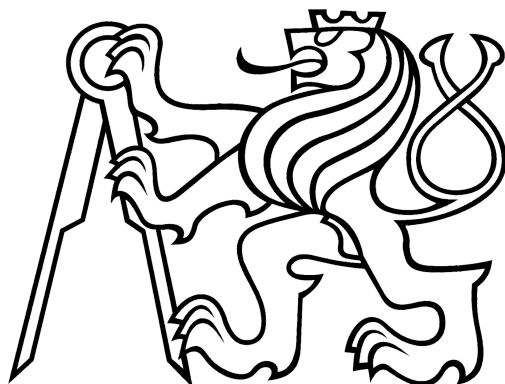


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE



TEZE K DISERTAČNÍ PRÁCI

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrotechnologie

Michal Brejcha

Řízení impulsních systémů pro kompenzaci neaktivní energie sítě

Doktorský studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektrotechnologie a materiály

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

Praha, červen 2014

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na katedře elektrotechnologie Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze.

Uchazeč: Ing. Michal Brejcha
Katedra elektrotechnologie
Fakulta elektrotechnická ČVUT
Technická 2, Praha 6, 166 27

Školitel: doc. Ing. Václav Papež CSc.
Katedra elektrotechnologie
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 Elektrotechnologie a materiály 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
Elektrotechnologie a materiály
Fakulta elektrotechnická ČVUT, Technická 2, Praha 6

Obsah

1 Úvod	3
2 Současný stav problematiky	4
3 Cíle disertační práce	6
4 Metody zpracování	7
5 Hlavní přínosy a výsledky	10
6 Závěr	14
Seznam v tezi použité literatury	15
Seznam publikací vztahujících se k disertační práci	17
Summary	20
Resumé	21

1 Úvod

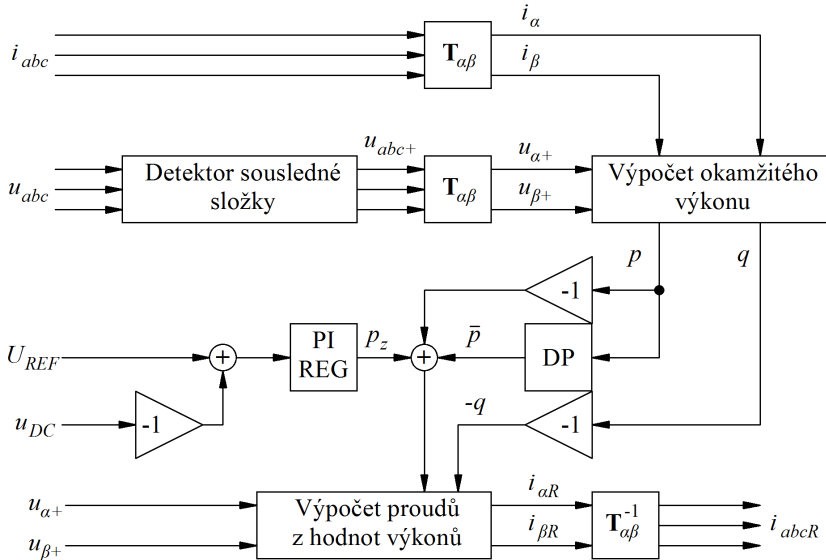
Způsob jakým vyrábíme, přenášíme a odebíráme elektrickou energii značně ovlivňuje účinnost jejího využití. Nejčastěji se lze v energetických sítích setkat se střídavým napětím v jednofázové nebo třífázové soustavě. Těmito soustavami se budeme v této práci zabývat. Z pohledu účinnosti je třeba zvážit, jaký výkon přenášíme, velikost tzv. jalové složky výkonu, jaká je použita napěťová hladina a v neposlední řadě jaké odchylky od harmonického průběhu vykazují průběhy napětí a proudu. Zmíněné pojmy lze shrnout do společného tématu, kterým je kvalita elektrické energie.

Idealizovaný proces výroby a spotřeby elektrické energie předpokládá, že energii, kterou s určitou účinností vyrobíme sníženou o ztráty na vedení, s určitou účinností spotřebujeme v cílovém zařízení. Při návrhu elektrických zdrojů a přenosových vedení je třeba navíc uvažovat i tu část energie, která nemění svůj charakter (elektrická energie - teplo, elektrická energie - kinetická energie apod.), ale pouze cirkuluje mezi zdrojem a zátěží. Tato neaktivní energie zvyšuje efektivní hodnotu procházejícího proudu, čímž rostou nároky na dimenzování elektrických strojů a vedení a také dochází k nárůstu úbytku napětí na sériových impedancích a tím k růstu ztrát v celém procesu. Je zřejmé, že právě z těchto důvodů je třeba zmíněnou neaktivní část energie pokud možno minimalizovat.

Neaktivní výkon je v energetických sítích produkován zpravidla zátěží (mohou ho produkovat i zdroje - aktivní filtry, kompenzátory apod.). V případě harmonických průběhů napětí a proudů dochází k jeho vzniku, pokud zátěž obsahuje akumulární prvky (kondenzátory, tlumivky), které jsou v rámci jedné periody síťového napětí střídavě nabíjeny a zase vybíjeny. Zde hovoříme o jalovém výkonu. U neharmonických průběhů obvodových veličin je tento výkon vytvořen, když jsou rozdílné průběhy napětí a proudu, tj. mají různý tvar nebo fázový posun. V tomto případě vždy hovoříme pouze o neaktivním výkonu a v energetických sítích je jeho zdrojem nelinearita zátěže. Tato práce se bude povětšinou zabývat právě způsoby kompenzace neaktivního případně jalového výkonu a zajištěním harmonických průběhů obvodových veličin.

2 Současný stav problematiky

Použití polovodičových měničů pro řízení toku energie v moderních sítích má řadu důvodů. Předně jimi lze snížit ztráty na vedení, zvýšit dynamickou stabilitu sítě, rovnoměrně rozložit tok energie mezi paralelní vedení (snížit okruhový proud), snížit poklesy nebo eliminovat výpadky napětí atd. Tato práce je zaměřena na použití aktivního harmonického filtru, který využívá řídicí smyčku založenou na tzv. PQ teorii.



Obrázek 1: Blokové schéma řídicího algoritmu pro paralelní aktivní harmonický filtr

Základní blokové schéma algoritmu založeného na PQ teorii je uvedeno na obrázku 1 a je v souladu s řízením publikovaným v [1]. Princip metody vychází z faktu, že při sinusovém symetrickém síťovém napětí je okamžitá hodnota výkonu v čase konstantní v případě, že i fázové proudy jsou symetrické a sinusové. V publikaci [1] autoři nepopisují jen případ harmonického průběhu síťového napětí. Ukazují podrobnější chování metody i s ohledem na další harmonické složky a nesymetrie, které může napětí napájecího systému vykazovat. Metodu lze uplatnit při mnoha konfiguracích kompenzačního zařízení, ať už se jedná o paralelní, sériový nebo hybridní AHF a pro různé účely jako například tlumení oscilací napájecího systému. Práce je zaměřena především

na paralelní aktivní filtr v trojvodičové 3f síti, který je uzpůsoben jak pro filtraci všech harmonických složek proudu, tak pro odstranění proudové nesy-
metrie.

Základní princip algoritmu je relativně jednoduchý. V průběhu jeho reali-
zace se však objevila řada problémů. Především se algoritmus skládá z velkého
množství výpočetních bloků řazených do série. Chyba ve výpočtu jednoho
bloku se kaskádně šíří až na výstup. Dále některé bloky obsahují zpětnou
vazbu a z principu funkce mohou být nestabilní. To je problém například
filtrů střední hodnoty (filtry s nekonečnou impulsní odezvou) nebo fázových
závěsů (detektor sousledné složky). Nakonec je zde i problém s výpočetní
složitostí daných bloků respektive náročnost výsledného algoritmu na do-
stupné prostředky použité platformy (taktovací rychlost, použitý paměťový
prostor atd.).

3 Cíle disertační práce

Tato práce navazuje na projekt realizace řídicího programu pro funkční vzorek aktivního harmonického kondicionéru. Jejím hlavním cílem je zjednodušení programu a zlepšení dynamických vlastností výsledného řídicího algoritmu. V rámci daného projektu byla implementována metoda okamžitých výkonů, tzv. PQ teorie [1]. Ta, jak bude ukázáno níže, se skládá z řady funkčních bloků, jako jsou Clarkové transformace, filtry střední hodnoty, matice výpočtu okamžitých výkonů atd. Blokové schéma výpočtu je relativně rozsáhlé. Vzhledem k této složitosti je zde třeba klást velký důraz na přesnost mezivýsledků. Problém je méně markantní u výpočtů v pohyblivé řádové čárce, nicméně v projektu funkčního vzorku bylo nutné, vzhledem k větší rychlosti algoritmu, provádět výpočty v pevné řádové čárce. V takovém případě lze vyšší přesnosti dosáhnout rozšířením bitových rozsahů. Stojí zde tak proti sobě požadavky velké přesnosti výpočtu a zachování jednoduchosti programu a nízkých paměťových nároků. Dřívější realizace algoritmu PQ teorie selhávaly právě na tomto rozporu. Základním cílem práce bylo najít metodiku, s jakou mají být v jednotlivých výpočtech voleny bitové rozsahy, aby bylo dosaženo rozumného kompromisu mezi nároky výpočtu a jeho přesností.

S požadavkem zmenšení výsledné velikosti celého programu zároveň vystal nový cíl pro úpravu stávajících bloků algoritmu za účelem jejich zjednodušení a zlepšení jejich dynamických vlastností. Zvláštní pozornost si v tomto případě zasloužily především fázové závěsy. V PQ teorii se využívají pro filtraci sousledné symetrické složky síťového napětí. Fázové závěsy obsahují relativně složité funkce, jakými jsou výpočty goniometrických funkcí a pak jejich dynamické vlastnosti nejvíce ovlivňují dynamiku výsledného řídicího programu. Cílem práce je tedy najít takový algoritmus, který může nahradit funkci fázového závěsu v PQ teorii, je jednodušší na implementaci a má podobné nebo lepší dynamické vlastnosti.

4 Metody zpracování

Veškeré navržené nebo použité algoritmy byly simulovány v softwaru MATLAB a zároveň testovány v reálných podmínkách po implementaci do funkčního vzorku aktivního harmonického kondicionéru. Ten pracoval v zapojení dle obrázku 2. Silový obvod byl napájen z 3f transformátoru $3 \times 230 \text{ V} / 3 \times 170 \text{ V}$ v zapojení Y_n/Y . Transformátor byl napájen z laboratorního stolu a galvanicky odděloval a snižoval napětí v měřicím obvodu. Měřicí obvod tak tvořila izolovaná IT síť, v jejímž případě se používá typ 3f měniče bez vyvedeného napěťového středu kondenzátorů ve stejnosměrném obvodu. Tomuto režimu odpovídalo i navržené řízení aktivního harmonického filtru.

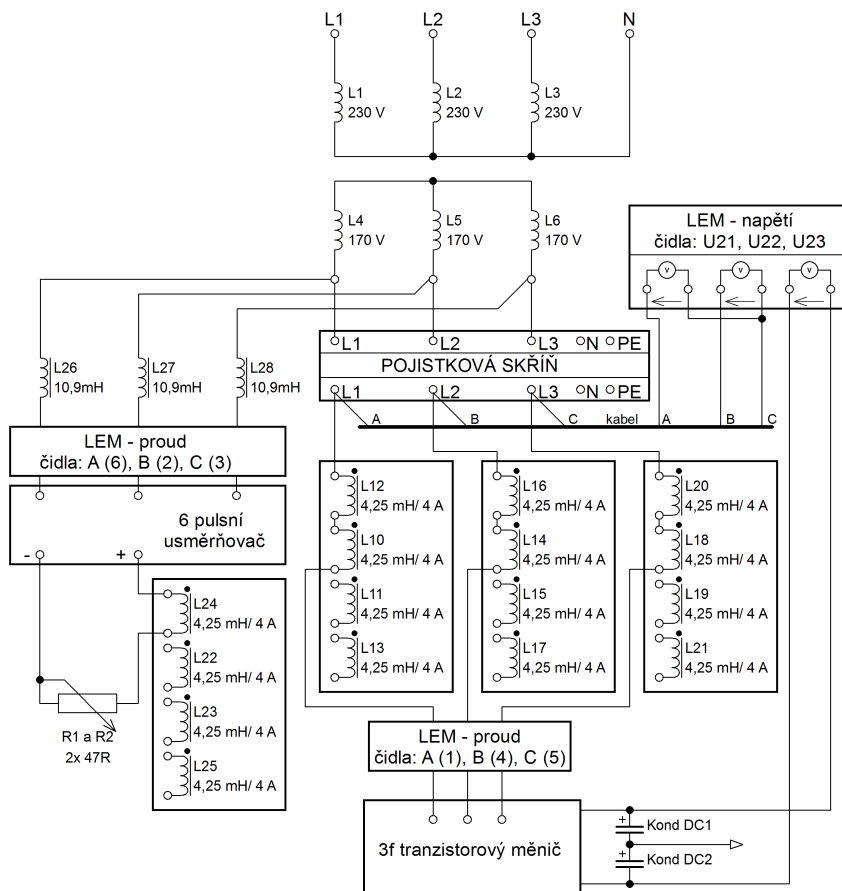
Na sekundární straně transformátoru se obvod dělil na dvě paralelní větve:

1. Obvod zátěže

- Každá fáze obsahovala tlumivku o indukčnosti 10,9 mH na jádře z transformátorových plechů se vzduchovou mezerou. Jmenovitý jalový výkon tlumivek byl 400 V·A.
- Za tlumivkami byl umístěn přípravek s čidly LEM pro měření proudu v každé fázi.
- Samotnou zátěž tvořil šesti-pulsní diodový usměrňovač, který byl zatížen sériovým spojením dvou potenciometrů a přípravku tlumivky. Maximální hodnota odporu potenciometrů byla 47Ω a tlumivku bylo možné přepínat ve 4 sekcích s hodnotou indukčnosti 4,25 mH. Jmenovitý proud tlumivky byl 4 A, čímž byl omezen maximální proud na stejnosměrné straně.

2. Obvod měniče

- Obvod měniče začínal pojistkovou skříní s hlavním vypínačem. Ta zde byla z bezpečnostních důvodů pro případ chybné činnosti řídicího programu a nechtěného propojení fází do zkratu. Po zapnutí vypínače pojistkové skříně docházelo nejdříve k propojení napájení a obvodu měniče přes sériový rezistor. Ten se po definovaném čase překlenu kontakty časového relé. Uvedené opatření zde bylo pro omezení nárazového proudu, který vzniká při nabíjení kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu měniče při jeho připojení na síť.
- Ze svorek pojistkové skříně byly čidly LEM snímány sdružené hodnoty napětí mezi fázemi L3-L1 a L3-L2. Poslední vstup přípravku napěťových LEM čidel se používal pro sledování napětí ve stejnosměrném obvodu měniče. Maximální vstupní napětí přípravku bylo 1 kV.



Obrázek 2: Zapojení výkonové části pracoviště vývoje aktivního harmonického filtru

- Mezi pojistkovou skříní a vstupem do měniče byly umístěny filtrační tlumivky. Tlumivky měly vyvedeny 4 odbočky s maximální dosažitelnou indukčností 16 mH.
- Proud na vstupu do měniče byl opět sledován přes proudová LEM. Číselné označení čidel v pořadí fází bylo 1, 4, 5.

Výstupy všech čidel LEM byly sledovány pomocí AD převodníků platformy CompactRIO. Všechny testované algoritmy pracovaly na dané konfiguraci sítě, kromě algoritmu pro detekci sousledné symetrické složky. Ten

byl navíc testován odděleně, kdy byla síť nahrazena 3f laboratorním elektronickým zdrojem „California Instruments Model 3001ix“. To umožnilo zjištění vlivu různých druhů nesymetrie a harmonických na navržený algoritmus. Výsledky algoritmu byly porovnávány s měřením přístrojem „Zimmer LMG310“. S podrobnostmi o tomto měření se lze seznámit v bakalářské práci [2].

Pro řízení měniče byla použita platforma CompactRIO cRIO-9014 vybavena následujícími 6 zásuvnými moduly:

- 4x modul NI9215: A/D převodník, 4 kanály, 100 kS/s, 16 bitů, ± 10 V
- 1x modul NI9421: logické vstupy, 8 kanálů, 100 μ s, maximální frekvence 10 kHz, logické signály (12 až 24) V
- 1x modul NI9474: logické výstupy, 8 kanálů, 1 μ s, maximální frekvence 1 MHz, logické signály (5 až 30) V, maximální proud výstupu 1 A

Moduly NI9215 sloužily k převodu analogových signálů z výstupů LEM čidel. Jelikož LEM čidla na DPS měniče nebylo možné pro měření proudu použít (rušení), byl jeden modul nadbytečný. Logické vstupy NI9421 byly použity pro sledování signalizace chyb tranzistorových modulů a logické výstupy NI9474 sloužily pro řízení spínání tranzistorů.

Program pro platformu CompactRIO byl vytvářen v prostředí Labview 2009. Programování v tomto prostředí je svým způsobem podobné vytváření modelů v prostředí SIMULINK. K dispozici je seznam předvolených bloků, jako například sčítání, násobení, Fourierova transformace, paměť typu FIFO apod. Ty pak uživatel přesouvá (vybírá) do pracovní plochy a propojuje signály tak, aby vznikl požadovaný program. Jedná se tedy o techniku programování „drag and drop“. U všech bloků lze nastavit určité parametry určující jejich chování. U aritmetických bloků lze například určit přesnost s jakou mají být dané početní operace prováděny a jakým způsobem má být ošetřeno případné přetečení. Kvůli tomu i v tomto prostředí musí mít vývojář povědomost o chování daných operací (výpočty v binárních číslech apod.), resp. o jejich implementaci na nízké úrovni (úroveň assembleru nebo kódu ve VHDL). Problém je tím významnější, pokud je cílem jeho programu platforma s jasně omezenými prostředky, jakou je například hradlové pole.

V případě platformy CompactRIO může program běžet buď v hradlovém poli nebo signálovém procesoru. Vzhledem k tomu, že program aktivního harmonického filtru musí pracovat v reálném čase s krátkou reakční dobou, byly všechny algoritmy vždy cíleny do hradlového pole. Ve všech případech byla měření prováděna pro vzorkovací frekvenci 10 kHz.

Ačkoliv byly výsledné algoritmy skutečně implementovány do funkčního vzorku, jsou dále popisovány především výsledky ze simulací. To je z důvodů

větší názornosti a možnosti jednoduchého zobrazení i vnitřních veličin daných algoritmů.

5 Hlavní přínosy a výsledky

Analýza chyb ve výpočtech v pevné řádové čárce

V práci byla provedena podrobná analýza tvorby, vlivu a šíření chyby v jednotlivých výpočetních operacích nutných pro správnou činnost algoritmu. Pozornost při tom byla věnována výpočtům v pevné řádové čárce, které mají v řídicích systémech výkonových měničů řadu výhod.

Samotný algoritmus PQ teorie vykazoval velmi dobré výsledky v simulacích softwaru MATLAB. Zde jsou výpočty prováděny ve formátu pohyblivé řádové čárky s dvojitou přesností. Implementace do hradlového pole jednotky CompactRIO však vyžadovala výpočty v pevné řádové čárce. Dřívější realizace řídicího programu selhávaly na dvou protichůdných požadavcích výpočtu s maximální přesností a úspory místa v hradlovém poli. Při nerespektování vlivu zaokrouhlování hodnot může docházet k nezanedbatelným odchylkám výstupu daného bloku od cílové hodnoty a v případě zpětnovazebních systémů dokonce ke vzniku oscilací. Naopak u výpočtů s nezaokrouhlovanými výsledky postupně roste bitová šířka jednotlivých hodnot. Paradoxně je této problematice věnováno v literatuře relativně málo místa (viz např. [3], [4], [5]). Podrobněji se tímto problémem zabývá především publikace [6], o kterou se opírala i analýza v disertační práci.

V práci je analyzován jak vliv chyby zaokrouhlování, tak šíření chyby do výsledku určité operace jako například násobení, dělení apod. Pozornost je věnována i zaokrouhlování koeficientů (filtry, transformace) a vzniku chyby v rekurzivním výpočtu. Na základě analýzy byly navrženy určité podmínky, které zajišťují kompromis mezi „dostatečnou“ přesností výpočtu a velikostí kódu. Daná pravidla byla aplikována v průběhu tvorby řídicího algoritmu, přičemž se podařilo výrazně snížit velikost původního kódu bez vzniku výrazné chyby výstupu daného řízení.

Filtrace střední hodnoty

Důležitou součástí algoritmu řízení harmonického filtru, který je založen na teorii okamžitého výkonu, je výpočet střední hodnoty signálů. V knize [1] řeší autoři tento úkol pomocí filtrů s nekonečnou impulsní odezvou (IIR). Jak je v disertační práci ukázáno, může být implementace takových filtrů v pevné řádové čárce dosti komplikovaný úkol. Proto byly hledány i alternativní výpočty, které jsou založeny na filtrech s konečnou impulsní odezvou

(FIR). Jako velmi zajímavá možnost se jeví určení střední hodnoty s filtry CIC.

CIC filtry jsou realizovány kaskádním spojením integrátoru a hřebenového filtru. Mezi oba bloky se pak vřazuje decimace, která dělí (snižuje) řád hřebenového filtru. Práce a následná implementace se zabývá typem filtru, kde je úroveň decimace rovna přímo řádu výsledné filtrace. Tudíž paměťové nároky takového filtru jsou minimální. Z principu se jedná o přímý výpočet střední hodnoty průměrováním jednotlivých vzorků. Pokud je tedy řád filtru zvolen v souladu s podmínkou:

$$N = f_s / f_1 \quad (1)$$

pak je prováděno průměrování přes celou periodu vstupního signálu. V rovnici (1) je f_s frekvence vzorkování a f_1 je základní frekvence vstupního signálu. Pochopitelně je podmínka (1) splněna jen přibližně, nicméně vzhledem k běžným hodnotám odstupů vzorkovací frekvence a frekvence sítě lze obvykle chybu zanedbat. Zajištění této podmínky lze také upravovat pomocí jednoduchého adaptivního algoritmu. Výsledná frekvenční charakteristika má na všech harmonických frekvencích nuly přenosu, což je velikou výhodou tohoto typu filtrace. Nevýhodou je, že aktualizovaná hodnota střední hodnoty je k dispozici jen jednou za jednu periodu. Po implementaci daného výpočtu do řízení aktivního harmonického filtru však nebylo pozorováno žádné zhoršení dynamiky. Výsledky tohoto úsilí byly prezentovány v práci [7].

Adaptivní pásmová propust

Tento filtr vznikl na základě požadavku získání základní harmonické složky z velmi zarušených nebo zkreslených signálů. Byl využit v detektorech průchodů nulou a lze jej využít jako zdroj referenčního signálu v aktivních harmonických filtrech. Velkou výhodou dále popisovaného řešení je jeho jednoduchost. Bylo ověřeno, že jej lze snadno implementovat i v osmibitových mikroprocesorech.

Základní myšlenka je taková, že vstupní průběh je filtrován úzkopásmovou propustí, jejíž centrální frekvence je totožná s frekvencí základní harmonické vstupního průběhu. Na výstupu takového filtru je signál s potlačenými vyššími harmonickými. Jeho základní harmonická složka má stejnou fázi a amplitudu, jako má základní harmonická složka vstupního průběhu. K ladění filtru na základní frekvenci jsme společně s Ing. Rudolfem Bayerem zvolili použití upravené verze prediktoru LMS. Použití prediktoru pro odhad frekvence vstupního signálu je popsáno například v [8]. Tato metoda je v disertační práci modifikována za účelem jejího nasazení speciálně pro účely ladění úzkopásmové propusti.

Nevýhodou navržené modifikace je, že adaptace pracuje korektně pouze se sinusovými signály. Pro obecné signály může docházet k odchylkám od skutečné úhlové frekvence. Proto je třeba pomoci jakéhokoliv vhodného filtru vytvořit ze vstupního signálu tzv. referenční sinusový signál o stejné základní frekvenci. Nezáleží však již na tom, v jakém vztahu spolu budou amplitudy a fáze referenčního signálu a zmíněné základní harmonické složky. Filtr je pak laděn podle referenčního signálu a zpracovává vzorky vstupního signálu.

Simulace filtru a jeho použití bylo publikováno například v pracích [9] a [10]

Detektor sousledné symetrické složky

Pravděpodobně nejvýznamnějším výsledkem disertační práce je adaptivní detektor sousledné symetrické složky. Ten byl určen jako přímá náhrada původního detektoru, který byl prezentován v publikaci [1]. Navrhovaný detektor je mnohem jednodušší a má podobné dynamické vlastnosti jako ten původní. Tento výsledek nebyl dosud publikován.

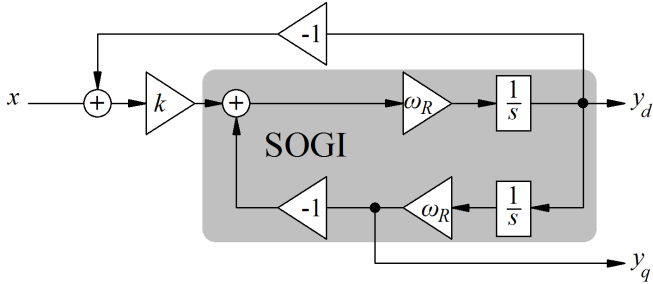
Algoritmus vychází z filtru publikovaného v [11]. Struktura tohoto filtru je zobrazena na obrázku 3. Zřejmě jsou oba výstupy filtrovány filtrem druhého řádu. V zásadě se v obou případech jedná o filtr typu pásmová propust', i když v případě výstupu q , je frekvenční charakteristika podobná dolní propusti. Vlastnosti filtru ovlivňují parametry k a ω_R . Parametrem k se nastavuje šířka propustného pásma a ω_R je centrální úhlová frekvence filtru.

Funkce filtru je velice jednoduchá. Základním předpokladem je, že základní frekvence vstupujícího signálu bude shodná s centrální frekvencí filtru. Pak na jeho výstupu jsou dva signály velmi blízké sinusovce (respektive filtrované vstupní signály), kdy jeden je ve fázi se základní harmonickou složkou vstupu a druhý se zpozdí uje o 90° . V detekčním výpočtu se oba signály využijí pro určení sousledné symetrické složky (viz [11]). Hlavním problémem zde je zajištění shody centrální frekvence se základní frekvencí vstupního signálu. V původní literatuře k tomuto účelu autoři využívají fázového závěsu. Mnohem jednodušším řešením je však použití bloku aktivního řízení zisku.

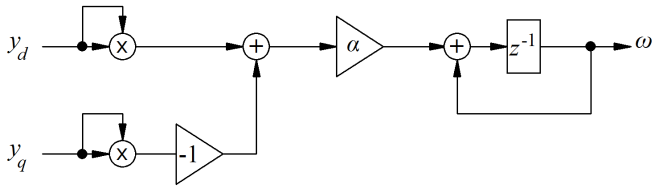
Z obrázku 3 je vidět, že posunutý signál se odvozuje pomocí integrace a násobení úhlovou frekvencí. Jelikož platí rovnost (uvažujeme funkci sinus jako referenční signál):

$$\int \sin(\omega t) dt = -\frac{\cos(\omega t)}{\omega}, \quad (2)$$

pak lze zjistit správnou hodnotu úhlové frekvence porovnáváním amplitud obou výstupních signálů filtru SOGI. Pokud je amplituda referenčního signálu vyšší než je amplituda posunutého signálu násobeného námi určenou úhlovou



Obrázek 3: Schéma algoritmu filtru pro detekci sousledné složky (SOGI - Second Order Generalized Integrator)



Obrázek 4: Algoritmus AGC pro porovnávání amplitud dvou signálů

frekvencí ω_R , pak je zřejmě nutné tento násobek zvětšit. Při opačné nerovnosti úhlovou frekvenci snižujeme.

Správné nastavení parametru ω_R lze získat pomocí automatického řízení zisku (AGC). Ten porovnává efektivní hodnoty obou výstupů a snaží se je dovést k rovnosti pomocí změny daného parametru. Speciálně upravená verze AGC pro tento účel je na obrázku 4. Reálné vlastnosti algoritmu byly ověřeny po nainstalování do platformy CompactRIO. Zde byl program realizován v softwaru LabVIEW. V disertační práci je dále ukázán způsob, jakým lze upravit výpočet vstupní chyby AGC tak, aby bylo dosaženo ještě lepších dynamických vlastností.

6 Závěr

Práce shrnuje problematiku implementace číslicových algoritmů v souvislosti s řízením aktivních harmonických filtrů. Zabývá se šířením chyb ve výpočtech v pevné řádové čárce, což bývá nejčastějším problémem použitelnosti jinak funkčních algoritmů. S tématem konečné přesnosti výpočtů velice úzce souvisí tematika získávání střední hodnoty sledovaných signálů. Daná problematika byla sledována právě proto, že tyto bloky tvoří nedílnou součást algoritmu PQ teorie. Řešení navrhované v původní literatuře[1] využívající filtrů IIR se totiž během implementace algoritmu do FPGA projevilo jako nevyhovující. V této práci je navrženo nahrazení těchto filtrů filtry CIC a je zde provedeno i jejich porovnání s původním řešením jak co do vlastností, tak do množství využitých prostředků FPGA.

Dále jsou v práci shrnuty výsledky, kterých autor dosáhl při řešení problému synchronizace řízení. Některé metody řízení totiž přímo vyžadují znalost aktuální frekvence sítě, kvůli dosažení definovaného fázového posunu mezi generovaným průběhem a průběhem síťových veličin. Za tímto účelem byly studovány implementace některých fázových závěsů, jejichž porovnání lze najít v příslušných kapitolách. V tomto rámci byly navrženy i dva adaptivní algoritmy. První je určen pro získávání základní harmonické složky vstupního průběhu se správnou amplitudou a fází. Zde se pro adaptaci využívá algoritmu LMS. Druhý algoritmus je v jistém smyslu významnější. Jeho účelem je získání průběhu sousledné symetrické složky trojfázového průběhu. Zde se oproti původnímu řešení využívá pro adaptaci úhlové frekvence aktivního řízení zisku AGC. Algoritmus byl testován jak simulací tak implementací v platformě CompactRIO a vykazoval stabilní a správné výsledky. V porovnání s fázovými závěsy bylo dokonce možné dosahovat lepší dynamiky ladění na žádanou frekvenci sítě.

Seznam v tezi použité literatury

- [1] AKAGI, Hirofumi, Edson Hirokazu WATANABE a Maurício AREDES. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience/ John Wiley, c2007, xiv, 379 p. ISBN 04-701-0761-8.
- [2] PŘIBYL, Filip. *Vliv nesymetrie fázových proudů na kvalitu elektrické energie a metody její kompenzace*. Praha, 2013 Bakalářská práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Michal Brejcha.
- [3] LYONS, Richard G. *Understanding digital signal processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011, xxiii, 954 s. ISBN 978-0-13-702741-5.
- [4] MEYER-BÄSE, Uwe. *Digital signal processing with field programmable gate arrays*. 3rd ed. Berlin: Springer, c2007, 774 s. ISBN 978-3-540-72612-8.
- [5] SHENOI, Belle A. *Introduction to digital signal processing and filter design*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006, 423 s. ISBN 9780471654421 (HBK.).
- [6] WIDROW, Bernard a István KOLLAR. *Quantization noise: roundoff error in digital computation, signal processing, control, and communications*. New York: Cambridge University Press, 2008, xxviii, 751 p. ISBN 05-218-8671-6.
- [7] BREJCHA, M., HÁJEK, J., ČERNEK, P., PÍGL, J., PAPEŽ, V., et al.: Střední hodnota okamžitého výkonu pro řízení aktivních filtrů. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, s. 323-328. ISBN 978-80-214-4514-7.
- [8] ŠTRUPL, Miroslav, SOVKA, Pavel. *Web Server Noel* [online]. 12. 12. 2006 [cit. 2013-05-31]. Cvičení k předmětu ADA. Dostupné z WWW: [jhttp://noel.feld.cvut.cz/vyu/ada/adacv/adacv.html](http://noel.feld.cvut.cz/vyu/ada/adacv/adacv.html).
- [9] BREJCHA, Michal, BAYER, Rudolf: Detekce průchodů nulou pomocí adaptivního filtru pro základní harmonickou frekvenci. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 1-4. ISBN 978-80-248-2393-5.

- [10] BAYER, Rudolf, BREJCHA, Michal: Simple Adaptive Control for a Single Phase Shunt Active Filter. In *Applied Electronic 2011*. Plzeň: University of West Bohemia, 2011, p. 39-42. ISBN 978-80-7043-987-6.
- [11] RODRIGUEZ, P., R. TEODORESCU, I. CANDELA, A.V. TIMBUS, M. LISERRE a F. BLAABJERG. New Positive-sequence Voltage Detector for Grid Synchronization of Power Converters under Faulty Grid Conditions. *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2006, s. 1-7. DOI: 10.1109/PESC.2006.1712059. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1712059>

Seznam publikací vztahujících se k disertační práci

Publikace v impaktovaných časopisech

Publikace v recenzovaných časopisech

- Brejcha, M., Černek, P., Bayer, R., Hájek, J. (40%)
Technologie konstrukce odrušovacích filtrů I: Analýza příčin chyb ve frekvenční charakteristice. *Elektrorevue* [online]. 2011, roč. 2011, č. 65, s. 1-15. Internet: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika-vzajemny-a-d-prevod/0/technologie-konstrukce-odrusovacich-filtru-i-ana>. ISSN 1213-1539.
- Brejcha, M. (100%)
A Wideband Low-Pass Filter for Differential Mode Distortion. *Acta Polytechnica*. 2011, vol. 51, no. 5, p. 14-17. ISSN 1210-2709.
- Černek, P., Brejcha, M., Hájek, J., Pígl, J. (10%)
A Comparison of Power Quality Controllers. *Acta Polytechnica [online]*. 2012, vol. 2012, no. 52, p. 22-25. Internet: <http://ctn.cvut.cz/ap/index.php?year=2012>. ISSN 1805-2363.

Patenty

Publikace excerpané WOS

- Brejcha, M. (100%)
Využití zapojení snižujícího měniče napětí v obvodu střídavého napájení. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2010. Brno: Brno University of Technology, 2010, díl 1, s. 827-831. ISBN 978-80-214-4094-4.
- Brejcha, M., Hájek, J., Černek, P., Pígl, J., Papež, V., et al. (20%)
Střední hodnota okamžitého výkonu pro řízení aktivních filtrů. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012, s. 323-328. ISBN 978-80-214-4514-7.

Publikace ostatní

- Brejcha, M. (100%)
Buck Converter in AC Circuit. In Workshop 2010. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010, p. 244-245. ISBN 978-80-01-04513-8.
- Bayer, R., Brejcha, M. (50%)
DETEKCE PRŮCHODŮ NULOU V SÍTĚ S VYSOKOU MÍROU RUŠENÍ.
In Sborník konference ELEN 2010. Praha: ČVUT FEL, Katedra elektroenergetiky, 2010, s. 1-19. ISBN 978-80-254-8089-2.
- Brejcha, M. (100%)
Methods of extracting first harmonic function from power network voltage. In POSTER 2010 - Proceedings of the 14th International Conference on Electrical Engineering. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2010, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04544-2.
- Brejcha, M., Bayer, R. (50%)
Detekce průchodů nulou pomocí adaptivního filtru pro základní harmonickou frekvenci. In Proceedings of the 12th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2011. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 1-4. ISBN 978-80-248-2393-5.
- Brejcha, M. (100%)
Realizace širokopásmového pasivního filtru s vysokým útlumem. In Cena nadace ČEZ o nejlepší vysokoškolský vědeckotechnický projekt. Praha: ČEZ, 2011, s. 1-7.
- Bayer, R., Brejcha, M. (50%)
Simple Adaptive Control for a Single Phase Shunt Active Filter. In Applied Electronic 2011. Plzeň: University of West Bohemia, 2011, p. 39-42. ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-7043-987-6.
- Brejcha, M. (100%)
The Solution of Wideband Low-Pass Filter for Differential Mode Distortion. In POSTER 2011 - 15th International Student Conference on Electrical Engineering. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2011, p. 1-4. ISBN 978-80-01-04806-1.
- Brejcha, M., Papež, V., Pokorný, L. (40%)
Using of buck-converter to provide quality of the electricity. In Workshop 2011. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, p. 1-6.

Ohlasy a citace

Výzkumné granty

- Brejcha Michal Ing., Papež Václav doc. Ing. CSc., Künzel Karel Ing. CSc., Hájek Jan Bc., Černek Petr Ing.,
Sít'ové kondicionéry - funkční vzorek. SGS12/061/OHK3/1T/13, SGS - Studentská grantová soutěž ČVUT
- Brejcha Michal Ing., Papež Václav doc. Ing. CSc., Pokorný Luboš Ing.,
Využití spínaných měničů k zajištění kvality elektrické energie. SGS10/060/OHK3/1T/13, SGS - Studentská grantová soutěž ČVUT

Odborné stáže

Summary

The thesis deals with specific types of algorithms that are used in control programs of active harmonic filters or power converters. It follows the research in project of realization of the active harmonic filter prototype at the department of Electrotechnology. The described algorithms are in close connection with control method called PQ theory, which was a part of the research at the department. The work deals with digital signal processing especially it is focused on adaptive filtering. The problems with error creation after rounding are widely discussed too. The main contribution of the work consists in the developed adaptive filter of positive sequence component. There is used a well-known algorithm of second order general integrator (SOGI). The innovation consists in adjusting of the central frequency of the filter for which is used the block of active gain control (AGC). Resulting algorithm has the same dynamic and it is less complicated than the commonly used phase locked loops.

The thesis shows especially the results from the simulations. It is because of reasons of better explanation. Nevertheless the most of the algorithms were also tested in real conditions after implementation to the prototype of the active harmonic filter. The work is divided to the following chapters:

First chapter is the introduction of basic concepts and it summarizes the theory used in the thesis. Also all goals of the thesis are presented here.

Second chapter briefly shows the use of power converters for compensation of reactive power. The purpose of the active harmonic filter is described here.

Third chapter introduces the prototype of active harmonic filter, which was used for algorithms testing. The topology of the testing circuit is specified too and it is explained the solution of control unit of the converter.

Fourth chapter shows the possible control algorithms for active harmonic filters. The basic principle of PQ theory is discussed and the problems in control loop are specified.

Fifth chapter describes the developed solution of the PQ theory control loop. It deals with cause of output error in calculation in individual blocks. Some recommendations are proposed to minimalize that error. The results of the research aimed on digital signal processing are discussed here. Especially the adaptive filtering of basic harmonic function and filtering of positive sequence component is presented here.

Resumé

Disertační práce zabývá určitými typy algoritmů využívaných v řídicích programech aktivních harmonických filtrů nebo výkonových polovodičových měničů. Práce navazuje na projekt realizace funkčního vzorku aktivního harmonického filtru na katedře elektrotechnologie. Z velké části jsou probírané problémy a algoritmy spojovány s řídicím mechanismem PQ teorie, jíž se daný výzkum zabýval. Je zde proto věnován prostor digitálnímu zpracování signálů, především se zaměřením na jejich adaptivní filtraci. Zároveň se práce zabývá i problémy spojené se vznikem chyby v důsledku zaokrouhlování výsledků početních operací v pevné řádové čarce. Zvláště přínosným tématem této práce je vyvinutý systém adaptivní filtrace sousledné harmonické složky. Ten je založený na dobře známém algoritmu obecného integračního članku druhého řádu (SOGI). Inovativní je zde způsob jeho ladění, který využívá bloku automatického řízení zisku (AGC). Výsledný algoritmus má výhodnější nebo stejné dynamické vlastnosti a jednodušší implementaci než běžně používané fázové závěsy.

V práci jsou popisovány především výsledky simulací. To je z důvodů jejich větší názornosti. Většina předložených algoritmů však byla testována a jejich funkčnost byla ověřena implementací do řízení funkčního vzorku aktivního filtru. Práce má následující členění:

První kapitola je úvodní a shrnuje základní pojmy a teorii využívanou dále v práci. Jsou zde také stanoveny cíle disertační práce.

Druhá kapitola stručně seznamuje s použitím polovodičových měničů pro účely kompenzace neaktivního výkonu. Je zde vysvětlen základní účel a užitečnost aktivního filtru harmonických proudů.

Třetí kapitola seznamuje s funkčním vzorkem aktivního harmonického filtru, na kterém byla většina algoritmů zkoušena. Je zde uvedena topologie testovacího obvodu a vysvětlen způsob, jakým byl funkční vzorek řízen a programován.

Čtvrtá kapitola ukazuje způsoby řízení aktivních filtrů. Je zde vysvětlen princip řízení pomocí PQ teorie a její základní bloková struktura v programové smyčce. Zároveň jsou nastíněny problémy, které s tímto typem řízení mohou nastat.

Pátá kapitola popisuje navržené úpravy programové smyčky PQ teorie. Zabývá se příčinou vzniku chyby ve výpočtech jednotlivých bloků a navrhuje opatření pro jejich minimalizaci. Dále jsou zde uvedeny výsledky výzkumu zaměřeného na zpracování číslicových signálů. Především jsou zde popsány adaptivní algoritmy filtru základní harmonické a detektoru sousledné symetrické složky.