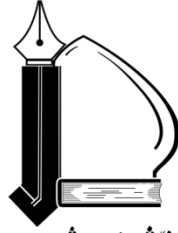


صلى الله عليه وسلم



دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی - گروه برق

پایان نامه کارشناسی ارشد برق - قدرت

ارایه روشی ساده و موثر برای کنترل دیجیتال جریان مبدل متصل به شبکه

نگارش:

مجید صنعت کار چایجانی

استاد راهنما:

دکتر محمد منفرد

شهریور ۹۱

تعهدنامه

اینجانب مجید صنعت کار چایجانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه ارایه روشی ساده و موثر برای کنترل دیجیتال جریان مبدل متصل به شبکه تحت راهنمایی دکتر محمد منفرد متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود و یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام "دانشگاه فردوسی مشهد" و یا "Ferdowsi University of Mashhad" به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ: ۹۱/۶/۳۱

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم بہ پدر و مادر م کہ با صبر و پشیمانی ہمیشگی خود در تمامی لحظات زندگی ام امید موفقیت را در من زنده نگاه داشته اند.



بسمه تعالی
مشخصات رساله / پایان نامه تحصیلی دانشجویان
دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله / پایان نامه:

ارایه روشی ساده و موثر برای کنترل دیجیتال جریان مبدل متصل به شبکه

نام نویسنده: مجید صنعت کار چایجانی

نام استاد راهنما: دکتر محمد منفرد

دانشکده: مهندسی	گروه: مهندسی برق	رشته تحصیلی: مهندسی برق - قدرت
تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۳/۲۰	تاریخ دفاع: ۱۳۹۱/۶/۳۱	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ●	دکتری ○	تعداد صفحات: ۱۵۴

چکیده رساله / پایان نامه:

پیشرفت سریع تکنولوژی ساخت پردازنده های دیجیتال و کاهش قیمت آنها باعث افزایش میزان استفاده از این پردازنده ها در کاربردهای صنعتی شده است. در کاربردهای الکترونیک قدرت نیز که به سرعت نسبتاً بالایی در پردازش اطلاعات نیاز است نیز استفاده از این پردازنده ها رشد قابل توجهی داشته است. برای استفاده از این پردازنده ها، نیاز است تا روش های کنترل مبدل های الکترونیک قدرت به صورت دیجیتالی پیاده سازی شوند. گسسته سازی روش های کنترل مرسوم مبدل ها (که به صورت آنالوگ می باشند) باعث افزایش حجم محاسبات و افزایش تأخیر و در نتیجه عملکرد نامطلوب سیستم کنترلی می شود. بنابراین نیاز به ارایه روش های کنترل دیجیتال می باشد.

در این پایان نامه یک روش کنترل دیجیتال برای مبدل های PWM منبع ولتاژی ارایه شده است. در این روش خطای جریان مبدل نسبت به جریان مرجع به عنوان فاکتور اصلی در کنترل مبدل می باشد. روش پیشنهادی علاوه بر دست یابی به خطای حالت دایمی صفر در جریان سمت AC، اعوجاج هارمونیک حداقل در جریان سمت AC مبدل و فرکانس سوئیچینگ ثابت، دارای حجم محاسباتی کم بوده و پیاده سازی آن در پردازنده های دیجیتال بسیار آسان می باشد. برای تایید عملکرد مناسب روش پیشنهادی، یک مبدل PWM سه فاز منبع ولتاژی با ظرفیت حدود ۲ kVA ساخته شده است. برای پیاده سازی روش کنترلی پیشنهادی از پردازنده دیجیتال DSP استفاده شده است.

امضای استاد راهنما:	کلید واژه:
	۱- کنترل دیجیتال جریان ۲- مبدل متصل به شبکه
تاریخ: ۹۱/۶/۳۱	

فهرست مطالب

۱۰	فصل اول پیشگفتار
۱۱	۱-۱- مقدمه
۱۳	۲-۱- اهداف پایان نامه
۱۳	۳-۱- ساختار پایان نامه
۱۵	فصل دوم ساختارهای مختلف مبدل های PWM منبع ولتاژی
۱۶	۱-۲- مقدمه
۱۷	۲-۲- مبدل های منبع ولتاژی PWM تک فاز
۱۷	۳-۲- مبدل های منبع ولتاژی PWM سه فاز
۱۸	۴-۲- مبدل های چند سطحی
۱۹	۱-۴-۲- مبدل کلمپ نقطه نوترال (NPC)
۲۰	۲-۴-۲- مبدل خازن شناور
۲۱	۳-۴-۲- مبدل آبخاری
۲۱	۵-۲- مبدل پشت به پشت یا مبدل AC/DC/AC
۲۲	۶-۲- مبدل ماتریسی
۲۳	۷-۲- معادلات حاکم بر مبدل منبع ولتاژی سه فاز متصل به شبکه
۲۴	۱-۷-۲- روابط ولتاژ و جریان شبکه
۲۵	۲-۷-۲- ولتاژ سمت AC مبدل
۲۶	۳-۷-۲- معادلات مبدل
۲۸	فصل سوم روش های متداول کنترل مبدل های منبع ولتاژ سه فاز متصل به شبکه
۲۹	۱-۳- مقدمه
۲۹	۲-۳- روش کنترل مقایسه شیب
۳۰	۳-۳- روش کنترل هیستریزس
۳۴	۴-۳- روش کنترل VOC
۳۸	۵-۳- روش کنترل مستقیم توان
۴۷	۶-۳- روش های نوین کنترل دیجیتال جریان
۵۰	فصل چهارم روش پیشنهادی (روش کنترل دیجیتال خطای جریان)
۵۱	۱-۴- مقدمه
۵۱	۲-۴- مبدل تک فاز
۵۲	۱-۲-۴- حالت های سوئیچینگ
۵۳	۲-۲-۴- مدولاتور PWM سینوسی تک قطبی
۵۵	۳-۲-۴- روش کنترل دیجیتال خطای جریان در مبدل تک فاز
۵۸	۱-۳-۲-۴- تعیین پارامتر k حدود پایداری و خطای حالت دایم
۶۰	۲-۳-۲-۴- استفاده از فرکانس نمونه برداری بزرگ تر
۶۲	۳-۳-۲-۴- محاسبه جریان مرجع
۶۲	۳-۴- روش کنترل دیجیتال خطای جریان در مبدل سه فاز
۶۷	۱-۳-۴- به دست آوردن ولتاژ مرجع
۶۸	۲-۳-۴- محاسبه محدوده انتخابی برای پارامتر k

۶۹	۳-۳-۴- استفاده از فرکانس نمونه برداری بزرگتر در مبدل سه فاز
۶۹	۴-۳-۴- محاسبه جریان مرجع در مبدل سه فاز
۷۰	۵-۳-۴- محاسبه فاز و پیک ولتاژ شبکه با استفاده از PLL
۷۱	۱-۵-۳-۴- به دست آوردن پیک ولتاژ شبکه
۷۴	فصل پنجم شبیه سازی
۷۵	۱-۵- مقدمه
۷۶	۲-۵- انتخاب پارامتر k
۷۷	۳-۵- رفتار حالت دایمی مبدل تک فاز و سه فاز
۸۰	۴-۵- بررسی رفتار دینامیکی سیستم در پاسخ به اعمال تغییرات پله در مقادیر مرجع توان ها
۸۳	۵-۵- حساسیت سیستم کنترلی نسبت به عدم قطعیت در مورد پارامترهای سیستم
۸۵	۶-۵- عملکرد روش کنترل دیجیتال خطای جریان با شبکه غیر ایده آل
۸۵	۱-۶-۵- وجود اغتشاش در ولتاژ شبکه
۸۷	۲-۶-۵- ولتاژ شبکه نامتعادل
۸۹	فصل ششم پیاده سازی عملی
۹۰	۱-۶- مقدمه
۹۱	۲-۶- ساختار مدل آزمایشگاهی
۹۱	۱-۲-۶- مدار قدرت
۹۱	۱-۱-۲-۶- خازن لینک DC
۹۳	۲-۱-۲-۶- فیلتر سلفی
۹۳	۳-۱-۲-۶- مبدل
۹۴	۲-۲-۶- مدارهای تغذیه، اندازه گیری و فرمان سوئیچ ها
۹۵	۱-۲-۲-۶- مدار تغذیه
۹۵	۲-۲-۲-۶- سنسورهای ولتاژ و جریان
۹۸	۳-۲-۲-۶- مدار فرمان گیت سوئیچ ها
۹۹	۳-۶- پردازنده دیجیتال
۹۹	۴-۶- حلقه خارجی کنترل ولتاژ
۱۰۰	۵-۶- ملاحظات پیاده سازی عملی
۱۰۰	۱-۵-۶- نویز اندازه گیری
۱۰۰	۲-۵-۶- تأخیر سیستم های دیجیتالی
۱۰۱	۶-۶- نتایج عملی
۱۰۳	۱-۶-۶- نتایج عملی مبدل تک فاز
۱۱۴	۲-۶-۶- نتایج عملی مبدل سه فاز
۱۳۹	۷-۶- مزایا و معایب روش کنترل دیجیتال خطای جریان
۱۴۱	فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۴۲	۱-۷- نتیجه گیری
۱۴۲	۲-۷- پیشنهادات
۱۴۳	پیوست (الف) تبدیل های قاب مرجع کلارک و پارک
۱۴۳	الف-۱: تبدیل کلارک
۱۴۳	الف-۲: تبدیل پارک
۱۴۵	پیوست (ب) توان در سیستم های تک فاز و سه فاز

۱۴۵.....	ب-۱- توان در سیستم تک فاز
۱۴۶.....	ب-۲- توان در سیستم سه فاز
۱۴۷.....	پیوست (ج) مشخصات فنی اجزای مبدل.....
۱۴۷.....	ج-۱- مشخصات IPM (PS21A79)
۱۴۹.....	ج-۲- مشخصات سنسور جریان (LTS 25-NP)
۱۴۹.....	ج-۳- مشخصات سنسور ولتاژ (LV 25-P)
۱۵۰.....	ج-۴- پردازنده دیجیتال TMSF28335
۱۵۱.....	مراجع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۲-۱: ساختار دو نمونه از مبدل‌های PWM تک‌فاز (الف) مبدل پل (ب) مبدل یک طرفه [۱]..... ۱۷
- شکل ۲-۲: مبدل سه‌فاز منبع ولتاژی شش سوئیچ..... ۱۸
- شکل ۲-۳: مبدل سه‌فاز منبع ولتاژی چهار سوئیچ [۴]..... ۱۸
- شکل ۲-۴: ساختار یک بازو از مبدل NPC سه سطحی [۷]..... ۲۰
- شکل ۲-۵: ساختار یک بازو از مبدل FC سه سطحی [۷]..... ۲۰
- شکل ۲-۶: مبدل آبشاری پنج سطحی (الف) ساختمان (ب) شکل موج ولتاژهای خروجی [۶]..... ۲۱
- شکل ۲-۷: مبدل پشت به پشت [۱۰]..... ۲۲
- شکل ۲-۸: ساختار مبدل ماتریسی [۱۱]..... ۲۳
- شکل ۲-۹: ساختار یک مبدل منبع ولتاژی PWM سه‌فاز متصل به شبکه (الف) مدار سه‌فاز (ب) مدار معادل تک‌فاز..... ۲۴
- شکل ۲-۱۰: دیاگرام برداری مبدل منبع ولتاژی (الف) یکسوسازی (ب) یکسوسازی با ضریب توان واحد (ج) اینورتری با ضریب توان واحد..... ۲۴
- شکل ۲-۱۱: بردارهای ولتاژ تولیدی توسط هشت حالت سوئیچینگ مجاز..... ۲۶
- شکل ۳-۱: روش کنترل مقایسه شیب [۱۲]..... ۳۰
- شکل ۳-۲: ساختار روش کنترل هیستریزس [۱۲]..... ۳۱
- شکل ۳-۳: (الف) بردار جریان مرجع و خطوط نشان دهنده پهنای باند هیستریزس فاز A (ب) بردار جریان مرجع و ترکیب خطوط نشان دهنده پهنای باند هیستریزس هر سه‌فاز [۱۴]..... ۳۱
- شکل ۳-۴: روش کنترل هیستریزس جریان مبتنی بر بردارهای فضایی پیشنهادی در مرجع [۱۶]..... ۳۲
- شکل ۳-۵: بردارهای ولتاژ خروجی مبدل و محدود کننده های جریان [۱۶]..... ۳۲
- شکل ۳-۶: ساختار روش کنترل هیستریزس بر پایه بردارهای فضایی پیشنهادی مرجع [۲۳]..... ۳۳
- شکل ۳-۷: بردارهای خروجی مبدل به همراه بردار ولتاژ مرجع و مشتق خطای جریان به ازای اعمال بردارهای سوئیچینگ متفاوت [۲۳]..... ۳۳
- شکل ۳-۸: روش پیشنهادی مرجع [۱۹] (الف) بردار جریان و محدوده هیستریزس (ب) ساختار روش کنترلی..... ۳۴
- شکل ۳-۹: بلوک دیاگرام روش کنترلی VOC [۲۳]..... ۳۵
- شکل ۳-۱۰: اعمال بخش‌هایی که باعث تزویج در قاب مرجع dq شده‌اند به صورت فیدفوروارد به ولتاژ کنترلی [۲۴]..... ۳۶
- شکل ۳-۱۱: مدل مبدل در قاب مرجع dq [۲۵]..... ۳۷
- شکل ۳-۱۲: بلوک دیاگرام ساده شده مبدل در محورهای d و یا q [۲۵]..... ۳۷
- شکل ۳-۱۳: بلوک دیاگرام روش DPC مبتنی بر جدول سوئیچینگ..... ۳۸
- شکل ۳-۱۴: تقسیم بندی فضای برداری به دوازده سکتور..... ۳۹
- شکل ۳-۱۵: ساختار کنترلرهای هیستریزس دو سطحی..... ۳۹
- شکل ۳-۱۶: تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو در یک پرپود ولتاژ شبکه به همراه سکتورهای بردار ولتاژ شبکه و به ازای اعمال بردارهای ولتاژ (حالت‌های سوئیچینگ) متفاوت..... ۴۲

- شکل ۳-۱۷: تقسیم بندی فضای برداری استفاده شده در روش VF-DPC [۳۲]..... ۴۴
- شکل ۳-۱۸: بلوک دیاگرام روش DPC-SVM [۳۳]..... ۴۵
- شکل ۳-۱۹: تغییرات توان در چهار ربع قاب $\alpha'\beta'$ [۳۴]..... ۴۶
- شکل ۳-۲۰: یک نمونه از شرایطی که هیچ بردار ولتاژی برای افزایش توان اکتیو و کاهش توان راکتیو وجود ندارد [۳۴]..... ۴۶
- شکل ۳-۲۱: فضای برداری تقسیم شده به شش بخش و سه زیر بخش مربوط به هر بخش [۳۵]..... ۴۷
- شکل ۴-۱: مبدل PWM تک‌فاز منبع ولتاژی..... ۵۱
- شکل ۴-۲: تغییرات جریان در لحظات مختلف ولتاژ شبکه برای سه حالت سوئیچینگ متفاوت..... ۵۳
- شکل ۴-۳: نحوه تولید پالس‌های گیت سوئیچ‌ها ($T_{sw}=T_{samp}$)..... ۵۴
- شکل ۴-۴: جریان مرجع و جریان مبدل ($P = 400 \text{ W}, Q = 0 \text{ VAr}$)..... ۵۶
- شکل ۴-۵: تغییرات جریان مبدل و همچنین جریان نمونه برداری شده حول مقدار مرجع جریان..... ۵۸
- شکل ۴-۶: نحوه تولید پالس‌های گیت سوئیچ‌ها ($T_{samp} = T_{sw}/2$)..... ۶۰
- شکل ۴-۷: بلوک دیاگرام روش کنترل دیجیتال خطای جریان در مبدل تک‌فاز..... ۶۱
- شکل ۴-۸: جریان‌های مبدل و مرجع برای مبدل تک‌فاز در روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۶۱
- شکل ۴-۹: نحوه تولید پالس‌های گیت با توجه به ولتاژهای مرجع و شکل موج حامل $v_{refx} > v_{refy} > v_{refz}$ ($T_{sw}=T_{samp}$)..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰: بلوک دیاگرام روش کنترل دیجیتال خطای جریان در مبدل سه‌فاز..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱: ساختار PLL [۴۰]..... ۷۱
- شکل ۴-۱۲: بلوک دیاگرام PLL در حوزه لاپلاس [۴۰]..... ۷۱
- شکل ۴-۱۳: مشخصه فیلتر مرتبه دوم استفاده شده در PLL (الف) پاسخ پله (ب) دیاگرام بود..... ۷۲
- شکل ۵-۱: جریان مبدل تک‌فاز در شرایطی که k خارج محدوده ($20 < k < 40$) انتخاب شده است (الف) $k = 10$ (ب) $k = 45$ ۷۷
- شکل ۵-۲: پاسخ حالت دایم مبدل تک‌فاز ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}, P = 500 \text{ W}, Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۷۸
- شکل ۵-۳: پاسخ حالت دایم مبدل سه‌فاز ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}, P = 1500 \text{ W}, Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۷۹
- شکل ۵-۴: طیف هارمونیک‌های جریان مبدل تک‌فاز ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}, P = 500 \text{ W}, Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۸۰
- شکل ۵-۵: طیف هارمونیک‌های جریان مبدل سه‌فاز ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}, P = 1500 \text{ W}, Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۸۰
- شکل ۵-۶: تغییرات توان مبدل تک‌فاز به ازای اعمال پله در توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}$) (الف) توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع (ب) توان لحظه‌ای مرجع (ج) توان لحظه‌ای در روش VOC (د) توان لحظه‌ای در روش کنترل دیجیتال خطای جریان..... ۸۱

- شکل ۵-۷: رفتار دینامیکی مبدل سه‌فاز در پاسخ به تغییرات پله در توان‌های مرجع ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان ۸۲
- شکل ۵-۸: آنالیز حساسیت سیستم کنترلی مبدل سه‌فاز نسبت به خطا در مقدار اندوکتانس ($f_{samp} = f_{sw} = 5 \text{ kHz}$) (الف) روش VOC (ب) روش کنترل دیجیتال خطای جریان ۸۴
- شکل ۵-۹: تأثیر اغتشاش در ولتاژ شبکه سه‌فاز بر THD جریان مبدل به ازای K_i ها، توان‌ها و فرکانس‌های سوئیچینگ متفاوت (الف) روش VOC (ب) روش VOC-IRCG (ج) روش کنترل دیجیتال خطای جریان ۸۶
- شکل ۵-۱۰: تأثیر عدم تعادل در ولتاژ شبکه سه‌فاز بر THD جریان مبدل به ازای K_i ها، توان‌ها و فرکانس‌های سوئیچینگ متفاوت (الف) روش VOC (ب) روش VOC-IRCG (ج) روش کنترل دیجیتال خطای جریان ۸۸
- شکل ۶-۱: پیکربندی سیستم آزمایشگاهی ۹۱
- شکل ۶-۲: تصویر سیستم آزمایشگاهی (۱) اتوترانسفورماتور سه‌فاز (۲) فیلتر سلفی (۳) برد مبدل سه‌فاز، برد eZdsp و برد مبدل دیجیتال به آنالوگ (۴) بار مقاومتی متغیر (۵) اسیلوسکوپ (۶) نرم افزار Code Composer Studio ۹۲
- شکل ۶-۳: برد مدار مبدل سه‌فاز و بردهای جانبی (۱) برد eZdsp (۲) برد مبدل دیجیتال به آنالوگ (۳) خازن‌های لینک DC (۴) IPM و مدارهای بوت‌استرپ (۵) ایزولاسیون نوری پالس‌های گیت (۶) مدار تغذیه (۷) سنسورهای ولتاژ (۸) سنسورهای جریان ۹۲
- شکل ۶-۴: PS21A79 DIPIPM (الف) نمای ظاهری (ب) ساختار داخلی ۹۴
- شکل ۶-۵: شماتیک مدار تغذیه در محیط نرم افزار Altium Designer DXP ۹۵
- شکل ۶-۶: سنسور جریان LTS 25-NP (الف) نمای ظاهری (ب) ساختار داخلی (ج) منحنی ولتاژ خروجی نسبت به جریان ورودی ۹۶
- شکل ۶-۷: سنسور ولتاژ LV 25-P (الف) نمای ظاهری (ب) نحوه اتصال ۹۷
- شکل ۶-۸: مدار ضرب کننده و بایاس دهنده ۹۷
- شکل ۶-۹: شماتیک مدار سنسورهای ولتاژ و جریان ۹۸
- شکل ۶-۱۰: ساختار HCPL4503 ۹۸
- شکل ۶-۱۱: مدار بوت‌استرپ ۹۹
- شکل ۶-۱۲: حلقه خارجی کنترل ولتاژ لینک DC ۱۰۰
- شکل ۶-۱۳: ولتاژ شبکه (الف) شکل موج ولتاژهای فاز (ب) شکل موج ولتاژهای خط (ج) و (د) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه ۱۰۳
- شکل ۶-۱۴: روش VOC در مبدل تک‌فاز با مقادیر مرجع $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ و $Q = 0 \text{ VAR}$ (الف) ولتاژ شبکه و جریان مبدل (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان‌های اکتیو و راکتیو ۱۰۵
- شکل ۶-۱۵: روش VOC-IRCG در مبدل تک‌فاز با مقادیر مرجع $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ و $Q = 0 \text{ VAR}$ (الف) ولتاژ شبکه و جریان مبدل (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان‌های اکتیو و راکتیو ۱۰۷

- شکل ۶-۱۶: روش پیشنهادی در مبدل تک‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 0 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ شبکه و جریان مبدل (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان‌های اکتیو و راکتیو..... ۱۰۹
- شکل ۶-۱۷: شکل موج‌های جریان مبدل تک‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله افزایشی در مقدار مرجع ولتاژ لینک DC از 150 V به 170 V ($Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی..... ۱۱۰
- شکل ۶-۱۸: شکل موج‌های جریان مبدل تک‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله کاهشی در مقدار مرجع ولتاژ لینک DC از 170 V به 150 V ($Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی..... ۱۱۱
- شکل ۶-۱۹: شکل موج‌های جریان مبدل تک‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله افزایشی در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار 0 VAr به 300 VAr ($V_{dc} = 150 \text{ V}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی..... ۱۱۲
- شکل ۶-۲۰: شکل موج‌های جریان مبدل تک‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله کاهشی در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار 0 VAr به -300 VAr ($V_{dc} = 150 \text{ V}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی..... ۱۱۳
- شکل ۶-۲۱: روش VOC در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 0 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان‌های اکتیو و راکتیو..... ۱۱۵
- شکل ۶-۲۲: روش VOC-IRCG در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 0 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۱۷
- شکل ۶-۲۳: روش پیشنهادی در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 0 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۱۹
- شکل ۶-۲۴: روش VOC در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = -500 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۲۱
- شکل ۶-۲۵: روش VOC-IRCG در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = -500 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۲۳
- شکل ۶-۲۶: روش پیشنهادی در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = -500 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۲۵
- شکل ۶-۲۷: روش VOC در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 500 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۲۷
- شکل ۶-۲۸: روش VOC-IRCG در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $Q = 500 \text{ VAr}$ و $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیک ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیک جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو..... ۱۲۹

- شکل ۶-۲۹: روش پیشنهادی در مبدل سه‌فاز با مقادیر مرجع $V_{dc,ref} = 150 \text{ V}$ و $Q = 500 \text{ VAr}$ (الف) ولتاژ فاز a و جریان‌های سه‌فاز (ب) و (ج) طیف هارمونیکی ولتاژ شبکه (د) و (ه) طیف هارمونیکی جریان مبدل (و) توان اکتیو و راکتیو ۱۳۱
- شکل ۶-۳۰: شکل موج‌های جریان‌های سه‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله افزایشی در مقدار مرجع ولتاژ لینک DC از 150 V به 170 V ($Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۳
- شکل ۶-۳۱: شکل موج‌های جریان‌های سه‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله کاهشی در مقدار مرجع ولتاژ لینک DC از 170 V به 150 V ($Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۴
- شکل ۶-۳۲: شکل موج‌های جریان‌های سه‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله افزایشی در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار 0 VAr به 1000 VAr ($V_{dc} = 150 \text{ V}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۵
- شکل ۶-۳۳: شکل موج‌های جریان‌های سه‌فاز و ولتاژ لینک DC با اعمال پله کاهشی در مقدار مرجع توان راکتیو از مقدار 1000 VAr به 0 VAr ($V_{dc} = 150 \text{ V}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۶
- شکل ۶-۳۴: شکل موج توان اکتیو با اعمال چند پله در مقدار مرجع ولتاژ لینک DC، $122/5$ ، 150 و 170 ولت ($Q = 0 \text{ VAr}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۷
- شکل ۶-۳۵: شکل موج توان راکتیو با اعمال چند پله در مقدار مرجع توان راکتیو، 0 ، 1000 و -1000 ولت آمپر راکتیو ($V_{dc} = 150 \text{ V}$) (الف) VOC (ب) VOC-IRCG (ج) روش پیشنهادی ۱۳۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: ولتاژ سمت AC در وضعیت سوئیچینگ متفاوت برای مبدل NPC سه سطحی ۱۹
- جدول ۲-۲: ولتاژ سمت AC و جریان خازن C_f در حالت‌های سوئیچینگ متفاوت برای مبدل FC سه سطحی ۲۰
- جدول ۱-۳: جدول سوئیچینگ در روش DPC [۲۹] ۴۲
- جدول ۱-۴: وضعیت سوئیچ‌ها با توجه به شماره بردار سوئیچینگ ۶۳
- جدول ۲-۴: بردارهای اکتیو و صفر تولید شده برای مقادیر متفاوت ولتاژهای مرجع نسبت به یکدیگر ۶۴
- جدول ۱-۵: پارامترهای سیستم شبیه‌سازی شده ۷۵
- جدول ۲-۵: تغییرات THD جریان و خطای توان نسبت به مقادیر متفاوت پارامتر k ($P_{ref} = 500 \text{ W}$, $Q_{ref} = 0 \text{ VAr}$) ۷۶
- جدول ۱-۶: مشخصات فنی هسته KT520-40D ۹۳
- جدول ۲-۶: متوسط THD جریان سه‌فاز در روش‌های مختلف ۱۳۲
- جدول ۳-۶: توان‌های اکتیو و راکتیو مبدل سه‌فاز در روش‌های مختلف ۱۳۲
- جدول ج-۱: حداکثر مقادیر مجاز بخش مبدل IPM ۱۴۷
- جدول ج-۲: حداکثر مقادیر مجاز بخش کنترلی IPM ۱۴۷
- جدول ج-۳: مشخصات الکتریکی بخش مبدل IPM (در دمای $T_j=25^\circ \text{C}$) ۱۴۸
- جدول ج-۴: مشخصات الکتریکی بخش کنترلی IPM (در دمای $T_j=25^\circ \text{C}$) ۱۴۸
- جدول ج-۵: مشخصات الکتریکی سنسور جریان ۱۴۹
- جدول ج-۶: نحوه اتصال پایه های سنسور جریان به منظور دست یابی به I_{PN} های متفاوت ۱۴۹
- جدول ج-۷: مشخصات الکتریکی سنسور ولتاژ ۱۴۹
- جدول ج-۸: مشخصات پردازنده دیجیتال TMSF28335 ۱۵۰

فصل اول

پیشگفتار

۱-۱- مقدمه

به سبب استانداردها و محدودیت‌های ارابه شده برای انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین هزینه بالای تولید انرژی از سوخت‌های فسیلی و انتقال آن‌ها در فواصل طولانی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر^۱ همچون سیستم‌های بادی، فوتوولتائیک، پیل سوختی و ... و تولید پراکنده^۲ رشد روز افزون یافته است. در این سیستم‌ها برق به صورت DC و یا AC با فرکانس متفاوت از فرکانس شبکه تولید می‌شود. در نتیجه این سیستم‌ها برای اتصال به شبکه نیازمند یک رابط برای تبدیل برق تولیدی به برق AC با فرکانس شبکه و سنکرون شدن با ولتاژ شبکه می‌باشند. برای این منظور از مبدل‌های الکترونیک قدرت به عنوان رابط استفاده می‌شود. از دیگر کاربردهای مبدل‌های الکترونیک قدرت می‌توان، استفاده در نسل جدید ادوات FACTS^۳ و خطوط HVDC^۴ و همچنین از کاربردهای متداول این مبدل‌ها می‌توان محرکه‌های AC و DC، منابع تغذیه AC و DC، فیلترهای اکتیو و قطارهای برقی را نام برد.

به منظور بهبود ضریب توان و کاهش اعوجاج هارمونیکی جریان سمت AC مبدل، از روش‌های PWM^۵ برای کنترل و مدولاسیون این مبدل‌ها استفاده می‌شود. تنوعی که در کاربردهای ذکر شده برای مبدل‌های الکترونیک قدرت وجود دارد باعث ایجاد انواع مختلفی از این مبدل‌ها مثل مبدل‌های PWM تک‌فاز، سه‌فاز، چند سطحی و ... شده است؛ که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، مبدل منبع ولتاژی PWM سه‌فاز دو سطحی است. به لحاظ کنترل و کاربرد این مبدل‌ها به دو دسته متصل به شبکه و جدا از شبکه و متصل به بار محلی تقسیم می‌شوند. مبدل‌های متصل به شبکه همچون یک منبع جریان کنترل شده و مبدل‌های متصل به بار محلی، به مانند یک منبع ولتاژ کنترل شده عمل می‌کنند. موضوع این پایان‌نامه مبدل‌های منبع ولتاژی متصل به شبکه می‌باشد.

¹ Renewable Energy Source

² Distributed Generation (DG)

³ Flexible AC Transmission System

⁴ High Voltage Direct Current

⁵ Pulse Width Modulation

روش‌های بسیاری برای کنترل مبدل‌های منبع ولتاژی متصل به شبکه ارائه شده‌اند، از این روش‌ها می‌توان روش‌های VOC^۱، DPC^۲ و روش‌های دیجیتال همچون هیستریزیس^۳ و پیش بین^۴ را نام برد؛ روش کنترل هیستریزیس یکی از ساده‌ترین روش‌های کنترلی می‌باشد. در این روش با استفاده از مقایسه‌گرهای هیستریزیس و مقایسه خطای جریان با یک مقدار خطای مجاز از پیش تعیین شده، وضعیت سوئیچ‌های مبدل در هر لحظه تعیین می‌شود. این روش دارای مزایای سادگی پیاده‌سازی و دینامیک بسیار سریع به علت گین نامحدود مقایسه‌گرهای هیستریزیس می‌باشد. عیب بزرگ این روش ایجاد طیف وسیع هارمونیک در جریان مبدل می‌باشد. یکی از پرکاربردترین روش‌های کنترل این مبدل‌ها، روش کنترل مبتنی بر ولتاژ (ولتاژگرا) یا VOC می‌باشد. در این روش، کنترل توان به صورت غیر مستقیم توسط کنترل مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو جریان انجام می‌شود. این روش به علت وجود حلقه‌های داخلی کنترل جریان، رفتار دینامیکی و استاتیکی مناسبی دارد، البته عملکرد نهایی این روش به شدت وابسته به کیفیت روش کنترل جریانی استفاده شده می‌باشد. در روش کنترل مستقیم توان یا DPC حلقه‌های داخلی کنترل جریان حذف شده و وضعیت سوئیچ‌ها از روی یک جدول از پیش تعیین شده به نحوی انتخاب می‌شوند که خطای توان اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در هر لحظه سوئیچینگ حداقل گردد. عیب این روش فرکانس سوئیچینگ متغیر، نیاز به فرکانس نمونه برداری بالا و همچنین فیلتر اندوکتانسی بزرگ می‌باشد؛ در مقابل، دینامیک سریع و سادگی طرح و همچنین سادگی پیاده‌سازی این روش باعث شده تا این روش در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گیرد. روش‌های کنترلی پیش بین خود به چند دسته تقسیم بندی می‌شوند. در کلیه این روش‌ها با استفاده از پیش بینی وضعیت برخی از کمیت‌های سیستم در یک یا دو نمونه آتی، سیگنال مرجع را به نحوی که خطای تابع هدف در نمونه بعدی صفر گردد، انتخاب می‌کنند. روش پیش بین بر پایه مدل سیستم یا MPC^۵ و روش dead-beat از جمله روش‌های پیش بین هستند که در مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در روش MPC که روش منعطف‌تری در بین روش‌های پیش بین است، برای عملکرد بهینه، یک تابع هدف تعیین شده و با انجام بهینه‌سازی روی این تابع عملکرد مطلوب مبدل حاصل می‌شود. این تابع هدف علاوه بر بخشی که مربوط به خطای حالت ماندگار مبدل است (یکی از اهداف اصلی روش‌های کنترلی)، می‌تواند شامل بخش‌هایی برای کاهش تلفات سوئیچینگ، دست یابی به فرکانس سوئیچینگ ثابت و ... نیز باشد. نکته دیگر در این روش این است که، در مبدل‌های الکترونیک قدرت با توجه به خاصیت ذاتی گسسته‌ای (تعداد حالت سوئیچینگ محدود) که دارند، این بهینه‌سازی تابع هدف به سادگی و برای تعداد حالات محدود و به سرعت انجام می‌شود. یکی دیگر از روش‌های پیش بین، روش کنترل dead beat می‌باشد. این روش به سبب خطای حالت دایم صفر و پاسخ سریع،

¹ Voltage Oriented Control

² Direct Power Control

³ Hysteresis Control

⁴ Predictive

⁵ Model Predictive Control

یکی دیگر از روش‌های کنترل دیجیتال است که برای کنترل این مبدل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. ایده اصلی در این روش که مبتنی بر مدل زمان گسسته سیستم تحت کنترل است، یافتن سیگنال مرجعی است که با اعمال آن به سیستم، در حداقل زمان ممکن، خطای خروجی، صفر (یا حداقل) گردد.

۱-۲- اهداف پایان‌نامه

با توجه به پیشرفت سریع تکنولوژی ساخت پردازنده‌های دیجیتال و کاهش قیمت آن‌ها، استفاده از این پردازنده‌ها در کاربردهای صنعتی افزایش یافته است. در کاربردهای الکترونیک قدرت نیز که به سرعت نسبتاً بالایی در پردازش اطلاعات نیاز است نیز استفاده از این پردازنده‌ها رشد قابل توجهی داشته است. برای استفاده از این پردازنده‌ها به علت خاصیت ذاتی دیجیتال بودن آن‌ها، نیاز است تا روش‌های کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت به صورت دیجیتال پیاده شوند. گسسته سازی روش‌های کنترل مرسوم مبدل‌ها که به صورت آنالوگ بوده‌اند باعث افزایش حجم محاسبات و در نتیجه عملکرد نامطلوب سیستم کنترلی می‌شود. بنابراین نیاز به ارایه روش‌هایی کنترل دیجیتال می‌باشد. روش‌هایی که علاوه بر برآورده ساختن اهداف اصلی روش‌های کنترلی همچون خطای حالت دایم صفر و اعوجاج حداقل در جریان سمت AC، با استفاده از مزایای پردازنده‌های دیجیتال با حجم محاسباتی کم قابلیت پیاده‌سازی در این پردازنده‌ها را داشته باشد.

هدف از انجام این پایان‌نامه ارایه یک روش کنترل دیجیتال برای مبدل‌های PWM منبع ولتاژی می‌باشد. روش پیشنهادی علاوه بر دست یابی به خطای حالت دایمی صفر در جریان سمت AC، اعوجاج هارمونیک حداقل در جریان سمت AC مبدل و فرکانس سوئیچینگ ثابت، دارای حجم محاسباتی کم بوده و پیاده‌سازی آن در پردازنده‌های دیجیتال بسیار آسان خواهد بود.

برای تایید عملکرد مناسب روش پیشنهادی، یک مبدل PWM سه‌فاز منبع ولتاژی با ظرفیت حدود ۲ kVA ساخته شده است. در این مدل آزمایشگاهی، ولتاژ ورودی برای حفاظت فردی توسط اتوترانسفورماتور به سطح ولتاژ پایین‌تری تبدیل می‌شود. اندازه‌گیری‌های ولتاژ و جریان به صورت ایزوله انجام شده است. در انتها برای پیاده‌سازی روش کنترلی پیشنهادی از پردازنده دیجیتال DSP استفاده شده است.

۱-۳- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه علاوه بر فصل پیشگفتار شامل شش فصل دیگر و سه پیوست به شرح زیر می‌باشد:

در فصل دوم، به ساختارهای متفاوت ارایه شده برای مبدل‌های منبع ولتاژ به طور مختصر اشاره می‌شود. در ادامه با توجه به اینکه روش پیشنهادی مربوط به مبدل‌های PWM سه‌فاز دو سطحی می‌باشد، ساختار این مبدل، معادلات حاکم بر آن و همچنین روش‌های کنترل این مبدل‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل سوم، مقالات معتبر علمی در زمینه روش‌های متفاوت کنترل مبدل‌های منبع ولتاژ سه‌فاز همچون روش کنترل هیستریزیس، VOC، DPC و روش‌های نوین کنترل دیجیتال مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم، روش کنترل پیشنهادی با عنوان کنترل دیجیتال خطای جریان ارایه شده است.

در فصل پنجم، نتایج مقایسه‌ای شبیه‌سازی‌های روش پیشنهادی و روش VOC برای مبدل‌های منبع ولتاژی آورده شده است. در این فصل به مقایسه نتایج حاصله از روش پیشنهادی و روش VOC در موارد رفتار حالت دائمی، رفتار دینامیکی، حساسیت نسبت به عدم قطعیت در پارامترهای اندازه‌گیری شده و رفتار مبدل در شبکه غیر ایده آل پرداخته شده است.

در فصل ششم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی عملی آورده شده است.

در فصل هفتم، خلاصه‌ای از نتایج حاصل از این پایان‌نامه به همراه پیشنهاداتی برای فعالیت‌های آتی در این زمینه آورده شده است.