دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق

رساله برای اخذ درجه دکتری مهندسی برق- قدرت

تحلیل و طراحی جبرانساز موازی مدولار، برای سیستمهای نامتعادل ولتاژ متوسط

حسن محمدی پیروز

استاد راهنما:

دکتر محمد توکلی بینا

شهریور ماه ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحیم

هو العلیم الفتاح

تقدیم به همسر عزیزم

عبور یادت از فکر من، حضور عشقت در قلب من و شکوه نگاهت در ذهن من

همیشه ماندگار خواهد بود و حس عطر مهربانیت در وجودم همواره پایدار

تقدیم به مادرم او که مهرش تا ابد در دلم جا دارد و بهشت در زیر پایش

تقدیم به پدرم اسطوره بزرگی و مردانگی، آموزنده آرامش و مهربانی

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه : تحلیل و طراحی جبرانساز موازی مدولار، برای سیستمهای نامتعادل ولتاژ متوسط

استاد راهنما: آقای دکتر محمد توکلی بینا

نام دانشجو: حسن محمدی پیروز

شماره دانشجوئی: ۸۴۱۱۵۰۶

اینجانب حسن محمدی پیروز دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق، گرایش قدرت دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان‌نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه، تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب و یا فرد دیگری در هیچ کجا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده‌ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده آن، آقای حسن محمدی پیروز می‌باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان‌نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده و یا کتابخانه دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد. ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

(استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد)

با سپاس از استاد بزرگوارم،

او که اندیشیدن را به من آموخت نه اندیشه ها را . . .

تحلیل و طراحی جبرانساز موازی مدولار، برای سیستمهای نامتعادل ولتاژ متوسط

چکیده

وجود عدم تعادل و هارمونیکها در ولتاژ و جریان شبکه سبب کاهش راندمان، افزایش دمای کاری و کاهش شدید طول عمر در برخی از تجهیزات نصب شده در سیستم قدرت از قبیل ماشینهای الکتریکی و ترانسفورمرها شده و در عمل اثرات نامطلوب و مخربی بر روی سیستم قدرت میگذارد. عدم تعادل جریان یا ولتاژ میتواند به صورت نابرابری سطوح اغتشاشات هارمونیکی بین فازهای مختلف نیز نمود پیدا کند. پستهای تغذیه راه‌آهن برقی از جمله بارهای نامتعادل توان بالا در سطح ولتاژ متوسط هستند که سبب تولید هارمونیکها و اعوجاج در شکل موج ولتاژ و جریان شبکه میشوند. بنابراین، استفاده از تجهیزات مناسب در سطح ولتاژ متوسط به منظور حفظ کیفیت توان شبکه امری ضروری میباشد. در این راستا جبران کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت پیشرفته به عنوان پاسخی برای این نیازها مطرح شده و تا کنون به طور قابل توجهی توسعه یافته‌اند. از جملهٔ کاربردی‌ترین جبرانسازهای استاتیکی میتوان به جبرانسازهای موازی اشاره نمود که از نظر نسبت هزینه به عملکرد نسبتا مناسب بوده و قادر به اصلاح بسیاری از مشکلات موجود در صنعت برق میباشند.

در دهه اخیر، ساختارهای مداری مختلفی برای مبدلهای الکترونیک قدرت معرفی شده است که از جمله مهمترین آنها برای کاربردهای ولتاژ متوسط و توان بالا مبدلهای چند سطحی هستند. تحقیقات و نتایج عملی نشان داده است که مبدلهای چندسطحی مدولار دارای مزایای فراوانی میباشد که از جمله آنها قابلیت اطمینان بالا، مدیریت بهتر خطا، سادگی در ساخت و انعطاف پذیری برای استفاده در توانهای مختلف است. در این تحقیق، جبرانسازی و متعادلسازی همزمان جریانهای نامتعادل هارمونیکی و تامین توان راکتیو بارهای متصل شده به شبکه در سطح ولتاژ متوسط، توسط یک جبرانساز مبتنی بر مبدل الکترونیک قدرت با ساختار مدولار بدون استفاده از ترانسفورمر واسط مورد مطالعه قرار میگیرد. در این راستا، استفاده از مبدل چند سطحی مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل به عنوان مبنای ساختار مداری یک

جبرانساز توان بالا پیشنهاد گردیده است. بدین منظور نحوه طراحی جبرانساز پیشنهادی که شامل مدار الکترونیک قدرت و روش کنترل آن در شرایط مختلف است ارائه میگردد. به جهت کاربردی شدن این تحقیق، جبرانسازی پست تغذیه یک خط راه‌آهن برقی بین شهری نمونه، به عنوان بار مورد مطالعه در نظر گرفته شده و شبیه‌سازیها و بررسی پایداری مبدل جبرانساز در چنین شرایطی مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین برای جبران بارهای نامتعادل با توانهای بالاتر، مدل توسعه یافته جبرانساز پیشنهادی نیز ارائه میگردد. اعتبار ساختار مداری و کنترل‌کننده جبرانسازهای مدولار پیشنهادی، از طریق ساخت یک نمونه آزمایشگاهی سه‌فاز چهارسیمه مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل آزمایشگاهی ساخته شده با توان 20KVA و در سطح ولتاژ 400V برای جبران یک بار نامتعادل سه فاز در یک سیستم چهارسیمه مورد بهره برداری قرار گرفته است.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه	۱
۱-۱. ضرورت توجه به کیفیت توان در سطح ولتاژ متوسط	۱
۱-۲. مروری بر جبرانسازهای موازی ولتاژ متوسط	۳
۱-۳. تحقیقات در زمینه جبرانسازهای موازی مبتنی مبدل چند سطحی مدولار	٦
۱-٤. دستاوردهای رساله	۱۰
فصل دوم: جبرانسازهای موازی مبتنی بر مبدلهای چندسطحی	۱٤
۲-۱. مقدمه	۱٤
۲-۲. اصول جبرانساز موازی	۱۵
۲-۳. مبدلهای منبع ولتاژ به کار رفته در جبرانسازهای ولتاژ متوسط	۱۸
۲-۳-۱. مبدلهای چند سطحی با کلمپ دیودی	۲۱
۲-۳-۲. مبدلهای چند سطحی با کلمپ خازنی	۲٤
۲-۳-۳. مبدلهای چند سطحی زنجیری	۲٦
۲-۳-٤. مبدل چند سطحی تعمیم یافته	۲۹
۲-۳-۵. مبدلهای زنجیری ترکیبی	۳۱
۲-۳-۵- الف. مبدلهای مبتنی بر مدولهای چند سطحی یکسان	۳۱
۲-۳-۵- ب. مبدلهای مبتنی بر مدولهای چند سطحی متفاوت	۳۲
۲-۳-۵- ج. مبدلهای دارای مدولهای ترکیبی	۳۳
۲-۳-٦. مبدلهای چند سطحی ترکیبی	۳٦
۲-٤. ارزیابی انواع مبدلهای چندسطحی در جبرانسازهای موازی ولتاژ متوسط	۳۵
۲-٤-۱. ارزیابی مبدلهای چندسطحی با ظرفیت خازنی متمرکز در لینک DC	۳٦
۲-٤-۲. ارزیابی مبدلهای چندسطحی دارای ظرفیت خازنی توزیع شده	٤۰
۲-٤-۲- الف. مبدلهای زنجیری مبتنی بر مدولهای تمام- پل	٤۰
۲-٤-۲- ب. مبدلهای زنجیری مبتنی بر مدولهای نیم- پل	٤٦

۲-۵. مقایسه مداری انواع مبدلهای چند سطحی ۵۰
۲-٦. نتیجه گیری ۵۲
فصل سوم: تحلیل و طراحی جبرانساز موازی مدولار برای سیستمهای نامتعادل ولتاژ متوسط ۵٤
۳-۱. مقدمه ۵٤
۳-۲. پیشنهاد متعادلساز انرژی برای مبدلهای چند سطحی مدولار ۵۵
۳-۲-۱. ساختار مداری ۵۷
۳-۲-۲. نتایج حاصل از شبیه‌سازی جبرانساز مورد مطالعه ٦۰
۳-۳. پیشنهاد جبرانساز مدولار با ساختار مداری مبتنی بر مدولهای نیم- پل ٦۵
۳-۳-۱. تشریح ساختار مداری پیشنهادی ٦۵
۳-۳-۲. تعریف جریانهای متعادل کننده در جبرانساز پیشنهادی ۷۰
۳-۳-۳. طراحی مقادیر عناصر پسیو در جبراساز مدولار پیشنهادی ۷۵
۳-٤. نحوه کنترل جبرانساز مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل ۷۸
۳-٤-۱. محاسبه جریانهای مرجع جبرانساز ۸۰
۳-٤-۲. نحوه توزیع جریان بین دو شاخه متصل به یک فاز ۸۲
۳-٤-۳. نحوه محاسبه ولتاژ مرجع هر شاخه ۸۳
۳-٤-٤. استخراج سیگنالهای فرمان برای کلیدهای نیمه‌هادی ۸٦
۳-٤-۵. متعادلسازی ولتاژ خازن DC همهٔ مدولهای مبدل ۸۸
۳-٤-٦. مدلسازی ریاضی مبدل جبرانساز ۹۲
۳-۵. ارزیابی عملکرد جبرانساز پیشنهادی بر مبنای نتایج شبیه‌سازی ۹۵
۳-٦. نتیجه گیری ۱۰۲
فصل چهارم: توسعه ساختار مداری جبرانسازهای مدولار برای کاربردهای توان بالا و ولتاژ بالا ۱۰٤
٤-۱. مقدمه ۱۰٤
٤-۲. توسعه ساختار مداری جبرانساز مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل ۱۰٤
٤-۳. نحوه محاسبه ولتاژ مرجع هر شاخه در جبرانساز مدولار توسعه یافته ۱۰۸
٤-٤. استخراج سیگنالهای فرمان برای کلیدهای نیمه‌هادی ۱۰۹
٤-۵. نحوه محدود کردن جریانهای گردشی در میان شاخه‌های متناظر ۱۱۱
٤-٦. شبیه‌سازی جبرانساز مدولار توسعه یافته ۱۱٤

٤-٧. نتیجه گیری	١١٨
فصل پنجم: پیاده سازی عملی جبرانساز مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل	١٢٠
٥-١. مقدمه	١٢٠
٥-٢. مشخصات مداری نمونه آزمایشگاهی	١٢١
٥-٣. نتایج حاصل از نمونه آزمایشگاهی جبرانسازهای مدولار	١٢٤
٥-٤. نتیجه گیری	١٣٦
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	١٣٧
٦-١. مقدمه	١٣٧
٦-٢. نتیجه گیری رساله	١٣٧
٦-٣. نوآوریهای حاصل از انجام این رساله	١٣٩
٦-٤. **پیشنهادات**	١٤٠
لیست مقالات ارائه شده	١٤٣
لیست مراجع	١٤٤

فهرست شکلها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱. ساختار مداری و نحوه اتصال یک مبدل چند سطحی مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل	۸
شکل ۲-۱. تشریح ساختار داخلی یک جبرانساز موازی ولتاژ متوسط	۱٦
شکل ۲-۲. دیاگرام تک خطی مدار قدرت یک جبرانساز موازی ساده	۱۸
شکل ۲-۳. ساختار جبرانساز دوسطحی بکار رفته در ولتاژ متوسط	۱۹
شکل ۲-٤. دیاگرام مداری جبرانساز مبتنی بر مبدلهای چند پالسه	۲۰
شکل ۲-۵. ساختار مداری مبدل چند سطحی با کلمپ دیودی	۲۲
شکل ۲-٦. ساختار مداری مبدل چند سطحی با کلمپ خازنی	۲۵
شکل ۲-۷. مدار قدرت یک شاخه فازی از مبدل نه سطحی زنجیری و نحوه ایجاد ولتاژ در دو سر آن	۲۷
شکل ۲-۸ . مبدل چند سطحی زنجیری مبتنی بر مدولهای سه فاز	۲۸
شکل ۲-۹. مدار قدرت مبدل پنج سطحی تعمیم یافته متشکل از چهار مجموعه	۳۰
شکل ۲-۱۰. مبدل زنجیری ترکیبی ساخته شده با مدولهای مبتنی بر اینورترهای پنج سطحی با کلمپ خازنی	۳۲
شکل ۲-۱۱. مبدل چند سطحی زنجیری ترکیبی نامتقارن، دارای اینورترهای با سطح ولتاژ DC متفاوت	۳۳
شکل ۲-۱۲. مبدل چند سطحی زنجیری ترکیبی نامتقارن، با اینورترهای با فرکانس سوئیچینگ متفاوت	۲۹
شکل ۲-۱۳. مدول مبدل زنجیری معمولی، یک شاخه فازی از مبدل زنجیری پنج سطحی و مدول مبدل زنجیری پنج سطحی دارای مدولهای ترکیبی با سوئیچهای کاهش یافته	۳٤
شکل ۲-۱٤. یک نمونه از مبدل چند سطحی ترکیبی	۳۵
شکل ۲-۱۵. تشریح یک شاخه فازی از مبدل چند سطحی با کلمپ دیودی	۳۷
شکل ۲-۱٦. تشریح یک شاخه فازی از مبدل چند سطحی با کلمپ خازنی	۳۷

شکل ۲-۱۷. نمونه‌ای از یک مدار نامتعادل سه فاز چهارسیمه به همراه مدل مداری جبرانساز زنجیری با اتصال ستاره ٤٢
شکل ۲-۱۸. ساختار مداری جبرانساز مبتنی بر مبدل زنجیری با اتصال مثلث، و نحوه اتصال آن به شبکه (مناسب برای متعادلسازی یک بار نامتعادل سه فاز سه سیمه در یک شبکه بدون هارمونیک) ٤٤
شکل ۲-۱۹. بلوک دیاگرام کنترل کننده جبراساز مبتنی مبدل زنجیری با اتصال مثلث برای جبرانسازی سیستمهای نامتعادل ٤٥
شکل ۲-۲۰. تشریح روش ارائه شده در [۳٦]، به منظور جبران جریانهای توالی منفی سینوسی با استفاده از جبرانساز مبتنی بر مبدل زنجیری با اتصال ستاره ٤٦
شکل ۲-۲۱. ساختار مداری یک فاز از M^2LC پنج سطحی و نحوه اتصال آن در یک سیستم انتقال HVDC ٤٧
شکل ۲-۲۲. خط انتقال توان HVDC با استفاده از مبدلهای الکترونیک قدرت ٤٧
شکل ۲-۲۳. ساختار مداری جبرانساز پیشنهادی مبتنی بر HB-CMC پنج سطحی برای جبران یک با نامتعادل هارمونیکی چهار سیمه ٤٨
شکل ۲-۲٤. تعداد کل عناصر مورد نیاز برای انواع مبدلها، به صورت تابعی از تعداد سطوح ولتاژ مورد نیاز ٥٢
شکل ۳-۱. ساختار مداری یک مدول پیشنهادی دارای مدار متعادلساز ٥٦
شکل ۳-۲. ساختار مداری یک جبرانساز مدولار هفت سطحی همراه با مدارهای متعادلساز انرژی پیشنهادی ٥٧
شکل ۳-۳. مدار فرمان سوئیچینگ اینورترهای متعادل کننده، و شکل موج ولتاژ و جریان برای سیم پیچ Tr1.a (سیم پیچ فاز a) در یکی از ترانسفورمرهای متعادل کننده ٦٠
شکل ۳-٤. مدار بار مورد جبران، به کار رفته در شبیه‌سازی ٦١
شکل ۳-٥. شکل موجهای ولتاژهای منبع، جریانهای منبع بعد از جبرانسازی، جریانهای بار نامتعادل و غیر خطی، جریانهای جبرانساز مدولار همراه با مدار متعادلساز و جریان سیم زمین جبرانساز ٦٢
شکل ۳-٦. شکل موجهای نوسانات ولتاژ خازن DC سه مدول متناظر (Vca1, Vcb1, Vcc1)، و جریان سه سیم پیچ ترانسفورمر مدار متعادل کننده متصل به خازنهای Ca1, Cb1, Cc1 ٦٣

شکل ۳-۷. ولتاژ دو سر سیم پیچهای ترانسفورمر متعادل کننده Tr1 ٦٤
شکل ۳-۸ . ساختار مداری یشنهادی برای جبرانساز چهارسیمه مبتنی بر HB-CMC و نحوه اتصال آن به شبکه قدرت ٦٦
شکل ۳-۹. ساختار مداری یک HBM ٦٨
شکل ۳-۱۰. مقادیر ولتاژ مرجع ایجاد شده توسط کنترل کننده برای جفت- شاخه‌ها ٦٩
شکل ۳-۱۱. بخشهای مختلف مدار جبرانساز پیشنهادی مبتنی بر HB-CMC برای بهسازی یک سیستم چهارسیمه ۷۰
شکل ۳-۱۲. شکل موج جریانهای خروجی و جریان شاخه‌های جبرانساز پیشنهادی برای مثال ۳-۱ ۷۵
شکل ۳-۱۳. جریان عبوری از یک مدول و از خازن لینک DC آن ۷۷
شکل ۳-۱٤. بلوک دیاگرام نحوه کنترل حلقه بسته جبرانساز مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل ۷۹
شکل ۳-۱۵. نحوه محاسبه جریانهای مرجع جبرانساز در مختصات αβo ۸۱
شکل ۳-۱٦. نحوه کنترل توزیع جریان بین دو شاخه متصل به یک فاز (PSER) ۸۲
شکل ۳-۱۷. نحوه محاسبه سیکل وظیفه (D) برای مدولهای هر شاخه مبدل بر مبنای جریانهای مرجع جبرانساز ۸۵
شکل ۳-۱۸. تشریح روش مدولاسیون بکار رفته برای استخراج فرمان کلیدهای نیمه‌هادی مبدل و نحوه کاهش ریپل جریان خروجی، فرض شده است که مبدل در هر شاخه دارای دو مدول سری میباشد ۸۷
شکل ۳-۱۹. تشریح مدل ریاضی پیشنهادی برای جبران ساز مبتنی بر HB-CMC ۹۳
شکل ۳-۲۰. شکل موجهای ولتاژ PCC و جریان بار، منبع و جبرانساز قبل و بعد از مطلوبسازی جریان بارتوسط جبرانساز ۹۷
شکل ۳-۲۱. شکل موج مجموع ولتاژهای مدولهای سری در هر شاخه جبرانساز، در مقایسه با ولتاژهای مرجع برای هر جفت- شاخه ۹۸
شکل ۳-۲۲. نوسانات ولتاژ لینک DC در یکی از مدولهای موجود در هر یک از شاخه¬های مختلف جبرانساز ۹۹
شکل ۳-۲۳. شکل موج جریان هر یک از شاخه¬های مبدل قبل و بعد از متعادلسازی جریان بار ۱۰۰

شکل ۳-۲٤. یک مدار نمونه برای پست تغذیه یک خط قطار برق 25KV و نحوه جبرانسازی آن ۱۰۱
شکل ٤-۱. استفاده از مدولهای موازی کاربردهای جریان بالا، با استفاده از لینک DC مجزا و با استفاده از لینک DC مشترک ۱۰٦
شکل ٤-۲. ساختار مداری جبرانساز مبتنی بر مبدل مدولار توسعه یافته (EMMC) و نحوه اتصال آن به شبکه قدرت ۱۰۷
شکل ٤-۳. تشریح روش مدولاسیون بکار رفته برای استخراج فرمان کلیدهای نیمه‌هادی جبرانساز مبتنی بر EMMC و نحوه کاهش ریپل جریان خروجی ۱۱۰
شکل ٤-٤. مدار فیلترهای تفاضلی (LC) و نحوه قرارگیری آنها در ساختار مداری جبرانساز مبتنی EMMC به منظور کاهش جریانهای گردشی بین شاخه‌های متناظر ۱۱۳
شکل ٤-٥. جهت جریان گردشی در بین دو شاخه متناظر ۱۱٤
شکل ٤-٦. مشخصه هارمونیکی بار دو فاز بکار رفته در شبیه‌سازی ۱۱٤
شکل ٤-۷. شکل موج جریانها و ولتاژهای حاصل از دو جبرانساز شبیه سازی شده ۱۱٦
شکل ٤-۸ . کاهش مولفه سوئیچینگ در جریان خروجی EMMC ۱۱۷
شکل ٤-۹. مقایسه مشخصه هارمونیکی جریان منبع در فازهای a، b و c پس از جبرانسازی توسط دو جبرانساز شبیه‌سازی شده ۱۱۷
شکل ٥-۱. ساختار مداری مدولهای ساخته شده آزمایشگاهی ۱۲۲
شکل ٥-۲. تصویر کامل مجموعه آزمایشگاهی ساخته شده برای بررسی جبرانسازهای مدولار مبتنی بر مدولهای نیم- پل ۱۲۳
شکل ٥-۳. تصویر مدارهای اندازه¬گیری، مدارهای حفاظت و مدارهای واسط بین مبدل و کنترل کننده ۱۲٤
شکل ٥-٤. افزایش ولتاژ خازنهای DC پس اتصال جبرانساز به شبکه توسط مقاومتهای راه‌انداز ۱۲٦
شکل ٥-٥. افزایش ولتاژ خازنهای DC پس از ارسال سیگنالهای سوئیچنگ و اتصال کوتاه شدن مقاومتهای راه‌انداز ۱۲٦
شکل ٥-٦. نوسانات ولتاژ خازن DC مدولهای مبدل در لحظات پس از شروع به جبرانسازی ۱۲۷
شکل ٥-۷. ریپل ولتاژ لینک DC مدولهای مبدل در زمان جبرانسازی بار ۱۲۸
شکل ٥-۸ . ریپل ولتاژ لینک DC مدولهای مبدل بدون جبرانسازی بار ۱۲۸

شکل ۵-۹. ولتاژها و جریانهای شبکه آزمایشگاهی مورد مطالعه قبل از جبرانسازی	۱۲۹
شکل ۵-۱۰. جریانهای شبکه آزمایشگاهی مورد مطالعه بعد از جبرانسازی	۱۲۹
شکل ۵-۱۱. نحوه توزیع جریان خروجی جبرانساز آزمایشگاهی در فاز a میان مدولهای متصل به فاز a	۱۳۰
شکل ۵-۱۲. مقایسه استرسهای ولتاژی در دو سر سلفهای سری	۱۳۱
شکل ۵-۱۳. ولتاژ بین دو شاخه موجود در NL-HBCC صرف نظر از ولتاژ سلفهای سری	۱۳۱
شکل ۵-۱٤. شکل موجهای ولتاژ دو سر بار، جریان بار، جریان جبرانساز مبتنی بر EMMC، جریان HB-CMC1، و جریان HB-CMC2	۱۳۳
شکل ۵-۱۵. شکل موجهای جریان جبرانساز مبتنی برEMMC ، جریانHB-CMC1 ، و جریان HB-CMC ، جریان منبع پس از جبرانسازی، جریان HB-CMC1، و جریان HB-CMC2	۱۳۳
شکل ۵-۱٦. مشخصه هارمونیکی جریان HB-CMC1، مشخصه هارمونیکی جریان HB-CMC2، مشخصه هارمونیکی جریان EMMC، و ریپل سوئیچینگ هر یک از جریانهای مذکور	۱۳٤

فهرست جدولها

عنوان	صفحه
جدول ۲-۱. تعداد عناصر مورد نیاز در انواع مبدلهای چند سطحی بکار رفته در جبرانسازها	۵۱
جدول ۳-۱. درجات آزادی در امکان انتخاب ولتاژ خروجی مدولهای موجود در یک شاخه مبدل	۵۸
جدول ۳-۲. مشخصات منبع، بار و خط انتقال به کار رفته در شبیه‌سازی	٦١
جدول ۳-۳. مشخصات مداری جبرانساز مدولار و مدار متعادلساز انرژی شبیه‌سازی شده	٦١
شکل ۳-۹. b) جدول حالتهای سوئیچینگ برای کلیدهای آن	٦٨
جدول ۳-٤. پارامترهای مداری جبرانساز شبیه‌سازی شده	٩٦
جدول ۳-۵. پارامترهای کنترلی جبرانساز شبیه‌سازی شده	٩٦
جدول ٤-۱. مشخصات عناصر و پارمترهای مدارهای شبیه‌سازی شده	۱۱۵
جدول ۵-۱. مشخصات عناصر و پارامترهای مداری بکار رفته در نمونه آزمایشگاهی	۱۲۵
جدول ۵-۲. مقادیر THD، و تلفات محاسبه شده برای جبرانساز آزمایشگاهی مبتنی بر HB-CMC	۱۳۵
جدول ۵-۳. مقادیر THD، و تلفات محاسبه شده برای جبرانساز آزمایشگاهی مبتنی بر EMMC	۱۳۵

فهرست علائم و اختصارات

n	Total number of the cascaded HBM in a leg
m	Total number of the MMC in an EMMC
k	The HBM number in a leg ($0 \le k \le n$)
j	The MMC number in the EMMC ($0 \le j \le m$)
L_F	The commutating inductance
L_C	The coupling inductance
L_S	Total inductance of the series inductors in a leg
C_m	DC-link capacitance of an HBM
R_S	The source resistance
T_S	The sampling period
τ	The time interval between two adjacent carriers
f_{C1}	Carrier frequency of an HBM
f_{SC}	DSP sampling frequency of the control unit
$i_{S(abc)}$	Three-phase source currents
$i_{L(abc)}$	Three-phase load currents
$i_{C(abc)\text{-}ref}$	STATCOM three-phase reference currents
$i_{C(abc)}$	The STATCOM currents
$I_{B(abc)}$	Balancing currents
I_C	Circulating current
$i_{C(\alpha\beta 0)\text{-}ref}$	$\alpha\beta 0$ reference currents of STATCOM
$i_{M\,j(abc)}$	abc currents of the jth MMC in the EMMC
$i_{H\max}$	Maximum current through the cascaded HBM
$\Delta i_{C\max}$	Maximum output current ripple of the converter
$i_{N(abc)}$	Measured currents of the NCP-HBCC legs
$i_{P(abc)}$	Measured currents of the PCP-HBCC legs
$i_{N(abc)\text{-}ref}$	Reference currents for the NCP-HBCC legs
$i_{P(abc)\text{-}ref}$	Reference currents for the PCP-HBCC legs
$i_{N(abc)}$	Total current of the NCP-HBCC legs in an EMMC
$i_{P(abc)}$	Total current of the PCP-HBCC legs in an EMMC
V_N	Voltage of the neutral point ($V_N = 0$)
$V_{S(abc)}$	Source voltages
$V_{(abc)}$	Voltages of the PCC
V_{Cm}	The DC-link voltage of the mth HBM
V_{CM}	Mean of all HBM's DC-link voltages
$V_{CM\text{-}ref}$	Reference voltage of V_{CM}
$V_{CN(abc),k}$	Measured DC voltage of the kth HBM of the NCP
$V_{CP(abc),k}$	Measured DC voltage of the kth HBM of the PCP
V_{PCP}	The voltage between PCP and the neutral point
V_{NCP}	The voltage between NCP and the neutral point
V_{DCM}	The voltage between PCP and NCP (V_{PCP}- V_{NCP})
$V_{N\,(abc)\,\text{-}ref}$	The reference voltage for the NCP-HBCC legs
$V_{P(abc)\text{-}ref}$	The reference voltage for the PCP-HBCC legs
V_{LN}, V_{LP}	Voltage drop on L_F of the NCP and PCP-HBCC legs
$V_{C(abc)\text{-}ref}$	Reference voltages of the pair-legs
$V_{(abc)\,1}$	Fundamental positive-sequence of the PCC voltage
ΔV_{Cmax}	Maximum voltage ripple on the DC-link capacitors
P_{Loss}	Total power losses of STATCOM
p_{Load}	Instantaneous active power of the load
q_{Load}	Instantaneous reactive power of the load
$p_{N(abc)}(t)$	Instantaneous power of the NCP-HBCC legs
$p_{P(abc)}\,(t)$	Instantaneous power of the PCP-HBCC legs
$P_{N(abc)}$	DC component of $p_{N(abc)}(t)$
$P_{P(abc)}$	DC component of $p_{P(abc)}(t)$
$p_{NO(abc)}\,(t)$	AC component of $p_{N(abc)}(t)$
$P_{PO(abc)}\,(t)$	AC component of $p_{P(abc)}(t)$
$D_{\,(abcN)\text{-}ref}$	Reference duty cycle calculated for the pair-legs
$D_{N(abcN)\text{-}ref}$	Duty cycle of the NCP-HBCC legs
$D_{P(abcN)\text{-}ref}$	Duty cycle of the PCP-HBCC legs

به نام خدا

فصل اول: مقدمه

۱-۱. ضرورت توجه به کیفیت توان در سطح ولتاژ متوسط:

از جمله مشکلات پیچیده در صنعت برق همزمانی حضور جریانهای نامتعادل و هارمونیکی، به همراه مصرف توان راکتیو توسط بارهای موجود در شبکه توزیع میباشد. بعلاوه میزان عدم تعادل، سطح هارمونیکها و توان راکتیو مصرفی، به طور پیوسته در حال تغییر است. در سطح ولتاژ متوسط نیز افزایش بارهای نامتعادل و هارمونیکی یکی از مسائل چالش انگیز سیستمهای قدرت امروزی میباشد. حضور بارهای هارمونیکی نامتعادل ولتاژ متوسط در شبکه‌های سه فاز، از قبیل سیستمهای تغذیه قطارهای برقی و کوره های ذوب فلزات، سبب نامتعادل شدن جریانها و ولتاژهای شبکه و کاهش کیفیت توان در سطح ولتاژ متوسط شده است [۱و۲]. از دیگر دلایل نامتعادلی ولتاژهای سیستم قدرت، نامتقارن بودن امپدانس سیم‌پیچ برخی از ترانسفورمرها (مثل ترانسفورمرهای مثلث باز)، نامتقارنی امپدانسهای خط انتقال (به سبب جابجایی ناقص فازهای خطوط انتقال) و خستگی و فرسودگی برخی از تجهیزات نصب شده در شبکه سه فاز، ذکر شده است [۳].

وجود عدم تعادل و هارمونیکها در ولتاژ و جریان شبکه سبب کاهش راندمان، افزایش دمای کاری و کاهش شدید طول عمر در برخی از تجهیزات نصب شده در سیستم قدرت از قبیل ماشینهای الکتریکی و ترانسفورمرها شده و در عمل اثرات نامطلوب و مخربی بر روی سیستم قدرت میگذارد [٤، ٥ و ٦]. عدم تعادل جریان یا ولتاژ میتواند به صورت نابرابری سطوح اغتشاشات هارمونیکی بین فازهای مختلف نیز نمود پیدا کند. در چنین حالتی، مشخصه هارمونیکی هر فاز ولتاژ شبکه یا جریان بار با سایر فازها متفاوت است. درحالیکه عامل اصلی کاهش کیفیت ولتاژ شبکه وجود جریانهای نامتعادل و هارمونیکی است، کاهش کیفیت ولتاژ نیز خود میتواند باعث ایجاد جریانهای نامتعادل و هارمونیکی در شبکه شود. از اینرو

به منظور بهبود کیفیت توان شبکه، افزایش راندمان شبکه، و نیز حفاظت از تجهیزات و مصرف کننده‌های متصل شده به شبکه، بهسازی ولتاژ منبع و نیز بهسازی جریان مصرف کننده ضروری میباشد.

در ایران، تلفات کل شبکه انتقال و توزیع برق از میزان ۱۳/۹٪ در سال ۱۳۷۱ [۷] به میزان نگران کننده ۱۹/۷٪ در سال ۱۳۸۷ [۸] افزایش یافته است. هم اکنون تلفات انرژی الکتریکی در سیستم توزیع نیروی صنعت برق کشور تا سطح ولتاژ متوسط برابر با ۱۷/۹٪ گزارش شده است [۹]. همچنین در حال حاضر مجموع تلفات کل سیستم قدرت (شامل بخشهای تولید، انتقال و توزیع) به طور متوسط برابر با ۲۳/۵٪ بوده و در اوج مصرف حتی تا حدود ۳۰ درصد هم گزارش شده است [۱۰]. به عبارت دیگر از هر یک میلیارد تومان سرمایه گذاری قدیم و جدید در صنعت برق کشور، ۲۳۵ ملیون تومان آن به سبب وجود تلفات هدر رفته است. نکته قابل توجه این است که بخش عمدهٔ این اتلاف انرژی در سیستم توزیع بوده و بدلیل عدم تقارن بار فازها در شبکه، نامتعادل بودن بار فیمابین فیدرهای مجاور یکدیگر و پایین بودن ضریب قدرت و گردش غیر ضروری توان راکتیو چه در سطح ولتاژ ضعیف و چه در سطح ولتاژ متوسط قید شده است [۷ و۱۱]. شایان ذکر است که تلفات انتقال انرژی برای یک بار نامتعادل متصل شده به دو فاز در حدود دو برابر و برای یک بار نامتعادل متصل شده به یک فاز و نول در حدود شش برابر یک شبکه با یک بار متعادل سه فاز با توان معادل میباشد [۱۲].

پستهای تغذیه راه‌آهن برقی از جمله بارهای نامتعادل توان بالا در سطح ولتاژ متوسط هستند که سبب تولید هارمونیکها و اعوجاج در شکل موج ولتاژ و جریان شبکه میشوند. قطار برقی دارای مشخصه الکتریکی غیرخطی بوده و به دلیل تغذیه شدن از سیستم تکفاز و یا دو فاز سبب نامتعادل شدن جریان و ولتاژ سیستم قدرت میشود. همچنین هنگام عبور قطار از محدوده یک پست تغذیه به محدوده پست تغذیه مجاور امکان ایجاد فلیکر ولتاژ در آن محدوده از شبکه وجود خواهد داشت [۱۳]. به عنوان مثال، قطار برقی تبریز - جلفا که از سه پست فوق توزیع 132/27.5 KV تغذیه میشود، سبب نامتعادل شدن ولتاژ شبکه فوق توزیع، نوسانات ولتاژ تا میزان ۵٪ (تغییرات از17.5KV تا 29KV) و تولید هارمونیک در سطح ولتاژ متوسط تا سه برابر بیشتر از میزان مجاز شده است [۱٤]. از آنجا که تغذیه قطارهای برقی بین شهری، باری و یا سریع‌السیر اغلب از طریق سیستم توزیع ولتاژ متوسط صورت میگیرد، مشکلات مذکور منجر به