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

حمیدرضا تودجی[1]

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[1]) 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 زیادتری نسبت به سیستم کنترل مکانیکی مرسوم الکترودها 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 الکترود، کیفیت توان، یکپارچه‌ساز جامع کیفیت توان (UPQC)

تاریخ ارسال مقاله: ۲۸/ ۰۷/ ۱۳۹۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۶ /۰۹/ ۱۳۹۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۲ /۰۴/ ۱۳۹۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمیدرضا تودجی

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

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 نمی توان هارمونیک‌های تولیدی کمتر در مبدل‌های چند پالسه و نیز مصرف کمتر الکترودها در کوره‌های قوس الکتریکی DC را نادیده گرفت [۵].

قوس‌هایی که به وسیله سه الکترود 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 الکترودهای گرافیتی و مواد مذاب منجر به تغییرات گسترده‌ای در جریان هر الکترود 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 الکترودها سعی می‌کند جریان الکترودها را در مقدار بهینه تنظیم کند [۶].

وزن الکترودهای گرافیتی به همراه بازوهای نگهدارنده و نیز شکنندگی الکترودها، سرعت پاسخ سیستم کنترل مکانیکی الکترودها 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 الکترودها به مواد مذاب به وجود می‌آیند را نمی‌توان به سرعت با جابه‌جایی الکترودها 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 مسایل 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 مسایل کیفیت توان مورد توجه قرار داد. جبرانساز استاتیکی توان راکتیو (SVC[۲]) 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، تریستورهای 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]

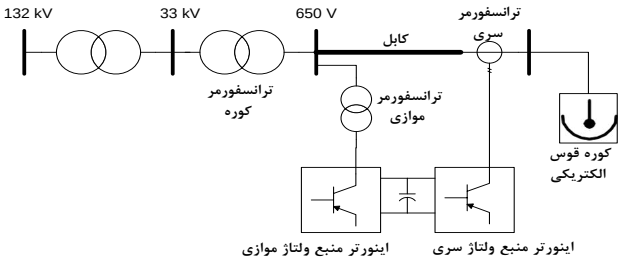
جبرانساز STATCOM[۳] متعلق به نسل بعدی جبرانسازهای مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت بوده و پاسخ سریع این جبرانساز در کنار سایر ویژگی‌ها، آن را مناسب برای سازگاری با ماهیت متغیر کوره‌های قوس می‌کند. مراجع [۱۲،۱۳] قابلیت‌های STATCOM برای کاهش فلیکر را مورد بحث قرار داده و مقایسه بین SVC و STATCOM برای کاربرد 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 مستقلا 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[۴]) 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 معمولا 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 افزاینده 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 افزاینده 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 یا ماژول‌های 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.

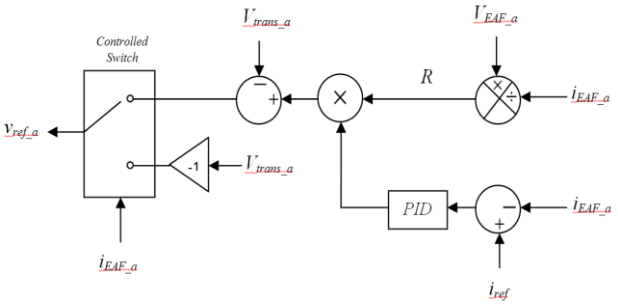
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۳-۱- کنترل بخش سری جبرانساز پیشنهادی

همانگونه که اشاره شد، به دلیل انتقال توان حرارتی حداکثر در یک جریان بهینه معین، معمولا یک مکانیزم مکانیکی با جابه‌جایی عمودی الکترودها به کمک سیستم هیدرولیکی و یا موتور DC سعی در تنظیم جریان کوره قوس در این مقدار بهینه می‌نماید. نشان داده خواهد شد که جبرانساز پیشنهادی می‌تواند تنظیم جریان را بسیار سریع‌تر و اقتصادی‌تر انجام دهد که در نتیجه، به انتقال توان حرارتی حداکثر به کوره قوس و افزایش تولید محصول [۳] منجر می‌شود.

بخش سری جبرانساز، تزریق ولتاژ را انجام می‌دهد بنابراین کنترل جریان کوره قوس می‌تواند با کنترل ولتاژ صورت بگیرد. برای محاسبه مرجع ولتاژ بخش سری (V_{ref_a}) که باعث ثابت ماندن جریان کوره قوس در شرایط مختلف می‌شود، اختلاف بین جریان مرجع (i_{ref}) و جریان اندازه‌گیری‌شده الکترودها (i_{EAF_a}) در مقاومت لحظه‌ای قوس (R) ضرب می‌گردد. چون ماهیت قوس بیشتر مقاومتی است بنابراین مقاومت لحظه‌ای آن را می‌توان به سادگی با تقسیم ولتاژ بر جریان قوس به دست آورد. همچنین به دلیل اندازه‌گیری ولتاژ در محل بازوی نگهدارنده الکترودها (V_{EAF_a})، مقاومت لحظه‌ای محاسبه شده شامل مقاومت بازوها نیز می‌شود. ذکر این نکته لازم است که در برخی از انواع کوره‌های قوس الکتریکی، مقاومت قوس به جای جریان آن ثابت نگه داشته می‌شود. یکی از مزایای سیستم کنترل پیشنهادی برای بخش سری جبرانساز این است که سیستم کنترل پیشنهادی فقط با اندکی تغییر می‌تواند مقاومت قوس را نیز در مقدار مشخصی ثابت نگه دارد.

چون ولتاژ تزریقی با جریان سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس هم‌فاز است بنابراین توان اکتیو از طریق بخش سری جبرانساز با کوره قوس تبادل می‌شود. این تبادل توان اکتیو، ولتاژ لینک خازنی بین دو اینورتر را تغییر می‌دهد. در قسمت بعد نشان داده می‌شود که بخش موازی اینورتر، تنظیم این ولتاژ را برعهده دارد.



شکل (۲): کنترل‌کننده فاز *a* بخش سری جبرانساز پیشنهادی

در مرحله ذوب به دلیل وجود موج در سطح مواد مذاب، ممکن است فاصله الکترودها و مواد مذاب به حدی برسد که جریان قطع شده و قوس خاموش شود. در این شرایط، کنترل‌کننده پیشنهادی بلافاصله حداکثر ولتاژ را تزریق کرده و همزمان دستور حرکت رو به پایین را به بازوی نگهدارنده الکترود خاموش شده ارسال می‌کند. وقتی ولتاژ اندازه‌گیری شده به محدوده عادی برگشت، نتیجه گرفته می‌شود که قوس مجدداً برقرار شده است، پس دستور توقف به بازوهای نگهدارنده ارسال شده و کنترل‌کننده به وضعیت قبلی خود بازمی‌گردد. در ادامه نیز کنترل‌کننده با تزریق ولتاژ مناسب، جریان قوس برقرارشده را افزایش داده و به مقدار بهینه برمی‌گرداند.

ولتاژ قوس عمدتاً به طول قوس وابسته بوده و تقریباً مستقل از جریان آن می‌باشد [۳]. از سوی دیگر، قوس بلند می‌تواند 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 قراضه‌های آهن را حداکثر می‌کند اما پس از تشکیل استخر فلز مایع در مرحله پالایش، طول قوس باید کاهش یابد. در سیستم کنترل پیشنهادی برای بخش سری جبرانساز مشاهده می‌شود که کاربر کوره قوس می‌تواند در هر مرحله از فرآیند ذوب، طول قوس را با تنظیم حداکثر ولتاژ مجاز قابل تزریق، کنترل نماید.

موضوع دیگر، برخورد الکترود به سطح مواد مذاب می باشد که دو مشکل عمده به وجود می‌آورد. یکی مربوط به تغییر نسبت کربن در محصول نهایی در اثر ورود الکترود گرافیتی به مواد مذاب بوده و دیگری مربوط به آسیب‌دیدگی تجهیزات الکتریکی در اثر ادامه یافتن عبور جریان اتصال کوتاه می‌باشد. در کنترل‌کننده پیشنهادی شکل (۲) برای این مشکل نیز راه‌حلی پیش‌بینی شده است، به این صورت که اگر دامنه جریان اندازه‌گیری شده از مقدار آستانه‌ای فراتر برود، بلافاصله ولتاژ معکوس ($-V_{trans_a}$) تزریق می‌شود. این ولتاژ معکوس باعث محدود شدن جریان قوس شده و همزمان، فرمان حرکت رو به بالا توسط کنترل‌کننده به بازوی نگهدارنده این الکترود ارسال می‌شود. تزریق ولتاژ معکوس برای یک بازه زمانی تعیین‌شده ادامه یافته و پس از سپری شدن این وقفه، مجدداً مقدار جریان اندازه‌گیری می‌شود. اگر جریان به کمتر از مقدار آستانه رسیده بود، ارسال فرمان به بازوی نگهدارنده الکترود قطع شده و کنترل‌کننده به وضعیت عادی خود بازمی‌گردد. اگر جریان هنوز کاهش نیافته بود، اندازه‌گیری مجدداً پس از گذشت یک وقفه زمانی دیگر انجام گرفته و این کار آن‌قدر تکرار می‌شود تا اطمینان حاصل شود که اتصال کوتاه برطرف شده است. البته حرکت رو به بالای الکترودها تضمین می‌کند که جریان اتصال کوتاه برای مدت طولانی ادامه نمی‌یابد.

بنابراین در سیستم پیشنهادی لزومی به تحمل جریان اتصال کوتاه توسط ترانسفورمر گرانقیمت کوره قوس، تا زمان دور کردن الکترودها را از سطح مواد توسط سیستم مکانیکی نبوده و جریان اتصال کوتاه به سرعت محدود می‌شود. از مزایای دیگر سیستم پیشنهادی این است که به دلیل امکان کنترل پیوسته ولتاژ تزریقی، نیازی به استفاده از تپ با پله‌های زیاد در ترانسفورمر نیست. این دو موضوع نشان می‌دهند که در سیستم پیشنهادی می‌توان ترانسفورمر خاص و گرانقیمت کوره قوس را با ترانسفورمرهای ساده‌تری جایگزین

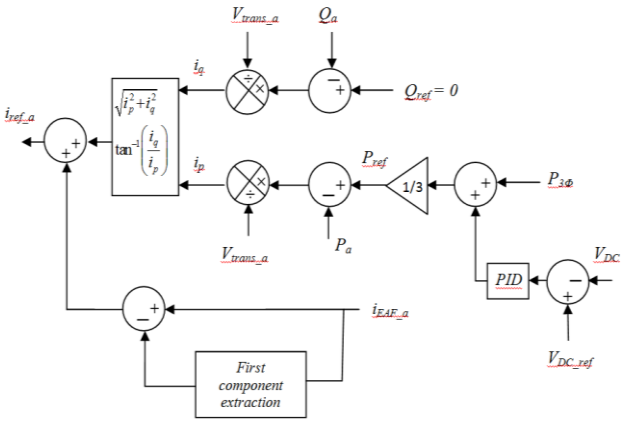
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3- Fall 2018

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 فوریه 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 این‌کار، 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 هارمونیکی محاسبه شده همان فاز، مرجع جریان هر فاز از بخش موازی جبرانساز (i_{ref_a}) به دست می‌آید.

$$|i| = \sqrt{i_p^2 + i_q^2} \quad , \quad \angle i = \tan^{-1}\left(i_q / i_p\right) \qquad (۱)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، جبرانساز UPQC با کنترل‌کننده پیشنهادی در یک سیستم نمونه تحت شرایط مختلف در نرم‌افزار MATALB 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018

۴-۱- معرفی سیستم مورد مطالعه

در سیستم مورد مطالعه، کوره قوس الکتریکی توسط یک خط انتقال ۱۳۲ kV و از طریق دو ترانسفورمر ۱۳۲ kV/۳۳ kV و ۳۳ kV/ ۶۵۰V 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 (۶۰ Hz)

ترانسفورمر کوره قوس	۷۰ MVA ، ۳۳ kV/ ۶۵۰V
امپدانس تونن منبع از دید اولیه ترانسفورمر کوره قوس (mΩ)	۰/۰۵۱۲ + j۰/۴۶
امپدانس ترانسفورمر کوره قوس (mΩ)	۰/۰۲۶۶ + j۰/۲۲
امپدانس در سمت فشار ضعیف ترانسفورمر کوره قوس (mΩ)	۰/۳۱ + j۳
ترانسفورمر موازی جبرانساز UPQC	۶/۵ kV / ۶۵۰ V
ترانسفورمر سری جبرانساز UPQC	۶/۵ kV / ۲ kV
خازن لینک DC	۵۰ mF ، ۹ kV

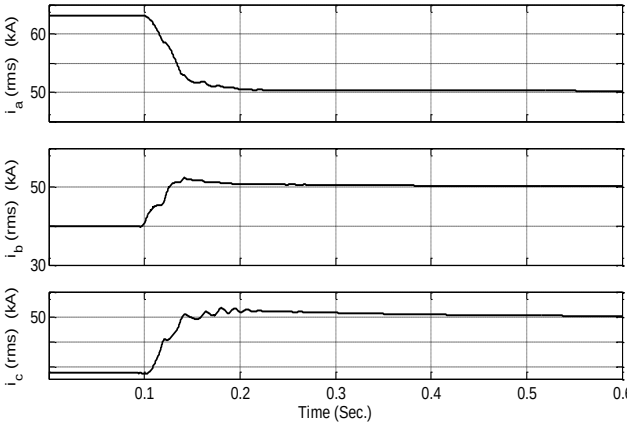
همانگونه که قبلاً اشاره گردید از دو مجموعه ترانسفورمر کاهنده برای بخش‌های سری و موازی جبرانساز استفاده شده و به همین خاطر ولتاژ خازن DC در مقدار ۹ kV تنظیم شده است. جدول (۲) نیز ضرایب کنترل‌کننده *PID* برای هر دو بخش سری و موازی جبرانساز که با روش سعی و خطا به دست آورده شده است را نشان می‌دهد.

جدول (۲): ضرایب کنترل‌کننده‌های *PID*

	ضریب‌تناسبی	ضریب انتگرال‌گیر	ضریب مشتق‌گیر
بخش سری جبرانساز	۰/۵	۱۵	۰/۰۰۲
بخش موازی‌جبرانساز	۱۰	۱۰۰	۰/۰۱

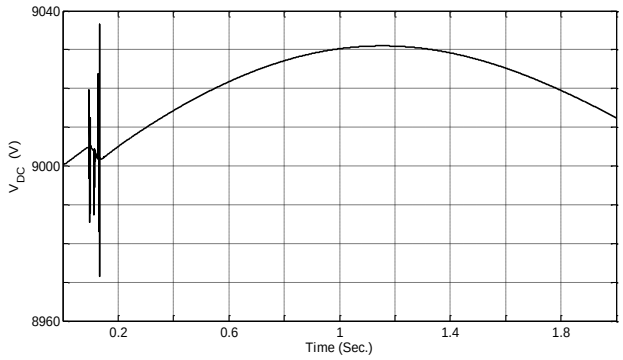
۴-۲- شرایط کار عادی

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 ۵۰ kA بوده و جریان اولیه هر فاز، متفاوت از فاز دیگر باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد که با فعال شدن جبرانساز در زمان ۰/۱ ثانیه، جریان فازها به سرعت در مقدار بهینه تنظیم شده و از دید شبکه، این به معنای متعادل‌سازی جریان‌ها نیز می‌باشد.



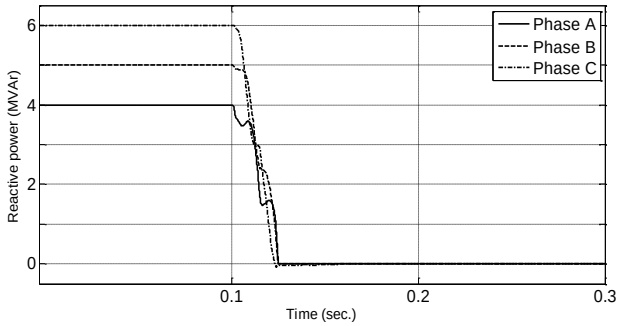
شکل (۴): متعادل‌سازی و تنظیم جریان فازها در جریان بهینه

تغییرات اندک در ولتاژ خازن DC حول مقدار مرجع ۹ 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

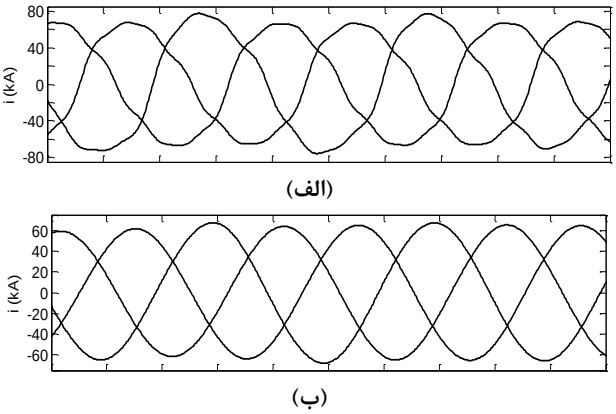
شکل (۶) توان راکتیو جذب‌شده توسط هر فاز که در سمت فشارضعیف ترانسفورمر کوره قوس اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که جبرانساز پیشنهادی توانسته است توان راکتیو غیرصفر و نابرابر سه فاز را به ضریب توان نزدیک به واحد از دید شبکه که معادل توان راکتیو تقریباً صفر است برساند. محاسبه مقدار عددی ضریب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



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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]

از قابلیت‌های دیگر سیستم پیشنهادی، بهبود وضعیت هارمونیکی 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 خاموش‌شده‌ای 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

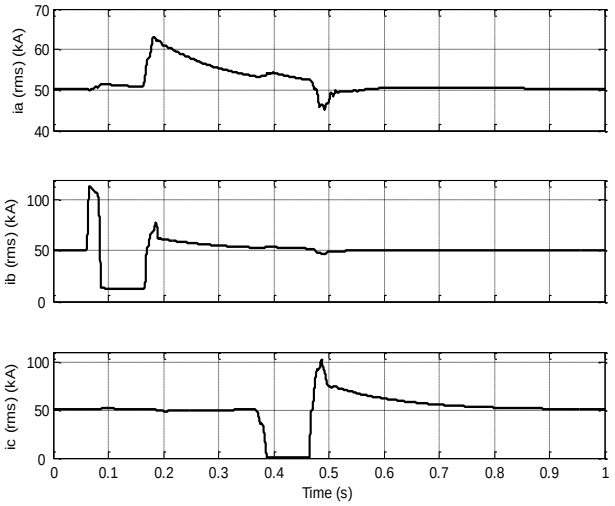
هدف از این قسمت، نشان دادن توانایی‌های برجسته جبرانساز پیشنهادی در شرایط کار غیرعادی می‌باشد. برای در نظر گرفتن بدترین شرایط کار فرض می‌شود در طی سه اتفاق غیرهم‌زمان، ابتدا اتصال کوتاهی در اثر برخورد الکترود فاز B به مواد مذاب رخ داده؛ سپس در اثر نزدیک شدن مواد مذاب به الکترود فاز A، جریان این فاز افزایش یافته و نهایتا در اتفاق سوم، قوس فاز C در اثر فاصله زیاد بین الکترود 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.

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

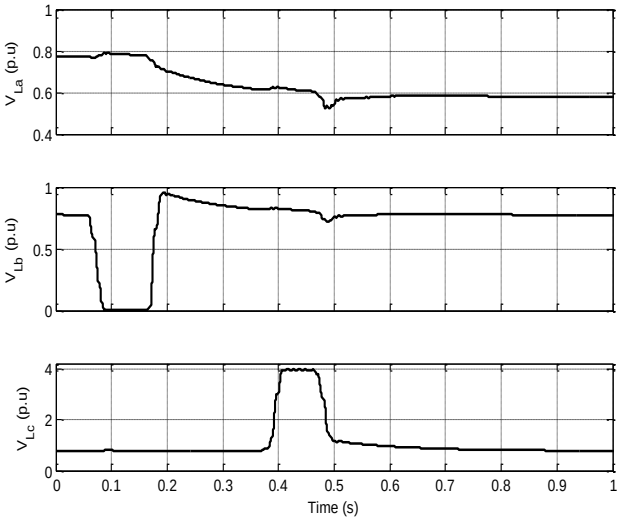
حداکثر ولتاژ مجاز تزریقی (پریونیت بر مبنای ۶۵۰ V)	۳
وقفه سیستم کنترل در شرایط اتصال کوتاه	۰/۱ Sec.
حداکثر دامنه جریان قابل قبول	۱۲۰ kA

فرض می‌شود که قبل از وقوع شرایط غیرعادی، جریان فازها توسط جبرانساز پیشنهادی در مقدار بهینه تنظیم شده باشد. ناگهان با برخورد الکترود 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 الکترود به مواد مذاب از مقدار آستانه فراتر رفته است بنابراین فرمان حرکت رو به بالا نیز به سیستم هیدرولیکی بازوی نگهدارنده الکترود فاز B ارسال شده است. از شکل (۸) دیده می‌شود که با حرکت الکترود به سمت بالا، جریان فاز B به سرعت کاهش یافته است. روشن است که در صورت عدم تزریق ولتاژ معکوس در فاصله بین وقوع اتصالی تا حرکت الکترود، 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

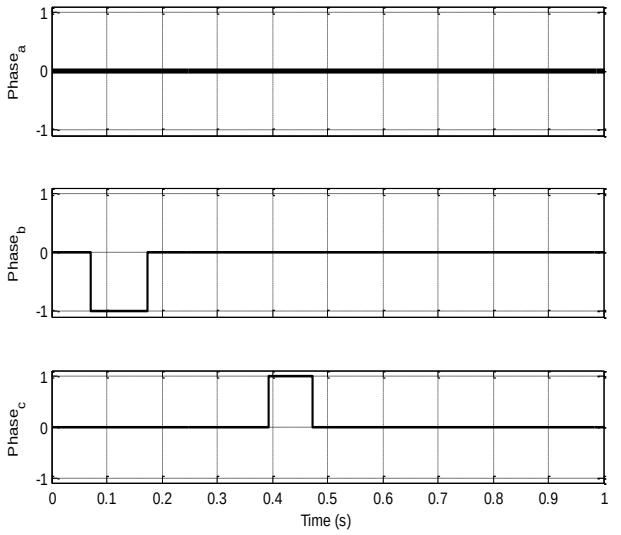
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018



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 (۰/۱ 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 الکترود فاز B نیز قطع شده و همانگونه که از شکل (۸) مشاهده می‌شود، جریان فازها به سمت مقدار بهینه هدایت می‌شوند.

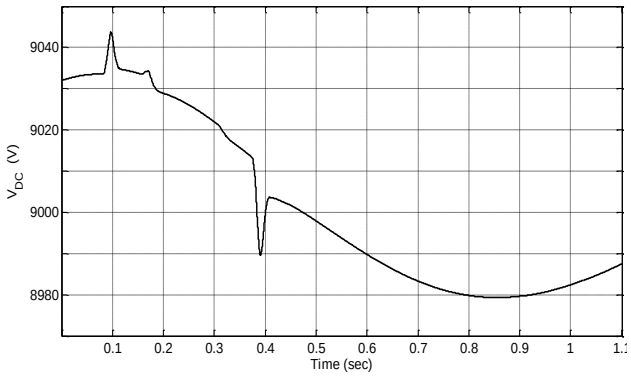
بلافاصله پس از رفع اتصال کوتاه در فاز B، افزایش جریان فاز A در اثر نزدیک شدن مواد مذاب به الکترود رخ می‌دهد. شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان می‌دهند که جبرانساز پیشنهادی با کاهش ولتاژ تزریقی فاز A، توانسته است جریان را به مقدار بهینه بازگرداند.



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

در ادامه، قوس فاز C در اثر فاصله گرفتن اتفاقی سطح مواد از الکترود خاموش شده و شکل (۹) نشان می‌دهد که کنترل‌کننده بخش سری جبرانساز سریعا حداکثر ولتاژ مجاز را تزریق نموده است. چون 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 الکترود فاز C نیز ارسال شده است. با کاهش فاصله بین الکترود 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 خاموش‌شده 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 با پله‌های زیاد نیز نمی‌باشد. در نتیجه به جای ترانسفورمر خاص و گرانقیمت 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]

استفاده از کلیدهای نیمه‌هادی با مقادیر نامی موجود در ساختار اینورترهای جبرانساز فراهم می‌گردد.

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.

[۴] مسچی ساناز، علی‌اکبرگلکار مسعود، هاشم‌زاده احسان،" شبیه‌سازی دینامیکی فلیکر ناشی از کوره‌های 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.

[۸] هوشمند رحمت اله، ترابیان اصفهانی مهدی، " تاثیر جبرانگرهای TCR/FC و TSC در عملکرد موازی کوره‌های قوس الکتریکی بر پارامترهای کیفیت توان شبکه‌های 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 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.

[۱۷] عطایی محمد ، قطب هاجر ، شاهقلیان غضنفر ، کیومرثی آرش، "مدل‌سازی 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.

زیرنویس‌ها

[1] Unified Power Quality Conditioner

[2] Static Var Compensator

[3] STATic COMpensator

[4] Sinusoidal Pulse Width Modulation

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-08-19]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.3.2.4]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.3-Fall 2018