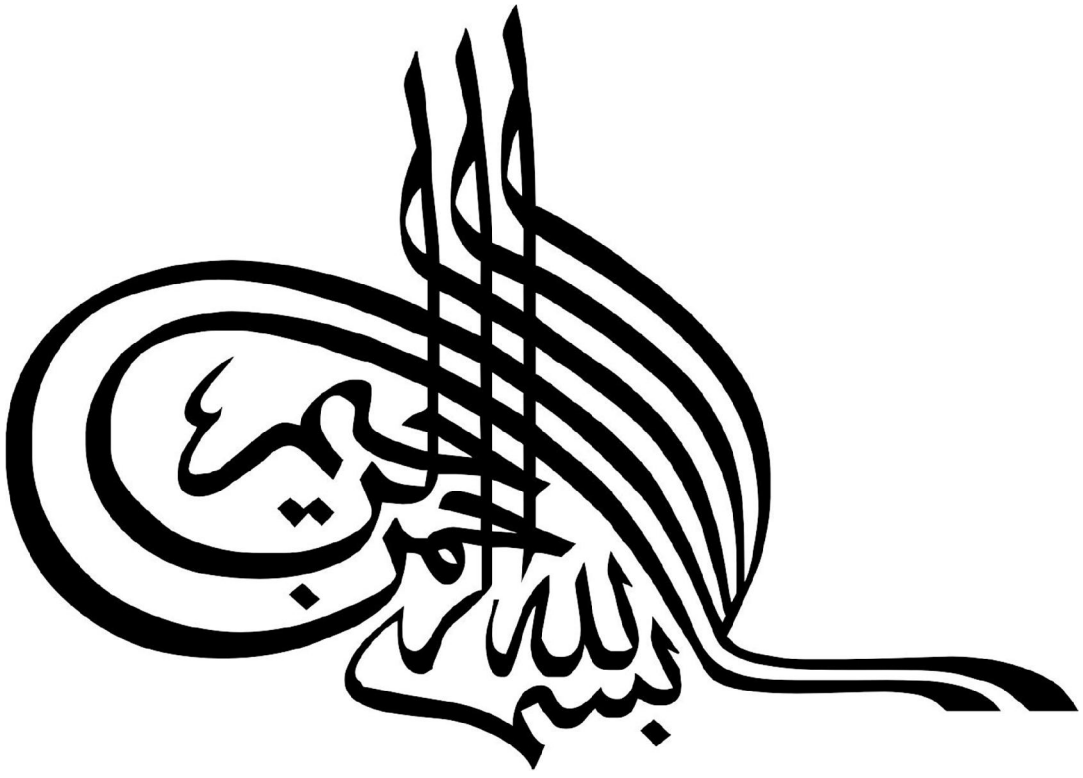

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

شبیه‌سازی یک جبران‌کننده توان راکتیو با ساختار FC/TCR برای بهبود کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – قدرت

محمد نظری وانانی

استاد راهنما

دکتر احمد قادری

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق –قدرت تحت عنوان

شبیه‌سازی یک جبران‌کننده توان راکتیو با ساختار FC/TCR برای بهبود کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی

در تاریخ ۱۳۹۲/۶/۳۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر احمد قادی
۲- استاد داور	دکتر حمیدرضا کارشناس
۳- استاد داور	دکتر محمد اسماعیل همدانی گلشن
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مسعود عمومی

سپاسگذاری

خدای بزرگ را شاکرم که دریای بی‌کران علم و دانش است.

از پدر و مادر عزیزم که زندگیم را مدیونشان هستم سپاسگذارم. فرزندیشان بزرگترین افتخار زندگیم، عشق و محبتشان امید و اشتیاق به ادامه راه و حمایت بی دریغشان استوار کننده قدم‌هایم می‌باشد. بی‌نهایت دوستشان دارم و تا ابد سپاسگزارشان هستم.

از همسر عزیزم به پاس همدلی و محبت‌هایش تشکر و قدردانی می‌کنم.

از برادران و خواهرعزیزم که یاری رسانم بودند متشکرم.

از استاد بزرگوار و ارجمند جناب آقای دکتر قادری که از ابتدا تا انتهای کار صبورانه و خستگی ناپذیر راهنمایی و همراهیم کردند، بی‌نهایت سپاسگذارم.

از پرسنل محترم مجتمع فولاد مبارکه آقایان مهندس ایمانیان و مهندس خزایی که اطلاعات مور نیاز را در اختیار اینجانب قرار دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از همکاری دوستان عزیزم که از هیچ تلاشی نسبت به اینجانب دریغ نکردند کمال تشکر و آرزوی سربلندی دارم. همچنین از دکتر کارشناس و دکتر همدانی گلشن که مسؤلیت داوری پایان نامه این بنده را پذیرفتن تشکر می‌نمایم.

محمد نظری وانانی

شهریور ماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوریهای ناشی از این تحقیق موضوع

این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به همسر عزیزم:

که با صبر و متانت خود رفیق بی شفیق لحظه لحظه های زندگیم است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب..... هفت

چکیده.....۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- پیش‌زمینه، صورت مسئله تحقیق، انگیزه و اهداف.....۲

۱-۲- مرور پژوهش‌های پیشین.....۵

۱-۳- ساختار پایان‌نامه.....۶

فصل دوم:کوره‌های قوس الکتریکی

۲-۱- کوره قوس الکتریکی.....۷

۲-۲- دسته‌بندی کلی کوره‌های قوس الکتریکی.....۸

۲-۳- مدل‌های کوره قوس الکتریکی در حوزه زمان.....۱۱

۲-۳-۱- مدل هذلولی گون.....۱۳

۲-۳-۲- خطی سازی منحنی ولتاژ-جریان یک قوس واقعی.....۱۷

۲-۳-۳- مدل نمایی کامل.....۲۱

۲-۳-۴- مدل درجه سوم.....۲۲

۲-۳-۵- مدل نمایی –هذلولی.....۲۳

۲-۴- مدل شبیه‌سازی بار کوره.....۲۴

۲-۴-۱- نامتعادلی فازها در کوره قوس الکتریکی.....۲۶

۲-۴-۲- فلیکر ولتاژ.....۲۸

فصل سوم: جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو SVC

۳-۱- جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو SVC بر پایه تریستور.....۳۲

۳-۲- ساختار SVC مجتمع فولاد مبارکه.....۳۶

۳-۳- سلف کنترل‌شونده با تریستور TCR.....۴۰

عنوان | صفحه

۳-۳-۱- عملکرد TCR و روابط حاکم بر آن ۴۰

۳-۳-۲- شبیه‌سازی TCR ۴۴

۳-۴- مشخصات دیگر جبران‌کننده‌های TCR ۴۹

۳-۴-۱- سرعت پاسخ ۴۹

۳-۴-۲- کنترل هر فاز به‌طور مستقل ۴۹

۳-۴-۳- پاسخ اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ ۵۰

۳-۴-۴- تلفات توان ۵۰

۳-۵- کنترل TCR به صورت سه‌فاز یا کنترل جداگانه در هر فاز ۵۱

۳-۵-۱- کنترل سه‌فاز ۵۱

۳-۵-۲- کنترل هر فاز به طور مستقل ۵۳

۳-۶- مدارهای فیلتر FC ۵۵

۳-۶-۱- عملکرد خازن‌های ثابت FC در مولد استاتیکی توان راکتیو FC-TCR ۵۵

۳-۶-۲- شبیه‌سازی خازن‌های ثابت FC ۵۶

۳-۶-۳- امپدانس هارمونیکی فیلترها ۶۰

۳-۷- ملاحظات لازم در طراحی و نصب فیلترهای غیر فعال ۶۱

۳-۸- پارامترهای فیلترهای میان‌گذر ۶۲

۳-۸-۱- فرکانس تنظیم(Tuned Frequency) ۶۲

۳-۸-۲- کیفیت (Quality) ۶۲

۳-۸-۳- ضریب عدم تنظیم ۶۲

۳-۸-۴- توان راکتیو تزریقی ۶۳

۳-۹- بلوک دیاگرام کنترلی سیستم ۶۵

۳-۹-۱- سیستم کنترل جبران‌کننده TCR ۶۵

۳-۹-۲- به‌دست آوردن ضرایب کنترل‌کننده PI ۶۷

عنوان صفحه

فصل چهام: مدل‌سازی و شبیه‌سازی خط kV/EAF Bus ۶۳ مجتمع فولاد مبارکه

۴-۱- ساختار شبکه برق مجتمع فولاد مبارکه..... ۶۹

۴-۲- شبیه‌سازی خط (EAF Bus) A kV ۶۳ مجتمع فولاد مبارکه..... ۷۰

۴-۳- کلیدزنی خازن‌های ثابت FC..... ۷۲

۴-۴- جبران بار با استفاده از جبران کننده FC-TCR(حالت اول: جبران کننده در محدوده کنترل عمل می‌کند) ۷۴

۴-۴-۱- نوسانات ولتاژ..... ۷۴

۴-۴-۲- ضریب توان..... ۷۶

۴-۴-۳- نامتعادلی فازها..... ۷۷

۴-۴-۴- آنالیز هارمونیکی..... ۷۹

۴-۵- جبران بار با استفاده از جبران کننده FC-TCR(حالت دوم: جبران کننده خارج از محدوده کنترل عمل می‌کند)..... ۸۱

۴-۵-۱- نوسانات ولتاژ..... ۸۱

۴-۵-۲- ضریب توان..... ۸۲

۴-۵-۳- نامتعادلی فازها..... ۸۴

۴-۵-۴- آنالیز هارمونیکی..... ۸۶

۴-۶- ارزیابی تلفات SVC مجتمع فولاد مبارکه با استفاده از نتایج شبیه‌سازی..... ۸۷

۴-۶-۱- تلفات مدارهای فیلتر FC..... ۸۸

۴-۶-۲- تلفات TCR..... ۸۸

۴-۶-۳- درصد تلفات نامی SVC..... ۸۸

۴-۶-۴- رسم منحنی تلفات بر حسب توان راکتیو خروجی..... ۸۹

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه‌گیری..... ۹۱

۵-۲-پیشنهادات برای ادامه این پژوهش..... ۹۲

عنوان **صفحه**

ضمیمه الف: اجزای SVC مجتمع فولاد مبارکه..... ۹۴

ضمیمه ب: نقشه اتصال خازن‌های فیلترهای جبران‌کننده توان راکتیو مجتمع فولاد مبارکه ۱۰۳

مراجع..... ۱۰۸

چکیده

کوره‌های قوس الکتریکی برای ذوب و بازیابی فلزات، خصوصاً آهن در کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع از کوره‌ها، قراضه‌ها را توسط گرمای ناشی از قوس الکتریکی ذوب می‌کنند. به دلیل ماهیت قوس الکتریکی و فرآیند ذوب، این دستگاه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی نظیر عدم تعادل ولتاژ و جریان، ولتاژ و جریان هارمونیکی ، نوسانات ولتاژ و ضریب توان پایین می‌شوند. به منظور استفاده بهینه از توان الکتریکی در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه‌های فولادسازی، لازم است مواردی چون تثبیت ولتاژ، اصلاح ضریب توان و فیلتر کردن هارمونیک‌ها مد نظر قرار گیرند. جبران کننده استاتیک توان راکتیو راه حلی مناسب برای کاهش مسائل کیفیت توان ناشی از کوره قوس الکتریکی می‌باشد.

این پایان‌نامه به مدل‌سازی خط ۶۳ کیلو ولت مجتمع فولاد مبارکه و بارهای متصل به این خط به منظور بررسی عملکرد جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو در بهبود مسائل کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی می‌پردازد. برای دستیابی به این هدف ابتدا مدل‌های مختلف کوره قوس الکتریکی در حوزه زمان مورد مطالعه قرار می‌گیرد. از آنجا که عامل اصلی در دقت مدل کوره قوس الکتریکی، منحنی مشخصه ولتاژ-جریان قوس می‌باشد، مدل نمایی-هذلولی که منحنی مشخصه نزدیکی به مشخصه واقعی قوس دارد، جهت شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. در این مدل عدم تعادل ولتاژ و جریان و فلیکر ولتاژ به صورت تصادفی اعمال گردیده است و نشان داده شده است که رفتار مدل کوره قوس الکتریکی در شبیه‌سازی‌ها مطابق با عملکرد کوره‌های قوس واقعی مجتمع فولاد مبارکه می‌باشد. همچنین ساختار و چگونگی عملکرد جبران کننده استاتیک توان راکتیو مجتمع فولاد مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس با توجه به اطلاعات شرکت سازنده، جبران‌کننده شبیه‌سازی شده و ضرایب کنترل کننده انتگرالی- تناسبی با زمان پاسخ کمتر از یک سیکل برای جبران فلیکر و خطای حالت دائم صفر برای جبران دقیق توان راکتیو با روش سعی و خطا به‌دست آمده است.

در نهایت با استفاده از مدل کوره‌های قوس الکتریکی و جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو، خط ۶۳ کیلو ولت مجتمع فولاد مبارکه شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌ها، امپدانس ترانسفورماتورها وخطوط طبق مقادیر واقعی جایگذاری گردید، تا نتایج به‌دست آمده تا حد امکان به نتایج عملی نزدیک شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دردو حالت عملکرد سلف کنترل شونده با تریستور یکی در محدود کنترل و دیگری خارج از محدوده کنترل، مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج واقعی مقایسه شده است. از نتایج به‌دست آمده مشخص شد تا زمانی که سلف کنترل شونده با تریستور در محدوده کنترل عمل کند، به نحو مطلوب مسائل کیفیت توان کوره قوس الکتریکی نظیر عدم تعادل ولتاژ و جریان و نوسانات ولتاژ را بهبود می‌بخشد. همچنین درصد اعوجاج هارمونیکی کل جریان منبع از ۳/۷ درصد به ۱/۳ و درصد اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ باس جبران‌کننده از ۲/۲ درصد به ۱/۱ کاهش یافته است. اما با افزایش تعداد کوره‌های قوس الکتریکی، توان راکتیو مصرفی این کوره‌ها افزایش می‌یابد، و در نتیجه جبران‌کننده دیگر قادر به جبران عدم تعادل ولتاژ و جریان و کاهش نوسانات ولتاژ نخواهد بود و تنها مقداری ثابت ضریب توان منبع را افزایش می‌دهد. بنابراین بارهای متصل به باس جبران‌کننده در این حالت دائماً در معرض این اعوجاجات قرار خواهند گرفت. البته در این حالت درصد اعوجاج هارمونیکی کل جریان منبع از ۳ درصد به ۰/۵ و درصد اعوجاج کل هارمونیکی ولتاژ باس جبران‌کننده از ۴/۲ درصد به ۱/۲ کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو، خازن‌های ثابت، سلف کنترل شونده با تریستور، کوره قوس الکتریکی

فصل اول
مقدمه

۱-۱ پیش‌زمینه، صورت مسئله تحقیق، انگیزه و اهداف

کیفیت توان الکتریکی سیستم‌های قدرت از جمله واژهایی است که از اواخر دهه ۱۹۸۰ بیشتر توسط متخصصان و مهندسان برق مورد استفاده قرار گرفته است. اغتشاشات[1] کیفیت توان الکتریکی سیستم قدرت، به هر مشکلی که موجب تغییر در ولتاژ، جریان یا فرکانس شده و بر عملکرد تجهیزات و مصرف کننده‌ها تأثیر گذارد، اطلاق می‌شود. با افزایش تجهیزات الکترونیک حساس به اغتشاشات شبکه، آگاهی مشترکین و حساسیت آن‌ها بر عملکرد تجهیزات خود، افزایش بارهای غیر خطی تولیدکننده اغتشاشات مختلف و گسترده شدن شبکه‌ها، اهمیت این مفهوم نزد شرکت‌های برق و مشترکین افزایش یافته است[۱].

مشخصه نامتعادل و غیرخطی بسیاری از بارهای متصل به سیستم قدرت، می‌تواند باعث ایجاد مشکلات کیفیت توان شود، که به نوبه‌ی خود روی سایر مصرف‌کننده‌ها تأثیر می‌گذارد. جریان‌های هارمونیکی ایجاد شده توسط بارهای غیرخطی با عبور از امپدانس شبکه، به صورت اعوجاج ولتاژ هارمونیکی به تجهیزات دیگر اعمال می‌شود. لذا تجهیزات مورد استفاده در شبکه‌های قدرت آلوده به هارمونیک‌ها، دائم در معرض این اعوجاج می‌باشند[۲].

کوره‌های قوس الکتریکی EAF[2] از جمله بارهایی هستند که باعث ایجاد مشکلات کیفیت توان بزرگی در شبکه الکتریکی می‌شوند. کوره‌های قوس الکتریکی برای ذوب و بازیابی فلزات، خصوصاً آهن در کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع کوره، قراضه‌ها را توسط گرمای ناشی از قوس الکتریکی ذوب

[1] Disturbance
[2] Electrical Arc Furnace

می‌کند، به علت ماهیت قوس الکتریکی و فرآیند ذوب، این دستگاه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی نظیر نامتعادلی ولتاژ و جریان، هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، نوسانات ولتاژ و ضریب توان پایین می‌شوند[۳]. به واسطه تأخیر جرقه زدن و مقاومت غیر خطی قوس، جریان کوره الکتریکی غیر منظم است. همچنین به علت اینکه قوس الکتریکی تحت تأثیر نیروهای الکترومغناطیسی، جریان‌های جابجایی، حرکت الکترودها، جابجایی مواد مذاب (که در اکثر موارد شامل آهن‌ها قراضه است) قرار دارد، جریان مسیر نامنظمی خواهد داشت و در نتیجه جریان‌ها نامتعادل بوده و دارای اعوجاج و تغییرات زیادی می‌باشد. تغییرات و اعوجاج جریان در طول چند دقیقه اول سیکل ذوب که الکترودهای گرافیت به سمت مواد رانده می‌شود، بسیار شدید است اما با افزایش مواد مذاب قوس الکتریکی کوتاهتر و پایدارتر می‌شود[۴].

اکثر سیستم‌های قدرت ac سه فاز بوده وبرای عملکرد متعادل طراحی می‌شوند. عملکرد نامتعادل کوره‌های قوس الکتریکی باعث ظاهر شدن مؤلفه های توالی منفی و صفر در جریان می‌گردد. مؤلفه‌های توالی منفی و صفر می‌تواند اثرات نامطلوبی روی بار از جمله تلفات اضافی در موتورها و ژنراتورها، گشتاور نوسانی در ماشین‌های AC، افزایش ریپل در یکسوکننده‌ها، اشباع ترانسفورماتورها، بیش از حد شدن جریان سیم خنثی و تلفات سیستم به دنبال داشته باشد[۴] و [۵]. اعوجاجات هارمونیکی به‌صورت جریان‌های هارمونیکی توسط بارهای غیرخطی به بقیه شبکه تزریق شده و با توجه به امپدانس شبکه، به صورت اعوجاجات ولتاژ هارمونیکی به تجهیزات دیگر اعمال می‌شود. لذا تجهیزات مورد استفاده در شبکه‌های قدرت آلوده به هارمونیک‌ها دائم در معرض این اعوجاجات می‌باشند. بنابراین هارمونیک‌های جریان باعث ایجاد تلفات اضافی سرگردان در ترانسفورماتورها گردیده و تلفات را در خطوط افزایش می‌دهند[۲]. همچنین هارمونیک‌ها در سیستم قدرت موجب مشکلات فنی و اقتصادی به علت افزایش تلفات، خطاهای سیگنال در سیستم‌های کنترل، خطا در وسایل اندازه‌گیری، اغتشاشات ولتاژ، افزایش افت ولتاژ، ایجاد رزونانس و نویز در دستگاه‌های مخابراتی می‌شود[۲] و [۶].

نوسانات ولتاژ عبارت است از تغییرات منظم پوش ولتاژ یا یک سری تغییرات ولتاژ تصادفی که دامنه آن‌ها معمولاً از ۰/۹ تا ۱/۱ پریونیت باشد. بارهایی که موجب تغییرات سریع و پیوسته دامنه جریان می‌شوند می‌توانند عامل تغییرات ولتاژ باشند که اغلب به عنوان فلیکر هم از آن‌ها نام برده می‌شود. مثالی از شکل موج که نشان‌گر فلیکر است توسط یک کوره قوس که عامل عمده در ایجاد این پدیده است، به‌دست می‌آید. سیگنال فلیکر به‌صورت مقدار مؤثر دامنه برحسب درصد مؤلفه اصلی بیان می‌شود. فلیکر ولتاژ در رابطه با حساسیت چشم انسان اندازه‌گیری می‌شود. معمولاً دامنه‌هایی به اندازه ۰/۵ درصد در رنج فرکانسی ۳ تا ۱۰ هرتز موجب بروز فلیکر آزار دهنده در لامپ‌ها می‌گردد[۱] و [۷].

به منظور استفاده مؤثر از توان الکتریکی در کوره‌های قوس الکتریکی کارخانه های فولاد سازی، لازم است مجموعه‌ای از مسائل به‌خصوص مسأله تثبیت ولتاژ، اصلاح ضریب توان و فیلتر کردن هارمونیک‌ها حل گردد.

تثبیت کردن ولتاژ عملکرد کوره قوس الکتریکی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد. این بهبود یا با افزایش حداکثر توان و در نتیجه افزایش میزان تولید فولاد صورت می‌گیرد. در حالی که تثبیت ولتاژ همواره مطلوب کارخانه فولاد است، برای مؤسسه‌ی تولید کننده برق نیز به عنوان بهبودی برای اغتشاشات ولتاژ که از تغییرات وسیع و سریع کوره ناشی می‌شود، محسوب می‌گردد. چه در غیر این صورت این اغتشاشات برای مصرف کننده‌های مجاور آزار دهنده خواهد بود[۴]. جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو SVC[1] راه حل مناسب برای کاهش مسائل کیفیت توان ناشی از کوره قوس الکتریکی می‌باشد. SVC مانند یک امپدانس متغیر موازی با بار عمل می‌کند که با تولید یا جذب توان راکتیو، دامنه ولتاژ را در باس PCC[2] سیستم تنظیم می‌کند.

به طور کلی یک SVC برای دو کاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد: جبران بار و پشتیبانی ولتاژ[۸]، [۹] و [۱۰]. در پشتیبانی ولتاژ، SVC برای تثبیت ولتاژ سیستم و افزایش پایداری سیستم قدرت و در جبران بار، SVC عمدتاً برای متعادل کردن فازها، کاهش نوسانات ولتاژ و تصحیح ضریب توان مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱۱].

مجتمع فولاد مبارکه اصفهان به عنوان بزرگترین مصرف‌کننده صنعت برق کشور، شبکه الکتریکی گسترده‌ای دارد. شبکه برق این مجتمع دارای دو بخش اساسی می‌باشد که یک بخش به تغذیه کوره‌های قوس الکتریکی و بخش دیگر به تغذیه سایر بارها مثل نورد گرم و سرد اختصاص دارد. با توجه به اینکه ابعاد و ظرفیت کوره‌های قوس این مجتمع بسیار زیاد است، در این مجتمع از جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو به عنوان جبران‌کننده جهت بهبود شاخص‌های مختلف کیفیت توان الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته است. این مجتمع دارای ۶ کوره قوس الکتریکی با توان ۸۸ مگا وات با ضریب توان ۰/۷۲ و ۲ کوره قوس با ظرفیت ۶۵ مگا وات از نوع Scrap با ضریب توان ۰/۸۸ می‌باشد. کوره‌های Scrap برای ذوب قراضه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین دارای ۴ کوره قوس از نوع Ladle نیز می‌باشد که جهت حفظ دمای مذاب تهیه شده از کوره‌های Scrap، برای اضافه کردن برخی مواد خاص به کار گرفته می‌شود. در این مجتمع برای بهبود مسائل کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی از جبران کننده استاتیک توان راکتیو SVC با ساختار FC-TCR[3] با ظرفیت TCR ۲۲۰ مگاوار و بانک خازنی ۲۰۰ مگاوار که بر روی باس ۶۳ kV متصل گردیده است، استفاده می‌شود.با توجه به اینکه ظرفیت کوره‌های قوس متصل به این باس به بیش از ظرفیت جبران‌کننده نیز می‌رسد، بررسی پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره‌های قوس با وجود استفاده از جبران‌کننده امری ضروری است. صورت مساله تحقیق در این پایان‌نامه مدل‌سازی خط ۶۳ کیلو ولت مجتمع فولاد مبارکه و بارهای متصل به این خط به منظور بررسی عملکرد جبران‌کننده استاتیک توان راکتیودر بهبود مسائل کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی می‌باشد. هدف کلی این پایان‌نامه، مطالعه عملکرد جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو در بهبود پدیده‌های کیفیت توان دردو حالتِ عملکرد TCR یکی در محدود کنترل و دیگری خارج از

[1] Static Var Compensator
[2] Point of Common Coupling
[3] Thyristor Controlled Reactor-Fixed Capacitor

محدوده کنترل می‌باشد. اهداف مشخص این پایان‌نامه عبارتند از:

۱. بررسی مدل‌های مختلف کوره قوس الکتریکی به منظور انتخاب مناسب‌ترین مدل جهت شبیه‌سازی کوره‌های قوس الکتریکی مجتمع فولاد مبارکه.
۲. بررسی ساختار و عملکرد جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو مجتمع فولاد وشبیه‌سازی آن.
۳. استخراج بلوک دیاگرام کنترلی جبران‌کننده و به‌دست آوردن ضرایب کنترل کننده PI.
۴. شبیه‌سازی خط ۶۳ kV مجتمع فولاد و ارزیابی عملکرد جبران‌کننده با استفاده از نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج عملی.

۱-۲ مرور پژوهش‌های پیشین

در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در زمینه جبران بار و پشتیبانی ولتاژ با استفاده از جبران‌کننده‌های استاتیک توان راکتیو در سیستم قدرت صورت پذیرفته است. به عنوان نمونه مکانیزم عملکرد TCR و اینورتر منبع ولتاژ در کاهش فلیکر ناشی از کورهای قوس در [۱۲] مقایسه شده است. در این مرجع به علت پهنای باند بسیار بیشتر اینورتر منبع ولتاژ از TCR، این جبران‌کننده در جبران فلیکر عملکرد بهتری نسبت به TCR داشته است.

در مرجع [۳] عملکرد جبران‌کننده TCR جهت بهبود پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی بررسی شده است و عنوان شده که بهبود پدیده‌های کیفیت توان کوره قوس باعث افزایش تولید به علت افزایش توان انتقالی به سمت بار ، کاهش مصرف الکترود به علت کاهش زمان ذوب و ذخیره انرژی به علت پایدار شدن قوس می‌شود.

در [۱۳] روش کنترل حلقه باز و حلقه بسته TCR به منظور جبران توان راکتیو و متعادل کردن بار پیشنهاد شده است. در این روش چون کنترل کننده حلقه باز مستقیماً توان راکتیو مورد نیاز را محاسبه می‌کند، پاسخ سریعی در جبران نوسانات توان راکتیو دارد. همچنین خطای حالت ماندگار با استفاده از کنترل حلقه بسته حذف شده است. بنابراین تغییرات توان راکتیو منبع با استفاده از این کنترل کننده به حداقل می‌رسد.

طراحی یک جبران‌کننده با ساختار FC-TCR جهت بهبود پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره‌های قوس در [۱۴] صورت پذیرفته است و نشان داده شده است که این جبران‌کننده در ناحیه کنترل TCR به نحوه مطلوب پدیده‌های کیفیت توان را بهبود می‌بخشد. همچنین آنالیز هارمونیکی مشخص نموده است که استفاده از فیلتر در سیستم قدرت شامل کوره قوس باعث کاهش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان تزریقی به شبکه می‌شود. در [۱۵] یک جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو برای متعادل کردن سیستم توزیع معرفی شده است. ساختارهای مختلف TCR-FC برای بهبود ضریب توان در [۱۶] معرفی شده است. نتایج عملی در این مطالعه نشان می‌دهد که هر دو ساختار TCR (ستاره و مثلث) ضریب توان را به مقدار واحد تصحیح می‌کنند. اما ساختار TCR-FC با اتصال مثلث TCR، عملکرد بهتری در تولید توان راکتیو بانک خازنی، به علت اغتشاش هارمونیکی کمتر نسبت به اتصال ستاره دارد. در [۱۷]

یک جبران‌کننده توان راکتیو از نوع FC/TCR طراحی شده و عملکرد آن در بهبود ضریب توان و محدود کردن هارمونیک‌های تزریقی ناشی از یکسو کننده به شبکه بررسی شده است. ساختار و عملکرد جبران کننده استاتیک توان راکتیو ایستگاه Oncor Electric Delivery Renner در [۱۸] تشریح شده است. این جبران کننده جهت بهبود پروفایل ولتاژ و افزایش پایداری سیستم قدرت به خط ۱۳۸ kV ایستگاه Renner متصل شده است.

۳-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم مدل‌های مختلف کوره قوس الکتریکی مورد مطاله قرار می‌گیرد. سپس با استفاده از منحنی مشخصه V-I یک کوره قوس واقعی، مدل مناسب جهت مطالعه مسائل کیفیت توان کوره‌های قوس الکتریکی انتخاب و شبیه‌سازی خواهد شد. در این مدل نامتعادلی ولتاژ و جریان، هامونیک‌ها و فلیکر ولتاژ تصادفی در نظر گرفته می‌شود.

در فصل سوم نحوه عملکرد جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو و ساختارهای مختلف آن بررسی می‌شود. سپس ساختار جبران‌کننده استاتیک توان راکتیو مجتمع فولاد مبارکه از کاتالوگ دستگاه استخراج و شبیه‌سازی می‌شود. همچنین ضرایب کنترل کننده PI برای دستیابی به زمان پاسخ سریع برای جبران فلیکر و خطای حالت دائم صفر برای جبران دقیق توان راکتیو با روش سعی و خطابه دست خواهد آمد.

در فصل چهارم با شبیه‌سازی خط ۶۳ kV A (EAF Bus) مجتمع فولاد مبارکه، بهبود پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره‌های قوس مورد مطالعه قرار می‌گیرد،سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی دردو حالت عملکرد TCR یکی در محدود کنترل و دیگری خارج از محدوده کنترل ارائه و با نتایج واقعی مقایسه می‌شود و میزان تأثیر SVC جهت بهبود پدیده‌های کیفیت توان و تصحیح ضریب توان ارائه خواهد شد.

سر انجام در فصل پنجم، جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای ادامه این تحقیق ارائه می‌شود.

فصل دوم
کوره‌های قوس الکتریکی

همانطور که در فصل مقدمه بیان شد کوره قوس الکتریکی باعث ایجاد مشکلاتی نظیر نامتعادلی ولتاژ و جریان، تولید هارمونیک‌ها، نوسانات ولتاژ و ضریب توان پایین می‌شود، که این مشکلات باعث اثرات نامطلوبی روی سیستم قدرت و تجهیزات متصل به آن می‌شود. در این فصل ابتدا مدل‌های مختلف کوره قوس در حوزه زمان بررسی می‌شوند، سپس با توجه به منحنی مشخصه V-I واقعی یک کوره قوس الکتریکی در مجتمع فولاد مبارکه، مدل مناسبی برای بیان رفتار کوره‌های قوس الکتریکی انتخاب خواهیم نمود. سپس در این مدل، نامتعادلی ولتاژ و جریان، تولید هارمونیک‌ها، نوسانات ولتاژ و ضریب توان این بار غیر خطی مورد مطالعه قرار خواهد گرفت و شبیه‌سازی می‌شود.

۲-۱ کوره قوس الکتریکی

کوره‌های قوس الکتریکی برای ذوب و بازیابی فلزات، خصوصا آهن در کارخانه‌های فولادسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع کوره، قراضه‌ها را توسط گرمای ناشی از قوس الکتریکی ذوب می‌کند، به علت ماهیت قوس الکتریکی و فرآیند ذوب، این دستگاه‌ها باعث ایجاد مشکلاتی نظیر نامتعادلی ولتاژ و جریان، هارمونیک‌های ولتاژ و جریان، نوسانات ولتاژ و ضریب توان پایین می‌شوند. به واسطه تأخیر جرقه زدن و مقاومت غیر خطی قوس، جریان کوره الکتریکی غیر منظم است. همچنین به دلیل اینکه قوس الکتریکی تحت تأثیر نیروهای الکترومغناطیسی، جریان‌های جابجایی، حرکت الکترودها، جابجایی مواد مذاب (که در اکثر موارد شامل آهن‌های قراضه است) قرار هستند. تغییرات و اعوجاج جریان در طول چند دقیقه اول سیکل ذوب که الکترودهای گرافیت به سمت مواد رانده

می‌شود، بسیار شدید است اما با افزایش مواد مذاب، قوس الکتریکی کوتاه‌تر و پایدارتر می‌شود.

به منظور مطالعه در این زمینه و بهبود پدیده‌های کیفیت توان ناشی از کوره‌های قوس الکتریکی، باید طراحی دقیق و کامل سیستم قدرت با کوره‌های قوس الکتریکی انجام گیرد. بنابراین انتخاب مدل مناسب برای کوره‌های قوس الکتریکی ضروری است[۱۴].

۲-۲ دسته‌بندی کلی کوره‌های قوس الکتریکی

به طور کلی کوره‌های قوس الکتریکی به دو دسته تقسیم بندی می‌شوند.

الف) کوره‌های قوس الکتریکی غیر مستقیم یا مستقل: مواد فلزی به وسیله جریا ن متناوب که از یک الکترود به الکترود دیگر از بالای فلز عبور می‌کند، گرم می‌شوند. انتقال گرما در این حالت از طریق تشعشعی است. کوره ممکن است ثابت، نوسانی و یا چر خشی باشد. این کوره‌ها به صورت تکفاز، دو فاز و سه فاز ساخته می‌شوند.

ب) کوره‌های قوس مستقیم: جریان از طریق قوس ایجاد شده بین الکترود و مواد فلزی عبور می‌نماید. این جریان ممکن است، به صورت مستقیم و یا متناوب به صورت‌های تکفاز، دو فاز و یا سه فاز باشد. اغلب نوع سه‌فاز آن برای تولید فولاد به‌کار می‌رود. البته نوع تکفاز نیز وجود دارد که در این نوع جریان از طریق یک قوس از الکترود به فلز و از فلز به الکترود یا الکترودهای دیگر عبور می‌نماید.

کوره‌های قوس الکتریکی که برای تولید فولاد به کار می‌روند، از نظر الکتریکی به دو دسته تقسیم می‌شوند. یکی کوره‌های جریان متناوب AC و دیگری کوره‌های جریان مستقیم DC. در سال‌های اخیر استفاده از کوره‌های قوس الکتریکی DC به دلیل پیشرفت المان‌های الکترونیک قدرت با توان بالا، زیاد شده است.

مهمترین تفاوت‌های کوره‌های قوس الکتریکی نوع DC و AC عبارتند از:

۱- مصرف انرژی الکتریکی در کوره‌های DC کمتر از مصرف انرژی در کوره‌های AC است. به دلیل وجود تنها یک الکترود در وسط کوره‌ی DC تلفات انرژی الکتریکی در مقایسه با کوره‌های AC که سه الکترود دارد، در حدود ۵ تا ۷ درصد کمتر است.

۲- مصرف الکترود در کوره‌های DC به دو دلیل تعداد الکترود کمتر و اکسیداسیون جانبی کمتر حول الکترود کوره DC کمتر است. مصرف الکترود در کوره AC حدود ۱/۶ تا ۲ کیلو گرم بر تن فولاد است. در حالی که کوره‌های DC حدود ۱ تا ۱/۳ کیلو گرم بر تن فولاد می باشد.

۳- پدیده فلیکر در کوره‌های DC بسیار کمتر است. چون از طریق یکسوکننده‌های AC/DC تغذیه می‌شوند که

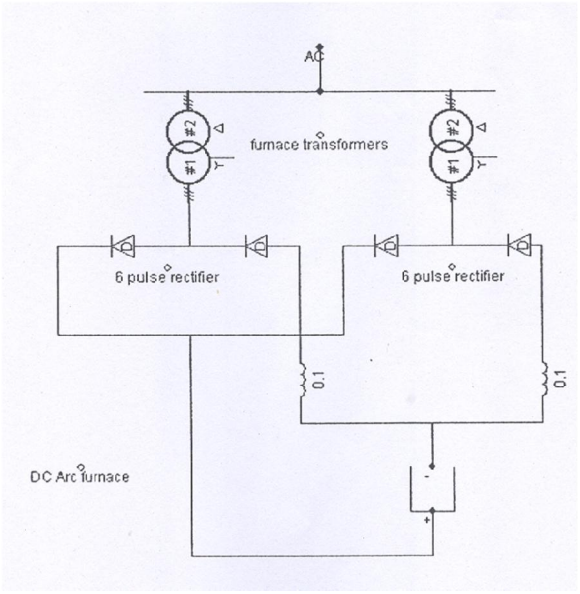
هارمونیک‌های آن مشخص و ثابت هستند. از طرفی تنظیم جریان در این کوره‌ها دقیق‌تر و سریع‌تر انجام می‌شود.

۴- هزینه نصب مجموعه کوره‌ی DC معمولاً بسیار بالاتر است و این به دلیل نیاز به یکسوکننده کنترل شده با توان بسیار بالا در این کوره‌هاست. همچنین هزینه‌ی نسوز کف کوره‌های DC در مقایسه با کوره‌های AC بسیار بالاتر است. چون در این کوره‌ها از کف کوره‌ها به عنوان آند استفاده می‌شود. ولی مصرف نسوز در بدنه‌ی کوره‌های DC حدود ۲/۳ برابر کوره‌های AC است.

۵- امکان به‌وجود آمدن حالت‌های نامتقارن در کوره‌های DC بسیار بیشتر است، چرا که با از دست رفتن یکی از بازوهای یکسوکننده (که معمولاً سه‌فاز است) جریان فازها در طرف AC به شدت نامتقارن خواهد بود.

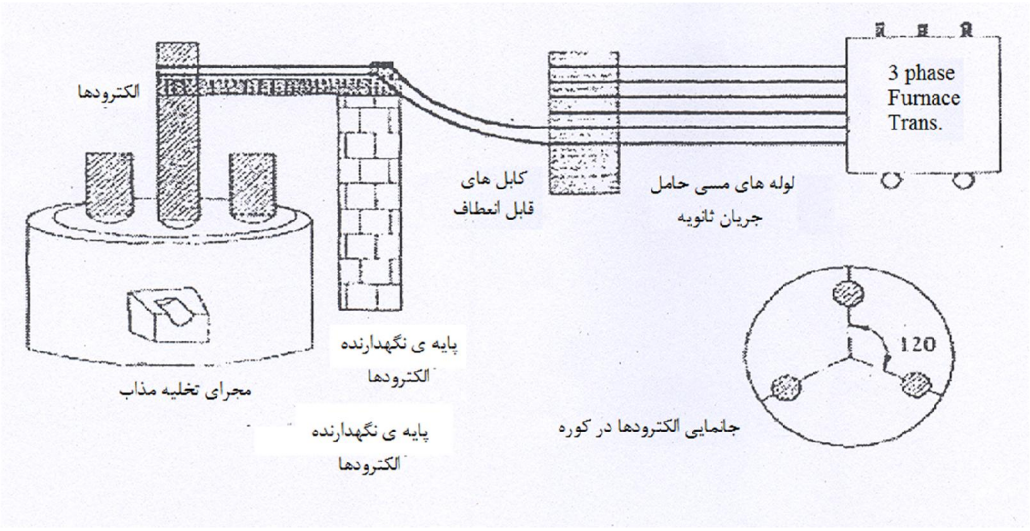
۶- به دلیل ثابت بودن مرتبه‌ی هارمونیک‌ها در کوره‌های DC، به جبران‌کننده توان راکتیو استاتیک در این گونه کوره‌ها نیاز نیست در صورتی که در کوره AC به این نوع جبران‌کننده‌ها نیاز داریم و هزینه ی بالایی به خود اختصاص می‌دهد.

شکل ۲-۱ شمای کلی یک کوره DC را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است ولتاژ سه فاز AC به ترانس‌های کوره با اتصالات مختلف داده می‌شود و خروجی هر یک از این ترانس‌ها به یک یکسوکننده شش پالسه برده می شود. این کار باعث افزایش ظاهری تعداد پالس‌های یکسوکننده شده (این آرایش مانند یک یکسوکننده ۱۲ پالسه رفتار می‌کند.) که به نوبه‌ی خود باعث حذف هارمونیک‌های قبل از یازدهم می‌شود و در نتیجه اعوجاج هارمونیکی کاهش می‌یابد. سلف‌های موجود در سر راه یکسوکننده و کوره برای کاهش هارمونیک‌های جریان به‌کار برده می‌شوند.



شکل ۲-۱- نمای کلی یک کوره قوس DC [۱۹]

شکل ۲-۲ نمای یک کوره قوس AC سه فاز را نشان می‌دهد. ولتاژ اولیه بسته به توان کوره بین ۲۰ تا ۱۳۲ کیلو ولت است، ولی در ثانویه ترانس کوره با توجه به تپ‌چنجر ولتاژ که در اولیه نصب می‌شود، ولتاژ از حدود ۳۵۰ ولت تا حدود ۷۰۰ ولت متغیر است.



شکل ۲-۲- نمای کلی یک کوره قوس الکتریکی سه فاز[۱۹]

در ثانویه ترانس به دلیل وجود جریان بسار بالا (حدود چند ده کیلو آمپر) از باس بارهای مسی که معمولاً آب درون آن‌ها جریان دارد، استفاده می‌شود. به دلیل لغزش دائمی الکترودها و اینکه امکان برداشتن سقف کوره فراهم