterezi. V tomto režimu je dále zobrazována požadovaná hodnota jalového výkonu. V případě volby manuálního režimu řízení se zde zobrazí posuvný ovladač, kterým je možné nastavit statickou hodnotu jalového výkonu dodávaného kompenzátozem.

V levé spodní části jsou uvedeny měřené veličiny – napětí, proud, činný výkon, jalový výkon, zdánlivý výkon, účinník a síťová frekvence.

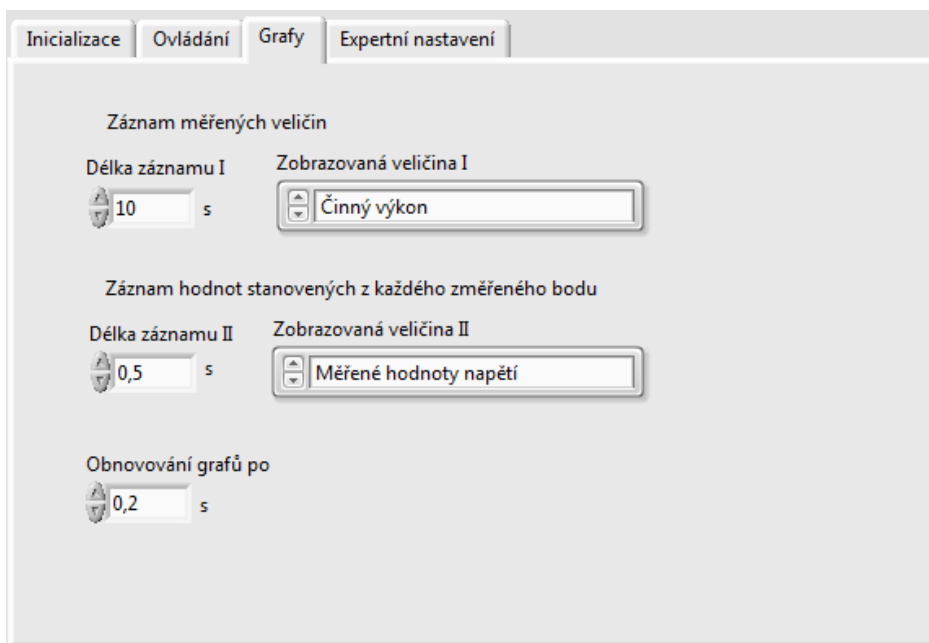


Obr. 7-12 Záložka ovládání

## 7.4.3 Karta grafy

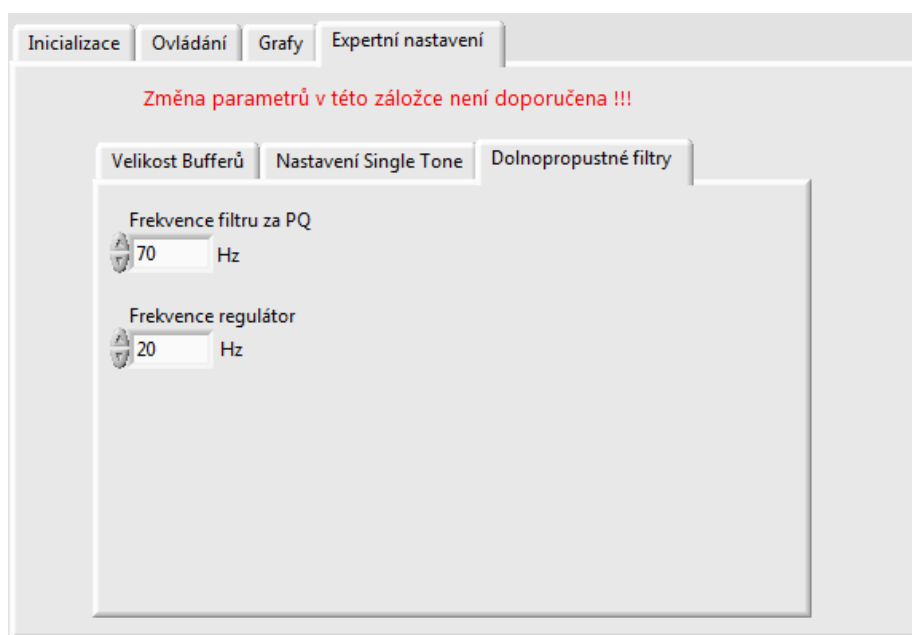
Jak bylo uvedeno dříve, k zobrazování měřených veličin slouží dva grafy. Graf nazvaný „záznam měřených veličin“ může zobrazovat činný výkon, jalový výkon, řídicí napětí tlumivky a účinník. Do tohoto grafu je po jednom oběhu hlavní smyčky přidána vždy jedna nová hodnota. Graf nazvaný „záznam hodnot stanovených z každého změřeného vzorku“ může zobrazovat měřené hodnoty napětí, měřené hodnoty proudu, okamžitý činný a okamžitý jalový výkon. Do tohoto grafu je po jednom oběhu hlavní smyčky přidáno vždy takový počet hodnot, jaký je vyčítán z karty. Délka záznamů zobrazovaných v grafech nastavitelná před spuštěním hlavní smyčky programu. Frekvence obnovování grafů je nastavitelná i při běhu programu.

Pro detailnější pohled na zobrazovaný průběh je nutné program zastavit a lze využít palety v pravém spodním rohu. Zde je možné vybrat možnosti přiblížení. Při kliknutí pravým tlačítkem myši do oblasti grafu a následném vybrání možnosti export data to excel lze zobrazená data jednoduše exportovat pro další zpracování např. v excelu.



Obr. 7-13 Záložka grafy

V kartě expertní nastavení jsou parametry, které jsou důležité pro správnou funkci automatické regulace jalového výkonu. Tyto parametry jsou nastaveny tak, aby byla kompenzace co nejrychlejší a nejstabilnější. Proto není doporučeno tyto parametry měnit. Volí se zde velikost zásobníků pro funkci filtrace měřených signálů a určování fáze. Dále je možné měnit parametry filtrů



Obr. 7-14 Záložka expertní nastavení

## 8 OVĚŘENÍ FUNKCE KOMPENZÁTORU

Měření funkčnosti kompenzační jednotky bylo průběžně prováděno pomocí grafů tvořených přímo v ovládacím programu. Průběhy okamžitých výkonů, účinník a řídicí napětí tlumivky jsou vykresleny z ovládacího programu. Pro nezávislé zjištění vlivu kompenzátoru dále byly provedeny záznamy napětí a proudů pomocí osciloskopu. Dále byl měřen flickr. Schéma připojení osciloskopu a měřiče flickru je uvedeno na Obr. 6-7. Napětí bylo měřeno pouze jedno a to na konci modelu vedení, kde byla umístěna zátěž a kompenzátor. Proudů potom byly měřeny 3 a to:

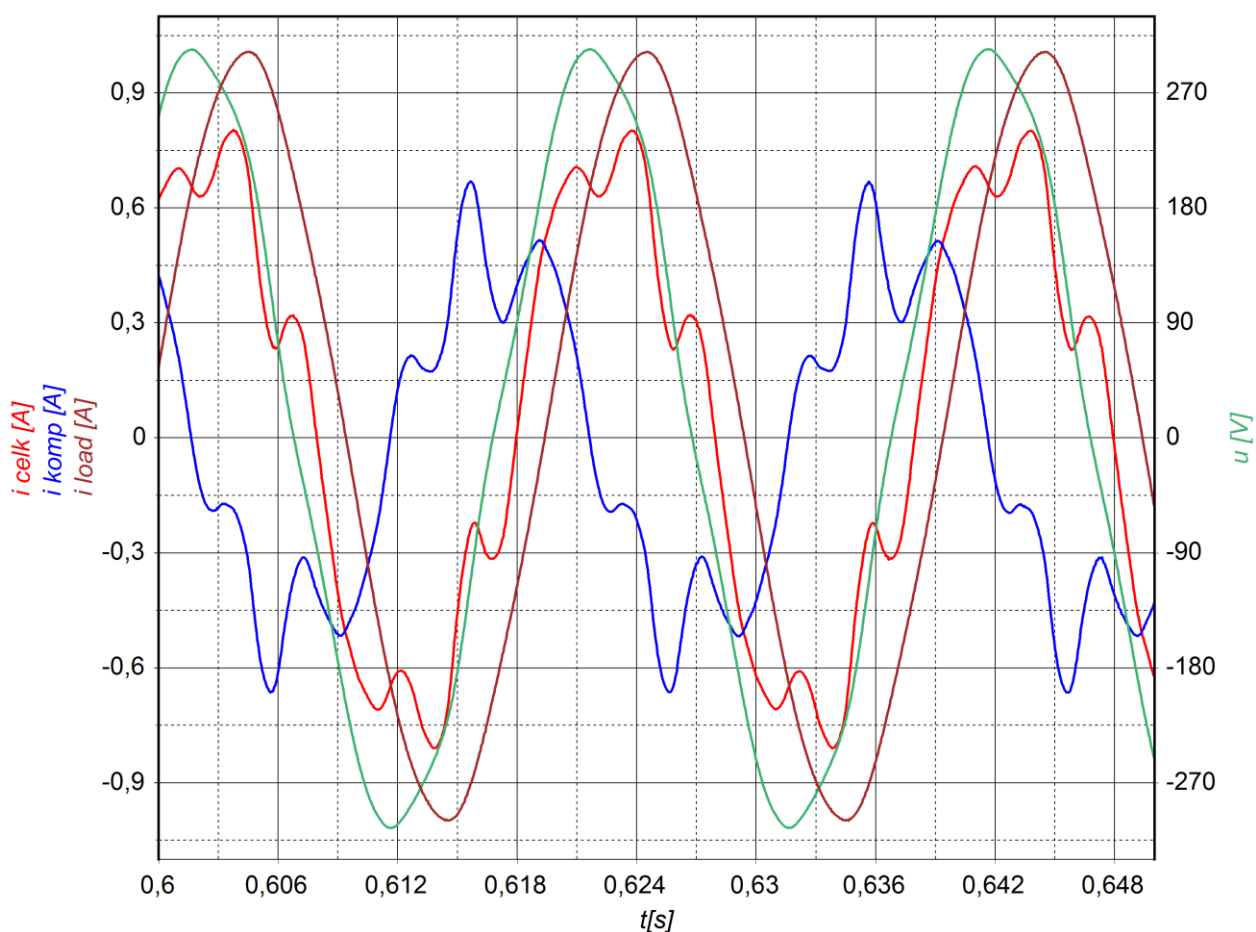
- $i_{load}$  jako proud zátěže
- $i_{komp}$  jako proud kompenzátoru
- $i_{celk}$  jako celkový proud tj.  $i_{load} + i_{komp}$

Záznamy byly pořizovány pomocí osciloskopu YOKOGAWA DL850. Vzorkovací frekvence u záznamů je 20kS/s. Délka záznamů 5s. Proudů byly měřeny pomocí sond FLUKE i30s. Napětí bylo měřeno pomocí sondy 1:10.

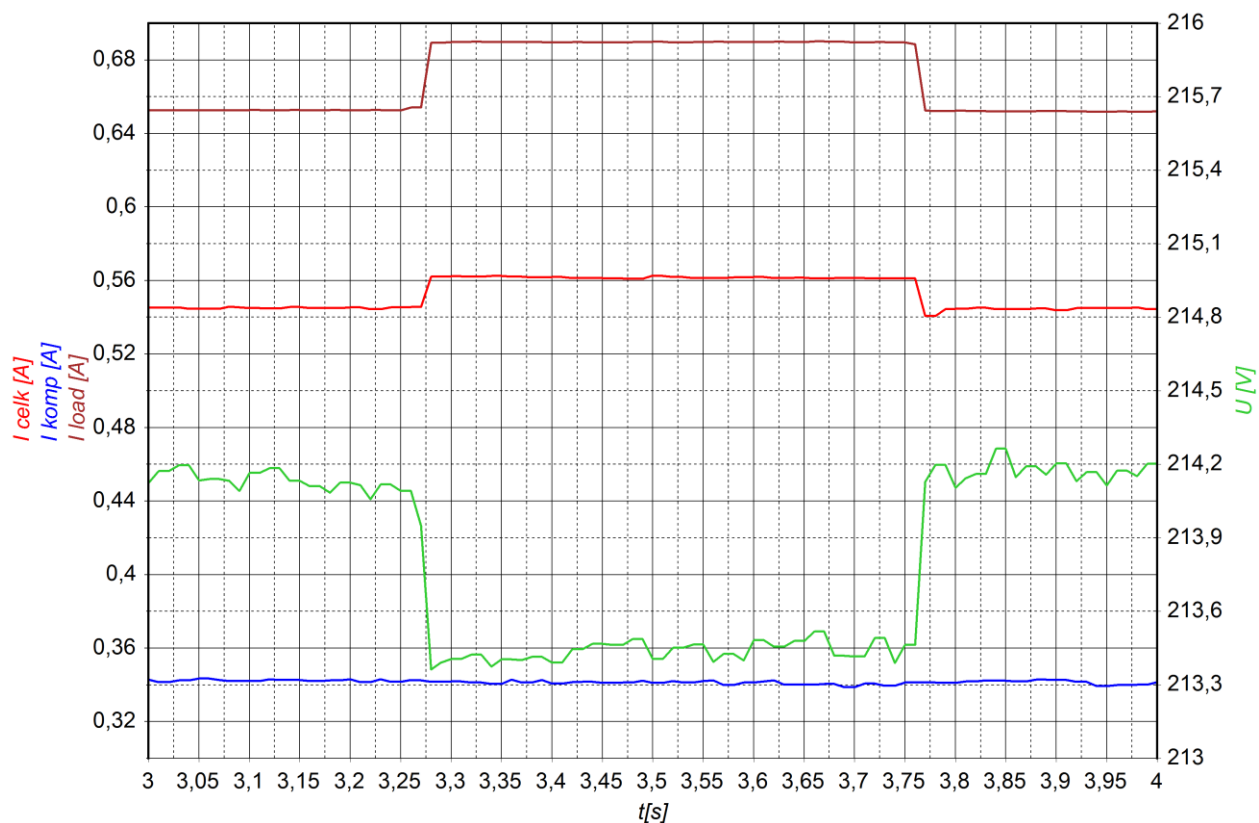
Všechny měřené průběhy, kde jsou prezentovány změna odebíraného jalového výkonu jsou odměřeny na jedné, stejně nastavené dynamické zátěži. Časové osy jednotlivých průběhů nejsou nijak vzájemně provázány.

## 8.1 Záznamy napětí a proudů

Na Obr. 8-1 jsou vykresleny průběhy napětí a proudů ve vykompenzovaném stavu. Zeleně je zde vyznačen průběh měřeného napětí. Průběh napětí není čistě sinusový a je vlivem přítomnosti vyšších harmonických složek napětí deformován. Maximální hodnota napětí dosahuje hodnoty cca 305V, což odpovídá efektivní hodnotě 215 V. Protékající proud tedy způsobuje na modelu vedení úbytek cca 15 V. Hnědou barvou je zde znázorněn proud induktivního charakteru tekoucí do zátěže. Modrou barvou je znázorněn proud kompenzační jednotky, kapacitního charakteru. Zkreslení proudu způsobuje kondenzátor, který „zesiluje“ deformaci napájecího napětí. Tato vlastnost kondenzátoru vychází z definice proudu jím protékaného ( $i=du/dt$ ). Červená křivka značí celkový odebíraný, již vykompenzovaný proud.



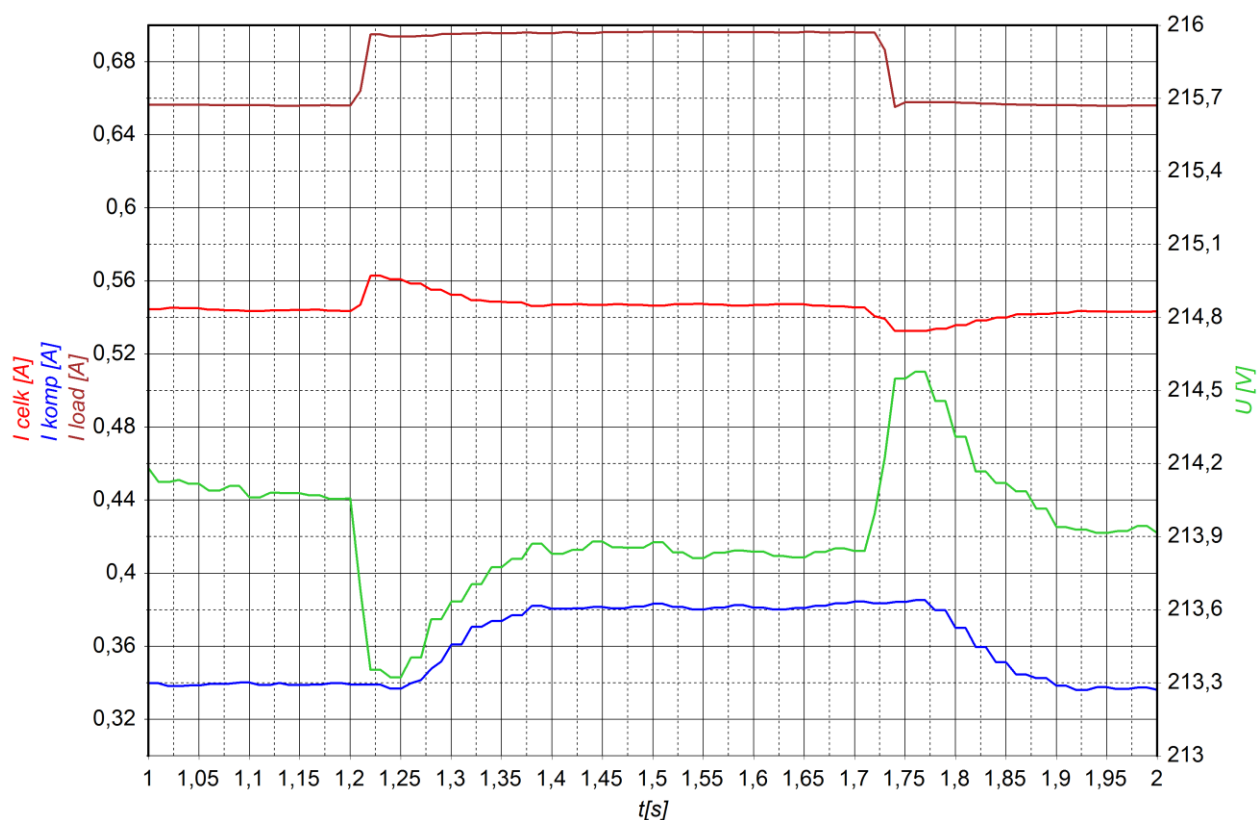
Obr. 8-1 Průběhy napětí a proudů - vykompenzováno



Obr. 8-2 Dynamická změna zátěže – nekompenzováno

Na Obr. 8-2 je průběh efektivních hodnot měřených veličin při dynamické změně odebíraného výkonu pro případ změny zátěže s frekvencí 1 Hz (přepnutí zátěže po 0,5s). V tomto případě byla kompenzační jednotka v manuálním režimu, kdy je pevně nastavena hodnota kompenzačního proudu. Proto je zde průběh proudu kompenzace téměř konstantní (mění se pouze v závislosti na kolísání napětí). V čase  $t=3,27$  s nastala změna proudu tekoucího do zátěže (hnědá křivka), zároveň pokleslo napětí. Zvýšení proudu o 40 mA vyvolalo úbytek cca 0,7 V. Červená křivka představuje celkový odebíraný proud. V čase  $t=3,76$  s nastala opět změna proudu tekoucího do zátěže. Situace se opakuje s tím rozdílem, že nastalo snížení proudu o cca 50mA a tím pádem napětí vzrostlo o cca 0,7 V. Z průběhu napětí lze dále vypožorovat, že není stabilní a stále mírně kolísá (v rozmezí cca 150 mV).

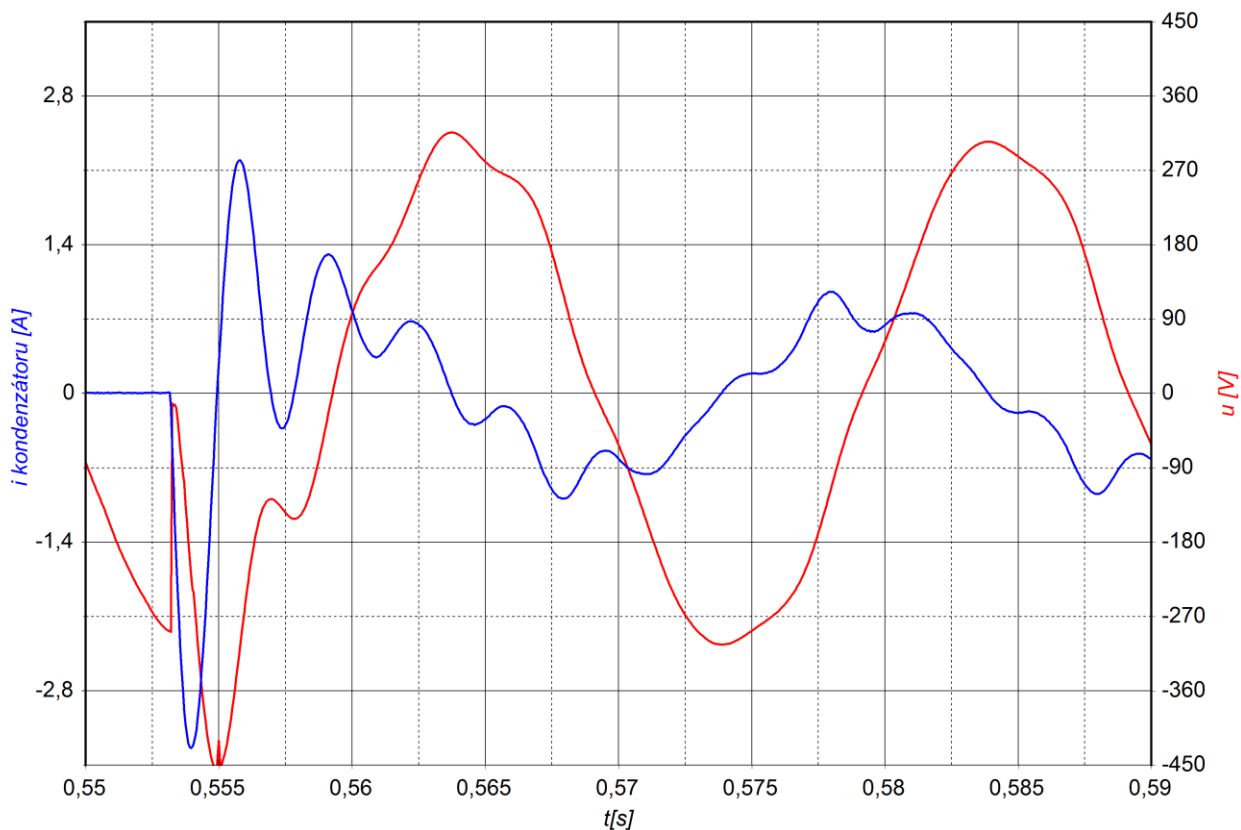
Průběhy na Obr. 8-3 představují stejný případ jako Obr. 8-2 s tím rozdílem, že kompenzace je již v automatickém režimu. V čase  $t=1,2$  s nastala změna (zvýšení) proudu tekoucího do zátěže. Napětí opět kleslo o 0,7 V. V čase  $t=1,25$  s tedy 50 ms od vzniku změny zátěže začal kompenzátor zvyšovat dodávaný kapacitní proud (modrá křivka). Postupné nastavování kompenzačního proudu trvalo cca 130 ms. V čase  $t=1,4$  s se již proud kompenzace přestal zvyšovat, celkový odebíraný proud (červeně) a napětí byly téměř stejné jako před změnou zátěže. Celková doba vykompenzování změny proudu trvala cca 180 ms. V čase  $t=1,7$  s nastala opět změna odebíraného proudu (snížení). Doba kompenzačního zásahu byla stejná jako v případě náhlého zvýšení proudu. Rozdíl je pouze v tom, že vlivem překompenzování vzrostlo napětí o cca 0,7 V.



Obr. 8-3 Dynamická změna zátěže – kompenzováno

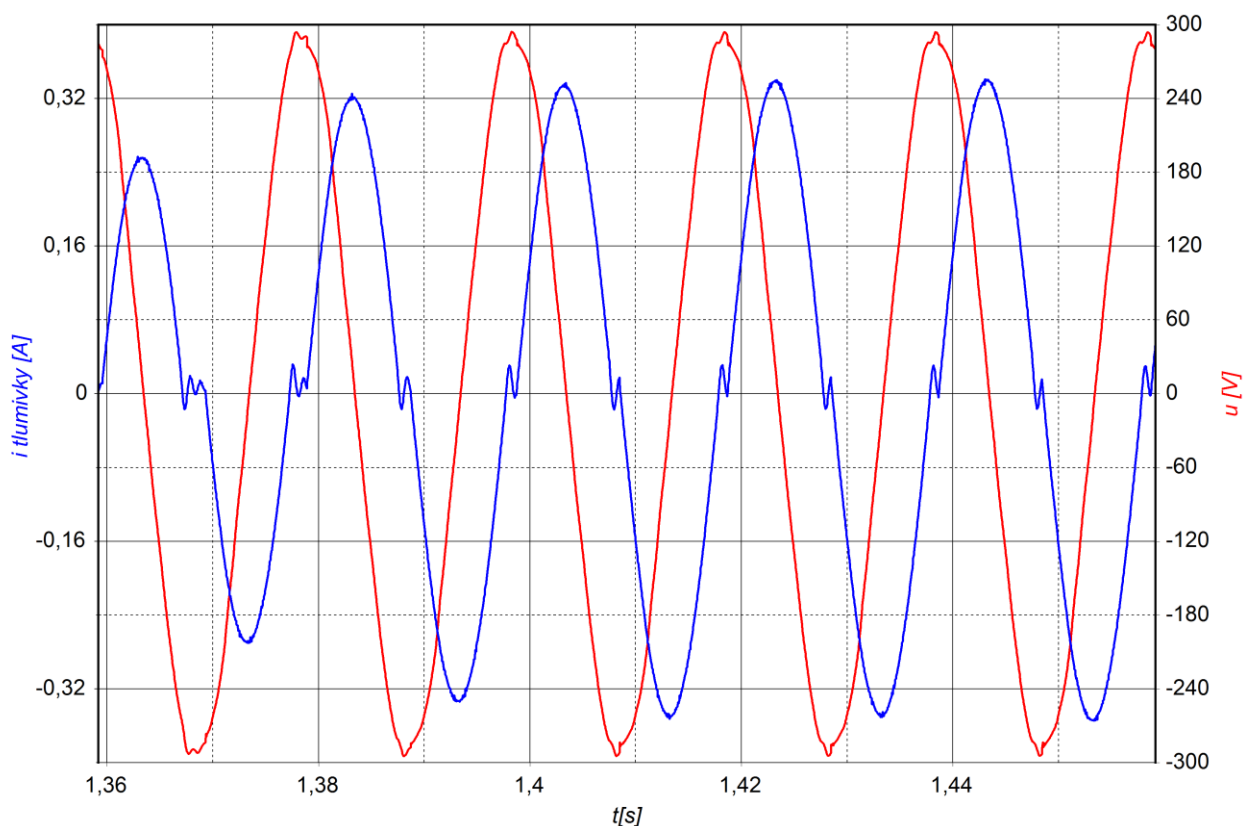
Na rozdíl od stavu na Obr. 8-2 tedy vzniká kolísání napětí nad i pod ustálenou hodnotu. Mezi extrémními změnami napětí je rozdíl 1,2 V. Zvýšení resp. snížení napětí trvá v nejprudší změně cca 100 ms, celkem potom cca 200 ms. Z pohledu doby trvání změny mají tyto pulzy frekvenci 5 až 10 Hz. Jak bylo uvedeno v kapitole o flikru, je lidské oko nejcitlivější na změny světelného toku s frekvencí 8 až 9 Hz. Frekvence napěťových pulzů způsobená kompenzátořem spadá do tohoto nejcitlivějšího pásma. Lze tedy předpokládat, že kompenzace bude flikr zvyšovat.

Na Obr. 8-4 je zobrazen průběh proudu kondenzátorem po zapnutí v hodnotě napětí cca - 270 V. Lze pozorovat, že ihned po připojení klesne z důvodu proudového rázu napětí téměř až k nule. Důvod poklesu je především ten, že proud protéká přes model vedení. Úbytkem napětí je však proudový ráz utlumen. Jak bylo popsáno v kapitole o kompenzační jednotce, nastala zde pravděpodobně rezonance s indukčností modelu vedení a napětí dosáhlo hodnoty až - 450 V. Proud kondenzátoru dosáhl špičkové hodnoty cca - 3,4 A, což je zhruba 4 násobek jmenovitého proudu. Průběh napětí nemá i po odeznění přechodného děje sinusový průběh.



Obr. 8-4 Průběh proudu po připojení kondenzátoru

Na Obr. 8-5 je zobrazen průběh proudu dekompenzační tlumivkou. Je zde názorně vidět, jak proud při průchodu nulou po zákmitech přestane protékat. K průchodu proudu začne znovu docházet, v závislosti na řídicím napětí. Na Obr. 8-5 je nejdříve řídicí napětí relé nastaveno na 8,5 V. Tomu odpovídá maximální proud cca 250 mA. V průběhu půlperiody, která začíná v čase  $t=1,378$  s dojde k nastavení řídicího napětí na 9,7 V. V následující půlperiodě je již maximální hodnota proudu cca 340 mA. Tento proud se následně ještě mírně zvýší. Dva nastavené proudy zároveň odpovídají maximům regulačního rozsahu proudu tlumivkou. Rozdíl je v absolutních hodnotách 90 mA v efektivní hodnotě je to potom 65mA. Zákmity proudu způsobují mírnou deformaci napětí v průchodu napětí maximální hodnotou.



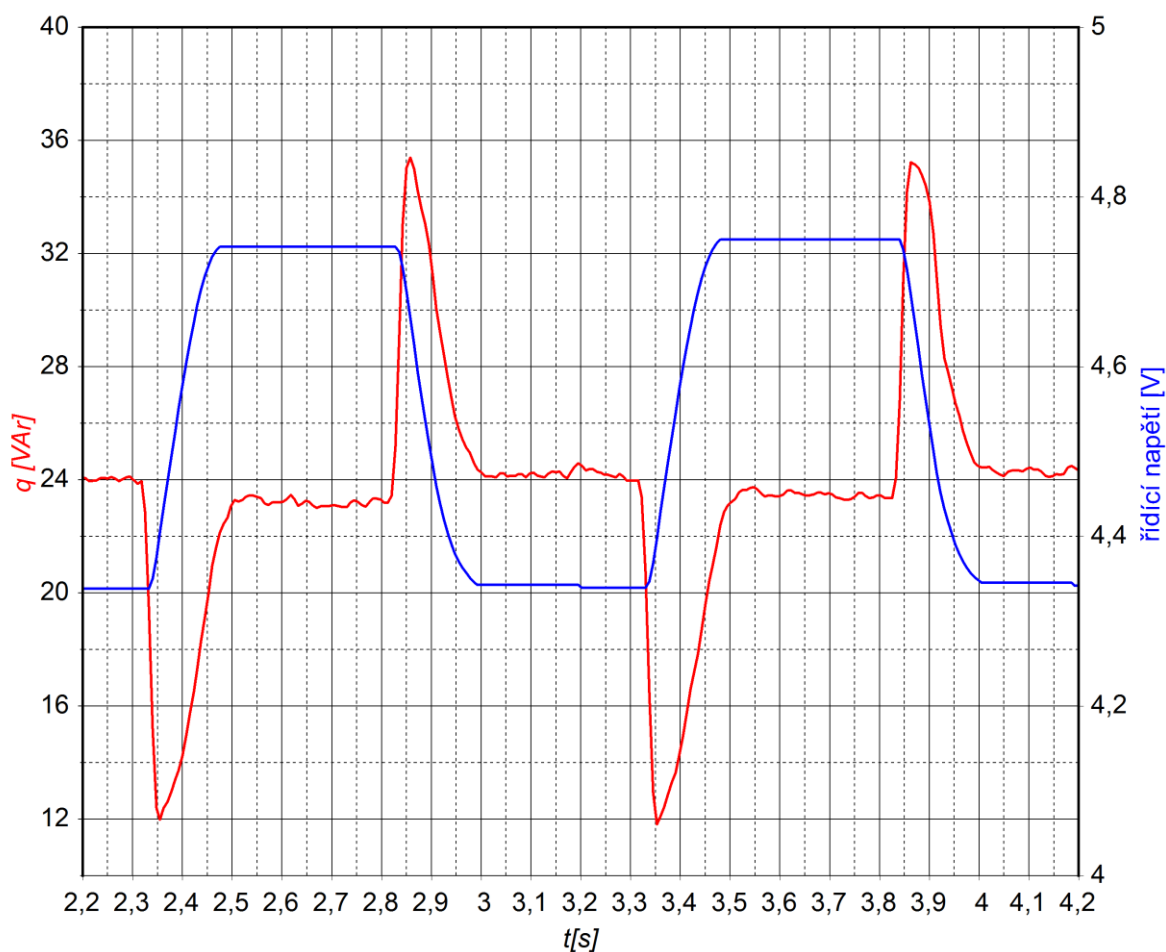
Obr. 8-5 Změna protékajícího proudu dekompenzační tlumivkou

## 8.2 Záznamy okamžitých výkonů a řídicího napětí

Obr. 8-6 zobrazuje průběhy změřené přímo řídicím programem. Skoková změna zátěže odpovídá hodnotě cca. 12 VAr. Vykompenzování změny trvá cca. 180ms. Dále je zde vyneseno řídicí napětí tlumivky. Řídicí napětí je zde poloviční (zesíleno 2x je až v kompenzační jednotce). V čase  $t=2,3$  s došlo k poklesu odebíraného jalového výkonu a po cca 10 ms je již zvyšováno řídicí napětí pro zvýšení jalového výkonu resp. proudu dekompenzační tlumivkou. Změna je plynulá nikoliv skoková. Tato postupná změna je dána filtrem, který zajišťuje, aby regulátor „nekmital“.

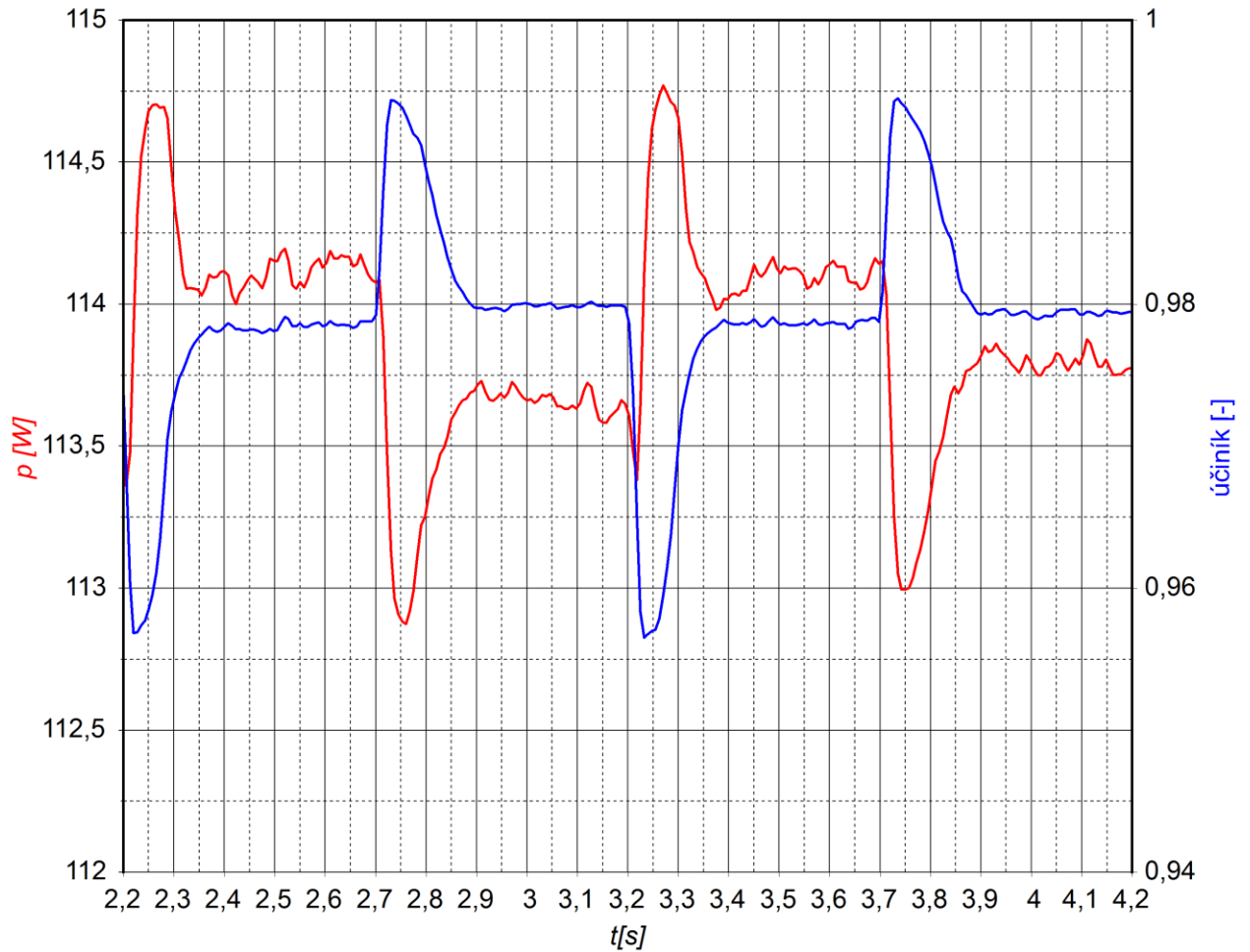
Zde se projevuje problém, se zpožděným zjištěním fázového posuvu proudu popsaného v kapitole o řídicím programu. Nastavení nového řídicího napětí tedy pro případ na Obr. 8-6 trvá cca. 150ms. Nedochozí k zákmitům jalového výkonu. Při rychlejší reakci řídicího napětí dochází k zákmitům jalového výkonu.

Vysvětlení praktického významu plynulého nastavení řídicího napětí polovodičového relé: Například regulátor dostane povel a nastaví změnu o 10VAr. Pro výpočet okamžitého výkonu jsou použity hodnoty v zásobníku. V případě, že má zásobník 45 ms, trvá necelých 40 ms, než program „zjistí“ změnu nastaveného jalového výkonu. Za tuto dobu, však program několikrát oběhne a stále vypočítává odchylku od požadovaného výkonu o 10VAr. Tato odchylka regulátoru je tedy neustále navyšována. V konečném efektu povede ke značnému překompenzování. Po zjištění překompenzování se bude celý problém opakovat v opačném smyslu. Toto povede ke kmitání kompenzátoru.



Obr. 8-6 Průběh jalového výkonu a řídicího napětí při kompenzaci

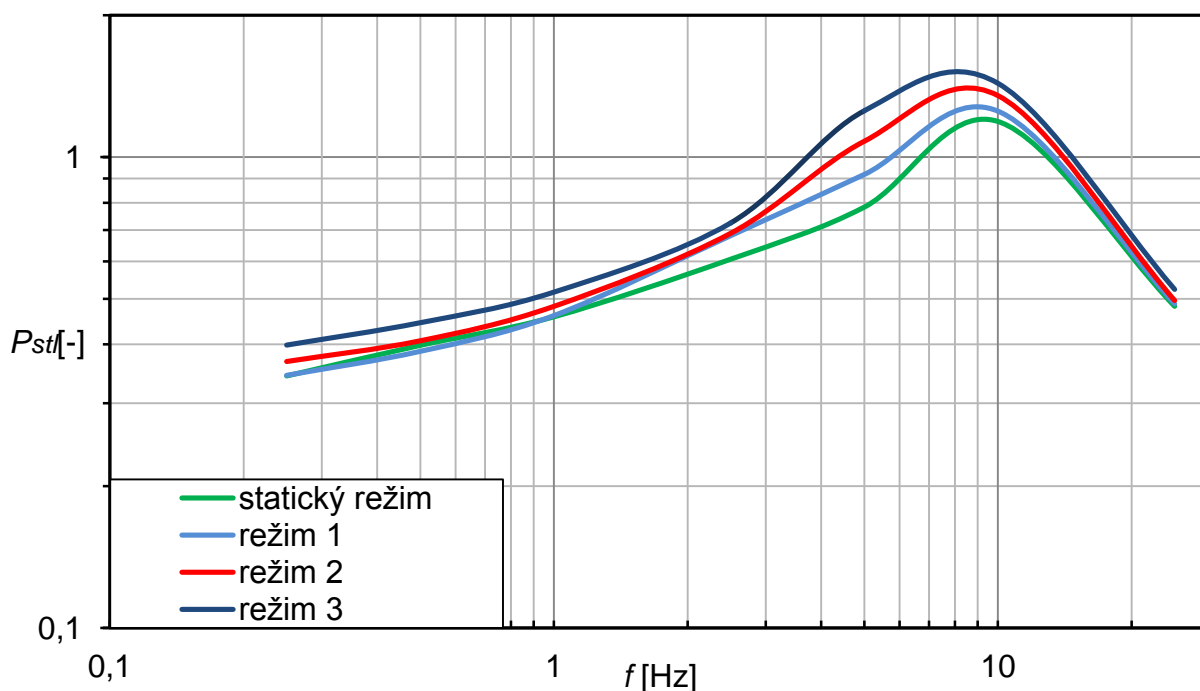
Na Obr. 8-7 je vynesena průběh činného výkonu a účinníku při kompenzaci. Skoková změna odebíraného činného výkonu je cca 0,5W. Na průběhu účinníku lze pozorovat analogii k průběhu jalového výkonu z Obr. 8-6. Když je jalový výkon dosahuje minima, tak účinník dosahuje maxima a naopak.



Obr. 8-7 Průběh činného výkonu a účinníku při kompenzaci

### 8.3 Měření flickru

Pro měření vlivu kompenzátoru na flickr byl použit analyzátor ZES ZIMMER LMG95. Měření probíhalo pro různé frekvence změny zátěže (počet změn za 1 sekundu). Změřeny byly celkem 4 průběhy. Jeden průběh byl měřen při stavu, kdy byla kompenzace ve statickém režimu, tj. byl pevně nastaven jalový výkon. Další 3 průběhy byly měřeny pro režimy, kdy kompenzace regulovala změny jalového výkonu. Jednotlivé režimy se od sebe lišily „rychlostí“ s jakou vyrovnávají dynamické změny jalového výkonu. Režim 1 vykompenzuje změnu odebíraného výkonu za 300 ms. Režim 2 je režim, se kterým kompenzátor běžně pracuje a vykompenzuje změnu za 180 ms. Režim 3 dokáže změnu vykompenzovat za 150 ms, avšak již dochází k překmitům.



Obr. 8-8 Výsledky měření flickru

Výsledky měření jsou uvedeny na Obr. 8-8. Průběh flickru v závislosti na frekvenci vyšel dle teoretických předpokladů správně, tj. nejvyšší flickr byl naměřen v oblasti 8-9 Hz. Akceptovatelná, normou stanovená, hranice míry vjemu flickru je do hodnoty  $P_{stl}=1$ . Nad tuto hodnotu již dochází k pozorovatelnému blikání světelných zdrojů. Zelená křivka je průběh flickru v případě, kdy je kompenzace nastavená na pevnou hodnotu dodávky jalového výkonu a automaticky nereguluje. Další 3 režimy, kdy byla kompenzace v automatickém režimu kompenzace, zhoršují flickr. Platí závislost, že čím rychlejší vyrovnání změny jalového výkonu, tím více kompenzátor zhoršuje flickr.

## 9 ZÁVĚR

Úvodní část se zabývá problematikou stanovení výkonů. Postupně jsou zde od začátku definovány jednotlivé složky výkonu, jak se určují a co reprezentují. To vše pro harmonický ustálený stav a jednofázovou soustavu. Následně jsou uvedeny dvě metody (Fryze a Budeanu) pro určení výkonů při neharmonických podmínkách. Na popsané jednofázové systémy navazují třífázové, kde na úvod byl popsán rozklad nesymetrických veličin do složkových soustav. Postupně jsou popsány třífázové výkony jak v symetrickém tak v nesymetrickém třífázovém systému. Všechny metody uvedené ve druhé kapitole však nejsou dostatečné pro stanovení okamžitého výkonu.

Dále práce navazuje rozborem teorie okamžitého výkonu. Zde popsaná teorie se nazývá p-q a je vhodná pro účely rychlého zjištění okamžitého výkonu aplikovatelného například do aktivních filtrů nebo kompenzátorů. Metoda je založena na transformaci do systému souřadnic  $\alpha\beta 0$ , proto je nejdříve popsána tato transformace. Dále jsou odvozeny postupy pro výpočet skutečných a imaginárních výkonů, které jsou analogické činným a jalovým výkonům. V závěru kapitoly je popsáno, jak by mohla metoda být použita pro stanovení potřebných kompenzačních proudů třífázového aktivního filtru. Demonstrační model SVC je jednofázový, proto je zde uvedena jednofázová pq teorie včetně příkladu výpočtu okamžitých výkonů. Již v tomto okamžiku bylo jasné, že nebude využitý potenciál pq teorie. Důvodem je omezená frekvence regulačních zásahů tyristorově řízené tlumivky, kde tyristor může změnit protékající proud tlumivkou pouze jednou za půlperrody pro 50 Hz to je tedy 10 ms. Pomocí pq teorie lze stanovit přesný okamžitý činný i jalový výkon v každém změřeném bodě.

Následující kapitola pojednává obecně o kompenzaci jalového výkonu. Je zde popsán vliv jalového výkonu na ztráty výkonu na vedení, na napětí na konci vedení a omezení přenosové kapacity. Většina z těchto vlivů má za důsledek především finanční ztráty. Problémem, který je pozorovatelným člověkem a může narušovat jeho psychickou pohodu nebo pracovní výkony je kolísání napětí s frekvencí 8-9 Hz, které se může projevat jako viditelné blikání světelných zdrojů. Proto byla část práce zaměřena na zjištění vlivu kompenzátoru na tento jev. V druhé části kapitoly jsou rozebrány jednotlivé druhy kompenzace z hlediska místa připojení, způsobu výroby jalové energie nebo plynulosti řízení.

Na popis kompenzačních zařízení navazuje podrobné rozebrání konceptu SVC kompenzátoru. Jsou zde rozebrány jednotlivé dílčí prvky. U tyristorově spínané indukčnosti i kapacity nenastává žádná komplikace z hlediska rušení v síti. To však neplatí u tyristorově řízené indukčnosti, kde v závislosti na řídicím úhlu vznikají vyšší harmonické proudy. Proto je zde taky popsán vliv řídicího úhlu na kmitočtové spektrum proudu indukčností. V další části je popsána regulace napětí pomocí SVC. Na závěr je popsáno, jak může vypadat skutečné SVC používané na přenosovém vedení 500kV.

Samotný návrh HW části kompenzátoru vycházel z větší části z již vytvořených dílčích modulů. Celá kompenzační jednotka je řízena přes PC prostřednictvím multifunkční karty od firmy National Instruments. Jedná se o jednu z nejzákladnějších karet od firmy, ale co do rychlosti a vybavení pro daný účel plně dostačovala. Regulační rozsah tyristorově řízené tlumivky byl bohužel omezen pouze na 70 mA. Toto omezení je dáno minimálním protékajícím proudem tyristoru (185mA). Časem bude použité polovodičové relé nahrazené jiným typem s nižším minimálním požadovaným minimálním protékajícím proudem. Polovodičové relé

spínající kondenzátor nemá automatické spínání v průchodu napětí nulou, proto bylo původním záměrem toto spínání vytvořit programově. Spínání v nule se však nepodařilo realizovat. Dynamická zátěž byla rozsahově nastavena ekvivalentně k regulačnímu rozsahu dekompenzační tlumivky.

Byl vytvořen ovládací program v prostředí LabVIEW, kde byla pro zjištění okamžitého výkonu použita pq teorie. Samotné určení výkonů, po získání vstupních údajů funguje výborně. Velmi omezujícím faktorem však je získání vstupních údajů, konkrétně fáze změřených vzorků. Signál je značně zkreslen a musí být filtrován (na 1. harmonickou) pro správné určení průchodů nulou. Pro použitý typ filtru je nutné použít větší část signálu. Tento problém má za následek značné zpomalení nastavování jalového výkonu. Je nutné podotknout, že regulátor je koncipován pro regulaci na požadovaný účinník. Požadovaný jalový výkon je tedy vypočítáván ze změřeného činného výkonu.

Postupnou aplikací filtrů, optimalizací a ověřováním funkčnosti byl pro dané podmínky a způsob stanovení úhlu vytvořen nejvhodnější řídicí program. Regulátor vykompenzuje změnu účinníku, při zachování stability za cca 180 ms. Se změnou odebíraného jalového výkonu se mění i napětí v místě připojení zátěže. V případě vykompenzování za dobu 180 ms vznikne právě tak dlouho trvající napěťová odchylka. Při přepočtu na frekvenci odpovídá 180 ms cca 6 Hz, což je velmi citlivé pásmo z hlediska flickru. Měřením bylo potom potvrzeno, že daný kompenzátor flickr zhoršuje.

Značné zrychlení by bylo možné po aplikaci jiného způsobu zjišťování úhlu měřených vzorků. Tento problém by mohla řešit implementace vhodného filtru typu pásmová propust (např. 45-55Hz), pro určení první harmonické a následně určení průchodu nulou. Daný typ filtru však může posouvat fázi, takže implementace by byla časově náročnější, ale pravděpodobně by vedla ke značnému zrychlení celého kompenzátoru. Určení průchodu nulou by potom bylo možné v každém změřeném bloku (standardně 7,5ms). Když bude připočtena doba, po jaké může být změněn proud tlumivkou (10 ms), lze se domnívat, že doba kompenzace by se mohla dostat na čas okolo 40 ms (odhad). Taková doba kompenzace při přepočtu odpovídá napěťovým změnám s frekvencí 25 Hz. Tato frekvence je potom z hlediska flickru již mnohem méně závadná a naopak se dá předpokládat, že zařízení by flickr zlepšovalo.

V závěru práce je proveden soubor měření a následné vyhodnocení výsledků. Jsou zde popsány reakce kompenzace na změnu zatížení, detailní průběhy napětí a proudů. Dále jsou vyneseny detaily průchodů napětí a proudu při zapnutí kondenzátoru nebo pohled na regulaci průchodu proudu tlumivkou pomocí polovodičového relé. Pro ověření vlivu kompenzátoru na flickr bylo provedeno měření s různým nastavením kompenzátoru.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AKAGI, Hirofumi, Edson Hirokazu WATANABE a Maurício AREDES. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley, 2007, 379 s. ISBN 04-701-0761-8
- [2] SEDLÁČEK, Jiří a Juraj VALSA. *Elektrotechnika II*. Brno, 186 s.
- [3] Elektrický výkon. *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD\\_v%C3%BDkon](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%BD_v%C3%BDkon)
- [4] TLUSTÝ, Josef, Jan ŠVEC, Petr BANNERT, Zbyněk BRETTSCHEIDER, Zbyněk KOCUR, Petr MAREČEK, Zdeněk MÜLLER a Tomáš SÝKORA. *Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí* .: Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 253 s. ISBN 978-80-01-04939-6.
- [5] JAYENDRAN, Arun. *Instantaneous Reactive Power Theory and its Applications to Active Power Filtering* [online]. 2010 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/arunj89/instantaneous-reactive-power-theory-and-its-applications>
- [6] Alpha–beta transformation. *Wikipedia* [online]. 2013 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha%E2%80%93beta\\_transformation](http://en.wikipedia.org/wiki/Alpha%E2%80%93beta_transformation)
- [7] *2010 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC 2010): Lagow, Poland, 15 - 18 June 2010* [online]. Piscataway, NJ: IEEE, 2010 [cit. 2014-01-06]. ISBN 978-142-4454-358. Dostupné z: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/17784/1/cabe%C3%A7alho.pdf>
- [8] BLAŽEK, Vladimír a Petr SKALA. *Distribuce elektrické energie*. Brno, 140 s.
- [9] MOLNÁR, Miloš. Zlepšení účinníku v energetice a návrh vhodných kompenzačních prostředků. [online]. [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/molnarm/pdf/kompence.pdf>
- [10] TLUSTÝ, Josef, Jan KYNCL, Ladislav MUSIL, Jan ŠPETLÍK, Jan ŠVEC, Petr HAMOUZ, Zdeněk MÜLLER a Miroslav MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2011, 255 s. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [11] KORENC, Vladimír. *Kompence jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1999, 127 s. ISBN 80-862-3007-4.
- [12] Regulátory jalového výkonu Novar. [online]. DNA Energie [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: [http://www.novar.cz/energie/ckfinder/userfiles/files/Novar\\_1xxx%20-%20CZ%20Manual.pdf](http://www.novar.cz/energie/ckfinder/userfiles/files/Novar_1xxx%20-%20CZ%20Manual.pdf)
- [13] Kompence jalové energie. [online]. EMG Zlín [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: [http://www.emgzlin.cz/menu/kompence-o\\_kompencaci.html](http://www.emgzlin.cz/menu/kompence-o_kompencaci.html)
- [14] MUSTHAFA, P., M. SIVASUBRAMANIAN a K. SAKTHIDHASAN. Analysis of Dynamic Power Factor Correction Using Flexible Ac Transmission Systems. 1. vyd. International Journal of Engineering Research and Applications, s. 710-715. ISSN 2248-9622. Dostupné z: <http://www.ijera.com/papers/vol%201%20issue%203/ZU013710715.pdf>
- [15] ACHA, Enrique. *Power electronic control in electrical systems*. Newnes, 2002, 443 p. ISBN 07-506-5126-1.

- [16] ŠVEC, Jan. *Systémy FACTS a HVDC v elektroenergetice (2): Učební text předmětu MRES* [online]. [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/elearning/course/view.php?id=133861>
- [17] NI USB-6009: *National Instruments* [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/201987>
- [18] Solid State Relays Industrial Carlo Gavazzi: Katalogový list. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: [http://www.galco.com/techdoc/elmc/rm1b48d50\\_cp.pdf](http://www.galco.com/techdoc/elmc/rm1b48d50_cp.pdf)
- [19] Solid State Relays Industrial Carlo Gavazzi: Katalogový list. [online]. [cit. 2014-05-02]. Dostupné z: [http://www.enika.cz/download/automatizace/katalogove\\_listy/Rele\\_polovodicova/1F\\_-\\_Industrial/RM1E.pdf](http://www.enika.cz/download/automatizace/katalogove_listy/Rele_polovodicova/1F_-_Industrial/RM1E.pdf)
- [20] LAKOMÝ, Marek. *Moderní prostředky paralelní kompenzace*. Brno, 2012. 52 l. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp\\_id=51910&rok=&typ=1&jazyk=&text=drapela&hl\\_klic\\_slova=0&hl\\_abstrakt=0&hl\\_nazev=0&hl\\_autor=0&str=1](https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=51910&rok=&typ=1&jazyk=&text=drapela&hl_klic_slova=0&hl_abstrakt=0&hl_nazev=0&hl_autor=0&str=1). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jiří Drápela.
- [21] Current Transducer LA 25-NP/SP8: Katalogový list. [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.lem.com/docs/products/la%2025-np%20sp8.pdf>
- [22] HONEYWELL. *Snímače elektrického proudu s Hallovou sondou* [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.honeywell.sk/?com=documents&id=91>
- [23] Voltage Transducer LV 20-P: Katalogový list. [online]. [cit. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/LEM%20USA%20PDFs/LV%2020-P.pdf>
- [24] SINGH, B.N., V. KHADKIKAR a A. CHANDRA. Generalised single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation. *IET Power Electronics* [online]. 2009, vol. 2, issue 1, s. 67-78 [cit. 2014-05-13]. DOI: 10.1049. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04723938>
- [25] LabVIEW: What is LabVIEW?. [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://labviewwiki.org/LabVIEW>
- [26] HANZELKA, Zbigniew a Andrzej BLEN. *Poruchy napětí: Flikr* [online]. AGH University of Science and Technology, 2006 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://www.medportal.sk/files/file/lpq\\_cz/5\\_1\\_4.pdf](http://www.medportal.sk/files/file/lpq_cz/5_1_4.pdf)
- [27] HANZELKA, Zbigniew a Andrzej BLEN. *Poruchy napětí: Měření flikru* [online]. AGH University of Science and Technology, 2005 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://www.medportal.sk/files/file/lpq\\_cz/5\\_2\\_3.pdf](http://www.medportal.sk/files/file/lpq_cz/5_2_3.pdf)