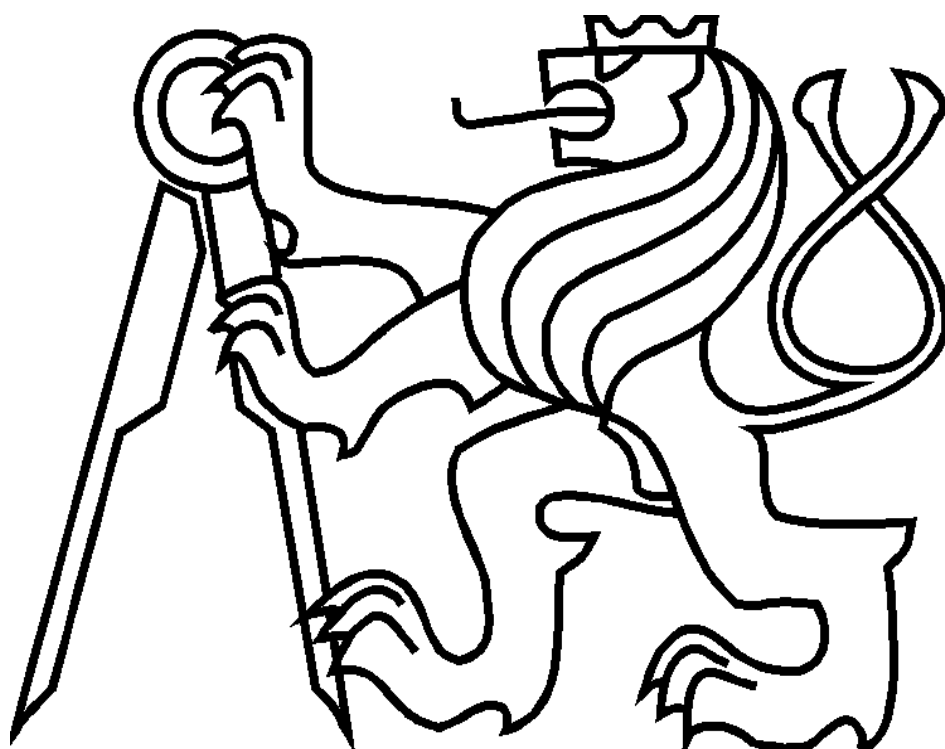


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**



**TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI**

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

**Ing. Zdeněk Paclt**

## **ŘÍZENÍ AKTIVNÍHO VÝKONOVÉHO FILTRU**

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Elektrické stroje, přístroje a pohony

Teze disertace k získání akademického titulu „doktor“, ve zkratce „Ph.D.“

Praha, srpen 2011

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Katedře 13114 elektrických pohonů a trakce Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Zdeněk Paclt  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: Prof. Ing. Viktor Valouch CSc.  
Katedra elektrických pohonů a trakce  
Fakulta elektrotechnická ČVUT  
Technická 2, Praha 6, 166 27

Oponenti: .....  
.....  
.....

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod. před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Elektroenergetika v zasedací místnosti č ..... Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

S disertací je možno se seznámit na děkanátu Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze, na oddělení pro vědu, výzkum a zahraniční styky, Technická 2, Praha 6.

.....  
předseda komise pro obhajobu disertační práce  
ve studijním oboru Elektrické stroje, přístroje a pohony  
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

# **OSNOVA**

<b>ABSTRAKT</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>6</b>
<b>1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY</b> .....	<b>8</b>
<b>2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>10</b>
<b>3. AKTIVNÍ PARALELNÍ FILTR</b> .....	<b>11</b>
<b>4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY</b> .....	<b>23</b>
<b>5. ZÁVĚR</b> .....	<b>26</b>
<b>6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>28</b>
<b>7. SEZNAM PUBLIKACÍ</b> .....	<b>31</b>
<b>8. VYBRANÉ PROJEKTY</b> .....	<b>31</b>

## ABSTRAKT

Tato disertační práce pojednává o aktivních výkonových filtrech. V současné době existují dva základní způsoby filtrace: pasivní a aktivní. Aktivní paralelní filtr představuje dodatečný výkonový elektronický měnič připojený k nelineární zátěži. Vstupní proud měniče je řízen tak, aby produkoval stejné úrovně harmonických jako nelineární zátěž, avšak v opačné fázi. Tyto dvě úrovně harmonických se v bodě spojení navzájem eliminují. Paralelní aktivní filtr a jeho způsob řízení je založen na transformaci ze souřadného systému os a-b-c do souřadného systému os d-q-0. Výpočet referenčních hodnot pro řízení je proveden pomocí využití Butterworthova filtru čtvrtého řádu. Regulátor a jeho základní regulační smyčky řídí odděleně proud ve dvou osách. Další regulační smyčka je určena pro řízení stejnosměrného napětí ve stejnosměrném meziobvodu měniče. Pro takto navržený řídicí algoritmus byl sestaven model v prostředí Matlab/Simulink s využitím knihoven SimPower systému. Základní struktura modelu je rozdělena na dva samostatné bloky. První blok - Simulovaná soustava - představuje silový obvod napájecí sítě, aktivního filtru a nelineární zátěže. Pro správnou funkci regulačního algoritmu jsou měřeny proudy zátěže, filtru, napětí sítě a stejnosměrného meziobvodu měniče. Pro zobrazení simulovaných průběhů je měření osazeno ve všech fázích modelu. Pro ověření vlastností navrženého řídicího algoritmu byl model zátěže doplněn tak, aby bylo možné sledovat chování při konstantní nelineární zátěži, ale také při změnách zatížení tyristorového měniče nebo nesymetrickém zatížení napájecí sítě. Výsledky simulace jsou uvedeny v části této práce. Řídicí algoritmus byl následně implementován do systému dSPACE 1103A.

Výsledky reálného experimentu jsou uvedeny v samostatné kapitole. Řídicí algoritmus byl doplněn třemi bloky softwarové ochrany s možností nastavení pásma hystereze a přímou vazbou na blok PWM modulátoru. Výsledky simulace a experimentů na reálném systému ukázaly, že uvedený způsob řízení dosahuje velmi dobré kompenzační schopnosti harmonických proudů nelineární zátěže jak pro kompenzaci v ustáleném stavu, tak i pro přechodné děje. Regulátor systému aktivního paralelního filtru je schopen kompenzovat i v případě poklesu vstupního síťového napájecího napětí, tak pro změny proudu nelineární zátěže.

## ABSTRACT

The aim of this PhD thesis is the analysis of the designed control strategy of a shunt active power filter. Nowadays, two basic methods of harmonic current filtration exist: passive and active. The parallel active power filter represents an additional electronic power converter connected to a non-linear load. The current generated by the converter is controlled to produce the same level of harmonic components as the non-linear load, but in the opposite phase. Thus, the harmonic current components of the active power filter and the load are eliminated each other in the point of common coupling.

The presented control method of the shunt active power filter is based on the transformation of variables between the coordinate system of the axis a-b-c and the coordinate system d-q-0. Two current controllers in the reference frame d-q-0 represent the basic control loops. The superimposed control loop is dedicated to the control of the dc voltage in the converter dc bus.

For the designed control algorithm the model of the control system of the parallel active power filter has been made in the Matlab/Simulink environment by using the SimPowerSystems tool. The basic structure of the model is separated into two independent main blocks. The first block, named „Simulated system“, represents the power circuits of the mains, active power filter and non-linear load. The currents of the load and active power filter are measured. The voltages of the mains and dc voltage at the converter dc bus are measured too. To display simulating waveforms, measurement sensors are connected in all phases of the model. The second block simulates the control circuitry of the active power filter. To verify properties of the designed control algorithm for the constant non-linear load, changing load or non-symmetric load of the mains too, all respective load and mains models have been included into the simulated system.

The results of the simulation are shown in the work. After that, the control algorithm has been implemented in the system dSPACE 1103A. The results of laboratory experiments are shown in the specific chapter. The control algorithm has been enlarged by the three software over-current protective blocks with the ability to block the PWM modulator.

The results of the simulation and experiments have shown that the discussed control method reaches the very good compensative ability of harmonic currents of different kinds of the non-linear load not only in steady

states but in transient processes too. The control system of the parallel active power filter is capable to compensate for harmonic currents not only in case of voltage drops of the mains, but also in case of current changes of the non-linear load.

# 1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

V současné době lze řídicí algoritmy aktivních výkonových filtrů rozdělit na základní dva typy řízení a to řízení, které pracuje v časové oblasti a řízení pracující ve frekvenční oblasti. Řízení ve frekvenční oblasti lze využívat jak pro jednofázové tak i trojfázové zapojení aktivních filtrů. Řídicí algoritmus využívá Fourierovu analýzu (DFT,FFT,RDFT) pro získání referenčních hodnot. Řízení v časové oblasti

Tyto metody řízení jsou v porovnání s řízením ve frekvenční oblasti rychlejší a vyžadují také méně výpočtů. Tyto metody lze dále rozdělit podle způsobů výpočtu referenčních hodnot kompenzačních veličin (napětí nebo proudů) na metody pracující s okamžitými výkony v napájecí síti (p-q řízení, synchronní detekční metoda) nebo se složkami okamžitých hodnot proudu ( $i_d$ - $i_q$ ).

Uvedené strategie řízení a jejich vlastnosti lze porovnat při různých pracovních podmínkách aktivního paralelního filtru. Uvedené strategie řízení aktivního paralelního filtru jsou porovnávány na základě celkového harmonického zkreslení THDi proudu sítě po kompenzaci.

V případě symetrického a sinusového napětí sítě všechny tři uvedené strategie řízení dosahují přibližně stejných výsledků. Výsledné spektrum proudu sítě po kompenzaci obsahuje pouze základní (první) složku.

V případě nesymetrického sinusového napětí sítě a využití metod řízení SDM (Synchronně detekční metoda) a řízení okamžitých hodnot složek proudu ( $i_d$ - $i_q$ ) dosahuje proud sítě po kompenzaci nižší harmonické zkreslení THDi než při využití metody řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie). Metoda řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie) je citlivá na nesymetrické napájecí napětí a při tomto režimu neposkytuje dostatečné kompenzační schopnosti.

V případě deformované (nesinusové) vstupní napájecí sítě a s využitím strategie řízení okamžitých hodnot složek proudu ( $i_d$ - $i_q$ ) dosahuje výsledný proud sítě po kompenzaci nízké hodnoty THDi. Další dvě uvedené metody řízení při tomto provozním stavu nevykazují dostatečné kompenzační schopnosti. Metoda řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie) i synchronně detekční metoda (SDM) dosahují přibližně stejných výsledků.

Pro další porovnání uvedených strategií řízení a jejich chování při zkreslení vstupní napájecí sítě, je vstupní napájecí napětí deformováno pátou



harmonickou složkou a nelineární zátěž odebírá sinusový proud. Výsledky simulace [23] ukazují, že všechny uvedené strategie řízení nedovedou kompenzovat neexistující harmonického zatížení.

- Nejhorší výsledek je dosažen v případě využití strategie řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie), dochází k deformaci síťového sinusového proudu a výsledný proud po kompenzaci má nejhorší harmonické zkreslení THD.
- Synchronně detekční metoda (SDM) dosahuje nižšího zkreslení THDi než metoda řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie).
- Strategie řízení okamžitých hodnot složek proudu ( $i_d$ - $i_q$ ) dosahuje nejnižší hodnoty THDi při tomto režimu, z čehož vyplývá snížená citlivost strategie řízení na výskyt harmonických v napájecím napětí.

V případě nesymetrické napájecí sítě či harmonické deformace vstupního napětí se jeví jako nejvhodnější strategie řízení okamžitých hodnot složek proudu  $I_d$ - $I_q$ . Tento způsob řízení dosahuje po kompenzaci nízké hodnoty THDi síťového proudu. Synchronně detekční metoda (SDM) dosahuje dobrých kompenzačních schopností i v případě nesymetrické napájecí sítě. Metoda řízení okamžitého neaktivního výkonu (p-q teorie) dosahuje nejhorších kompenzačních schopností jak pro nesymetrické napájecí napětí tak pro harmonicky deformované [20], [23], [24].

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Zkreslení napájecí sítě může mít za následek závažné škody. Jsou dva základní způsoby filtrace: pasivní a aktivní. Pasivní filtry obsahují sérii obvodů LC laděných na harmonickou, kterou mají odfiltrovat. Spojením několika takovýchto filtrů paralelně může být blok filtrů konstruován tak, že odfiltruje všechny problematické harmonické. Aktivní paralelní filtr představuje dodatečný výkonový elektronický měnič připojený k nelineární zátěži. Vstupní proud měniče je řízen tak, aby produkoval stejné úrovně harmonických jako nelineární zátěž, avšak v opačné fázi. Tyto dvě úrovně harmonických se v bodě spojení navzájem eliminují.

### **Cíle disertační práce**

Úkolem této práce je analýza řídicích algoritmů paralelních výkonových aktivních filtrů, vytvoření matematického modelu paralelního aktivního filtru s navrženým algoritmem řízení, simulace jeho chování pro různé typy nelineárních zátěží a za různých provozních stavů a následné experimentální ověření s využitím řídicího systému dSPACE 1103A. To zahrnuje následující :

1. Rozbor a analýzu strategií řízení paralelních aktivních filtrů.
2. Návrh zvoleného řídicího algoritmu.
3. Simulace navrženého algoritmu řízení pro různé typy zátěží a za různých provozních stavů (s ohledem na pozdější realizaci s využitím systému dSPACE 1103 v prostředí Matlab/Simulinku) a její odladění.
4. Realizaci modelového pracoviště aktivního paralelního filtru pro experimentální ověření výsledků.
5. Návrh a implementace softwarové ochrany aktivního paralelního filtru
6. Implementaci odladěného algoritmu řízení do systému dSPACE 1103a pro jeho použití v reálném čase.
7. Experimentální ověření navrženého digitálního řízení aktivního paralelního filtru a závěrů plynoucích z provedených simulací.

### 3. AKTIVNÍ PARALELNÍ FILTR

Nejjednodušší způsob potlačení harmonického zkreslení je použití pasivních filtrů. Pasivní filtr bývá nejčastěji tvořen indukčností  $L$  a kondenzátorem  $C$ . Mezi nejčastěji používaná zapojení pasivního filtru je laděný LC filtr anebo filtr jako dolní propust, který je připojen paralelně k zátěži [4].

Použití pasivních filtrů má určité výhody:

1. snadný návrh
2. spolehlivost
3. účinnost
4. náklady

Mezi nevýhody použití pasivních filtrů patří:

1. impedance zdroje ovlivňuje filtrační charakteristiku filtru
2. vlastnost filtrace závisí na parametrech naladění filtru
3. změny parametrů pasivního filtru ovlivňují rezonanční kmitočet
4. při zvětšení harmonických složek proudu může dojít k přetížení filtru
5. možnost vzniku paralelní rezonance mezi napájecí sítí a pasivním filtrem způsobuje zvětšení proudů harmonických na zdrojové straně
6. možnost vzniku sériové rezonance mezi pasivním filtrem a napájecí sítí, protože napěťová deformace produkuje nadměrné harmonické proudy tekoucí do pasivního filtru

Všechny tyto nežádoucí vlastnosti pasivních filtrů lze odstranit použitím aktivních filtrů. Základní část aktivního filtru pro vícefázové rozvody je nejčastěji tvořena můstkovým pulzně řízeným usměrňovačem s napěťovým meziobvodem (Obr. 3.1).

Pulzní usměrňovač je osazen šesti vypínatelnými polovodičovými součástkami (IGBT,IGCT) a jejich zpětnými diodami. Na střídavé straně je připojena indukčnost  $L_c$ . Podmínkou pro činnost aktivního paralelního filtru je splnění nerovnosti

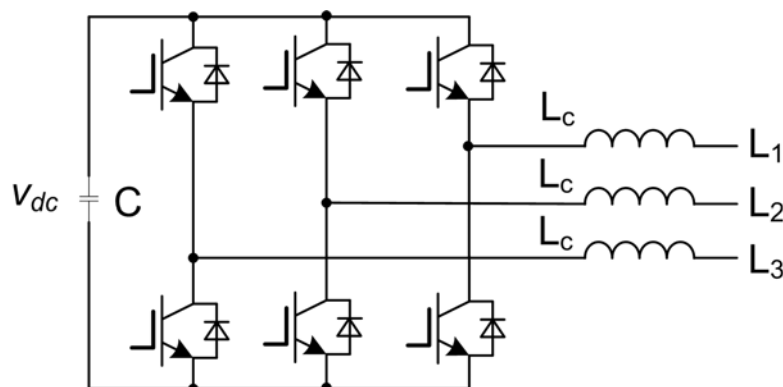
$$V_{m1} + L_c \frac{di_F}{dt} \leq \frac{v_{dc}}{\sqrt{3}} \quad (3.1)$$

kde  $di_F/dt$  maximální strmota nárůstu proudu filtru, kterou lze ovlivnit velikostí napájecího napětí, napětím stejnosměrného meziobvodu  $v_{dc}$  a velikostí indukčnosti filtru  $L_c$ . Velikost napětí ve stejnosměrném obvodu musí být větší než amplituda síťového napětí. Pro správnou činnost aktivního paralelního filtru

by měla hodnota napětí ve stejnosměrném meziobvodu být větší než násobek efektivní hodnoty napájecího napětí. Kondenzátor ve stejnosměrném meziobvodu by měl mít dostatečnou velikost, aby nedocházelo k příliš velkému zvlnění stejnosměrného napětí. Velikost kondenzátoru a napětí ve stejnosměrném meziobvodu ovlivňuje maximální výkon harmonických složek, který musí být dodán aktivním filtrem do napájecí sítě. Velikost kondenzátoru lze určit [26]

$$C = \frac{S_n}{2 \cdot \omega \cdot v_{dc} \cdot \Delta v_{dc}} \quad (3.2)$$

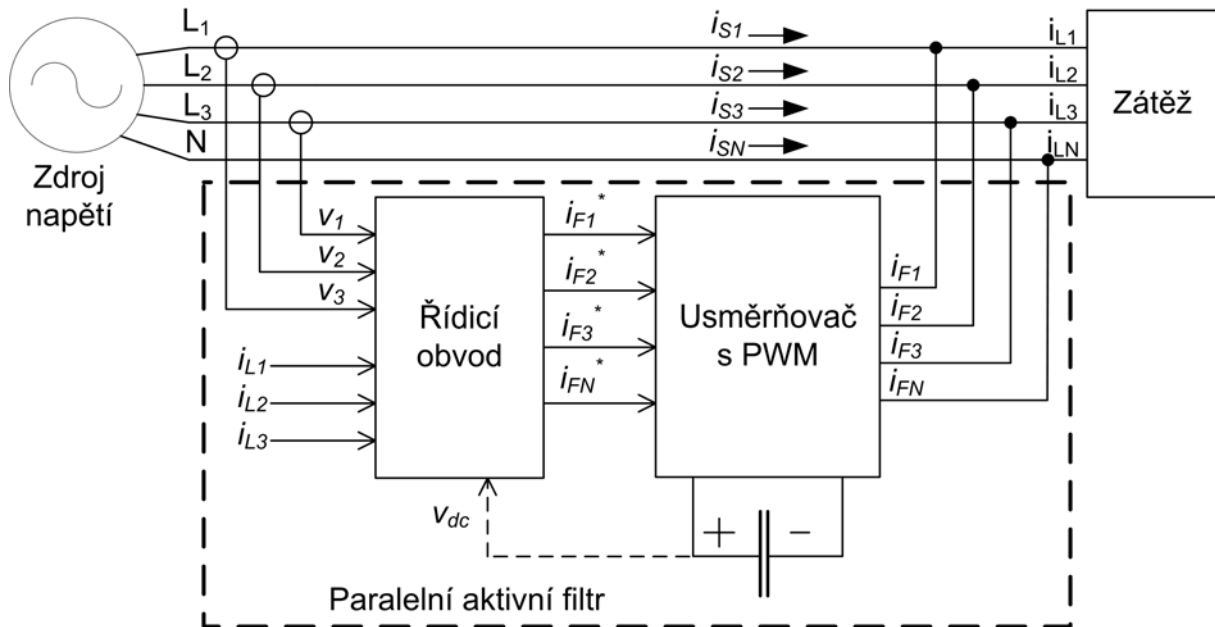
Statické a dynamické vlastnosti aktivního filtru jsou kromě parametrů použitých výkonových součástek determinovány zejména strategií řízení zahrnující jak samotné vnitřní řízení pulzního usměrňovače, tak i stanovení referenčních hodnot pro výstupní veličiny konkrétního filtru. Podle způsobů připojení k zátěži lze aktivní filtry rozdělit na paralelní (derivační) a sériové, kombinací paralelního a sériového dostaneme kombinované zapojení (UPQC=Unified Power Quality Controller). Použitím aktivního sériového nebo paralelního filtru s pasivním filtrem vzniká filtr hybridní. [5]



Obr.3.1 Střídač s napětovým meziobvodem

### 3.1. Paralelní aktivní filtr

Paralelní filtr se používá pro kompenzaci nežádoucích harmonických proudů tím způsobem, že generuje shodné harmonické složky proudu, ale opačné fáze do sítě. Výsledný proud je potom zbaven harmonických. Tímto způsobem se filtruje proud odebíraný ze sítě a tím se také upravují deformace napětí způsobené zátěží a zlepšuje účinník sítě. [6], [7] Na Obr. 3.2 je zobrazeno schéma paralelního aktivního filtru pro třífázovou soustavu s nulovým vodičem.



Obr. 3.2 Paralelní aktivní filtr

Aktivní filtr je schopen kompenzovat proud nulovým vodičem, toto řešení vyžaduje střídač se 4 větvemi. Pro případ souměrné zátěže bez 3. harmonické proudu (třífázové řízené a neřízené usměrňovače, regulované pohony atd..) není potřeba kompenzovat proud nulovým vodičem. Aktivní filtr nepotřebuje externí zdroj napájení, dobíjení kondenzátoru zajišťuje řídicí algoritmus.

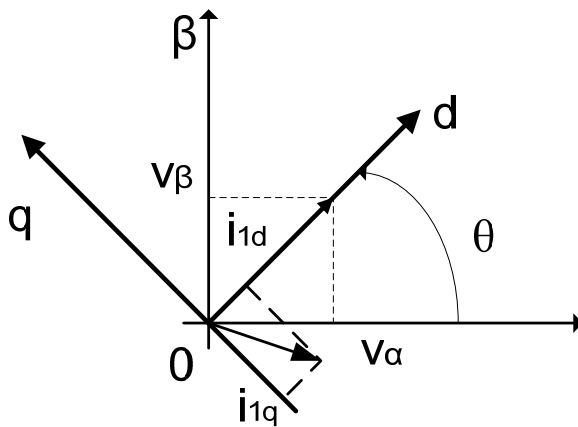
### 3.2. Způsob řízení okamžitých hodnot složek proudu

Tento způsob řízení aktivního filtru využívá pro získání referenčních hodnot kompenzačního proudu činné  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$  jalové složky proudů zátěže. Proudů zátěže jsou pomocí transformace ze souřadnicového systému a-b-c převedeny do systému d-q. Souřadnicový systém os d-q, rotujícího synchronně s vektorem napětí tohoto zdroje, základní harmonické v tomto souřadnicovém systému se jeví jako stejnosměrné veličiny. Transformace proudů zátěže a napětí sítě je dána následujícími vztahy

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Pro případ sinusového souměrného napájení je transformační úhel  $\theta = \omega t$ . Obecně je transformační úhel  $\theta$  závislý na nesymetrii a harmonických napětí. Fázor napětí je položen do osy d souřadného systému.

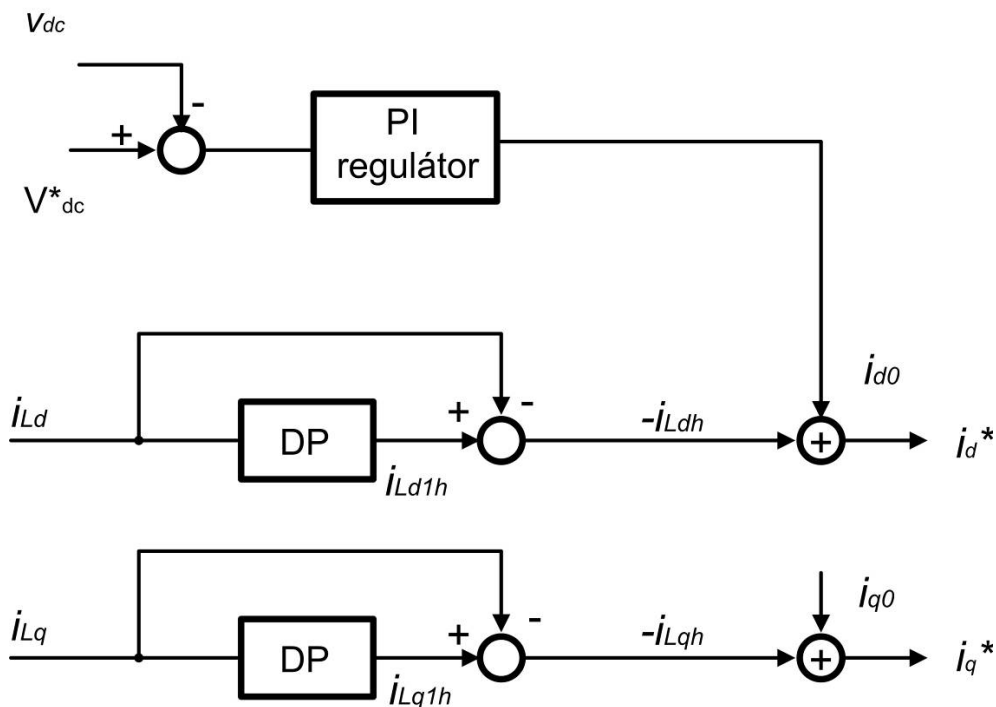


Obr. 3.3 Zobrazení vektoru proudů v osách dq

Okamžité hodnoty proudů zátěže  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$  obsahují dvě složky. Stejnoseměrné složky  $i_{Ld1h}$  a  $i_{Lq1h}$  představují první (základní) harmonické proudy zátěže a oscilující složky představují harmonické proudy zátěže  $i_{Ldh}$  a  $i_{Lqh}$

$$\begin{aligned} i_{Ld} &= i_{Ld1h} + i_{Ldh} \\ i_{Lq} &= i_{Lq1h} + i_{Lqh} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Harmonické proudy vyšších řádů  $i_{Ldh}$  a  $i_{Lqh}$  jsou získány odfiltrováním stejnosměrných složek proudů  $i_{Ld}$  a  $i_{Lq}$  pomocí dolní propusti (DP).



Obr. 3.4 Výpočet referenčních hodnot-řízení okamžitých složek proudu

Velikost napětí stejnosměrného meziobvodu je řízeno proudem  $i_{d0}$ , tento proud obsahuje pouze první harmonickou [15],[17],[18].

### 3.3. Model APF v prostředí Matlab/Simulink

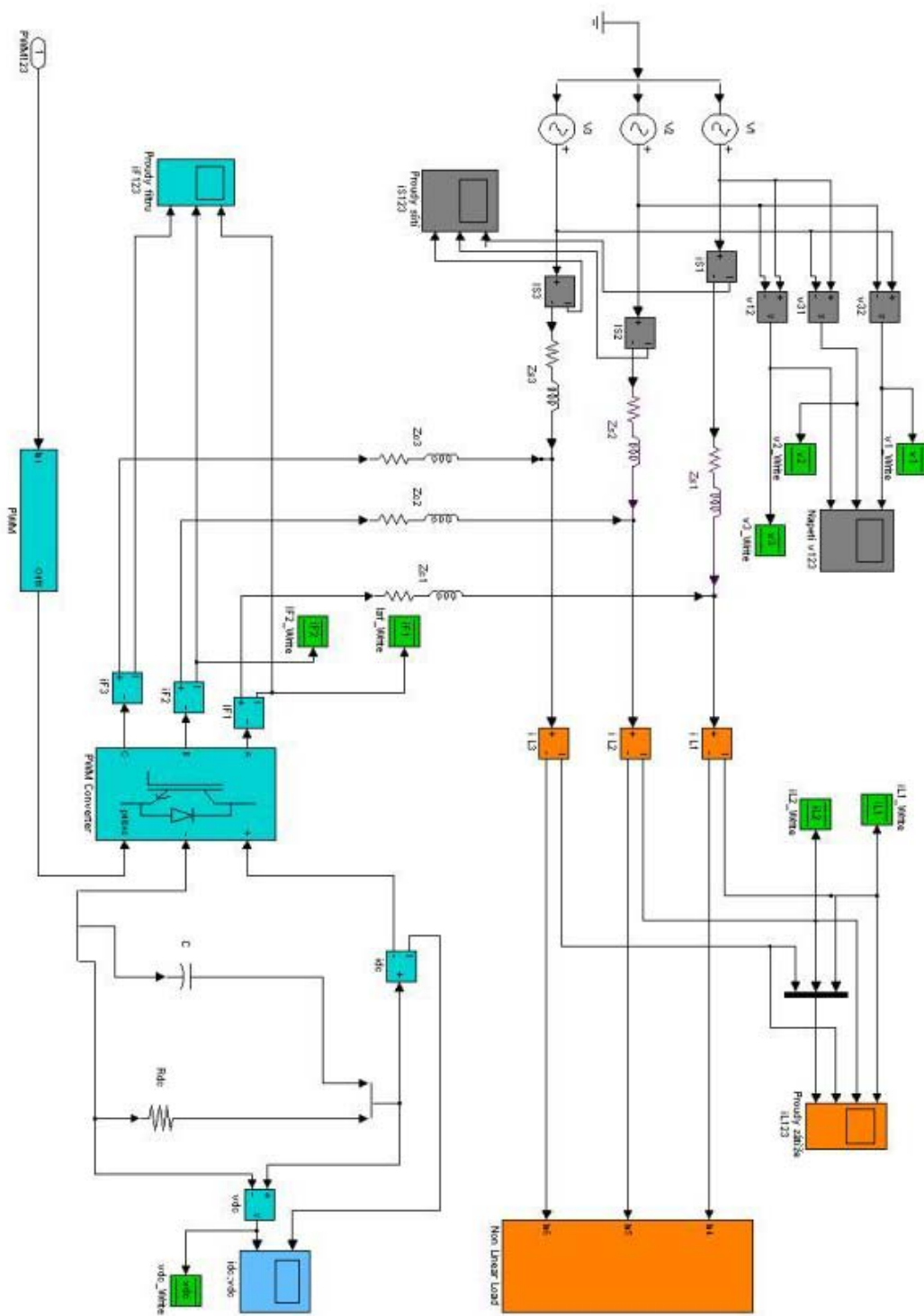
Základní schéma pro simulaci aktivního paralelního filtru v prostředí Matlab/Simulink je naznačeno na Obr.3.5. Model je rozdělen na základní dvě části: „Regulátor“ a „Simulovanou soustavu“. Toto uspořádání modelu umožňuje po úspěšné simulaci použít regulátor v reálné aplikaci se skutečným filtrem připojeným na standardní třífázovou síť. Objekty v horní části schématu reprezentují přenos dat mezi simulovanou soustavou a regulátorem, v reálném prostředí se tento přenos uskutečňuje čtením z převodníků připojených na čidla napětí a proudů. Pro ověření vlastností regulačního algoritmu byl v prostředí Matlab/Simulink sestaven model výkonové části aktivního paralelního filtru tvořeného trojfázovým řízeným můstkem, předřazenými indukčnostmi  $L_c$  včetně trojfázové napájecí sítě a nelineární zátěže. Realizovaný model je zobrazen na Obr. 3.6.



Obr. 3.5 Základní rozdělení modelu aktivního paralelního filtru

Blok Regulátoru je dále rozdělen do několika subbloků. Obsahuje blok transformace souřadnic, kde jsou naměřené hodnoty veličin transformovány do souřadného systému os d-q. Výstupy z bloku transformace souřadnic jsou vedeny do bloku kontrol. Tento blok je základem pro řízení paralelního aktivního filtru APF, je zde pomocí filtru Buttworthův filtr čtvrtého řádu proveden výpočet referenčních hodnot a realizován samotný regulační algoritmus. Výstup z bloku Control je veden do subbloku zpětné transformace souřadnic a výstup je zadání pro PWM modulátor, který se již nachází v bloku simulovaná soustava. Dále tento blok obsahuje skutečné naměřené hodnoty proudu odebíraného zátěží a proudu generovaného filtrem do bodu společného připojení. Tyto dva bloky slouží pouze k vizuální kontrole a nejsou nutné pro funkci aktivního paralelního filtru.





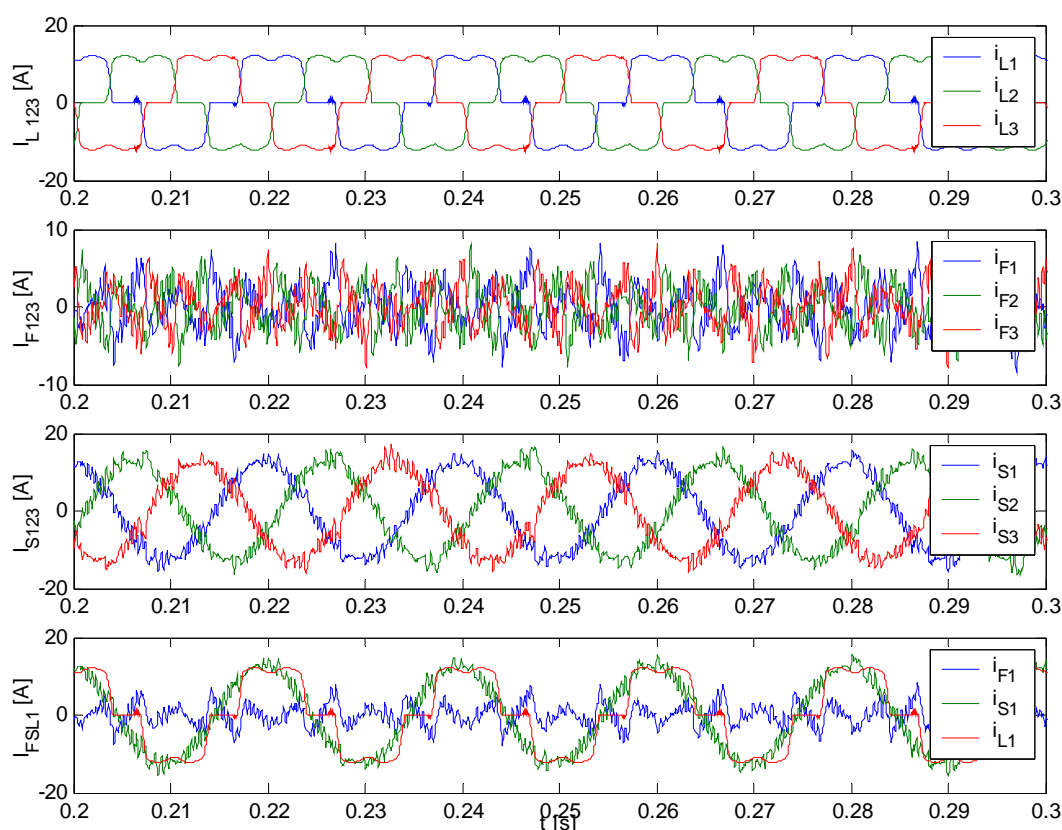
Obr. 3.6 Silové schéma paralelného aktívneho filtra

### 3.4. Výsledky simulace

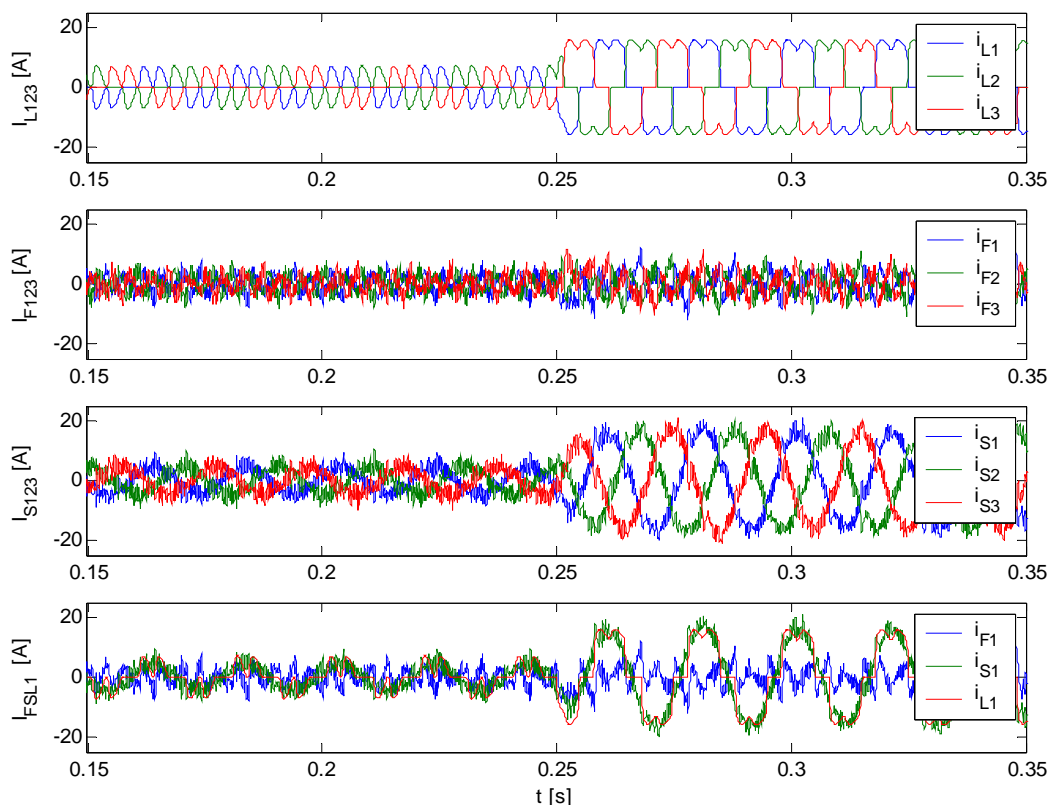
Pro ověření vlastností popsaného způsobu řízení byl vytvořen model paralelního aktivního filtru v simulačním prostředí programu Matlab/ Simulink s využitím knihovny SimPowerSystems. Základní nastavení parametrů simulovaného obvodu jsou uvedeny v Tab. 1

Tab. 1 Tabulka parametrů pro simulaci

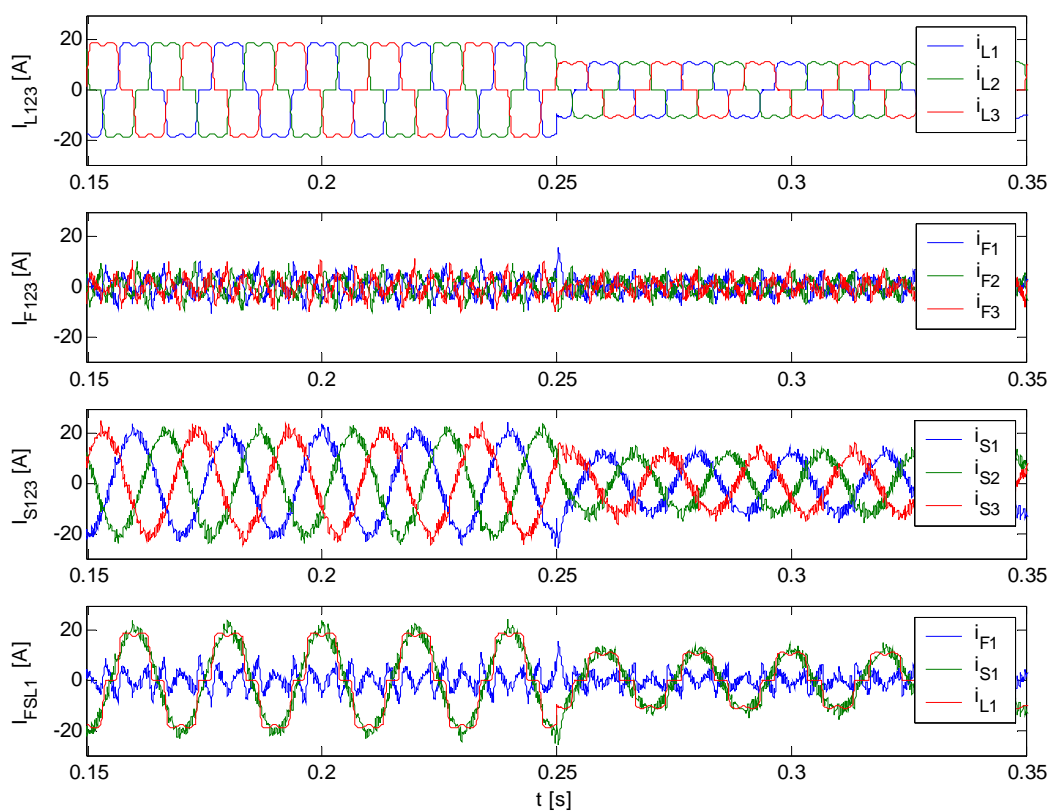
Tabulka parametrů pro simulaci:	
Napájecí síť	$R_S = 1\Omega$ , $L_S=10\mu\text{H}$ , $V=110\text{V}$ (rms/fázové), $f= 50\text{Hz}$
Nelineární zátěž	$R_L=20\ \Omega$ , $L_L=5\text{mH}$
Aktivní filtr (APF)	$R_C= 0,1\ \Omega$ , $L_c=7\text{mH}$ , $V_{dc}=400\text{V}$ , $R_{dc}=7500\ \Omega$ , $C=2350\ \mu\text{F}$
Regulátor proudu	$K_p=39,88$ ; $K_i=532960$
Regulátor napětí	$K_{pdc}=1,75$ ; $K_{idc}=6,32$
Parametry modelu	$f_s=20\ \text{kHz}$ , $T = 50\ \mu\text{s}$ , metoda výpočtu – diskrétně, single task



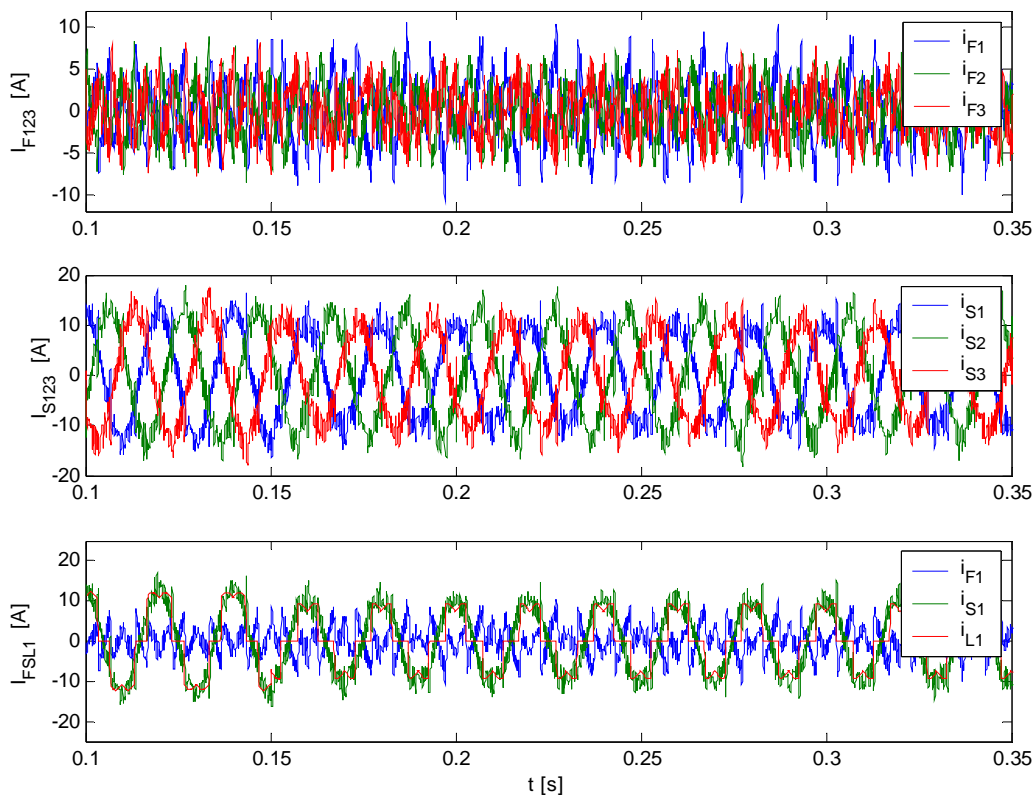
Obr. 3.8 Generované průběhy paralelního aktivního filtru pro neřízený usměrňovač



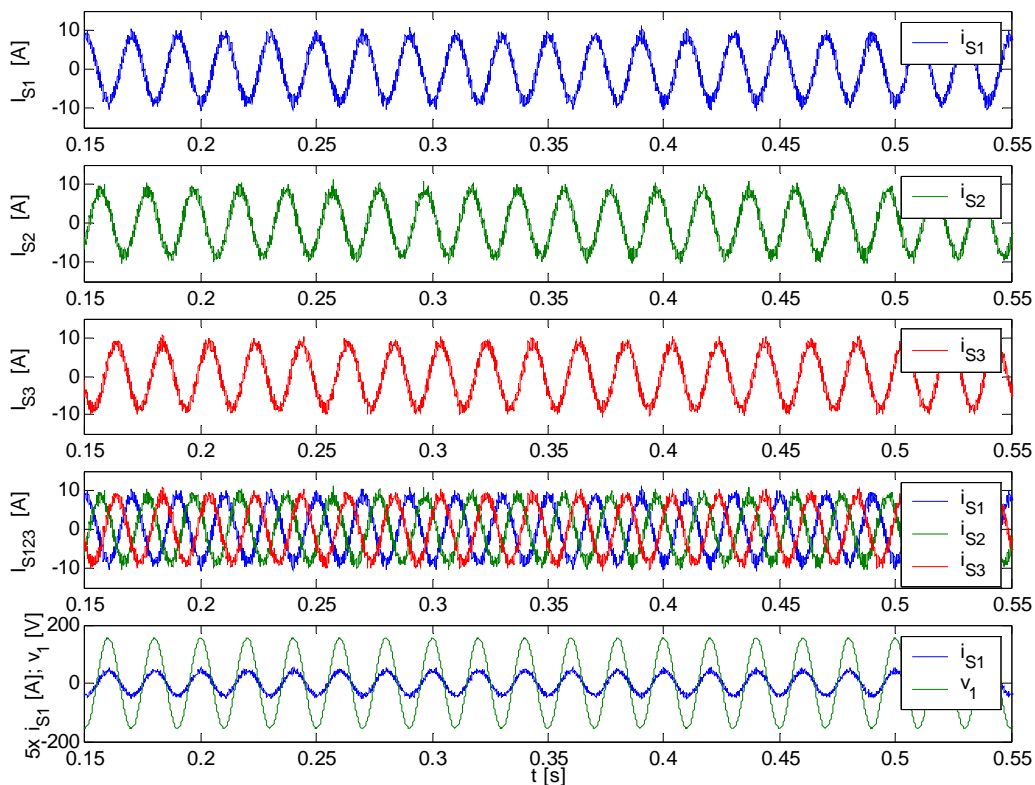
*Obr. 3.9 Generované průběhy paralelního aktivního filtru pro změnu řídicího úhlu usměrňovače*



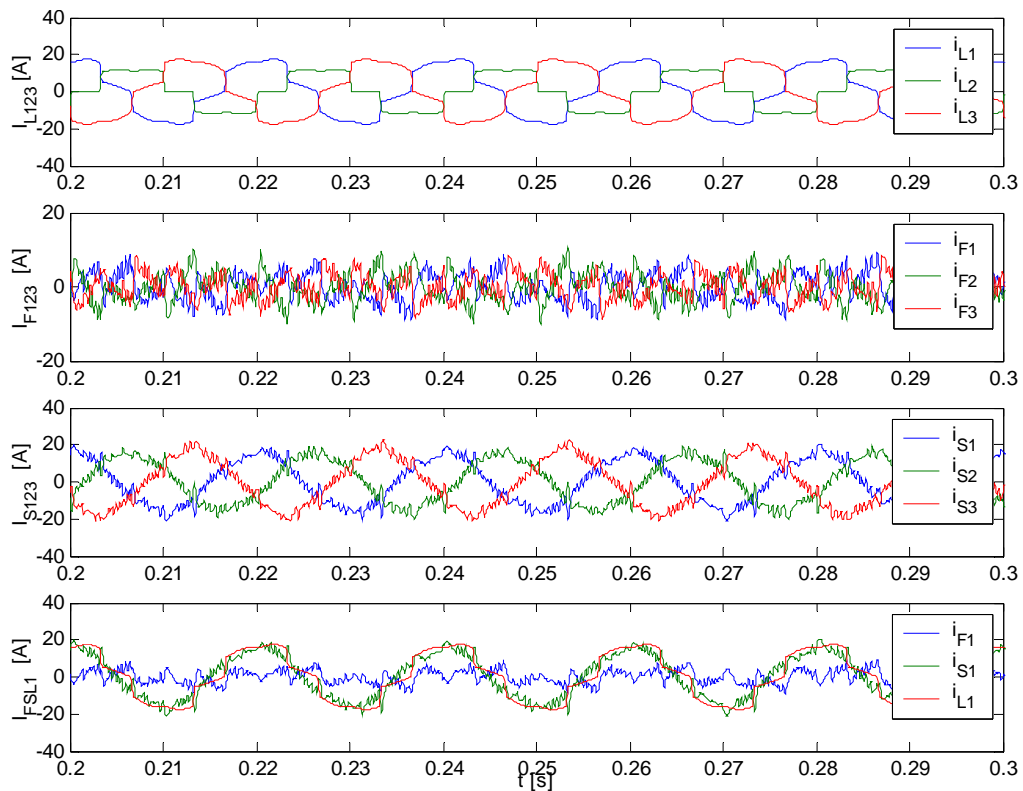
*Obr. 3.10 Generované průběhy paralelního aktivního filtru pro změnu zatížení usměrňovače*



Obr. 3.11 Generované průběhy paralelního aktivního filtru při změně napájecího napětí



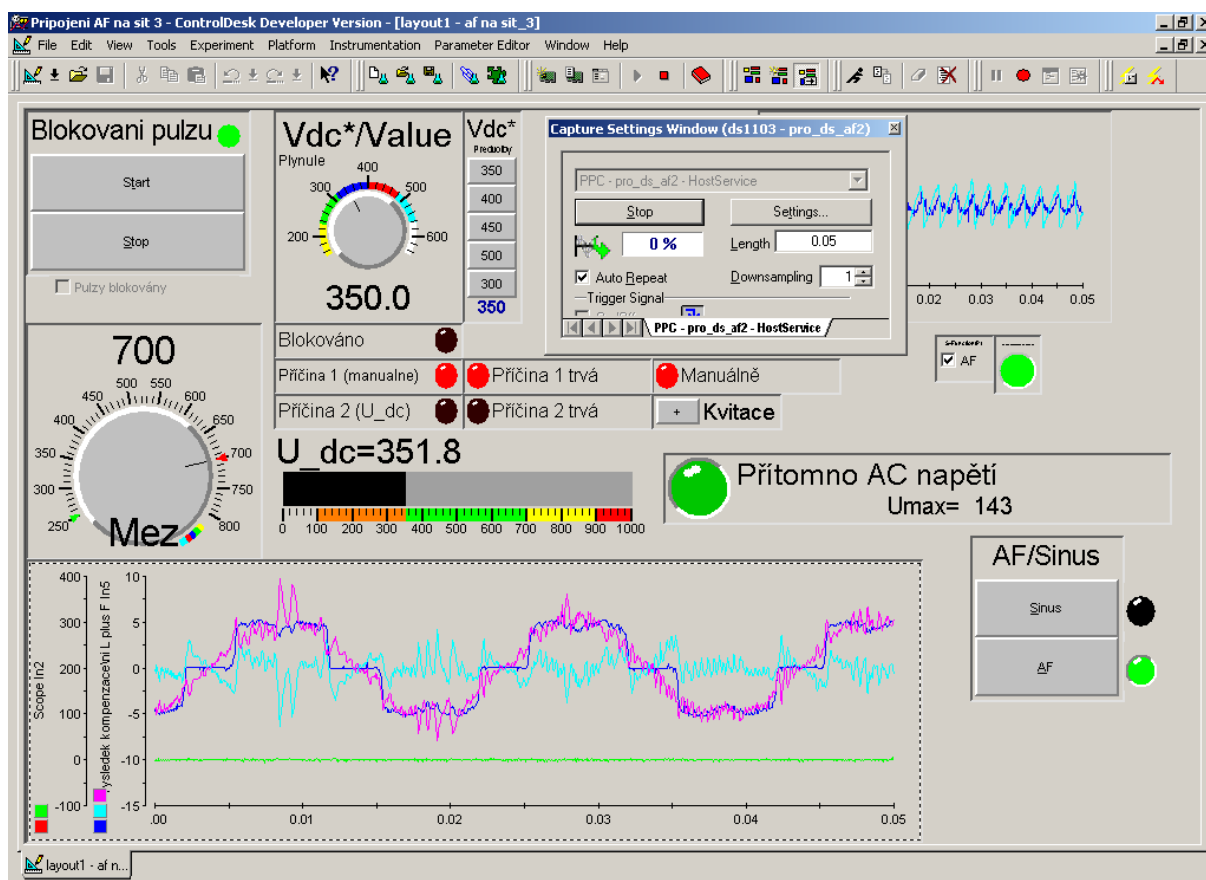
Obr. 3.12 Generované průběhy paralelního filtru v režimu kompatibilní usměrňovač



*Obr. 3.13 Generované průběhy paralelního aktivního filtru při nesymetrickém zatížení*

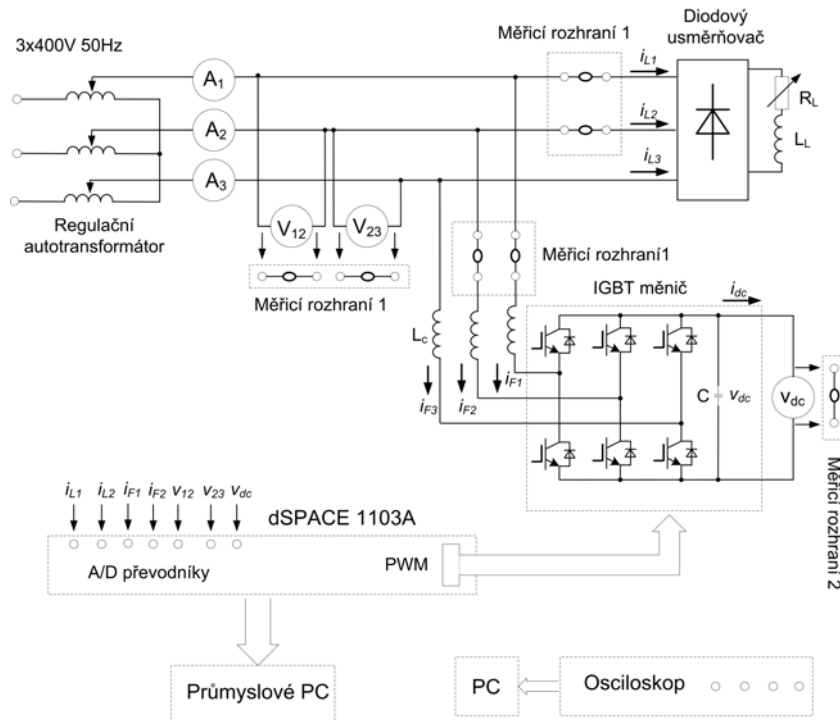
### 3.5. Implementace řídicího algoritmu

Model aktivního paralelního filtru (řídící a silová část) byla pro simulace vytvořena pomocí knihoven SimPowerSystems. Z tohoto modelu byla převzata řídicí část, která zajišťuje výpočet referenčních hodnot a regulátory. Algoritmus řízení aktivního filtru pracuje s hodnotami napětí a proudů zátěže, regulátor proudu generovaného do sítě potom s proudem měniče. Dále je měřena velikost napětí na kondenzátoru na stejnosměrné straně. Na základě toho je vypočtena hodnota zatěživatele zadávaná generátoru řídicích pulzů.

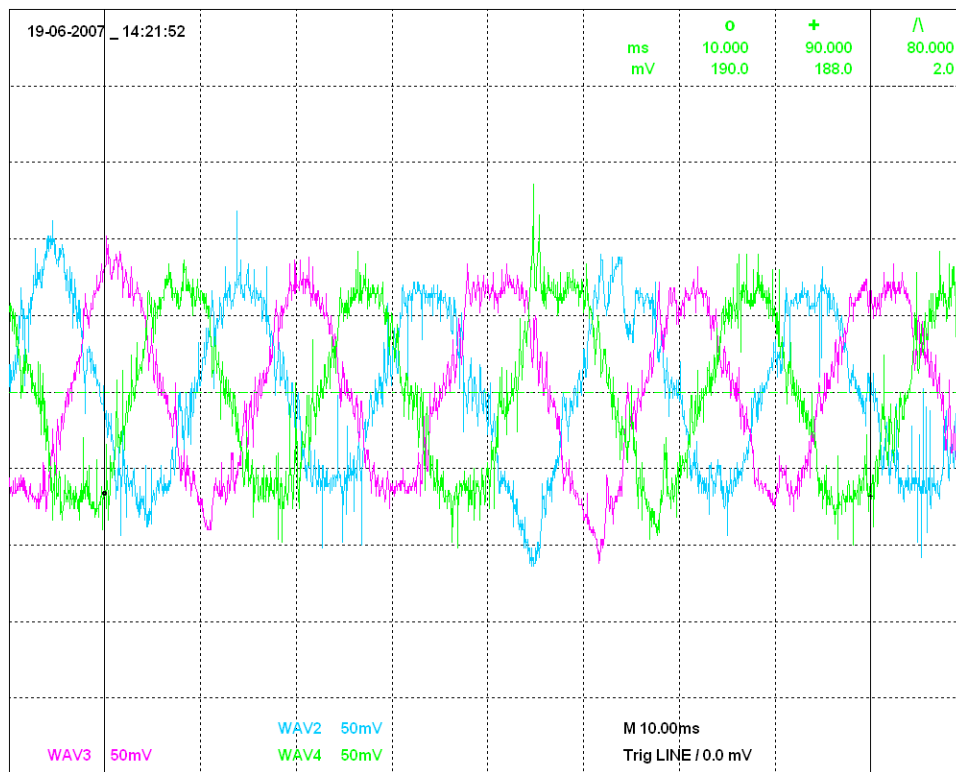


Obr. 3.14 Layout pro ovládání aktivního filtru, signalizuje manuální blokování pulzů

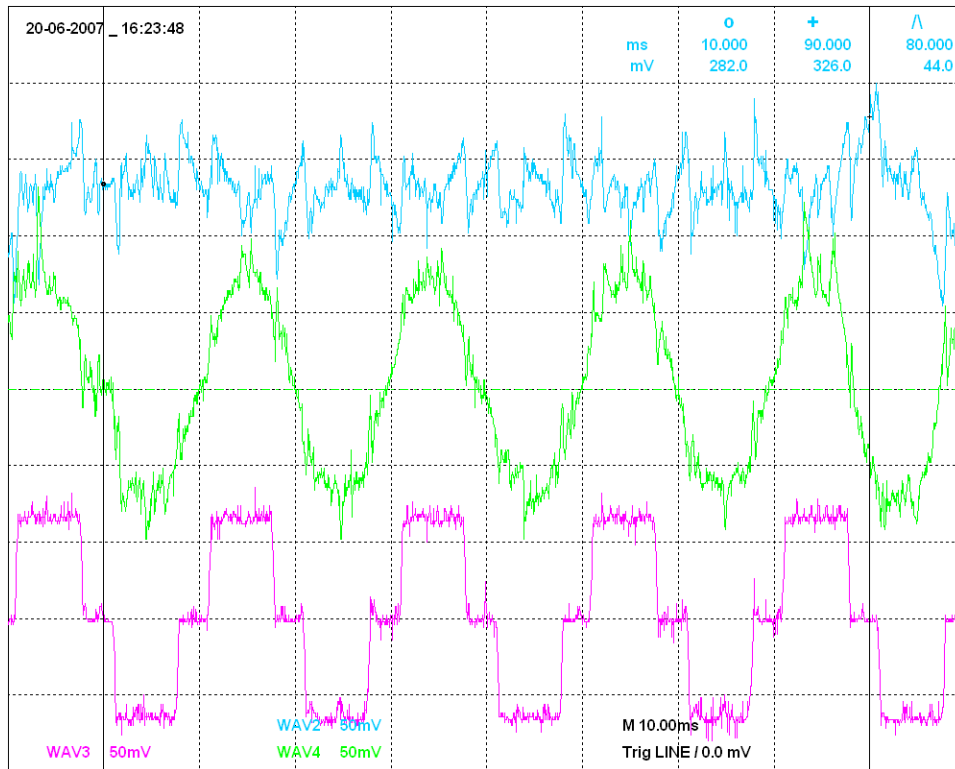
## 4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY



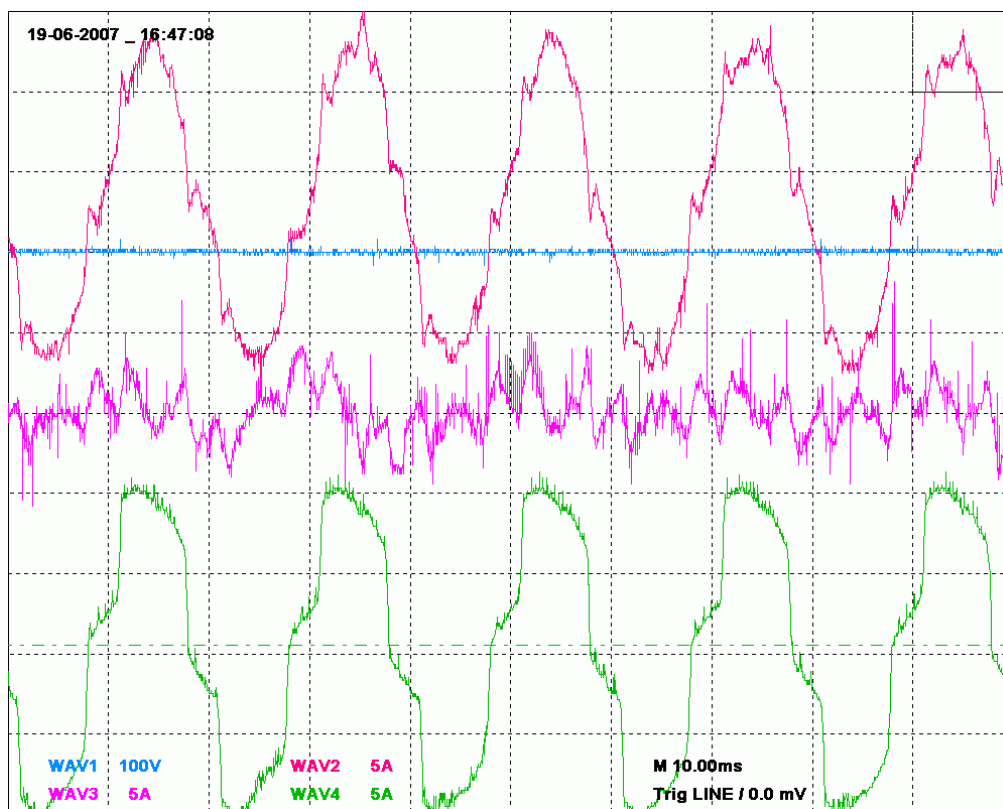
Obr. 4.1 Experimentální pracoviště aktivního paralelního filtru



Obr. 4.2 Průběh síťového proudu při použití vstupní indukčnosti  $L=5mH$

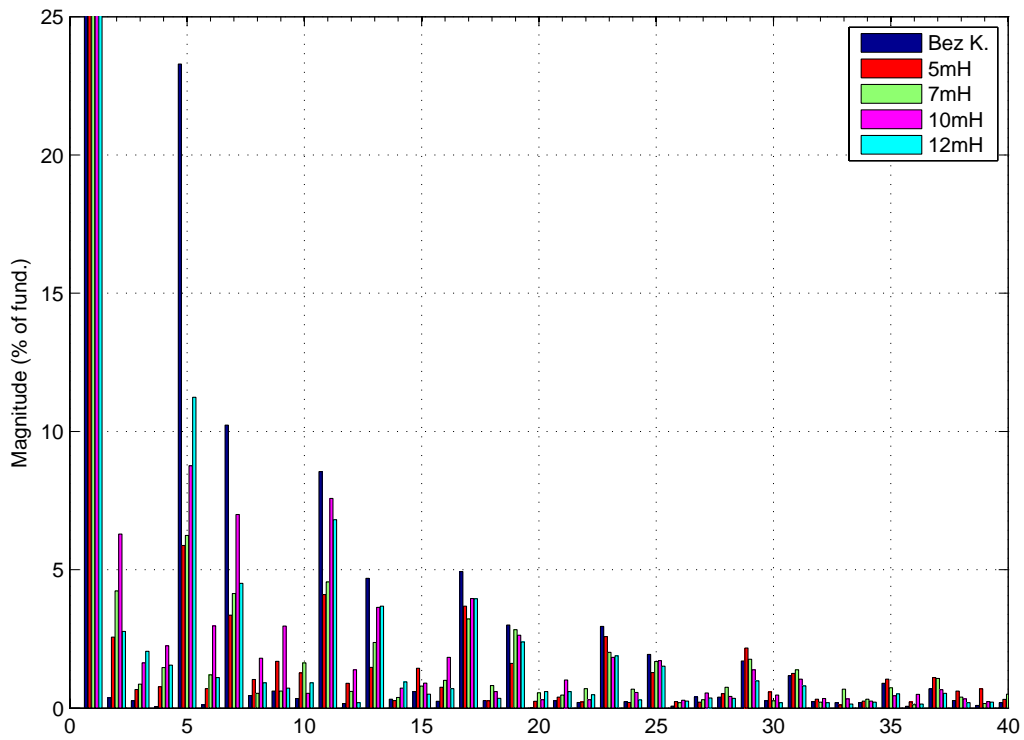


Obr. 4.3 Průběh proudů aktivního paralelního filtru při vstupní indukčnosti  $L=5mH$



Obr. 4.4 Průběh proudů aktivního paralelního filtru proudů aktivního filtru pro  $u_{dc}^*=400V$  a nesymetrickou zátěž





*Obr. 4.5 Porovnání filtrace pro jednotlivé velikosti vstupní indukčnosti aktivního filtru*

## 5. ZÁVĚR

V této práci byla provedena analýza řídicích algoritmů paralelních aktivních filtrů, simulace řídicího algoritmu s využitím řízení okamžitých hodnot složek proudu ( $i_d$ - $i_q$ ) a následná realizace plně digitálního řízení aktivního paralelního filtru.

V kapitole 4 jsou uvedeny metody řízení a způsoby určení referenčních hodnot pro řízení paralelního aktivních filtrů. Dále jsou uvedeny vlastnosti metod řízení a porovnání kompenzačních vlastností s ohledem na různé provozní stavy aktivního paralelního filtru.

Na základě uvedených vlastností jednotlivých strategií řízení byla zvolena strategie s využitím řízení okamžitých hodnot složek proudu ( $i_d$ - $i_q$ ). V kapitole 5 byl proveden teoretický rozbor zvoleného způsobu řízení APF. Uvedený způsob řízení je založený na dvou vnitřních proudových regulačních smyčkách a vnější regulační smyčce pro stejnosměrné napětí v meziobvodu aktivního paralelního filtru. Vnitřní (proudová) a vnější (napěťová) regulační smyčka se vzájemně neovlivňují.

Následně byl vytvořen model aktivního paralelního filtru a provedena simulace zvoleného způsobu řízení v prostředí Matlab/Simulink a její odladění. Struktura modelu byla zvolena tak, aby řídicí část byla snadno implementovatelná do systému dSPACE 1103A pro využití řídicího algoritmu v reálném čase. Byla provedena simulace pro různé pracovní podmínky aktivního paralelního filtru (symetrické a nesymetrické napájení zátěže). Dále byla provedena simulace pro různé provozní stavy nelineární zátěže (konstantní nelineární zátěž, změna proudu nelineární zátěže a nesymetrické nelineární zatížení).

Výsledky simulace uvedené v kapitole 7 ukazují, že zvolená strategie řízení aktivního paralelního filtru je velmi vhodná ke kompenzaci charakteristických i necharakteristických harmonických složek proudu, který je do vstupní napájecí sítě generován nelineární zátěží. Výsledky simulace ukázaly, že uvedený způsob řízení dosahuje velmi dobré kompenzační schopnosti harmonických proudů nelineární zátěže jak pro kompenzaci v ustáleném stavu, tak i pro přechodné děje. Regulátor systému aktivního paralelního filtru je schopen kompenzovat i v případě poklesu vstupního síťového napájecího napětí, tak i pro změny proudu nelineární zátěže.

Bylo vytvořeno experimentální pracoviště aktivního paralelního filtru pro ověření simulovaných výsledků. Experimentální pracoviště bylo sestaveno

z komponent (měniče a měřicí rozhraní) postavených na katedře Elektrických pohonů a trakce ČVUT Praha.

Realizovaný řídicí algoritmus byl následně implementován do systému dSPACE 1103A pro ověření realizovaného způsobu řízení aktivního paralelního filtru v reálném čase a potvrzení výsledků získaných simulací. Řídicí algoritmus byl doplněn bloky softwarové ochrany, implementace ochran byla provedena souběžně s implementací řídicího algoritmu a experimentální části.

Výsledkem experimentálních měření byly potvrzeny výsledky dosažené při simulaci řídicího algoritmu. Během experimentální části byl sledován vliv vstupní indukčnosti na výsledné harmonické zkreslení síťového proudu. Pro indukčnost o velikosti 5mH bylo dosaženo nejmenší zkreslení průběhu proudu THDi i obsah harmonických složek. Experimentálně byl ověřen stav při nesymetrickém zatížení, systém aktivního paralelního filtru byl provozován i pro vstupní napájecí napětí 3x400V.

Systém dSPACE 1103A se jeví z pohledu rychlosti a uživatelského rozhraní jako velmi vhodný nástroj pro realizaci a vývoj regulačních algoritmů pro řízení elektrických pohonů, či výkonových měničů pro rozmanité využití..

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Tisková informace ABB.: Harmonické – lepší prevence než náprava, Elektro 2000/5
- [2] Santarius P., Tlustý J., Korenc V.: Zachování kvality dodávané elektrické energie při nárůstu úrovně rušivých vlivů v distribučních sítích, Grantový projekt Grantové agentury České republiky (evidenční číslo 102/99/1000)
- [3] Sýkora T.: Rozptýlená výroba elektrické energie, Diplomová práce, ČVUT, 2004
- [4] Valouch V., Škramlík J.: Principy řízení aktivních filtrů, III. Konference Energetické rušení v energetice, Brno 1998
- [5] Valouch V.: Řízené usměrňovače s pulsně šířkovou modulací a jejich použití jako aktivní filtry, Elektro 1998/4
- [6] Bůbela T.: Koncepce aktivních filtrů tuzemské výroby, III. Konference Energetické rušení v energetice, Brno 1998
- [7] Bůbela T., Korenc V.: Paralelní aktivní filtry, Elektro 1998/11
- [8] Dixon J., Morán L.: Delivering Clean and Pure Power, Hugh Rudnick, IEEE Power engineering Society September/October 2003
- [9] Dixon J., Morán L., Espinoza J. Wallace R.: Using active power filters to improve power quality
- [10] Alfonso J, Ribeiro da Silva, Martins J.S.: Active filters for power quality improvement, IEEE PowerTech, 2001
- [11] María Isabel Milanés Montero, Enrique Romero Cadaval, Fermín Barrero González: Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems , IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 22, NO. 1, JANUARY 2007
- [12] Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems
- [13] Valouch V.: Active filter control methods based on different power theories, ISIE 99
- [14] João Alfonso J., Couto C., Martins J.: Active Filters with Control Based on the p-q theory, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol. 47, n° 3, Sept. 2000
- [15] Alfonso J., Aredes M., Edson Watanabe E., Martins J.: Shunt Active Filter for Power Quality Improvement, International Conference UIE 2000, November 2000

- [16] Ali Emadi ,Abdolhosein Nasiri, Stoyan B. Bekiarov : Uninterruptible Power Supplies and Active Filters , CRC Press, 2005, ISBN-10: 0849330351
- [17] Valouch V., CHIN E. LIN, CHIN-LIN CHEN: Synchronous detection method for three-phase three-wire systems in reactive and harmonic power compensation, Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)Vol. 23, No. 3, 1999.
- [18] N. Mendalek, K.Al-Haddad: Modelling and nonlinear control of shunt aktive power filter, International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 23, No. 1, 2003
- [19] Paolo Mattavelli : A Closed-Loop Selective Harmonic Compensation for Active Filters, IEEE Transactions on industry applications, Vol 37, No.1 January /February 2001
- [20] H. P. To, M. F. Rahman and C. Grantham : Decoupled control of a three phase current source active power filter , School of Electrical Engineering and Telecommunications University of New South Wales
- [21] Shailendra Jain,P. Agarwal, H. O. Gupta , Ganga Agnihotri : Modeling of Frequency Domain Control of Shunt Active Power Filter Using MATLAB Simulink and Power System Blockset
- [22] Moleykutty George, Kartik Prasad Basu : Three-Phase Shunt Active Power Filter, American Journal of Applied Sciences 5 (8): 909-916, 2008 ISSN 1546-9239
- [23] Matthew Alan Gray: A Comperative analysis of proporational-integral compensated and sliding mode compensated shunt active power filler. Faculty of Mississippi State University, December 2004
- [24] Consalva J. Msigwa, Beda J. Kundy and Bakari M.M. Mwinyiwiwa: Control Algorithm for Shunt Active Power Filter using Synchronous Reference Frame Theory, World Academy of Science, Engineering and Technology 58 2009
- [25] DS1103 PPC Controller Board 1103, Release 4.0 – August 2003
- [26] Helder J. Azevedo, José M. Ferreira, António P. Martins, Adriano S. Carvalho : Direct Current Control of an Active Power Filter for Harmonic Elimination, Power Factor Correction and Load Unbalancing Compensation, FACULTY OF ENGINEERING OF THE UNIVERSITY OF PORTO
- [27] P. Šimek : Implementace řídicího algoritmu aktivního filtru, Diplomová práce, ČVUT, 2008

- [28] H.-H.Kuo,S.-N.Yeh,J.-C.Hwang: Novel analytic model for design and implementation of three – phase aktive power filter controller,IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 148 No.4 July 2001

## 7. SEZNAM PUBLIKACÍ<sup>1</sup>

- [1] Paclt Z. - Valouch V.: *Modelování paralelního aktivního filtru*. In XXI. Mezinárodní symposium učitelů elektrických pohonů SYMEP 2006. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, s. 1-9. ISBN 80-7043-455-4
- [2] Paclt Z., Valouch V.: *Způsoby řízení paralelních aktivních filtrů*.. Odborná konference ELEKTROENERGETIKA 2006 - ELEN, Praha, Česko, září 18-19, pp. 1–7, 2006
- [3] Paclt Z., Škramlík J., Valouch, V.: *Control Strategy of Hybrid Power Filter*. 16th Inter. Conference on Electrical Drives and Power Electronics – EDPE 07, the High Tatras, Slovakia, September 24-26, pp. 1–5, 2007
- [4] Paclt Z.: *Modeling of shunt active power filter*. 11th International Student Conference on Electrical Engineering POSTER 2007
- [5] Paclt Z., Šimek P., Valouch V.: *Implementace algoritmu řízení paralelního aktivního filtru do systému dSPACE1103A*. In SYMEP 2008 [CD-ROM]. Trenčín: Trenčianská univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíně, 2008, s. 81-88. ISBN 978-80-8075-337-5.
- [6] Paclt Z., Šimek P., Valouch V.: *Řízení paralelního aktivního filtru systémem dSpace1103A*. Konference ELEN 2008, Prague, Czech Republic, September 2-3, pp. 1–7, 2008
- [7] Paclt, Z, Šimek P., Škramlík J., Valouch, V.: *Control Strategy of Active Power Filter*. Symposium on Electric Machines and Drives, Power Electronics and Drive Control, Prague, Czech Republic, 30 September – 2 October, pp. 45–48, 2008
- [8] Paclt Z., Šimek P., Škramlík J., Valouch, V., Klíma, J.: *Analytical Modelling and Implementation of Three-Phase Four-Switch Space-Vector PWM Converter*. Symposium on Electric Machines and Drives, Power Electronics and Drive Control, Prague, Czech Republic, 30 September – 2 October, pp. 49–52, 2008

## 8. VYBRANÉ PROJEKTY

- [9] Paclt Z : „*Výkonové aktivní filtry*“, Projekt podporovaný grantem (2006), CTU CTU0606313

---

<sup>1</sup> Bez ohlasů a citací.