OPONENTSKÝ POSUDEK DISERTAČNÍ PRÁCE

Autor : Ing. Jan Moldaschl
Název práce : Design and Optimisation of Active Power Factor Correctors
Školitel : Doc. Ing. Jiří Hammmerbauer, Ph.D.

a) Aktuálnost zvoleného tématu

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) patří mezi nejsledovanější vlastnosti elektrických zařízení. Dokazuje to nejen rostoucí množství norem a předpisů, které musí elektrické zařízení z oblasti EMC splňovat, ale na druhé straně i množství spotřebičů, které obsahují nelineární prvky. Proto každé zařízení, které umožní eliminovat složky harmonických, je velkým technickým přínosem. Zejména u spotřebičů malých výkonů (třídy D) je náročné vyhovět příslušným normám. Proto považuji téma "Design and Optimisation of Active Power Factor Correctors " za aktuální.

b) Splnění plánovaného cíle

Dizertační práce zkoumá některé typy aktivních korektorů účiníku.
Cílem práce je podání přehledu topologií a řízení celkového účiníku, včetně metod pro vylepšení samotných korektorů. Doktorand zvolil SiC Schottkyho diody, rozmítání spínací frekvence a řízení výkonu. V praktické oblasti pak byl cílem návrh a realizace několika prototypů, na kterých pak byla provedena měření harmonických proudů, účinnosti a zejména účiníku.
Domnívám se, že práce splnila cíl ve všech bodech.

c) Zvolené metody zpracování

V práci jsou nejprve popsány základní vztahy, které definují problematiku harmonických proudů a napětí v nelineárních soustavách, výkonů s důrazem na deformační výkon, power factor (skutečný účiník, účiník) a různé koeficienty zkreslení. Dále jsou popsány základní principy, které umožňují zlepšit charakter odebíraného proudu a tím účiník. Kapitola 5 je věnována perspektivním technologiím a strategiím řízení. Těžiště práce je v kapitolách 7-10, kde jsou popsány doktorandem realizované a odměřené 4 různé varianty zdrojů s aktivními korektory účiníku s použitím nových polovodičových součástek. V závěru je pak provedeno určité porovnání jednotlivých zapojení a zhodnocení.
Postup, zvolený pro zpracování disertační práce považuji za správný.

K práci mám několik připomínek a dotazů:

a) V souladu s mezinárodním elektrotechnickým slovníkem se řád harmonické udává písmenem **h**.
b) Vzorce 1.3 až 1.6 : sumace jsou přes *k*, ale indexováno je písmenem *n*.
c) Vzorce 1.3 až 1.6 : fázový posuv napětí a proudu musí být obecně odlišný θ_u a θ_i.
d) Vzorec 1.4 : za písmenem I_{m1} má být znaménko +. Obdobně u 1.6 za U_{m1}.
e) Vzorec 1.7 : opět nesprávné součty přes k, navíc platí pouze při stejném fázovém posuvu (viz. bod c připomínek).
f) Obdobné chyby v dalších vzorcích kapitoly 1.2.
g) Obrázky 7.16 – 7.18 : pro zvolenou diodu 12R06DI jsou nejvyšší ztráty $P_{D\text{-}cond}$ i $P_{D\text{-}sw}$. Přesto je dle obrázku 7.18 nejvyšší účinnost pro tuto diodu. Není vysvětleno.
h) Obrázky 7.25 a další obrázky v kapitolách 8,9,10: nelze uvádět naměřené hodnoty v disktrétních hodnotách a hodnoty harmonických proudů dle normy jako spojitou křivku. V normě jsou uvedeny limity pro disktrétní hodnoty. Nelze je proto prokládat křivkou. To považuji za významnou chybu. Navíc norma udává jak hodnoty v [mA/W], tak i proudy jednotlivých harmonických v [A] – viz tabulka 6.1 na straně 53. Ve všech grafech je ale provedeno porovnání s proudem vztaženým na výkon, ale nestandardně v [mA], což je zavádějící s ohledem na povolené hodnoty v normě v [mA].
i) Porovnání jednotlivých zapojení v kapitole 11 doporučuji udělat též v grafech pro účinnost, PF, případně pro tepelné namáhání.

d) Vyjádření k publikacím studenta

Student publikoval výsledky (dle seznamu literatury v práci 6x) postupně na několika konferencích, z nichž několik je vedeno ve WoS nebo Scopus. Celkem je však vedeno autorství nebo spoluautorství ve více jak 10 publikacích ve WOS či Scopus. Publikační činnost autora považuji za uspokojivou.

e) Výsledky disertace s uvedením nových poznatků a významu pro praxi

V práci je proveden výčet možných zapojení PF korektorů. Těžiště práce je v realizaci 4 zapojení, jejich proměření a porovnání. Ze závěru je zřejmý přínos práce pro praxi.
Formální úprava práce odpovídá požadovanému standardu.

e) Závěr

V práci dokázal pan Ing. Jan Moldaschl, že ovládá metody vědecké práce, má velmi dobré teoretické znalosti a svou prací přinesl nové poznatky oboru. Vytýčený cíl práce byl splněn.

Na závěr konstatuji, že předložená disertační práce pana Ing. Jana Moldaschla splňuje podmínky tvůrčí vědecké práce. **Práci doporučuji k obhajobě a po úspěšné obhajobě doporučuji udělit titul "PhD".**

V Plzni, 21. 6. 2018

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

Posudek disertační práce

Autor práce:	**Ing. Jan Moldaschl** Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita v Plzni
Název práce:	**Design and Optimisation of Active Power Factor Correctors**
Rozsah práce:	217 stran
Oponent:	**prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.** Fakulta vojenských technologií, Univerzita obrany

Rekapitulace cílů práce

Posuzovaná disertační práce shrnuje současný stav používání spínaných zdrojů a frekvenčních měničů, které se používají, a ukazuje na stav harmonického znečištění síťového proudu těmito měniči. Autor ve své práci správně ukazuje na zkreslení proudů z důvodů nelineárního zpracování výkonu měniči, které jsou pak příčinou nižšího účiníku. Autor se zde tedy zaměřil na korekce účiníku.

Disertační práce Ing. Jana Moldaschla je velmi obsáhlá a zahrnuje velmi detailní popis současného stavu, kapitola 1 až 5 popsáno na 45 stranách odborného textu. Tento popis je kvalifikovaný a dle mého názoru a zkušeností je v rozsahu a podobě připomínající spíše habilitační práci. Z uvedeného je patrné, že někdy spíše připomíná učebnici než odborný text disertační práce. Autor se snad až příliš zabývá popisem obecně známých principů.

Z textu je patrné, že autor předložené práce problematice rozumí. Práce je nesporně aktuální a prokazuje znalosti autora o obvodech výkonové elektroniky a regulace. Částečnou chybou této předložené práce je, že v práci nejsou uvedeny konkrétní cíle. Nicméně cíle a klíčové aspekty jsou v textu odevzdané práce zřejmé. Autor v práci uvedl zajímavá řešení a popsal detailně zkoumanou oblast, experimentálně ověřil a odborně zhodnotil.

Charakteristika práce a její výsledky

Práce je členěna do dvanácti kapitol, přičemž kapitola 1 je úvod do problematiky zkreslení a definuje základní parametry. Autor zde odkazuje na současnou literaturu v této problematice a uvedený popis dává ucelený přehled o řešené problematice. V kapitolách 2 a 3 jsou uvedeny základní principy PFC. Ve čtvrté kapitole jsou popsány způsoby řízení PFC obvodů. Pátá kapitola uvádí popis perspektivních topologií a jejích řízení. Je patrné, že autor disertační práce vycházel často např. z literatury 26 – 33, katalogových listů již realizovaných obvodů pro řízení PFC, které jsou běžně dostupné a dávají ucelený pohled na přístup k PFC. Nicméně tento typ literatury nedává, jak se domnívám, ucelený pohled na současný stav k dosažení požadovaných cílů disertačních prací zákonem. Dále je patrné, že problematika PFC obvodů byla řešena vědeckou komunitou zejména v letech 2007 – 2009. Z tohoto období jsou hlavní publikace a odborné publikace v této problematice. Novější publikace jsou spíše založeny na SiC prvcích a tedy vlastní přínos do oboru je spíše menší. Je škoda, že Ing. Jana Moldaschl neudělal širší a detailnější rešerši publikací s PFC problematikou a k popisu využil spíše firemní dokumentaci a publikace, které nejsou

nejnovější a chybí odkazy na soudobé publikace z IEEE Transaction, např. Power Electronics nebo Power Systems.

Vlastní práce autora začíná od strany 47 kapitolou 6 - 10. Zde jsou uvedeny různé návrhy jednotlivých systémů PFC. Nicméně je škoda, že těmto kapitolám nepředchází kapitola definující konkrétní cíle disertace.

Z uvedeného je patrné, že autor je schopen praktických dovedností a je zřejmý jeho přínos v této problematice. Vlastní přístupy jsou uvedeny v rámci kapitol 6 až 10. Je zde patrný vliv SiC do dříve zkoumaných a používaných PFC obvodů. Já osobně bych pravděpodobně očekával detailnější analýzu vlivu nových materiálů spínacích prvků do PFC technologií.

Během rozpravy prosím detailněji vysvětlete výsledky z obrázku 7.13 na straně 81. Dále prosím i detailní vysvětlení výsledků z obrázků 7.14 na straně 85 a 7.17 na straně 86. Díle v částech 7.13 uvádíte účinnosti např. 96,5 %, ale v grafech např. obr. 7.24 uvádíte výsledky na celá čísla. Prosím definujte nejistotu vašich měření a experimentálních ověření, zejména pro měření účinnosti a PF z obrázku 7.24.

V kapitole 11 je uvedeno porovnání výsledků z kapitol 7 – 10. Zde jsou porovnávány výsledky například: 95.5 % na 230 V pro UCC28060 a 96,8 % na 230 V pro UCC28070. Nicméně vlastní porovnání je spíše krátké a pro uvedené výsledky se domnívám, že autor měl provést detailní analýzu nejistoty měření. Rovněž zhodnocení nákladů na straně 209 pravděpodobně do této disertační práce nepatří.

Kapitola 12 je věnována shrnutí dosažených výsledků, bohužel jen na 3 stranách a to včetně analýz prací do budoucna.

Formální úprava disertační práce

Formální úprava práce je na dobré úrovni. Řešená problematika je podána spíše obsáhle a disertační práci by prospělo určité zestručnění, zejména v popisech obecně známých principů. Naopak jsou až příliš stručně popsány některé dosažené výsledky vlastní práce autora. Dále myslím, že autor mě provést širší rešerši v této oblasti zkoumání a zaměřit se na jiný typ literatury, který více přísluší k vědecké práci zakončené Ph.D. Dále nejsou uvedeny práce autora a odkazy na jeho publikace.

Za klad práce považuji velmi dobrou orientaci autora v řešené problematice a schopnost autora praktické činnosti. Za negativum práce považuji velmi slabou rešerši zkoumané problematiky a spíše méně ambiciosní cíle této disertační práce.

Závěr:

- Téma disertační práce je zcela jistě aktuální.
- Disertační práce splnila stanovený cíl.
- Po stránce formální je zvolená přehledná forma.
- Celá problematika je zpracovávána v logické posloupnosti.
- Cíle disertační práce jsou vhodně zvoleny, nicméně myslím, že tato část měla být obsáhlejší a detailněji popsáno čeho chce autor dosáhnout.

Rád konstatuji, že disertační práci Ing. Jana Moldaschla doporučuji k obhajobě.

Při obhajobě doporučuji, aby se uchazeč vyjádřil k následujícím doplňujícím otázkám:

1. Během rozpravy prosím detailněji vysvětlete výsledky z obrázku 7.13 na straně 81. Dále prosím i detailní vysvětlení výsledků z obrázků 7.14 na straně 85 a 7.17 na straně 86.
2. V částech 7.13 uvádíte účinnosti např. 96,5 %, ale v grafech např. obr. 7.24 uvádíte výsledky na celá čísla. Prosím definujte nejistotu vašich měření a vašich experimentálních ověření, zejména pro měření účinnosti a PF z obrázku 7.24.
3. Vysvětlete pojem „Crest Factor" a uveďte jeho vliv při měření účinností v obvodech výkonové elektroniky. Uveďte, jak jste řešil jeho vliv při vašich měřeních

V Brně dne 18.6. 2018

prof. Ing. Jan Leuchter, Ph.D.
Univerzita obrany, FVT
Kounicova 64
662 10 Brno

Oponent review of the dissertation

Author of dissertation: **Ing. Jan Moldaschl**
Name of the thesis: **Design and Optimization of Active Power Factor Correctors**
Návrh a optimalizace aktivních korektorů účiníku
Dissertation lecturer: Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.

Objectives of the dissertation

The main goal of the dissertation is to analyze and propose methods of improving power factor of switching sources with possibility of suppression of harmonic input current pollution. Another aim of the thesis is a comprehensive overview of topologies and control techniques, including methods designed to improve the function of the corrector. The aim of the thesis is also the design and realization of prototype transducers based on selected methods of control techniques in order to evaluate individual methods.

Characteristics of dissertation

Currently, the massive use of switched sources causes the harmonic network pollution. Therefore, power factor correction becomes particularly important for switched sources. Active power fctor crrectors will increase the power factor to 0.999. It should be noted that active power factor correctors reduce the level of harmonic pollution at the cost of the increase in electromagnetic interference. The main aim of the thesis is a comprehensive overview of topologies and control techniques including methods for improving the function of proofreaders.

The first chapters contain definition of Power fctor and Total hrmonic dstortion. The following are the basic hardware structures used for power factor correction. Passive and active power factor correctors are described.

The following chapters deal with the advanced control procedures used for APFC.
There are four basic modes of Continuous Conduction Mode (CCM), Discontinuous Conduction Mode (DCM), Critical Conduction Mode (CrM), and Frequency Clamped Critical Conduction Mode (FCCrM).

The last chapters contain calculations and design of the correctors based on selected integrated circuits. The circuits have been selected so that the selected control methods can be verified. The results of the experimental verification then allowed the author to assess the effectiveness of the selected management methods. This is considered to be a significant contribution to the dissertation.

The first prototype is based on the single Boost topology, which is controlled by a specialized control circuit UCC28180. The controller UCC28180 is a power factor controller with Average Mode Control technique. It is an active PFC controller that operates under continuous conduction mode to achieve high power factor, low current distortion and excellent voltage regulation.

The second prototype is based on the UCC28060 controller. It is characterized by a flat structure that uses flat inductors and other built-in components.
The UCC28060 controller allows you to construct a two phase interleaved corrector. The controller uses FCCrM, which reduces production costs and improves switching losses thanks to soft switching. The controller has two identical loops that can be deactivated in case of light load.

Another prototype uses the UCC28070 circuit. It is a circuit that uses it Interleaved Average Current-Mode PWM control with inherent current matching.
The UCC28070 is an advanced power factor correction (PFC) device that integrates two pulse-width modulators. This device is a good solution for the PFC interleaved average continuous current mode (CCM), which generates substantial reduction of input and output ripple current.

The latest prototype describes the digitally controlled APFC based on the UCD3138 microprocessor. UCD3138 is a digital power supply controller from Texas Instruments. The flexible nature of the UCD 3138 makes it suitable for a wide variety of power conversion applications. The UCD3138 combines powerful 32-bit microprocessors, high-speed precision data converters, multiple programmable hardware control loops and various communication engines in a small 6-mm x 6-mm package.
In this case, this is the most expensive solution. On the other hand, this solution allows a significant reduction in network current distortion.

The figure 7.6 shows the amplitude and phase characteristics of the voltage regulator. This characteristic corresponds to a regulated first order system. The switching power supply usually consists of two storage elements (a coil and a condenser). The regulated system of APFC in this case is 2nd order. (see equations 2.3). If we consider a cascade control structure consisting of a voltage and current loop, we can obtain the transfer function of a closed current loop, which is 1st order. This corresponds to the procedure in Figure 7.4. The computationally derived transfer function of the closed voltage loop is of the 2nd order. Figure 7.6 is a transmission function of the 1st order. How has this transmission function been measured?

Author's publication

In the papers attached to the dissertation thesis there is a participation in the six articles presented mostly at sophisticated conferences.

Based on the list of publications, I can say that the core of the habilitation was published at the required level.

Scientific benefits of work

In my opinion, the dissertation thesis presents a valuable attempt at a complex view of the correction of the power factor using advanced methods using modern technical means. The emphasis was put on the analysis and comparison of the different types of control

methods used to improve the power factor of switching power sources with the possibility of suppression of harmonic pollution of the mains.

The indisputable benefit of the work is also the design and implementation of selected prototypes of proofreaders, including experimental verification. The experimental results obtained were used for the assessment of individual methods.

Questions about the submitted dissertation

- Compare the power factor of resonant switching sources with boost converter.

- How was the frequency response, shown in Fig. 7.6, measured?

- Explain the cause of the high power supply drop in the 110V supply voltage shown in Fig. 8.14a and Fig. 8.16a.

Conclusion

The dissertation deals with important issues related to design and implementation of power converters. The thesis deals in detail with methods for increasing the power factor of power transducers.

This issue is currently a promising, dynamically evolving discipline. The dissertation demonstrates that the author knows the methods of scientific work. He has sufficient theoretical knowledge in the field. He also manages methods of design and practical implementation of power electronics equipment. I consider the solution to the problem chosen by the author to be correct and adequate to the objectives set. In conclusion, I can state that the goals of the dissertation were fulfilled.

Based on the above, I recommend the dissertation thesis submitted to the defense.

V Liberci 15. 6. 2018

Doc. Ing. Pavel Rydlo, Ph.D.
Fakulta mechatroniky,
informatiky a mezioborových studií