

ارتقای کیفیت توان و بهبود فرآیند کنترل کوره قوس الکتریکی با استفاده از UPQC

حمیدرضا تودجی^۱

۱- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه یزد- یزد- ایران

toodeji@yazd.ac.ir

چکیده: کوره‌های قوس الکتریکی مصرف‌کنندگانی بزرگ، غیرخطی و متغیر با زمان بوده و با ایجاد مشکلاتی نظیر هارمونیک، فلیکر، نامتعادلی و ضریب قدرت پایین، کیفیت توان شبکه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این مقاله، برای بهبود کیفیت توان و افزایش کارایی سیستم کنترل کوره قوس الکتریکی از یکپارچه‌ساز جامع کیفیت توان (UPQC) استفاده شده است. کاهش هارمونیک‌های تزریقی به شبکه، بهبود ضریب قدرت و متعادل‌سازی جریان، برخی از مزایای استفاده از این جبرانساز می‌باشد. جبرانساز پیشنهادی، تنظیم جریان هر فاز کوره قوس در مقدار بهینه را با سرعت و دقت بالاتری نسبت به سیستم کنترل مکانیکی مرسوم الکترونها انجام داده و عملکرد این سیستم مکانیکی را محدود به شرایط اتصال کوتاه ادامه‌دار و نیز روشن‌کردن قوس خاموش‌شده می‌کند. به علاوه، محدودکردن سریع جریان اتصال کوتاه کوره قوس و نیز کنترل پیوسته ولتاژ قوس توسط سیستم پیشنهادی، امکان جایگزینی ترانسفورمرهای گرانقیمت کوره قوس با ترانسفورمرهای ارزان‌تر را فراهم می‌آورد. همچنین به دلیل اتصال مبدل‌های سری و موازی جبرانساز پیشنهادی از طریق ترانسفورمرهای کاهنده به سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس، می‌توان از کلیدهای نیمه‌هادی موجود استفاده نمود. در این مقاله، مزایای سیستم پیشنهادی توسط نتایج شبیه‌سازی یک سیستم نمونه تحت شرایط مختلف در نرم‌افزار MATLAB تأیید می‌گردد.

کلمات کلیدی: کوره قوس الکتریکی، سیستم مکانیکی کنترل الکترو، کیفیت توان، یکپارچه‌ساز جامع کیفیت توان (UPQC)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۱۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا تودجی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - یزد - صفاییه - بلوار دانشگاه - دانشگاه یزد - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

آمارهای جهانی نشان می‌دهد که تولید فولاد خام در سال ۲۰۱۳ بالغ بر ۱۶۰۶ میلیون تن [۱] و سهم کوره‌های قوس الکتریکی از این مقدار تولید، ۲۷/۴٪ بوده است [۲]. بنابراین هرگونه تحقیقاتی که منجر به افزایش کارایی کوره‌های قوس الکتریکی شود بسیار ارزشمند و دارای اهمیت اقتصادی زیادی است. لازم به ذکر است که کوره‌های قوس الکتریکی نسبت به کوره‌های اکسیژن، انعطاف بیشتری در کنترل دما نشان داده و فاقد تأثیر بر ترکیب شیمیایی محصول نهایی می‌باشند [۳].

در کنار این مزایا، کوره‌های قوس الکتریکی، مصرف‌کنندگانی بزرگ و غیرخطی برای سیستم قدرت محسوب شده و از این رو تحقیقات زیادی برای بهبود رفتار آن‌ها از دیدگاه الکتریکی صورت گرفته است [۴]. با وجودی که برای تغذیه کوره‌های قوس الکتریکی می‌توان از هر دو نوع ولتاژ AC و DC استفاده نمود ولی ولتاژ AC به دلیل ارزان‌تر بودن تجهیزات الکتریکی مورد نیاز، کاربرد بیشتری دارد. البته نمی‌توان هارمونیک‌های تولیدی کمتر در مبدل‌های چند پالسه و نیز مصرف کمتر الکترونها در کوره‌های قوس الکتریکی DC را نادیده گرفت [۵].

قوس‌هایی که به وسیله سه الکتروود گرافیتی در کوره‌های قوس الکتریکی AC ایجاد می‌شوند نقش منبع حرارتی کوره قوس برای ذوب قراضه‌های آهنی را بازی می‌کنند. فاصله متغیر و نابرابر بین الکتروودهای گرافیتی و مواد مذاب منجر به تغییرات گسترده‌ای در جریان هر الکتروود از صفر تا جریان‌های بسیار بزرگ می‌شود. از طرف دیگر، توان حرارتی حداکثر، در جریان مشخصی به مواد مذاب منتقل می‌شود [۳]. بنابراین یک سیستم کنترل مکانیکی از طریق یک سیستم هیدرولیکی و یا موتور DC با حرکت دادن عمودی الکتروودها سعی می‌کند جریان الکتروودها را در مقدار بهینه تنظیم کند [۶].

وزن الکتروودهای گرافیتی به همراه بازوهای نگهدارنده و نیز شکنندگی الکتروودها، سرعت پاسخ سیستم کنترل مکانیکی الکتروودها را محدود می‌کند. به علاوه، خطر بروز نوسان ناشی از پاسخ سریع سیستم کنترل نیز محدودکننده سرعت سیستم کنترل مکانیکی می‌باشد. این محدودیت‌ها به معنای آن است که جریان‌های اتصال کوتاهی که در اثر برخورد اتفاقی الکتروودها به مواد مذاب به وجود می‌آیند را نمی‌توان به سرعت با جابه‌جایی الکتروودها توسط سیستم مکانیکی قطع نمود. بنابراین ترانسفورمر کوره قوس باید به گونه‌ای طراحی شود تا بتواند در برابر این جریان‌های زیاد و ادامه‌دار که به صورت مداوم اتفاق می‌افتند ایستادگی کند.

کنترل طول قوس در هر مرحله از ذوب نیز یکی دیگر از مسائلی مورد توجه می‌باشد؛ قوس‌های بلند برای مرحله ذوب و

قوس‌های کوتاه برای مرحله پالایش مناسب هستند. با تنظیم ولتاژ می‌توان به طول قوس دلخواه دست یافت که به این منظور، ترانسفورمر کوره قوس به تغییردهنده تپ زیر بار با پله‌های زیاد مجهز شده است. بدیهی است که حتی با پله‌های زیاد نیز نمی‌توان ولتاژ را به صورت پیوسته تغییر داد. همچنین به دلیل عدم قطع جریان زیاد کوره قوس در حین تغییر تپ، خوردگی زیادی در اثر قوس در تغییردهنده تپ رخ می‌دهد.

مساله دیگر، مصرف توان اکتیو زیاد در ولتاژ کمتر از یک کیلوولت می‌باشد که منجر به جاری شدن جریان چند ده کیلوآمپری شده و به همین دلیل از کابل‌های خنک‌شونده با آب در ثانویه ترانسفورمر کوره قوس استفاده می‌شود. اندوکتانس بزرگ این کابل، نزدیک به ۷۵٪ اندوکتانس سمت ثانویه را تشکیل داده و بنابراین هرگونه اختلاف در مشخصات و طول کابل فازها - که عملاً اجتناب‌ناپذیر است - منجر به نامتعادلی بزرگی می‌شود. وجود این اندوکتانس بزرگ در کنار ماهیت قوس باعث می‌شود که کوره قوس در ضریب توان پایینی کار کند. به علاوه، جذب جریان‌های بزرگ، ناپیوسته و نامتعادل از شبکه منجر به بروز فلیکر نیز می‌شود به گونه‌ای که کوره‌های قوس الکتریکی به عنوان یکی از منابع تولید فلیکر در شبکه شناخته می‌شوند.

هارمونیک‌های تولیدی کوره قوس که با ماهیت متغیر خود، طراحی فیلتر غیرفعال را مشکل می‌کنند، یکی دیگر از مشکلات کوره‌های قوس الکتریکی به شمار می‌آیند. به علاوه، وجود هارمونیک‌های زوج در جریان کوره قوس به دلیل اثرات نامطلوبی که بر برخی تجهیزات سیستم قدرت دارند باید مورد توجه قرار گیرد. برای حل این مشکلات کیفیت توان، مطالعات زیادی انجام گرفته و برخی جبران‌سازها نظیر بانک‌های خازنی متغیر در کنار کوره قوس قرار داده شده‌اند. البته سرعت تغییر پله‌های خازنی کند بوده و تغییر مقدار خازن نیز به صورت ناپیوسته انجام می‌شود. به علاوه، خطر تشدید با اندوکتانس شبکه نیز وجود دارد. همچنین برای کاهش هارمونیک‌ها و اصلاح ضریب توان می‌توان از فیلتر هارمونیکی که شامل یک اندوکتانس سلفی کوچک سری با بانک خازنی است استفاده نمود. در [۷] روشی برای طراحی فیلتر غیر فعال برای کوره‌های قوس الکتریکی معرفی شده است.

در مقابل، می‌توان جبران‌سازهای مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت را به عنوان راه‌حلی کارآمد برای مسائلی کیفیت توان مورد توجه قرار داد. جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) از ابتدایی‌ترین انواع این جبران‌سازها می‌باشد که به صورت گسترده‌ای در کنار کوره‌های قوس استفاده شده است. در مراجع [۹، ۸] SVC برای اصلاح ضریب قدرت و نیز کاهش فلیکر به کار رفته‌اند. البته برای حذف هارمونیک‌های تولیدی SVC نیاز به فیلتر هارمونیکی وجود دارد [۱۰]. به علاوه، تریتستورهای مورد استفاده در SVC دارای یک تأخیر ذاتی می‌باشند که [۱۱] استفاده از روش کنترل پیش‌بین برای کاهش تأثیر این تأخیر را پیشنهاد کرده است.

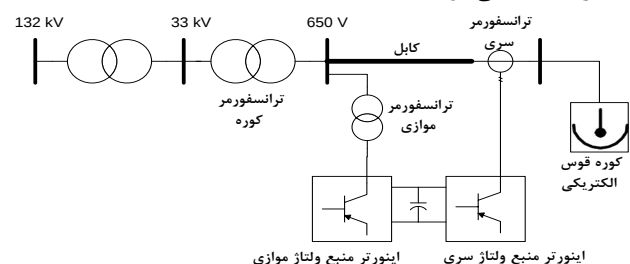
جبران‌ساز STATCOM^۳ متعلق به نسل بعدی جبران‌سازهای مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت بوده و پاسخ سریع این جبران‌ساز در کنار سایر ویژگی‌ها، آن را مناسب برای سازگاری با ماهیت متغیر کوره‌های قوس می‌کند. مراجع [۱۲، ۱۳] قابلیت‌های STATCOM برای کاهش فلیکر را مورد بحث قرار داده و مقایسه بین SVC و STATCOM برای کاربرد در کوره قوس الکتریکی در [۱۴، ۱۵] انجام شده است. جبران‌ساز UPQC که اولین بار در سال ۱۹۹۸ معرفی شد [۱۶] از جمله جبران‌سازهای پیشرفته‌ای است که تقریباً اغلب قابلیت‌های جبران‌سازهای مرسوم را دارا می‌باشد. در مطالعات محدودی از UPQC برای حل مشکلاتی نظیر فلیکر، نامتعادلی و ضریب قدرت پایین استفاده شده است [۱۰] ولی مزایای UPQC برای کوره قوس الکتریکی فقط به این موارد محدود نمی‌شود.

در مقاله حاضر، ابتدا مدلی ساده و موثر از کوره قوس به همراه ساختار جبران‌ساز UPQC پیشنهادی معرفی می‌شود. در قسمت بعد، ساختار جدیدی برای کنترل‌کننده‌های بخش‌های سری و موازی جبران‌ساز با هدف بهبود کارایی سیستم کنترل کوره قوس الکتریکی ارائه می‌گردد. در انتها نیز قابلیت‌های جبران‌ساز پیشنهادی در ارتقای سیستم کنترل کوره قوس و نیز بهبود کیفیت توان آن توسط نتایج شبیه‌سازی یک سیستم نمونه تحت شرایط مختلف در نرم‌افزار MATLAB نشان داده می‌شود.

۲- ساختار سیستم پیشنهادی

در سیستم مورد مطالعه شکل (۱)، جبران‌ساز UPQC پیشنهادی در کنار کوره قوس الکتریکی قرار گرفته و کوره قوس از طریق کابل خنک‌شونده با آب و دو ترانسفورمر کاهنده از شبکه تغذیه می‌شود. تجهیزات جانبی کوره قوس مانند بازوها، نگهدارنده‌های الکترودها و خود الکترودها با مقاومت و اندوکتانس مدل شده‌اند ولی مدل قوس باید مستقلاً مورد توجه قرار گیرد.

با وجودی که مدل‌های مختلفی برای قوس معرفی شده‌اند ولی هیچ‌کدام نتوانسته‌اند تمام جنبه‌های رفتاری آن را مدل کنند. برای مدل‌سازی قوس با ماهیت غیرخطی و متغیر با زمان، دو رویکرد عمده یکی در حوزه زمان و دیگری در حوزه فرکانس وجود دارد [۱۷، ۱۸]. چون هدف مقاله حاضر، مدل‌سازی قوس نیست بنابراین از یک اندوکتانس کوچک سری با مقاومت متغیر با دقت معقولی در مطالعه حاضر استفاده می‌شود.



شکل (۱): نمودار تک‌خطی سیستم مورد مطالعه

جبران‌ساز UPQC شکل (۱) از دو اینورتر منبع ولتاژ تشکیل شده که به صورت پشت به پشت قرار گرفته و از طریق دو عدد ترانسفورمر سری و موازی به سیستم متصل می‌شود. ساختارهای مختلفی از اینورترها شامل دو سطحی تا چندسطحی [۱۹] و حتی اینورتر منبع جریان [۲۰] با الگوریتم‌های کلیدزنی متنوع برای جبران‌ساز UPQC پیشنهاد شده است. در مطالعه حاضر از ساختار مرسوم سه سطحی با الگوریتم کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM)^{*} استفاده می‌شود. چون اینورترها تولیدکننده هارمونیک در خروجی خود هستند بنابراین نیاز به یک فیلتر پایین‌گذر در خروجی اینورتر برای کاهش این هارمونیک‌ها وجود دارد. برای این منظور معمولاً فیلترهای مرتبه اول و دوم که به ترتیب از مدارهای $R-L$ و $L-C$ به دست می‌آیند در خروجی اینورترهای سری و موازی جبران‌ساز نصب می‌شوند.

به دلیل وجود سطوح مختلف جریان و ولتاژ در سیستم تغذیه کوره قوس، نصب جبران‌ساز UPQC در محل مناسب، اهمیت زیادی دارد. چون تزریق ولتاژ توسط بخش سری جبران‌ساز صورت می‌گیرد بنابراین سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس محل مناسبی به نظر می‌رسد. بخش موازی نیز چون تزریق جریان را انجام می‌دهد بنابراین سمت فشار قوی ترانسفورمر کوره قوس که دارای ولتاژ بالا و جریان کمتری است، می‌تواند مکان مناسبی برای اتصال آن محسوب می‌شود. ولی باید در نظر داشت که اتصال بخش سری به سمت فشار ضعیف به همراه استفاده از ترانسفورمر افزایشده سری، باعث می‌شود جریان کلیدهای نیمه‌هادی اینورتر سری به چند ده کیلو آمپر افزایش یابد. از طرف دیگر، چون حفاظت از ترانسفورمر کوره قوس در مقابل جریان‌های بسیار بزرگ یکی از وظایف بخش موازی جبران‌ساز پیشنهادی است بنابراین این بخش از جبران‌ساز نیز باید به سمت فشار ضعیف ترانسفورمر اصلی متصل شود. ولی جریان بسیار زیاد سمت فشار ضعیف به همراه استفاده از ترانسفورمر افزایشده برای اتصال بخش موازی باعث می‌شود که جریان کلیدهای نیمه‌هادی اینورتر موازی نیز به چند ده کیلو آمپر برسد.

چون امروزه کلیدهایی مانند IGBT با مقادیر نامی ۱/۷ کیلو آمپر و ۲/۵ کیلو ولت [۲۱] موجود بوده و جبران‌ساز نیز به سیستمی با ولتاژ کمتر از یک کیلوولت متصل می‌شود بنابراین با استفاده از ترانسفورمرهای کاهنده برای اتصال جبران‌ساز به سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس، می‌توان جریان کلیدهای اینورتر را به مقادیر نامی کلیدها و با مازول‌های الکترونیک قدرت موجود محدود کرد.

۳- کنترل جبران‌ساز UPQC

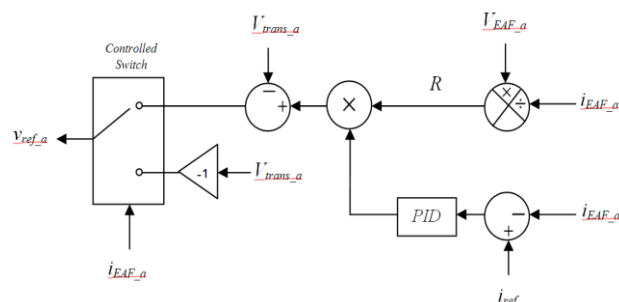
در این بخش، ابتدا در مورد کنترل بخش سری و سپس کنترل بخش موازی جبران‌ساز پیشنهادی صحبت می‌شود.

۳-۱- کنترل بخش سری جبران ساز پیشنهادی

همانگونه که اشاره شد، به دلیل انتقال توان حرارتی حداکثر در یک جریان بهینه معین، معمولاً یک مکانیزم مکانیکی با جابه جایی عمودی الکترونها به کمک سیستم هیدرولیکی و یا موتور DC سعی در تنظیم جریان کوره قوس در این مقدار بهینه می نماید. نشان داده خواهد شد که جبران ساز پیشنهادی می تواند تنظیم جریان را بسیار سریع تر و اقتصادی تر انجام دهد که در نتیجه، به انتقال توان حرارتی حداکثر به کوره قوس و افزایش تولید محصول [۳] منجر می شود.

بخش سری جبران ساز، تزریق ولتاژ را انجام می دهد بنابراین کنترل جریان کوره قوس می تواند با کنترل ولتاژ صورت بگیرد. برای محاسبه مرجع ولتاژ بخش سری (V_{ref_a}) که باعث ثابت ماندن جریان کوره قوس در شرایط مختلف می شود، اختلاف بین جریان مرجع (i_{ref}) و جریان اندازه گیری شده الکترونها (i_{EAF_a}) در مقاومت لحظه ای قوس (R) ضرب می گردد. چون ماهیت قوس بیشتر مقاومتی است بنابراین مقاومت لحظه ای آن را می توان به سادگی با تقسیم ولتاژ بر جریان قوس به دست آورد. همچنین به دلیل اندازه گیری ولتاژ در محل بازوی نگهدارنده الکترونها (V_{EAF_a})، مقاومت لحظه ای محاسبه شده شامل مقاومت بازوها نیز می شود. ذکر این نکته لازم است که در برخی از انواع کوره های قوس الکتریکی، مقاومت قوس به جای جریان آن ثابت نگه داشته می شود. یکی از مزایای سیستم کنترل پیشنهادی برای بخش سری جبران ساز این است که سیستم کنترل پیشنهادی فقط با اندکی تغییر می تواند مقاومت قوس را نیز در مقدار مشخصی ثابت نگه دارد.

چون ولتاژ تزریقی با جریان سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس هم فاز است بنابراین توان اکتیو از طریق بخش سری جبران ساز با کوره قوس تبادل می شود. این تبادل توان اکتیو، ولتاژ لینک خازنی بین دو اینورتر را تغییر می دهد. در قسمت بعد نشان داده می شود که بخش موازی اینورتر، تنظیم این ولتاژ را برعهده دارد.



شکل (۲): کنترل کننده فاز a بخش سری جبران ساز پیشنهادی

در مرحله ذوب به دلیل وجود موج در سطح مواد مذاب، ممکن است فاصله الکترونها و مواد مذاب به حدی برسد که جریان قطع شده و قوس خاموش شود. در این شرایط، کنترل کننده پیشنهادی بلافاصله حداکثر ولتاژ را تزریق کرده و همزمان دستور حرکت رو به پایین را به بازوی نگهدارنده الکترونها خاموش شده ارسال می کند. وقتی ولتاژ

اندازه گیری شده به محدوده عادی برگشت، نتیجه گرفته می شود که قوس مجدداً برقرار شده است، پس دستور توقف به بازوهای نگهدارنده ارسال شده و کنترل کننده به وضعیت قبلی خود بازمی گردد. در ادامه نیز کنترل کننده با تزریق ولتاژ مناسب، جریان قوس برقرار شده را افزایش داده و به مقدار بهینه برمی گرداند.

ولتاژ قوس عمدتاً به طول قوس وابسته بوده و تقریباً مستقل از جریان آن می باشد [۳]. از سوی دیگر، قوس بلند می تواند به سقف کوره قوس آسیب برساند؛ بنابراین باید طول قوس را با توجه به هر مرحله از فرآیند ذوب، کنترل نمود. قوس بلند در مرحله ذوب، توان انتقالی به قراضه های آهن را حداکثر می کند اما پس از تشکیل استخر فلز مایع در مرحله پالایش، طول قوس باید کاهش یابد. در سیستم کنترل پیشنهادی برای بخش سری جبران ساز مشاهده می شود که کاربر کوره قوس می تواند در هر مرحله از فرآیند ذوب، طول قوس را با تنظیم حداکثر ولتاژ مجاز قابل تزریق، کنترل نماید.

موضوع دیگر، برخورد الکترونها به سطح مواد مذاب می باشد که دو مشکل عمده به وجود می آورد. یکی مربوط به تغییر نسبت کربن در محصول نهایی در اثر ورود الکترونها گرافیتی به مواد مذاب بوده و دیگری مربوط به آسیب دیدگی تجهیزات الکتریکی در اثر ادامه یافتن عبور جریان اتصال کوتاه می باشد. در کنترل کننده پیشنهادی شکل (۲) برای این مشکل نیز راه حلی پیش بینی شده است، به این صورت که اگر دامنه جریان اندازه گیری شده از مقدار آستانه ای فراتر برود، بلافاصله ولتاژ معکوس ($-V_{trans_a}$) تزریق می شود. این ولتاژ معکوس باعث محدود شدن جریان قوس شده و همزمان، فرمان حرکت رو به بالا توسط کنترل کننده به بازوی نگهدارنده این الکترونها ارسال می شود. تزریق ولتاژ معکوس برای یک بازه زمانی تعیین شده ادامه یافته و پس از سپری شدن این وقفه، مجدداً مقدار جریان اندازه گیری می شود. اگر جریان به کمتر از مقدار آستانه رسیده بود، ارسال فرمان به بازوی نگهدارنده الکترونها قطع شده و کنترل کننده به وضعیت عادی خود بازمی گردد. اگر جریان هنوز کاهش نیافته بود، اندازه گیری مجدداً پس از گذشت یک وقفه زمانی دیگر انجام گرفته و این کار آن قدر تکرار می شود تا اطمینان حاصل شود که اتصال کوتاه برطرف شده است. البته حرکت رو به بالای الکترونها تضمین می کند که جریان اتصال کوتاه برای مدت طولانی ادامه نمی یابد.

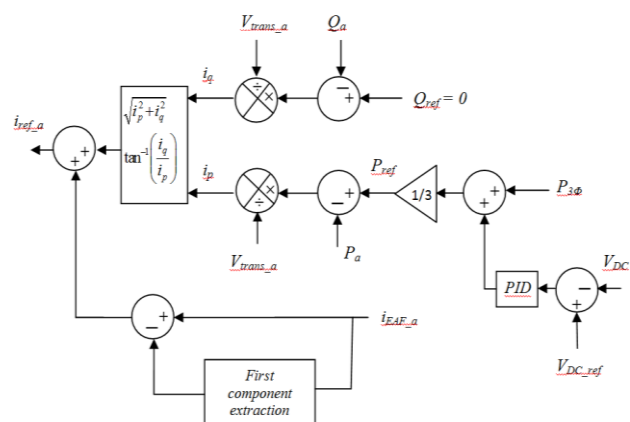
بنابراین در سیستم پیشنهادی لزومی به تحمل جریان اتصال کوتاه توسط ترانسفورمر گرانقیمت کوره قوس، تا زمان دور کردن الکترونها را از سطح مواد توسط سیستم مکانیکی نبوده و جریان اتصال کوتاه به سرعت محدود می شود. از مزایای دیگر سیستم پیشنهادی این است که به دلیل امکان کنترل پیوسته ولتاژ تزریقی، نیازی به استفاده از تپ با پله های زیاد در ترانسفورمر نیست. این دو موضوع نشان می دهند که در سیستم پیشنهادی می توان ترانسفورمر خاص و گرانقیمت کوره قوس را با ترانسفورمرهای ساده تری جایگزین

نمود که به معنای کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و نیز هزینه‌های بهره‌برداری می‌باشد.

۳-۲- کنترل بخش موازی جبران‌ساز پیشنهادی

بخش موازی جبران‌ساز UPQC می‌تواند مشکلات کیفیت توان ناشی از کوره قوس الکتریکی را کاهش داده و حتی برخی از آن‌ها را به طور کامل حل کند. سیستم کنترل پیشنهادی برای قسمت موازی جبران‌ساز در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که قبلاً اشاره گردید، جریان کوره قوس حاوی هارمونیک‌های زوج و فرد با ماهیت متغیر با زمان و وابسته به فرآیند ذوب می‌باشد که طراحی فیلتر غیرفعال را برای حذف این هارمونیک‌ها مشکل می‌کند. کنترل‌کننده پیشنهادی، مولفه اصلی جریان هر فاز که در سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره اندازه‌گیری شده ($i_{EAF,a}$) را به کمک تبدیل فوری سریع استخراج نموده و آن را از جریان فاز کم می‌کند. در نتیجه، هارمونیک‌های هر فاز استخراج شده و توسط اینورتر موازی تولید می‌شود. در حالت ایده‌آل این کار باعث می‌شود مجموعه کوره قوس و جبران‌ساز از دید شبکه، فاقد هارمونیک باشند ولی در عمل به دلیل استفاده از فیلتر پایین‌گذر در خروجی اینورترها، نمی‌توان هارمونیک‌های فرکانس بالای تولیدی کوره قوس را جبران نمود. البته به دلیل کم بودن دامنه هارمونیک‌های فرکانس بالا در جریان کوره قوس، عملاً مشکل خاصی ایجاد نمی‌شود.

مشکل دیگر، ضریب توان پایین کوره قوس می‌باشد که این مشکل نیز با تزریق توان راکتیو کنترل‌شده توسط اینورتر موازی به راحتی قابل حل می‌باشد. جریان مرجع اینورتر موازی از دو مولفه عمود بر هم i_p و i_q تشکیل شده که مولفه i_q نماینده توان راکتیو می‌باشد. برای یافتن مرجع i_q در هر فاز، توان راکتیو هر فاز (Q_a) بر مقدار موثر ولتاژ همان فاز ($V_{trans,a}$) تقسیم می‌شود. با تزریق این جریان توسط بخش موازی جبران‌ساز می‌توان با تأمین توان راکتیو مورد نیاز برای هر فاز، ضریب توان را به واحد نیز رساند.



شکل (۳): کنترل‌کننده فاز a بخش موازی جبران‌ساز پیشنهادی

مولفه هم‌فاز جریان مرجع (i_p) که به کنترل توان اکتیو اختصاص داده شده است می‌تواند برای متعادل‌سازی جریان و تنظیم ولتاژ لینک

DC استفاده شود. به دلیل رفتار متفاوت فازهای کوره قوس الکتریکی، توان اکتیو نامتعادلی توسط کوره قوس جذب شده و نامتعادلی جریان به وجود می‌آید. توان اکتیو متفاوت تبادل‌شده در ترانسفورمرهای بخش سری جبران‌ساز نیز دلیل دیگر این عدم تعادل می‌باشد. در این شرایط، کنترل‌کننده بخش موازی، توان اکتیو کل جذب‌شده توسط مجموعه کوره قوس الکتریکی، کابل فشار ضعیف و بخش سری جبران‌ساز را در محل اتصال خود به سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره ($P_{3\phi}$) را اندازه‌گیری نموده و آن را بر تعداد فازها تقسیم می‌کند. برابری توان مصرفی فازها با این مقدار به معنای متعادل بودن جریان فازها می‌باشد. در غیر این صورت، کنترل‌کننده بخش موازی، به اندازه‌ای جریان به هر فاز تزریق می‌کند تا از دید شبکه، جریان سه‌فاز متعادل شود. بنابراین از دیدگاه متعادل‌سازی جریان، سیستم پیشنهادی در مقایسه با سیستم کنترل مکانیکی بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر عمل می‌کند.

برای عملکرد مطلوب اینورترها، ولتاژ لینک DC باید ثابت نگه داشته شود که به این منظور، اختلاف ولتاژ DC اندازه‌گیری شده (V_{DC}) و ولتاژ DC مرجع ($V_{DC,ref}$) بعد از عبور از یک کنترل‌کننده PID به جریان مرجع i_p افزوده می‌شود. با این کار، تأمین توان اکتیو مورد نیاز خازن به طور مساوی بین هر سه فاز به اشتراک گذاشته شده و از بروز نامتعادلی جریان جلوگیری می‌گردد. نهایتاً برای محاسبه مرجع جریان i_p در هر فاز، اختلاف بین توان اکتیو اندازه‌گیری شده (P_a) و توان اکتیو مرجع (P_{ref}) بر مقدار موثر ولتاژ همان فاز تقسیم می‌شود. سرانجام با استفاده از رابطه (۱) برای هر فاز و افزودن مولفه‌های هارمونیک محاسبه شده همان فاز، مرجع جریان هر فاز از بخش موازی جبران‌ساز ($i_{ref,a}$) به دست می‌آید.

$$|i| = \sqrt{i_p^2 + i_q^2}, \quad \angle i = \tan^{-1}(i_q / i_p) \quad (1)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، جبران‌ساز UPQC با کنترل‌کننده پیشنهادی در یک سیستم نمونه تحت شرایط مختلف در نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود تا قابلیت‌های جبران‌ساز پیشنهادی در ارتقای کیفیت توان و بهبود فرآیند کنترل کوره قوس الکتریکی نشان داده شود. بدین منظور ابتدا سیستم مورد مطالعه معرفی شده و سپس کارایی سیستم پیشنهادی در شرایط کار عادی و غیرعادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. منظور از شرایط کار عادی، حالتی است که مشکلات کوره قوس فقط شامل مشکلات کیفیت توان و نیز بهینه نبودن جریان فازها می‌باشد. شرایط کار غیرعادی نیز حالتی است که یا در اثر برخورد الکترود به مواد کوره قوس، اتصال کوتاهی رخ داده و یا در اثر فاصله زیاد بین الکترود و مواد، قوس خاموش شده است.

۴-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

در سیستم مورد مطالعه، کوره قوس الکتریکی توسط یک خط انتقال 132 kV و از طریق دو ترانسفورمر $132 \text{ kV}/33 \text{ kV}$ و $132 \text{ kV}/65.07 \text{ kV}$ تغذیه می‌شود (شکل (۱)). مقدار پارامترهای سیستم تغذیه [۲۲] به همراه پارامترهای جبران‌ساز پیشنهادی در جدول (۱) آورده شده‌اند.

جدول (۱): مقدار پارامترهای سیستم مورد مطالعه (60 Hz)

ترانسفورمر کوره قوس	70 MVA ، $33 \text{ kV}/65.07 \text{ kV}$
امپدانس تونن منبع از دید اولیه ترانسفورمر کوره قوس ($\text{m}\Omega$)	$0.0512 + j0.46$
امپدانس ترانسفورمر کوره قوس ($\text{m}\Omega$)	$0.266 + j0.22$
امپدانس در سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس ($\text{m}\Omega$)	$0.31 + j3$
ترانسفورمر موازی جبران‌ساز UPQC	$6/5 \text{ kV} / 65.07 \text{ V}$
ترانسفورمر سری جبران‌ساز UPQC	$6/5 \text{ kV} / 2 \text{ kV}$
خازن لینک DC	50 mF ، 9 kV

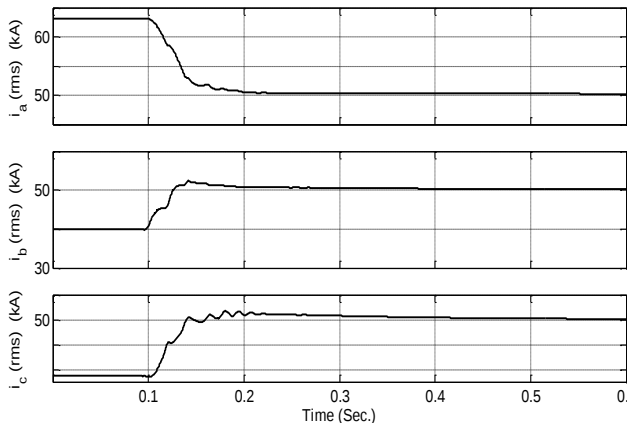
همانگونه که قبلاً اشاره گردید از دو مجموعه ترانسفورمر کاهنده برای بخش‌های سری و موازی جبران‌ساز استفاده شده و به همین خاطر ولتاژ خازن DC در مقدار 9 kV تنظیم شده است. جدول (۲) نیز ضرایب کنترل‌کننده PID برای هر دو بخش سری و موازی جبران‌ساز که با روش سعی و خطا به دست آورده شده است را نشان می‌دهد.

جدول (۲): ضرایب کنترل‌کننده‌های PID

ضریب متناسبی	ضریب انتگرال‌گیر	ضریب مشتق‌گیر	
0.5	15	0.002	بخش سری جبران‌ساز
10	100	0.01	بخش موازی جبران‌ساز

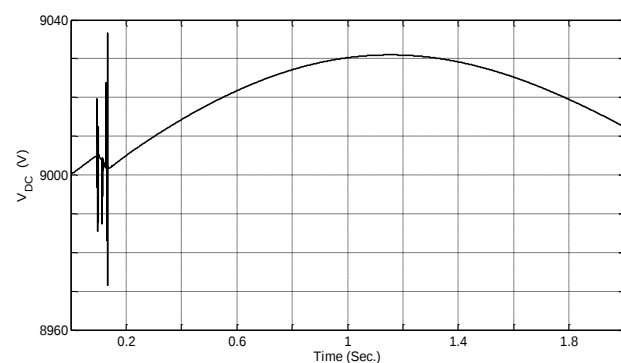
۴-۲- شرایط کار عادی

در این قسمت، تأثیر جبران‌ساز پیشنهادی بر عملکرد کوره قوس در شرایط کار عادی ارزیابی می‌شود. همانگونه که در بخش قبل اشاره شد هدف بخش سری جبران‌ساز، تنظیم جریان هر فاز کوره قوس در مقدار بهینه و هدف بخش موازی، جبران توان راکتیو، متعادل‌سازی جریان، تنظیم ولتاژ لینک DC و بهبود وضعیت هارمونیکی می‌باشد. در ابتدا فرض می‌شود که جریان بهینه برابر با 50 kA بوده و جریان اولیه هر فاز، متفاوت از فاز دیگر باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد که با فعال شدن جبران‌ساز در زمان 0.1 ثانیه، جریان فازها به سرعت در مقدار بهینه تنظیم شده و از دید شبکه، این به معنای متعادل‌سازی جریان‌ها نیز می‌باشد.



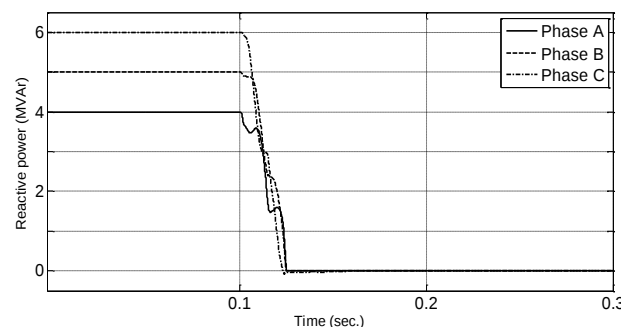
شکل (۴): متعادل‌سازی و تنظیم جریان فازها در جریان بهینه

تغییرات اندک در ولتاژ خازن DC حول مقدار مرجع 9 kV در شکل (۵) نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترل‌کننده PID در بخش موازی جبران‌ساز می‌باشد. با وجود نوسانات شدید ولی کم دامنه در لحظه ورود جبران‌ساز پیشنهادی به مدار، ولتاژ خازن بعد از گذشت ۲ ثانیه به مقدار مرجع خود بازگشته است.



شکل (۵): ولتاژ خازن DC در شرایط کار عادی

شکل (۶) توان راکتیو جذب‌شده توسط هر فاز که در سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که جبران‌ساز پیشنهادی توانسته است توان راکتیو غیر صفر و نابرابر سه فاز را به ضریب توان نزدیک به واحد از دید شبکه که معادل توان راکتیو تقریباً صفر است برساند. محاسبه مقدار عددی ضریب توان نیز این موضوع را تایید می‌کند.

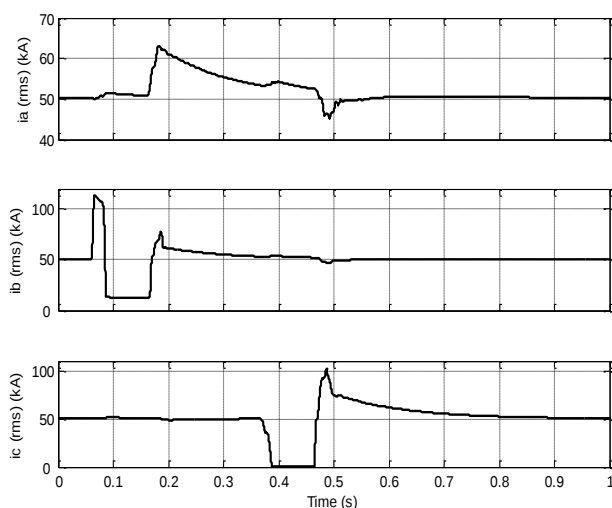


شکل (۶): توان راکتیو اندازه‌گیری شده در سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس

جدول (۳): تنظیمات کنترل‌کننده‌های جبران‌ساز پیشنهادی برای شرایط کار غیرعادی

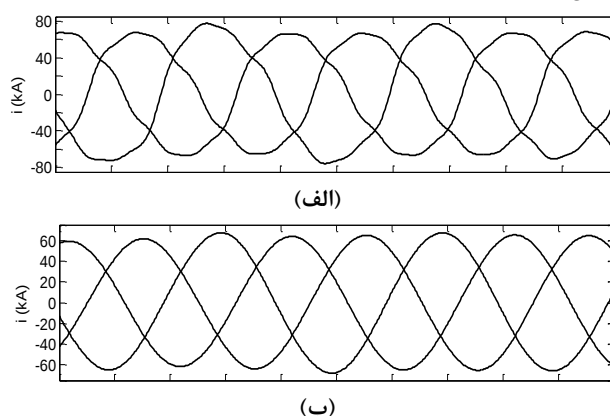
۳	حداکثر ولتاژ مجاز تزریقی (پریویت بر مبنای ۶۵۰ V)
۰/۱ Sec.	وقفه سیستم کنترل در شرایط اتصال کوتاه
۱۲۰ kA	حداکثر دامنه جریان قابل قبول

فرض می‌شود که قبل از وقوع شرایط غیرعادی، جریان فازها توسط جبران‌ساز پیشنهادی در مقدار بهینه تنظیم شده باشد. ناگهان با برخورد الکتروود فاز B به مواد مذاب، جریان شدیدی از فاز B کشیده می‌شود. با وجودی که عامل اتصال کوتاه هنوز وجود دارد ولی از شکل (۸) دیده می‌شود که کنترل‌کننده بخش سری جبران‌ساز بلافاصله با تزریق ولتاژ معکوس، جریان را محدود کرده است. از شکل موج ولتاژ فازها در شکل (۹) دیده می‌شود که ولتاژ فاز B کوره قوس الکتریکی بعد از تزریق ولتاژ معکوس تقریباً صفر شده است. همچنین شکل (۱۰) نشان می‌دهد چون دامنه جریان در لحظه برخورد الکتروود به مواد مذاب از مقدار آستانه فراتر رفته است بنابراین فرمان حرکت رو به بالا نیز به سیستم هیدرولیکی بازوی نگهدارنده الکتروود فاز B ارسال شده است. از شکل (۸) دیده می‌شود که با حرکت الکتروود به سمت بالا، جریان فاز B به سرعت کاهش یافته است. روشن است که در صورت عدم تزریق ولتاژ معکوس در فاصله بین وقوع اتصال تا حرکت الکتروود، ترانسفورمر کوره قوس باید جریانی بسیار بزرگتر از آنچه در شکل (۸) دیده می‌شود را تحمل نماید.



شکل (۸): جریان فازهای کوره قوس در شرایط کار غیرعادی

از قابلیت‌های دیگر سیستم پیشنهادی، بهبود وضعیت هارمونیک است که برای نشان دادن این قابلیت، جریان نمونه کوره قوس در مرحله ذوب که حاوی هارمونیک‌های زوج و فرد می‌باشد در نظر گرفته می‌شود [۳]. شکل (۷) نشان می‌دهد که جبران‌ساز پیشنهادی توانسته است با کاهش مقدار THD از ۱۱/۲۴٪ در سیستم مرسوم فاقد جبران‌ساز به زیر ۱/۵٪ در سیستم پیشنهادی، هارمونیک‌های تزریقی به شبکه را کاهش داده و جریان را نیز متعادل سازد. شکل‌های (۶) و (۷) نیز نشان می‌دهند بخش موازی جبران‌ساز در شرایط کار عادی که هر سه فاز کوره قوس دارای جریان بوده و قوس خاموش شده‌ای نیز وجود ندارد، توان راکتیو لازم را تأمین نموده و هارمونیک‌های جریان را کاهش داده است.



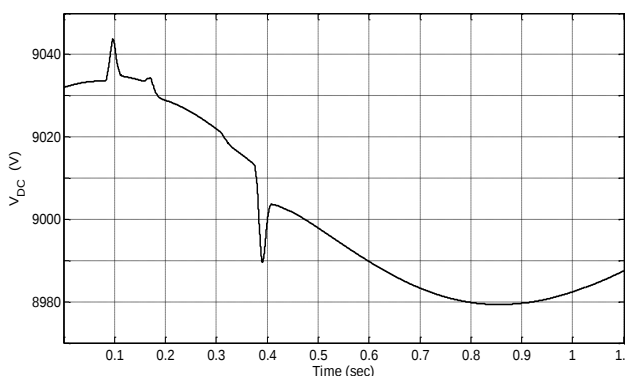
شکل (۷): (الف) جریان نامتعادل با هارمونیک‌های زیاد در سیستم مرسوم؛ (ب) جریان متعادل با هارمونیک‌های اندک در سیستم پیشنهادی

۴-۳- شرایط کار غیرعادی

هدف از این قسمت، نشان دادن توانایی‌های برجسته جبران‌ساز پیشنهادی در شرایط کار غیرعادی می‌باشد. برای در نظر گرفتن بدترین شرایط کار فرض می‌شود در طی سه اتفاق غیرهم‌زمان، ابتدا اتصال کوتاهی در اثر برخورد الکتروود فاز B به مواد مذاب رخ داده، سپس در اثر نزدیک شدن مواد مذاب به الکتروود فاز A، جریان این فاز افزایش یافته و نهایتاً در اتفاق سوم، قوس فاز C در اثر فاصله زیاد بین الکتروود و مواد مذاب خاموش می‌شود. فرض می‌شود که اتفاق مربوط به فاز A ادامه‌دار بوده و دو اتفاق دیگر، هرکدام به مدت ۰/۱ ثانیه به طول می‌انجامند.

تنظیمات کنترل‌کننده‌های جبران‌ساز پیشنهادی برای شرایط کار غیرعادی در جدول (۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که حداکثر ولتاژ مجاز تزریقی در جدول (۳) متناسب با نسبت تبدیل ترانسفورمر سری در جدول (۱) انتخاب شده و برای تزریق ولتاژهای بالاتر باید نسبت تبدیل مناسب را استفاده نمود.

ولتاژ تزریقی برای روشن کردن مجدد قوس کافی نبوده است بنابراین همانگونه که شکل (۱۰) نشان می‌دهد، فرمان حرکت رو به پایین به سیستم هیدرولیکی بازوی نگهدارنده الکتروود فاز C نیز ارسال شده است. با کاهش فاصله بین الکتروود و مواد، قوس مجدداً برقرار شده و در نتیجه، ارسال فرمان به سیستم هیدرولیکی متوقف گردیده و بخش سری جبران‌ساز با تزریق ولتاژ مناسب، جریان‌ها را به مقدار بهینه برمی‌گرداند. این موضوع از شکل‌های (۸) و (۱۰) قابل مشاهده است. شکل (۱۱) نشان می‌دهد که ولتاژ لینک DC حتی در شرایط کار غیرعادی نیز تغییرات قابل قبولی حول مقدار مرجع دارد که بیانگر کارایی رضایت‌بخش کنترل‌کننده بخش موازی جبران‌ساز پیشنهادی می‌باشد.

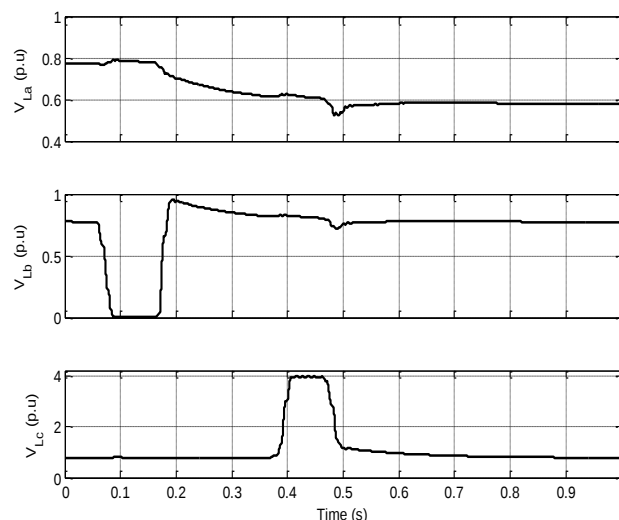


شکل (۱۱): تغییرات ولتاژ لینک DC در شرایط کار غیرعادی

۵- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، برای بهبود کیفیت توان و نیز افزایش کارایی کوره قوس الکتریکی استفاده از جبران‌ساز UPQC با کنترل‌کننده مناسب پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بهبود ضریب توان، کاهش هارمونیک‌های متغیر تزریقی به شبکه و متعادل‌سازی جریان از قابلیت‌های جبران‌ساز پیشنهادی می‌باشد. ساختار پیشنهادی قادر است تنظیم جریان کوره قوس در مقدار بهینه را بسیار سریع‌تر و دقیق‌تر از کنترل‌کننده مکانیکی کوره قوس انجام داده و نقش سیستم کنترل مکانیکی را فقط محدود به شرایط خاصی مانند اتصال کوتاه و یا قوس خاموش شده نماید.

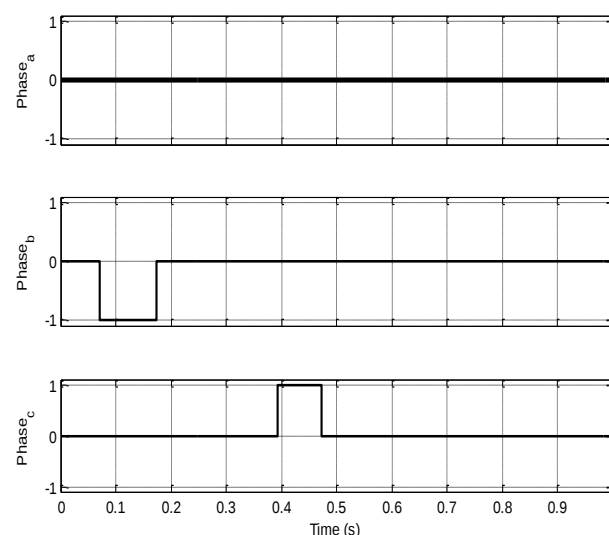
جبران‌ساز پیشنهادی همچنین می‌تواند جریان‌های اتصال کوتاه را به سرعت محدود کرده و بنابراین نیازی به تحمل جریان‌های اتصال کوتاه ادامه‌دار توسط ترانسفورمر کوره قوس نیست. از طرفی به دلیل کنترل ولتاژ قوس به صورت پیوسته توسط جبران‌ساز پیشنهادی، نیازی به استفاده از تغییردهنده تپ زیر بار یا پله‌های زیاد نیز نمی‌باشد. در نتیجه به جای ترانسفورمر خاص و گرانیگت کوره قوس می‌توان از ترانسفورمرهای ساده‌تری استفاده نمود که صرفه‌جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری ایجاد می‌کند. در ساختار پیشنهادی با اتصال اینورترهای سری و موازی جبران‌ساز از طریق دو ترانسفورمر کاهنده به سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس، امکان



شکل (۹): ولتاژ فازهای کوره قوس در شرایط کار غیرعادی

پس از سپری شدن وقفه تعریف شده برای کنترل‌کننده پس از وقوع شرایط اتصال کوتاه (۱/۱ ثانیه)، چون جریان اندازه‌گیری شده به کمتر از مقدار آستانه کاهش یافته است بنابراین کنترل‌کننده به حالت عادی خود برمی‌گردد. همچنین مطابق شکل (۱۰)، فرمان ارسالی به سیستم هیدرولیکی بازوی نگهدارنده الکتروود فاز B نیز قطع شده و همانگونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، جریان فازها به سمت مقدار بهینه هدایت می‌شوند.

بلافاصله پس از رفع اتصال کوتاه در فاز B، افزایش جریان فاز A در اثر نزدیک شدن مواد مذاب به الکتروود رخ می‌دهد. شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که جبران‌ساز پیشنهادی با کاهش ولتاژ تزریقی فاز A، توانسته است جریان را به مقدار بهینه بازگرداند.



شکل (۱۰): فرمان ارسالی به سیستم هیدرولیکی بازوهای نگهدارنده

در ادامه، قوس فاز C در اثر فاصله گرفتن اتفاقی سطح مواد از الکتروود خاموش شده و شکل (۹) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده بخش سری جبران‌ساز سریعاً حداکثر ولتاژ مجاز را تزریق نموده است. چون

and Voltage-Source Inverters for Compensation of Flicker Caused by Arc Furnaces", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, pp. 1225-1231, 2000.

- [16] Fujita, H., Akagi, H., "The unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters", IEEE Transactions Power Electronics, vol. 13, no. 2, pp. 315-322, 1998.
- [17] عطایی محمد، قطب هاجر، شاهقلیان غضنفر، کیومرثی آرش، "مدل سازی کوره قوس الکتریکی بر مبنای نظریه آشوب به منظور کنترل پارامترهای کیفیت توان"، مجله کنترل، سال هفتم، شماره ۲، صص ۳۳-۴۲، ۱۳۹۲.
- [18] Chen C., Chen, Y., "A Neural-Network-Based Data-Driven Nonlinear Model on Time- and Frequency-Domain Voltage-Current Characterization for Power-Quality Study", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.30, no.3, pp.1577-1584, 2015.
- [19] Farokhnia, N., Fathi, S.H., Toodeji, H., "Voltage Sag and Unbalance Mitigation in Distribution Systems Using Multi-Level UPQC", First IEEE Power Quality Conference, Iran, 2010.
- [20] P. E. Melin et al., "Analysis, Design and Control of a Unified Power-Quality Conditioner Based on a Current-Source Topology," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 4, pp. 1727-1736, 2012.
- [21] "Power Modules", MITSUBISHI Electric Corporation, <http://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/php/eSearch.php?FOLDER=/product/powermod/powmod/thyristormod>, Available on Oct. 2015
- [22] Ahmed, E., Abdel- Aziz, M., El-Zahab, E., Xu, W., "Investigation and Mitigation of Harmonics from Electric Arc Furnaces", IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1126-1131, Canada, 1999.

زیر نویس ها

- ¹ Unified Power Quality Conditioner
- ² Static Var Compensator
- ³ STATic COMPensator
- ⁴ Sinusoidal Pulse Width Modulation

استفاده از کلیدهای نیمه هادی با مقادیر نامی موجود در ساختار اینورترهای جبران ساز فراهم می گردد.

مراجع

- [1] "Coal & Steel Statistics", World Coal Association, <http://www.worldcoal.org/resources/coal-statistics/coal-steel-statistics/>, Available on Dec. 2015.
- [2] "Steel Statistical Yearbook 2014", world steel Committee on Economic Studies – Brussels, 2014, pp. 16.
- [3] Miller, T. J. E., Reactive Power Control in Power System, Willey Publishing, 1982.
- [4] مسچی ساناز، علی اکبر گلکار مسعود، هاشم زاده احسان، "شبیه سازی دینامیکی فلیکر ناشی از کوره های قوس الکتریکی"، مجله مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، دوره ۶، شماره ۳، صص ۲۲۱-۲۲۶، پاییز ۱۳۸۷
- [5] Jung, K., Suh, Y., Kim, T., Park, T., Lee, Y., "Arc Stability Control of a High-Power Thyristor Rectifier System in a DC Arc Furnace", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no.12, pp.6342-6351, 2014.
- [6] Rangaswamy, T. R., Thyagarajan, T., "Efficient Control System for Steel Melting Process", IEEE International Conference on Industrial Automation and Control, pp. 417-420, India, 1995.
- [7] Chang, Y., Low, C., "Optimization of a Passive Harmonic Filter Based on The Neural-Genetic Algorithm with Fuzzy Logic for a Steel Manufacturing Plant", Expert Systems with Applications, vol. 34, no. 3, pp. 2059-2070, 2008.
- [8] هوشمند رحمت اله، ترابیان اصفهانی مهدی، "تاثیر جبرانگرهای TCR/FC و TSC در عملکرد موازی کوره های قوس الکتریکی بر پارامترهای کیفیت توان شبکه های قدرت"، مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۴، صص ۷۷-۹۱، ۱۳۸۷
- [9] Dionise, T.J., "Assessing the Performance of a Static VAR Compensator for an Electric Arc Furnace", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 3, pp.1619-1629, 2014.
- [10] Esfandiari, A., Parniani, M., Mokhtari, H., "Mitigation of Electric Arc Furnace Disturbances Using the Unified Power Quality Conditioner", 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, vol. 2, pp.1469-1474, South Korea, 2004.
- [11] Samet, H., Parniani, M., "Predictive Method for Improving SVC Speed in Electric Arc Furnace Compensation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 732-734, 2007.
- [12] Han, C., Yang, Z., Chen, B., Huang, A.Q., Zhang, B., Ingram M.R., Edris, A., "Evaluation of Cascade-Multilevel-Converter-Based STATCOM for Arc Furnace Flicker Mitigation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 2, pp. 378-385, 2007.
- [13] Yazdani, A., Crow, M.L., Guo, J., "An Improved Nonlinear STATCOM Control for Electric Arc Furnace Voltage Flicker Mitigation", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2284-2290, 2009.
- [14] Poudel, S., Watson, N. R., "Assessment of Light Flicker Mitigation Using Shunt Compensators", International Conference on Power System Technology, pp. 23- 28, Singapore, 2004.
- [15] García-Cerrada, A., García-González, P., Collantes, R., Gómez, T., Anzola, J., "Thyristor-Controlled Reactors