

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

مدلسازی هارمونیک کوره قوس الکتریکی و TCR در حوزه‌ی فرکانس جهت طراحی فیلترهای پسیو

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

سعید خان باباپور

استاد راهنما
دکتر حمید رضا کارشناس



دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته برق (قدرت) آقای سعید خان باباپور
تحت عنوان

مدلسازی هارمونیک کوره قوس الکتریکی و TCR در حوزه‌ی فرکانس جهت طراحی
فیلترهای پسیو

در تاریخ ۱۳۸۶/۲/۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهائی قرار گرفت.

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| حمید رضا کارشناس | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| مهدی معلم | ۲- استاد مشاور پایان نامه |
| اکبر ابراهیمی | ۳- استاد داور |
| یدالله ذاکری | ۴- استاد داور |
| علی محمد دوست حسینی | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

تشکر و قدردانی

حمد و سپاس شایسته‌ی خداوندی است که لطف و رحمتش را از هیچ بنده‌ای دریغ نمی‌کند. خداوند را شکر گزارم از اینکه این دوره را با موفقیت و خرسندی به پایان رساندم.

بر خود لازم می‌دانم از زحمات‌های دلسوزانه‌ی پدر و مادر و خانواده‌ی عزیزم که در طول دوران تحصیل مشوق و همراه بنده بوده‌اند و از هیچ کوششی در جهت رفع مشکلات و موانع سر راهم دریغ نکرده‌اند تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم.

از زحمات‌ها و صبر و تحمل همسر مهربان و خانواده‌ی محترم من که در طول این دوره یار و همراه بنده بوده‌اند نیز تشکر و قدردانی می‌کنم.

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر حمیدرضا کارشناس که در طول انجام پایان‌نامه و سایر مراحل این دوره از راهنمایی‌های ارزنده و مفیدشان بهره برده‌ام قدردانی می‌کنم. همچنین از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر مهدی معلم که استاد مشاور این پایان‌نامه بوده‌اند تشکر و قدردانی می‌کنم.

از اساتید ارجمند آقایان دکتر اکبر ابراهیمی و مهندس یدالله ذاکری که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل نمودند متشکرم.

از اساتید محترم آقایان دکتر سید مرتضی سقاییان‌نژاد، دکتر مهدی معلم، دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن، دکتر جعفر سلطانی، دکتر اکبر ابراهیمی، دکتر حمیدرضا کارشناس و دکتر فرید شیخ‌الاسلام که در طول این دوره از محضرشان بهره‌مند شده‌ام و همچنین از معلمان، دبیران و اساتید تمام دوران تحصیلاتم که زحمات زیادی را برای بنده متحمل شده‌اند نیز سپاسگزاری می‌کنم.

از رئیس تحصیلات تکمیلی دانشکده برق و کامپیوتر جناب آقای دکتر علی محمد دوست‌حسینی و مسئول دفتر تحصیلات تکمیلی دانشکده سرکار خانم نکویی نیز تشکر و قدردانی می‌کنم.

همچنین از همکاری صمیمانه‌ی مهندس گلکیان از پرسنل زحمت‌کش شرکت فولاد مبارکه اصفهان نیز تشکر و قدردانی می‌کنم.

در پایان نیز از دوستان عزیز و ارجمندم به خصوص هم‌اتاقی‌های محترم آقایان توحید حکم‌آبادی و قربان حسین‌زاده که این دوره را در کنار یکدیگر با صمیمیت و مهربانی پشت سر گذاشتیم نیز قدردانی می‌کنم.

سعید خان باباپور

اردیبهشت ماه ۱۳۸۶

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این
پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی
اصفهان است.

تقوى پيم به

پكو و مادر عزيزم

و

همسر مهر بانم

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فهرست مطالب هشت

چکیده فارسی ۱

فصل اول: مقدمه ۲

فصل دوم: مدلسازی جبران‌کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو در حوزه‌ی فرکانس جهت تحلیل هارمونیکی

۱-۲- مقدمه ۶

۲-۲- ساختار کلی جبران‌کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو (SVC) ۶

۲-۳- اصول کار TCR و هارمونیک‌های تولیدی آن ۷

۲-۴- بررسی مدل‌های TCR در حوزه‌ی فرکانس ۹

۲-۴-۱- مدل منبع جریان هارمونیکی ۹

۲-۴-۲- مدل نورتن ۱۲

۲-۴-۳- مدل منبع ولتاژ و ادمیتانس سری متغیر ۱۳

۲-۴-۴- مدل ماتریس فوریه ۱۸

۲-۴-۵- تحلیل TCR با پخش بار هارمونیکی چندفازه ۲۱

۲-۵- مقایسه‌ی شبیه‌سازی زمانی TCR با مدل‌های حوزه‌ی فرکانس ۲۳

فصل سوم: مدلسازی کوره‌ی قوس الکتریکی در حوزه‌ی فرکانس جهت تحلیل هارمونیکی

۳-۱- مقدمه ۲۸

۳-۲- دسته‌بندی‌های کلی کوره‌ی قوس ۲۹

۳-۳- بررسی مدل‌های مختلف کوره‌ی قوس الکتریکی جهت تحلیل هارمونیکی در حوزه‌ی فرکانس ۳۲

۳-۳-۱- مدل منبع ولتاژ ۳۳

۳-۳-۲- مدل منبع جریان ۳۶

۳-۳-۳- مدل تجربی کوره‌ی قوس ۳۶

۳-۴- مدلسازی قوس الکتریکی توسط معادله‌ی دیفرانسیل غیرخطی ۳۷

۳-۵- ارائه یک مدل جدید برای کوره‌ی قوس الکتریکی جهت تحلیل هارمونیکی در حوزه‌ی فرکانس ۳۹

۳-۶- مقایسه‌ی مدل‌های مختلف کوره‌ی قوس در حوزه‌ی فرکانس با یک مدل غیرخطی دقیق ۴۶

فصل چهارم: نحوه‌ی طراحی فیلتر هارمونیکی برای کوره‌ی قوس الکتریکی

۴-۱- مقدمه ۵۲

۴-۲- انواع کوره‌های قوس ۵۳

۴-۳- انواع فیلتر هارمونیکی ۵۳

۵۴	۴-۴- تعیین مقادیر نامی فیلتر هارمونیک
۵۵	۴-۴-۱- شرایط بی‌باری
۵۵	۴-۴-۲- بدترین شرایط قوس‌زنی در حالت ماندگار
۵۵	۴-۴-۳- شرایط موقتی برای برق‌دار کردن ترانسفورمر کوره
۵۵	۴-۴-۴- قطع و وصل بریکر یا کلید خلاً
۵۵	۴-۴-۵- کلیدزنی پشت به پشت فیلترهای هارمونیک روی یک باس مشابه
۵۶	۴-۵- طراحی فیلترهای هارمونیک برای کوره‌ی قوس AC در حالت ماندگار
۵۷	۴-۶- نحوه‌ی طراحی فیلترهای شکافی
۵۸	۴-۶-۱- مرحله‌ی اول: تعیین میزان توان راکتیو تولیدی توسط فیلتر هارمونیک
۵۸	۴-۶-۲- مرحله‌ی دوم: تعیین مقدار اولیه برای فرکانس تنظیم فیلتر هارمونیک
۶۰	۴-۶-۳- مرحله‌ی سوم: بهینه‌سازی ساختار فیلتر هارمونیک برای برآورده شدن حدود استاندارد
۶۱	۴-۶-۴- مرحله‌ی چهارم: تعیین مقادیر مؤلفه‌های موجود در فیلتر
۶۲	۴-۶-۴- الف- خازن فیلتر هارمونیک
۶۴	۴-۶-۴- ب- راکتور فیلتر هارمونیک
۶۴	۴-۶-۴- ج- مقاومت فیلتر هارمونیک
۶۴	۴-۶-۴- د- سوئیچ یا بریکر مدار
۶۵	۴-۷- نحوه‌ی طراحی فیلتر نوع PI
۶۸	۴-۷-۱- حالت اول: بهینه‌سازی مشخصه‌ی امپدانس فیلتر PI با تغییر R
۶۹	۴-۷-۲- حالت دوم: بهینه‌سازی مشخصه‌ی امپدانس فیلتر PI با تغییر R ، r_1 و r_2
۷۵	۴-۸- نحوه‌ی طراحی فیلترهای نوع C
۷۶	۴-۸-۱- روش اول: تعیین پارامترهای فیلتر نوع C بر اساس میزان حذف هارمونیک جریان در فرکانس تنظیم
۷۸	۴-۸-۲- روش دوم: تعیین پارامترهای فیلتر نوع C با مینیمم کردن هزینه‌ی فیلتر

فصل پنجم: طراحی فیلتر هارمونیک برای شبکه‌ی فولاد مبارکه اصفهان

۸۴	۵-۱- مقدمه
۸۴	۵-۲- معرفی شبکه‌ی الکتریکی فولاد مبارکه اصفهان
۸۷	۵-۳- مدلسازی شبکه‌ی فولاد در حوزه‌ی فرکانس توسط نرم‌افزار DIGSILENT
۹۰	۵-۴- طراحی فیلترهای شکافی
۹۰	۵-۴-۱- مرحله‌ی اول: تعیین میزان توان راکتیو خازنی جبران شونده توسط فیلترها
۹۰	۵-۴-۲- مرحله‌ی دوم: تعیین فرکانس تنظیم فیلترها
۹۲	۵-۴-۳- مرحله‌ی سوم: بهینه‌سازی ساختار فیلتر جهت برآورده شدن حدود استاندارد
۹۳	۵-۴-۴- مرحله‌ی چهارم: تعیین مقادیر نامی مؤلفه‌های مختلف فیلترها
۹۳	۵-۴-۴- الف- خازن فیلترهای هارمونیک
۹۶	۵-۴-۴- ب- راکتور فیلترهای هارمونیک

- ۹۷-۴-۴-۵- ج- بریکرها و یا کلیدها.....
- ۹۷-۵- طراحی فیلترهای نوع PI برای مجتمع فولاد مبارکه اصفهان.....
- ۱۰۰-۶-۵- مقایسه‌ی نتایج حاصل از بکارگیری فیلترهای شکافی و فیلترهای نوع PI.....
- ۱۱۲-۷-۵- طراحی فیلترهای نوع C برای مجتمع فولاد مبارکه اصفهان.....
- ۱۱۲-۱-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک دوم.....
- ۱۱۲-۲-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک دوم با فیلتر شکافی هارمونیک سوم.....
- ۱۱۳-۳-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک سوم با فیلتر شکافی هارمونیک دوم.....
- ۱۱۳-۴-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک دوم با فیلترهای شکافی هارمونیک سوم, چهارم و پنجم.....
- ۱۱۳-۵-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک سوم با فیلترهای شکافی هارمونیک دوم, چهارم و پنجم.....
- ۱۱۴-۶-۷-۵- فیلتر نوع C تنظیم شده روی هارمونیک دوم با فیلترهای شکافی هارمونیک سوم, چهارم و پنجم.....
- ۱۲۱-۸-۵- مقایسه‌ی نتایج طرح‌های مختلف فیلتر نوع C.....

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۱۲۴-۱-۶- نتیجه‌گیری.....
- ۱۳۰-۲-۶- پیشنهادات.....
- ۱۳۱- پیوست.....
- ۱۳۴- مراجع.....
- ۱۳۷- چکیده انگلیسی.....

چکیده

کوره‌های قوس الکتریکی از جمله بارهای بزرگی هستند که مشخصه‌ی ولتاژ-جریان آنها غیرخطی، تغییرپذیر با زمان و تا حدودی تصادفی می‌باشد. طیف هارمونیک گسترده، دامنه‌ی بالای هارمونیک‌های تولیدی، ضریب توان پایین و تغییرات زیاد در توان اکتیو و راکتیو مصرفی، از جمله مشخصات این نوع بارها می‌باشد. جهت جبران توان راکتیو و رفع فلیکر ولتاژ در این بارها معمولاً از SVC استفاده می‌شود. با توجه به تزریق زیاد هارمونیک‌های جریان توسط کوره‌های قوس و راکتور متغیر جبران‌کننده (TCR)، عموماً خازن‌های موجود در SVC به صورت فیلترهای پسیو پیاده‌سازی می‌گردند. مرسوم‌ترین روش برای طراحی این فیلترها یافتن مشخصه‌ی امپدانس سیستم در حوزه‌ی فرکانس و مشاهده‌ی تأثیر این فیلترها بر این مشخصه می‌باشد. در این پایان‌نامه ضمن بررسی مدل‌های مختلف کوره‌ی قوس و TCR در حوزه‌ی فرکانس و مقایسه‌ی آنها با یک شیب‌سازی زمانی، یک مدل جدید غیر خطی از کوره‌ی قوس نیز در حوزه‌ی فرکانس ارائه شده است. در ادامه انواع فیلترهای پسیو شامل فیلترهای شکافی، فیلترهای نوع PI و فیلترهای نوع C مورد مطالعه قرار گرفته و ضمن بررسی معایب و محاسن هر یک، به نحوه‌ی طراحی این فیلترها نیز پرداخته می‌شود. روش ارائه شده برای طراحی فیلتر نوع PI برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده است. با ارتقاء توان مصرفی کوره‌های قوس و نصب راکتورهای سری جدید در شبکه‌ی فولاد مبارکه اصفهان، این مجتمع نیاز به نصب SVC‌های جدیدی خواهد داشت. با بکارگیری مدل‌های بدست آمده برای کوره‌ی قوس و TCR در حوزه‌ی فرکانس به طراحی انواع فیلترهای پسیو با آرایش‌های مختلف برای شبکه‌ی فولاد مبارکه اصفهان پرداخته شده و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شده است.

فصل اول

مقدمه

کیفیت توان الکتریکی سیستم‌های قدرت از جمله واژه‌هایی است که از اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ بیشتر توسط متخصصان و مهندسان برق مورد استفاده قرار گرفته است. اغتشاشات کیفیت توان الکتریکی سیستم قدرت، به هر گونه مشکلی که موجب تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس شده و بر عملکرد تجهیزات و مصرف‌کننده‌ها تأثیر گذارد، اطلاق می‌گردد [۱]. با افزایش تجهیزات الکترونیکی حساس به اغتشاشات شبکه و آگاهی‌های مشترکین و حساسیت آنها بر عملکرد تجهیزات خود از یک طرف و افزایش بارهای غیرخطی تولیدکننده اغتشاشات مختلف و گسترده شدن شبکه‌ها از طرف دیگر، اهمیت این مفهوم نزد شرکت‌های برق و مشترکین افزایش یافته است.

یکی از مصادیق اغتشاشات شبکه که در مبحث کیفیت توان الکتریکی مورد توجه قرار می‌گیرد اعوجاج‌های هارمونیکی می‌باشد. هرگونه شکل موج غیرسینوسی و متناوب را می‌توان به شکل موج‌های سینوسی با فرکانسی متفاوت از فرکانس اصلی شبکه تجزیه کرد. این شکل موج‌های متناوب با عنوان اعوجاج‌های هارمونیکی شناخته می‌شوند. باید توجه داشت که اعوجاج‌های لحظه‌ای و غیرمتناوب در این تعریف نمی‌گنجد. با فرض سینوسی بودن ولتاژ نیروگاه‌ها و منابع قدرت، در صورت جاری شدن جریان‌های

هارمونیکی در شبکه و به دلیل وجود امپدانس های سری و موازی اعوجاج ولتاژ در باس بارها ایجاد گردیده و بارهای حساس را تحت تأثیر قرار می دهد.

اعوجاج های هارمونیکی از عواملی هستند که از دهه ی ۱۹۳۰ مشکلاتی را برای شبکه فراهم نموده اند. ابتدا ترانسفورمرها، به عنوان منابع اصلی هارمونیکی ها به شمار می آمدند. با عرضه ی اولین لامپ های قوس الکتریکی به بازار، اعوجاج های هارمونیکی در شبکه ها افزایش یافت. در دهه ی ۱۹۷۰ با وارد شدن سیستم های الکترونیک قدرت به شبکه ی قدرت در قالب کوره های القایی، درایوها، مبدل ها و منابع تغذیه، مشکل هارمونیکی جدی تر شد. کوره های قوس الکتریکی نیز به خاطر طبیعت جریان غیر سینوسی آنها همیشه از منابع تولید هارمونیکی بوده اند. مشکل هارمونیکی زمانی حادث تر می شود که خازن های تصحیح ضریب توان نصب شده در شبکه به دلیل فراهم نمودن شرایط رزونانس، باعث تشدید و تقویت این اعوجاج ها می شوند. فیلترهای پسیو نصب شده در شبکه که سطح هارمونیکی ها را در شبکه کاهش می دهند نیز در صورت تنظیم نامناسب آنها هارمونیکی ها را در شبکه تقویت می کنند.

کوره های قوس الکتریکی از جمله بارهای بزرگی هستند که مشخصه ی ولتاژ- جریان آنها غیرخطی، تغییرپذیر با زمان و تا حدودی تصادفی می باشد. طیف هارمونیکی گسترده، دامنه ی بالای هارمونیکی های تولیدی، ضریب توان پایین (در محدوده ی ۰/۷ تا ۰/۸۵ پس فاز) و تغییرات زیاد در توان اکتیو و راکتیو مصرفی، از جمله مشخصات این نوع بارها می باشد. تغییرات سریع و پیوسته ی توان راکتیو در این بارها معمولاً استفاده از SVC^۱ (جبران کننده ی استاتیک توان راکتیو) را جهت جبران توان راکتیو و رفع فلیکر ولتاژ اجباری می کند [۲]. با توجه به تزریق زیاد هارمونیکی های جریان توسط کوره ی قوس الکتریکی و راکتور متغیر جبران کننده (که با نام TCR^۲ شناخته می شود)، عموماً خازن های موجود در SVC به صورت فیلترهای شکافی^۳ پیاده سازی می گردند.

مرسوم ترین روش برای طراحی این فیلترها یافتن مشخصه ی امپدانس سیستم و مشاهده ی تأثیر این فیلترها بر این مشخصه می باشد. به طور خاص مشخصه ی امپدانس سیستم به همراه فیلتر باید به گونه ای باشد که هارمونیکی های مزاحم را در بدترین شرایط به صورت مطلوب تضعیف نموده و علاوه بر این تشدیدهای موازی موجب افزایش غیر قابل قبول سایر هارمونیکی ها نگردد. در یافتن مشخصه ی امپدانس یک سیستم شامل فیلترهای شکافی مدل کردن مناسب المان های مختلف سیستم نقش اساسی ایفا می کند.

در مطالعات هارمونیکی در حوزه ی فرکانس معمولاً بارهای غیرخطی (تولید کننده ی هارمونیکی) توسط منابع جریان هارمونیکی مدل می گردند [۳]. معهداً برای بارهای بسیار بزرگ شبیه سیستم های HVDC، کوره های قوس بزرگ و TCR موجود در سیستم های SVC، مدل منبع جریان به تنهایی و به خاطر تأثیر زیاد

1. Static Var Compensator
2. Thyristor Controlled Reactor
3. Notch Filters

این بارها بر روی شبکه از دقت قابل قبولی برخوردار نمی‌باشد. هر گونه خطا در مدل‌سازی این بارها می‌تواند فرکانس‌های تشدید و دامنه‌ی مشخصه‌ی امپدانس را دچار تغییر کرده و لذا روند طراحی فیلتر و انتخاب پارامترها را دچار اشتباه نماید.

در مراجع موجود [۴-۱۹] روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی TCR و کوره‌های قوس در حوزه‌ی فرکانس ارائه شده است. معهدا مقایسه‌ای بین دقت این مدل‌ها بر اساس یک ملاک معین وجود ندارد. یکی از اهداف این پایان‌نامه جمع‌آوری و مقایسه‌ی مدل‌های مختلف TCR و کوره‌ی قوس در حوزه‌ی فرکانس و برآورد دقت و کارایی این مدل‌ها می‌باشد. برای بررسی اعتبار مدل‌های مختلف، نتایج شبیه‌سازی در حوزه‌ی فرکانس با شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان مقایسه گردیده و اظهار نظر می‌گردد.

محرک اصلی برای انجام این پایان‌نامه ارتقاء و افزایش ظرفیت کوره‌های قوس الکتریکی مجتمع فولاد مبارکه اصفهان و نصب SVC های جدید در این مجتمع می‌باشد. به همین دلیل این پایان‌نامه به چگونگی طراحی فیلتر با تمرکز روی سیستم تحت طراحی مجتمع مذکور نیز خواهد پرداخت.

روند ارائه‌ی مطالب در این پایان‌نامه به صورت زیر خواهد بود. در فصل دوم به بررسی و مقایسه‌ی مدل‌های مختلف TCR در حوزه‌ی فرکانس پرداخته می‌شود. ملاک و معیار مقایسه‌ی مدل‌های حوزه‌ی فرکانس، یک شبیه‌سازی زمانی از TCR خواهد بود که نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل‌های حوزه‌ی فرکانس خواهد داشت. در پایان این فصل مدل پیشنهادی برای TCR جهت طراحی فیلتر هارمونیک ارائه شده است. در فصل سوم کار مشابهی برای مدل‌سازی کوره‌ی قوس الکتریکی صورت گرفته است. در این فصل ضمن بررسی و مقایسه‌ی مدل‌های مختلف کوره‌ی قوس در حوزه‌ی فرکانس، یک مدل جدید نیز جهت طراحی فیلتر هارمونیک ارائه شده است که مشخصه‌ی امپدانس دقیق‌تری نسبت به مدل‌های قبلی ارائه می‌کند.

در فصل چهارم به بررسی نحوه‌ی طراحی انواع فیلترهای هارمونیک پسیو برای کوره‌های قوس الکتریکی پرداخته می‌شود. استاندارد IEEE-1531 فیلترهای شکافی، فیلترهای نوع PI و فیلترهای نوع C را برای حذف هارمونیک‌های کوره‌ی قوس الکتریکی پیشنهاد کرده است [۲۰]. در این فصل ضمن بررسی ساختار هر سه نوع فیلتر به نحوه‌ی طراحی این فیلترها نیز پرداخته می‌شود. روش‌های ارائه شده برای طراحی فیلتر نوع PI برای اولین بار در این تحقیق ارائه شده‌اند.

در فصل پنجم با بکارگیری مدل‌های بدست آمده برای ساختارهای غیرخطی به طراحی فیلترهای هارمونیک پسیو برای شبکه‌ی فولاد مبارکه اصفهان که شامل چندین کوره‌ی قوس الکتریکی می‌باشد، پرداخته می‌شود. با ارتقاء توان مصرفی کوره‌های قوس الکتریکی و نصب راکتورهای سری جدید در شبکه‌ی فولاد مبارکه اصفهان این مجتمع به جبران توان راکتیو خازنی بیشتری نیاز دارد. علاوه بر آن میزان هارمونیک‌های تزریقی توسط کوره‌های قوس الکتریکی جدید نیز افزایش می‌یابد. به همین دلیل مجتمع

فولاد مبارکه اصفهان قصد دارد SVC های جدیدی را در شبکه ی داخلی خود نصب کند [۲۱]. در این فصل ضمن معرفی شبکه ی الکتریکی این مجتمع و مدلسازی هارمونیکی اجزای مختلف آن به طراحی فیلترهای جدید هارمونیکی نیز پرداخته می شود. در طراحی انجام شده انواع مختلف فیلترهای پسیو مطرح شده در فصل چهارم با آرایش های مختلف بکار گرفته شده است.

فصل ششم نیز نتایج کلی بدست آمده در این پایان نامه را به همراه پیشنهاداتی برای ادامه ی کار بیان می دارد.

فصل دوم

مدلسازی جبران کننده‌ی استاتیکی

توان راکتیو در حوزه‌ی فرکانس

جهت تحلیل هارمونیکی

۲-۱- مقدمه

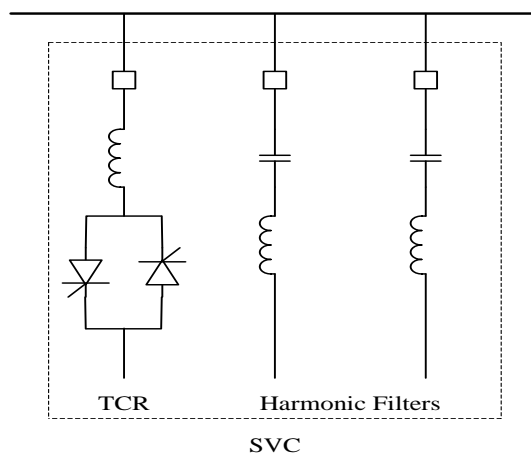
همان گونه که در فصل اول ذکر گردید مدلسازی دقیق راکتور کنترل شونده با تریستور (TCR) در حوزه‌ی فرکانس در مطالعات هارمونیکی بسیار مهم می‌باشد. توان نامی بزرگ این ادوات و دامنه‌ی نسبتاً زیاد هارمونیکی‌های تولیدی و تأثیر قابل توجه آنها روی شبکه‌ی مورد مطالعه معمولاً مدل‌های متعارف هارمونیکی در حوزه‌ی فرکانس را کم دقت می‌کند. در این فصل مدل‌های مختلف یک TCR در حوزه‌ی فرکانس مورد بررسی قرار گرفته و سعی می‌گردد با استفاده از نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان، مدلی با حداکثر دقت استخراج شده و مورد بررسی قرار گیرد.

۲-۲- ساختار کلی جبران کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو^۱ (SVC)

جبران کننده‌های موازی استاتیک در طبقه‌ی جبران کننده‌های اکتیو قرار می‌گیرند. استاتیک به این معناست که برخلاف کندانسورهای سنکرون، دارای قسمت متحرک نمی‌باشند. این نوع جبران کننده‌ها در جبران امپدانس ضربه‌ای و جبران با تقسیم‌بندی خط در خطوط ولتاژ بالا و طویل بکار برده می‌شوند. به علاوه کاربردهای متنوعی در زمینه جبران بار دارند. ثابت نگه داشتن ولتاژ در یک سطح معین و یا نزدیک آن،

بهبود پایداری سیستم قدرت، بهبود ضریب توان و تصحیح عدم تقارن فازها از جمله کاربردهای عملی جبران‌کننده‌های استاتیک در سیستم‌های قدرت الکتریکی هستند [۴].

به منظور استفاده مؤثر از توان کوره‌های قوس الکتریکی در کارخانجات فولادسازی، لازم است مجموعه‌ای از مسائل به خصوص مسأله‌ی تثبیت ولتاژ، اصلاح ضریب توان و فیلتر کردن هارمونیک حل گردد. یکی از ساختارهای پرکاربرد جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو برای کوره‌های قوس الکتریکی استفاده از خازن‌های ثابت به موازات راکتور قابل کنترل (TCR) می‌باشد. خازن‌های ثابت اغلب با راکتورهای کوچک برای فرکانس‌های هارمونیک که ممکن است عدد صحیح یا غیر صحیح باشند، هم‌نوا می‌گردند (شکل ۱-۲).

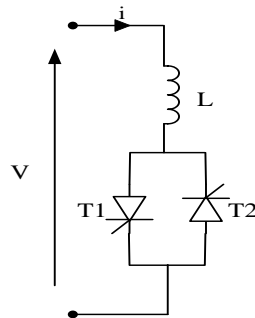


شکل ۱-۲: ساختار کلی یک جبران‌کننده‌ی استاتیکی توان راکتیو

مهم‌ترین مشخصه‌ی این جبران‌کننده آن است که قادر است با تنظیم توان راکتیوی که با سیستم تبادل می‌نماید، ولتاژ را به طور قابل ملاحظه‌ای در ترمینال خود ثابت نگاه دارد. این خاصیت یعنی تثبیت ولتاژ در کاهش چشمک زدن لامپ و تغییرات ناشی از بارهای متغیر از اهمیت برخوردار است.

۲-۳- اصول کار TCR و هارمونیک‌های تولیدی آن

اصول راکتور تریستور کنترل (TCR) در شکل ۲-۲ نشان داده شده است [۴]. عنصر کنترل‌کننده، کنترلر تریستوری است که در آن یک زوج تریستور هر یک در جهت خلاف هم قرار گرفته و در نیم سیکل متوالی فرکانس تغذیه هدایت می‌کنند. اگر تریستورها دقیقاً در لحظه‌ی پیک ولتاژ تغذیه آتش شوند، تریستورها به طور کامل هدایت کرده و جریان عبوری از راکتور مشابه وقتی است که کنترلر تریستور اتصال کوتاه شده باشد. جریان اساساً راکتیو بوده و از ولتاژ تقریباً 90° درجه عقب‌تر است. اگر در آتش کردن تریستورها به مقدار مساوی تأخیر ایجاد شود، یک مجموعه شکل موج‌های جریان بدست می‌آید که مربوط به یک زاویه‌ی آتش α معین است. اگر زاویه‌ی آتش α از نقطه‌ی صفر موج ولتاژ اندازه‌گیری شود، در زاویه‌ی آتش 90° درجه هدایت کامل صورت می‌گیرد. کسری از هدایت با زاویه‌ی آتش بین 90° درجه و 180° درجه بدست می‌آید.



شکل ۲-۲: ساختار کلی یک TCR

تا جایی که به مؤلفه‌ی جریان پایه مربوط می‌شود، راکتور کنترل شده با تریستور یک سوسپتانس قابل کنترل بوده و بنابراین می‌تواند به عنوان جبران‌کننده‌ی استاتیک بکار برده شود. جریان لحظه‌ای که از TCR می‌گذرد از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{V} (\cos \alpha - \cos \omega t) & \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma \leq \omega t \leq \alpha + \pi \end{cases} \quad (1-2)$$

که در آن V ولتاژ مؤثر، X_L راکتانس راکتور در فرکانس پایه (بر حسب اهم)، ω فرکانس زاویه‌ای و α زاویه‌ی آتش است. مبدأ زمان طوری انتخاب شده است که بر نقطه‌ی صفر مثبت شونده موج ولتاژ منطبق باشد. مؤلفه‌ی پایه به وسیله‌ی تحلیل فوریه طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_1 = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} V \quad (2-2)$$

که در آن σ زاویه‌ی هدایت بر حسب رادیان و I_1 مؤلفه‌ی پایه جریان بر حسب آمپر می‌باشد. زاویه‌ی هدایت (σ) با رابطه‌ی زیر با زاویه‌ی آتش (α) مرتبط می‌شود:

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (3-2)$$

معادله‌ی (۲-۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$I_1 = B_L(\sigma) V \quad (4-2)$$

که در آن $B_L(\sigma)$ (سوسپتانس قابل تنظیم فرکانس پایه است و با زاویه‌ی هدایت طبق قانون زیر کنترل می‌شود):

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \quad (5-2)$$

حداکثر مقدار B_L برابر است با $1/X_L$ که در زاویه‌ی هدایت 180° درجه یعنی هدایت کامل تریستور بدست می‌آید. حداقل مقدار B_L برابر با صفر است که در زاویه‌ی هدایت صفر درجه بدست می‌آید.

اثر افزایش زاویه‌ی آتش، کاهش یافتن مؤلفه‌ی اصلی جریان، افزایش اندوکتانس راکتور و کاهش توان راکتیو آن می‌باشد. در این حالت شکل موج جریان به میزان بیشتری از شکل سینوسی خارج می‌شود. به عبارت دیگر TCR جریان‌های هارمونیک تولید می‌کند.

اگر زاویه‌های آتش متعادل باشد (یعنی برای هر دو ترستور یکسان باشد) فقط هارمونیک‌های فرد ایجاد می‌شود.

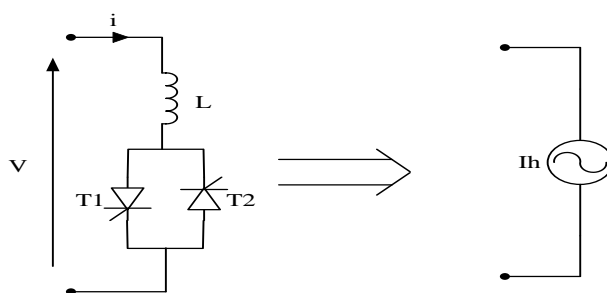
برای سیستم سه‌فاز که در آن سه TCR تک‌فاز به صورت مثلث بسته شده‌اند، با فرض متقارن بودن سیستم سه‌فاز تمامی هارمونیک‌های مضرب سه در مثلث بسته به گردش در می‌آیند و از جریان‌های خط حذف می‌گردند. تمامی هارمونیک‌های دیگر موجود در جریان‌های فاز در جریان‌های خط نیز می‌باشند. در TCR این مسأله حائز اهمیت است که مطمئن باشیم زاویه‌ی هدایت در دو ترستور که در جهت خلاف هم قرار دارند یکسان است. نامساوی بودن زاویه‌ی هدایت منجر به تولید مؤلفه‌های هارمونیک زوج و مؤلفه‌ی DC در جریان می‌گردد. آنها همچنین منجر به تنش حرارتی نابرابر در زوج ترستور می‌گردند. ضرورت هدایت برابر همچنین α را در حداکثر مقدار 180° درجه محدود می‌نماید.

۴-۲- بررسی مدل‌های TCR در حوزه‌ی فرکانس

در مطالعات هارمونیک‌های شبکه‌های الکتریکی از روش‌های حل مدار خطی در حالت ماندگار استفاده می‌شود. منابع هارمونیک‌های در یک شبکه‌ی خطی مدل می‌شوند. در تحلیل هارمونیک‌های یک شبکه‌ی الکتریکی جهت طراحی فیلترهای هارمونیک‌ها، دامنه‌ی هارمونیک‌های جریان تزریقی توسط TCR و مشخصه‌ی امیدانسی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه به بررسی مدل‌های مختلف TCR در حوزه‌ی فرکانس جهت تحلیل هارمونیک‌های شبکه‌های الکتریکی پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱- مدل منبع جریان هارمونیک

در این مدل به جای TCR برای تحلیل هارمونیک‌های یک منبع جریان قرار داده می‌شود [۴ و ۵]. این مدل در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.



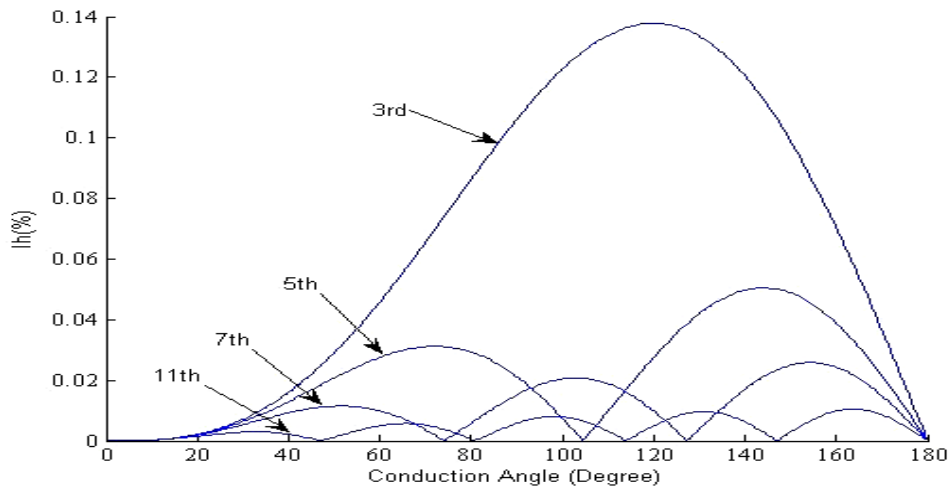
شکل ۲-۳: مدل منبع جریان برای TCR

با فرض متعادل بودن زاویه‌های آتش برای هر دو ترستور تنها هارمونیک‌های فرد ایجاد می‌شوند که دامنه‌ی آنها از طریق بسط فوریه‌ی جریان لحظه‌ای TCR که در رابطه‌ی ۲-۱ آمده است، بدست می‌آیند. مقدار مؤثر مؤلفه‌های هارمونیک‌های جریان از رابطه‌ی زیر بدست می‌آیند:

$$I_n = \frac{4}{\pi} \frac{V}{X_L} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \frac{\sin \alpha}{n} \right] \quad (۴-۲)$$

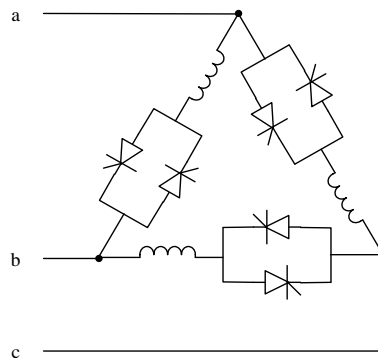
$$n = 3, 5, 7, 11, 13, \dots$$

که در این رابطه n شماره‌ی هارمونیک، V ولتاژ مؤثر، X_L راکتانس راکتور در فرکانس پایه (بر حسب اهم) و α زاویه‌ی آتش ترستورها می‌باشند. شکل ۲-۴ تغییرات دامنه‌ی تعدادی از هارمونیک‌های مرتبه‌ی پایین جریان را بر حسب زاویه‌ی هدایت نشان می‌دهد.



شکل ۲-۴: مقدار هارمونیک‌های جریان بر حسب زاویه‌ی هدایت ترستورها

همان‌طور که مشخص است مقدار ماکزیمم در تمامی هارمونیک‌ها در زاویه‌ی هدایت یکسان اتفاق نمی‌افتد. برای سیستم سه‌فاز، آرایش TCR معمولاً به صورت شکل ۲-۵ خواهد بود. وقتی سیستم متقارن باشد و اندازه‌ی راکتورها در سه‌فاز برابر باشند، تمامی هارمونیک‌های مضرب سه در مثلث بسته به گردش در می‌آیند و از جریان‌های خط حذف می‌گردند. سایر هارمونیک‌های موجود در جریان فاز در جریان خط نیز حضور دارند.



شکل ۲-۵: آرایش سه‌فاز TCR

با توجه به اینکه زاویه‌ی آتش در ترستورها متغیر است، پس هارمونیک‌های جریان تزریقی توسط TCR نیز بسته به مقدار زاویه‌ی آتش تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه مؤلفه‌ی اصلی جریان در هدایت کامل با مقدار مؤثر جریان در هدایت کامل برابر است، داریم:

$$I_{rms} = \frac{V}{X_L} \quad \text{if} \quad \sigma = 180^\circ \quad I_1 = \quad (V-2)$$

بنابراین رابطه‌ی ۲-۶ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{I_n}{I_1(\sigma = 180^\circ)} (\%) = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \times 100 \quad (۸-۲)$$

در این رابطه هارمونیک‌های جریان تزریقی به صورت درصدی از مقدار نامی جریان TCR در هدایت کامل بیان شده‌اند. اگر دیفرانسیل رابطه‌ی ۲-۸ را نسبت به زاویه‌ی α بدست آوریم و آن را برابر صفر قرار دهیم:

$$\frac{d\left(\frac{I_n}{I_1(\sigma = 180^\circ)}\right)}{d(\alpha)} = 0 \quad (۹-۲)$$

آنگاه داریم:

$$-0.3183 \left[\cos(h+1)\alpha + \cos(h-1)\alpha + \frac{2 \sin(h\alpha) \sin(\pi - \alpha)}{h} + 2 \cos(\pi - \alpha) \cosh \alpha \right] = 0 \quad (۱۰-۲)$$

به عنوان مثال هارمونیک مرتبه‌ی پنجم در زاویه‌ی آتش $107/8^\circ$ حداکثر دامنه را داراست که برابر $5/05$ درصد می‌باشد و یا هارمونیک مرتبه‌ی هفتم در زاویه‌ی آتش $102/65^\circ$ و هارمونیک مرتبه‌ی یازدهم در زاویه‌ی آتش $97/8^\circ$ و هارمونیک مرتبه‌ی سیزدهم در زاویه آتش $96/65^\circ$ حداکثر دامنه را دارا می‌باشند. مقادیر هارمونیک‌های تزریقی توسط TCR در زوایای آتشی که هارمونیک‌های مرتبه‌ی پنجم، هفتم، یازدهم و سیزدهم حداکثر مقدار خود را دارا هستند، در جدول ۲-۱ آمده است (مقادیر برحسب درصدی از جریان نامی TCR در هدایت کامل می‌باشند).

جدول ۲-۱: مقادیر مؤلفه‌های هارمونیک TCR در زوایای آتش مختلف

h	$\alpha = 107/8^\circ$	$\alpha = 102/65^\circ$	$\alpha = 97/8^\circ$	$\alpha = 96/65^\circ$
۵	۵/۰۵	۴/۵۲	۳/۱۹۶	۲/۷۸۶
۷	۲/۱۴	۲/۵۹	۲/۱۱	۱/۸۸
۱۱	۰/۲۵	۰/۶۹	۱/۰۵	۰/۷۵
۱۳	۰/۵۵	۰/۲۱	۰/۷۳۸	۱/۰۱
۱۷	۰/۳۶	۰/۲۴	۰/۳۲۵	۰/۴۰۵
۱۹	۰/۱۳	۰/۳	۰/۱۸۷	۰/۲۸۴
۲۳	۰/۱۷	۰/۲۲	۰/۰۰۴	۰/۱۱
۲۵	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۰۴۹
۲۹	۰/۰۶	۰/۰۱۶۵	۰/۱۰۸	۰/۰۳۳
۳۱	۰/۰۲۴	۰/۰۶۸	۰/۱۱۵	۰/۰۵۸
۳۵	۰/۰۹۹	۰/۱	۰/۱۰۳	۰/۰۸۲
۳۷	۰/۰۷۸	۰/۰۸۶۵	۰/۰۸۷۵	۰/۰۸۴