

استفاده از جبران‌ساز توان استاتیکی ترکشن AC با در نظر گرفتن انرژی ترمز باززایی قطار

حسن ادبی فیروزجاه (نویسنده مسئول)، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سید محمد موسوی گزافروودی، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

سیامک فرشاد، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: hasan_adfi@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۳۰ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۶/۲۸

چکیده

برای برطرف کردن مشکلات کیفیت توان در شبکه ترکشن از جبران‌ساز توان استاتیکی ترکشن^۱ (RPC) در حضور ترانسفورماتور $Y\Delta 11$ استفاده شده است. در این مقاله از قابلیت ترمز باززایی قطار و برگشت توان بهره گرفته شده است. به منظور برگشت توان در مدل بار ترکشن از یک پل تمام کنترل‌شونده استفاده می‌شود و ضرایبی مشخص به معادله جریان بار ترکشن اضافه می‌گردد. ترکیب قابلیت برگشت توان قطار و استفاده از RPC به افزایش راندمان سیستم و بهبود کیفیت توان شبکه کمک می‌نماید. مرجع معادلات در طرح کنترلی سمت ثانویه ترانسفورماتور در نظر گرفته می‌شود. در این طرح کنترلی جریان‌های مرجع اکتیو و راکتیو و هارمونیک از یکدیگر جدا شده و نیز از یک کنترل‌کننده PI برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن لینک DC استفاده می‌گردد. نهایتاً با اعمال این طرح کنترل پیشنهادی، توالی منفی و هارمونیک جریان جبران شده و ضریب قدرت شبکه بهبود می‌یابد. به منظور اثبات صحت عملکرد تئوری جبران‌سازی مطرح شده، جبران‌ساز RPC توسط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده و اعتبارسنجی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جبران‌ساز توان استاتیکی ترکشن (RPC)، ترمز باززایی، توالی منفی جریان، هارمونیک جریان، ترانسفورماتور $Y\Delta 11$.

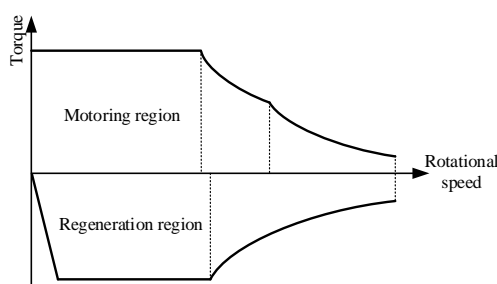
۱. مقدمه

امروزه با پیشرفت در زمینه قطارهای سریع‌السیر، اکثر قطارهای شهری فعلی در جهان به صورت برقی درآمده‌اند و همچنین از زمره مصرف‌کننده‌هایی می‌باشند که باعث اختلال در کیفیت توان شبکه قدرت می‌باشند. بارهای راه‌آهن برقی به دلیل توان بالایی که مصرف می‌نمایند، خصوصیتی هم‌چون جریان هارمونیکي بالا، مولفه منفی جریانی بالا، ضریب قدرت پایین و ... دارند که شبکه قدرت سه‌فاز تغذیه‌کننده خود را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. آلوده کردن سیستم قدرت الکتریکی به جریان‌های هارمونیکي، جریان مولفه منفی و ... موجب اختلالاتی هم‌چون اضافه گرما، نویز، پیری عایق‌ها و ایجاد عیب در تجهیزات شبکه انتقال و توزیع قدرت می‌گردد [Terciyani et al. 2012; Sirbu, Nicolae and Bojoi, 2010]

بهبود شاخص‌های کیفیت توان در سیستم‌های راه‌آهن برقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. مقدار توالی منفی جریانی به توپولوژی شبکه از جمله نوع ترانسفورماتور ترکشن بستگی دارد. با استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل مانند اسکات^۲ و وود بریج^۳ می‌توان توالی منفی جریانی را کاهش داد ولی در شبکه ترکشن داشتن بار کامل و یکسان در دو بخش^۴ مجاور یک اتفاق بسیار نادر است چرا که دائماً لکوموتیوهای در هر بخش در حال سرعت‌گیری و یا توقف می‌باشند. [Morimoto, 2002]. از طرف دیگر این ترانسفورماتور، یک ترانسفورماتور گران و پیچیده در شبکه‌های ریلی محسوب می‌گردد [Kalantari, 2011]. از این‌رو ترانسفورماتور اسکات نیز نمی‌تواند جبران‌سازی کاملی برای این بارهای نامتعادل ترکشن انجام دهد. برای کاهش توالی منفی جریانی می‌توان از SVC بهره گرفت [Guiping, Jianye and Xiaoyu, 2008]. SVC با استفاده از امپدانس متغیر به تولید یا جذب توان راکتیو می‌پردازد که می‌تواند ضریب توان شبکه را بهبود دهد. اما SVC قادر نیست که هم‌زمان توالی منفی جریانی و ضریب توان شبکه را بهبود دهد. جبران‌کننده‌های دیگری مانند فیلترهای اکتیو می‌توانند هارمونیک‌ها را کاهش دهند ولی قادر به جبران‌سازی توالی منفی جریانی نیستند [Joshi and Bohra,

2013; Vasanthi and Ashok, 2011; Tan, Loh and Holmes, 2004].

جبران‌سازی توان استاتیکی ترکشن (RPC) سیستمی است که جهت جبران‌سازی توالی منفی جریانی، هارمونیک‌های جریانی و ضریب توان در شبکه ترکشن AC بکار گرفته می‌شود [Tan, Loh and Holmes, 2004; Luo et al. 2011; Wu et al. 2012]. جبران‌کننده‌های RPC دارای دو مبدل پشت به پشت هستند که توسط یک خازن لینک DC به هم وصل می‌شوند. در حوزه ساختار و توپولوژی عمده‌ترین مباحث را می‌توان در ساختار پست کشش (نوع ترانسفورماتور استفاده شده) مطرح نمود. سیستم RPC در ابتدا با ترانسفورماتور اسکات و مشتقات آن در پست‌های ترکشن ژاپن مطرح شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفت [Uzuka, Ikedo and Ueda, 2004; Horita et al. 2010]. اما به موجب استفاده متعدد از ترانسفورماتورهای نامتعادل (مانند V/V و $Y\Delta$) در پست‌های کشش کشورهای مختلف، محققین در مقالات خود شروع به تطبیق سیستم RPC با این ترانسفورماتورهای ترکشن کردند [Luo et al. 2011; Guo, Enen and Mingxing, 2008]. با بررسی‌های انجام شده و با توجه به اینکه ترانسفورماتور $Y\Delta$ رایج‌ترین ترانسفورماتور موجود در بین سایر ترانسفورماتورهای ترکشن است این امر موجب کاهش قیمتش نسبت دیگر ترانسفورماتورها شده است و بعنوان ترانسفورماتور پست کشش انتخاب می‌گردد [Kalantari, 2011]. در تمامی مقالات انجام شده [Tan, Loh and Holmes, 2004; Luo et al. 2011; Wu et al. 2012] بارهای ترکشن در دو بخش در حالت موتوری بوده و دائماً از شبکه قدرت توان را دریافت می‌کردند. در این مقاله به بارهای ترکشن این اجازه داده شده است تا از قابلیت ترمز دینامیکی استفاده کنند و به ژنراتور تبدیل شوند. با این قابلیت، بخش مورد نظر توان را به شبکه برمی‌گرداند ولی در حضور RPC می‌توان این توان را علاوه بر شبکه، به بخش دیگری که به توان نیاز دارد، فرستاد؛ که منجر می‌شود شبکه ریلی توان کمتری از شبکه قدرت دریافت کند و یا حتی به آن بازگرداند. این روش به ذخیره‌سازی انرژی و در نهایت به افزایش راندمان سیستم کمک نمود. همچنین در طرح کنترل ارائه شده در این مقاله جریانی‌های مرجع اکتیو، راکتیو و هارمونیکي جدا از یکدیگر



شکل ۱. محدوده تغییرات گشتاور-سرعت بار ترکشن

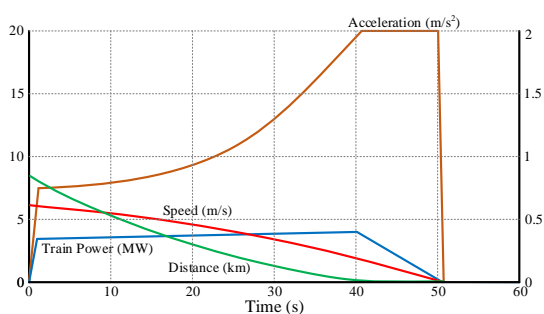
۲-۱ مقدار ظرفیت توان برگشتی

در مقالات و منابع متعددی بر مقدار ظرفیت انرژی برگشتی حاصل از ترمز دینامیکی بحث شده است [Kulworawanichpong, 2004; Falvo et al. 2010; Depenbrock and Staudt, 2009]. مقدار انرژی برگشتی قطار در حالت ترمزی به پروفیل توان قطار، مشخصات شبکه برقی، ولتاژ خط، پروفیل مسیر، طول بخش تغذیه و توان کمکی قطار بستگی دارد. شکل‌های (۲) و (۳) منحنی‌های مسافت طی‌شده، سرعت، شتاب‌گیری و توان قطار را به ترتیب در حالت شتاب‌گیری مثبت و ترمزی برای مدت زمان ۶۰ ثانیه نشان می‌دهد. منحنی‌های سرعت و توان قطار براساس مقیاس بندی محور سمت چپ و منحنی‌های مسافت و شتاب‌گیری براساس مقیاس بندی سمت راست نشان داده شده است. از مقایسه این دو شکل مشخص می‌گردد که مقدار توان برگشتی در حالت ترمزی به نصف توان کشش در حالت شتاب‌گیری مثبت است. این مقدار ظرفیت از توان برای یک شبکه ترکشن می‌تواند اهمیت داشته باشد که با صرف هزینه مناسب و اعمال این قابلیت در ترمزگیری قطار، به ذخیره سازی انرژی و بالا بردن راندمان شبکه کمک نماید. در این مقاله مقدار توان برگشتی ۵۰٪ مقدار توان دریافتی بار خواهد بود.

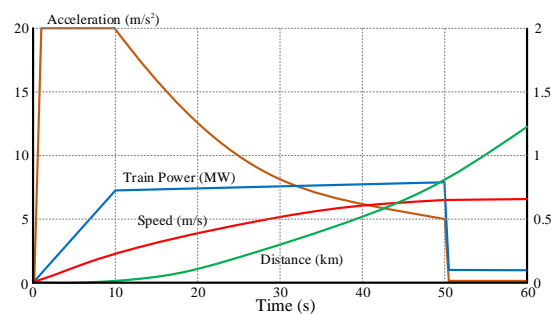
ساخته می‌شوند و با بهره‌گیری از یک کنترل‌کننده PI به تثبیت ولتاژ خازن لینک DC پرداخته می‌شود. در ضمن با انتخاب سمت ثانویه ترانسفورماتور پست کشش به عنوان مرجع معادلات، این تئوری برای تمامی ترانسفورماتورهای ترکشن معتبر خواهد بود.

۲. توان برگشتی قطار حاصل از ترمز باززایی

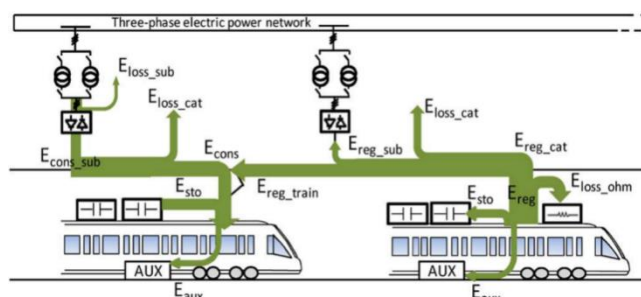
امروزه راندمان انرژی یک موضوع بسیار مهمی در سیستم‌های راه‌آهن برقی است که برای کاهش مصرف انرژی مصرفی و هزینه‌ها مطالعات گسترده‌ای روی آن صورت گرفته است. قسمت بزرگی از انرژی که صرف شتاب گرفتن قطار می‌گردد به صورت انرژی جنبشی در جرم آن ذخیره می‌گردد که در عمل امکان بازیافت قسمتی از آن وجود دارد، لذا برای بازیابی این انرژی باید به سیستم کنترل دسترسی داشت. در اوایل دهه ۱۹۳۰ برای اولین بار استفاده از ترمزهای باززایی در قطارها مطرح شد [Lee and Kwak, 2008]. ماشین‌های الکتریکی در هنگام حرکت قطارها به عنوان یک موتور الکتریکی عمل می‌کنند. در موتورهای الکتریکی انرژی الکتریکی گرفته شده از طریق شبکه تبدیل به انرژی جنبشی شده و منجر به حرکت قطار می‌گردد. اما شرایط در ژنراتورهای الکتریکی کاملاً معکوس است، در ژنراتورهای الکتریکی انرژی جنبشی دورانی محور ماشین، تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. در این صورت اگر بتوان موتور الکتریکی قطار را تبدیل به ژنراتور کرد و امکان بازگشت انرژی الکتریکی را برایش فراهم نمود، عملاً انرژی جنبشی ناشی از حرکت قطار تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود و سرعت قطار کاهش می‌یابد. انرژی که از طریق این روش به منبع تغذیه بازگردانده می‌شود، در واقع بخشی از همین انرژی است که منبع در هنگام عملکرد موتوری به ماشین الکتریکی تحویل داده است. به همین دلیل این روش ترمز باززایی نامیده می‌شود. استفاده از این سیستم امکان احیا کردن انرژی جنبشی و استفاده بهینه از آن را میسر می‌کند. شکل (۱) محدوده تغییرات گشتاور بار ترکشن را براساس تغییرات سرعت نشان می‌دهد.



شکل ۳. منحنی‌های مربوط به حالت ترمزی قطار



شکل ۲. منحنی‌های مربوط به حالت شتاب‌گیری قطار



شکل ۴. گردش انرژی در شبکه راه‌آهن برقی [Falvo et al. 2010]

شد و همچنین باید فضای بیشتری برای آن در نظر گرفت.

- در نهایت برای بهبود مصرف انرژی، می‌توان این انرژی را به شبکه قدرت AC انتقال داد. این انتقال در شبکه راه‌آهن برقی AC امکان پذیر بوده ولی در شبکه راه‌آهن برقی DC می‌توان با اینورترهایی که اجازه عبور توان DC را می‌دهد استفاده نمود. البته باید در نظر داشت که این توان برگشتی دارای هارمونیک‌های بالایی است و معمولاً برای مصرف‌کنندگان شبکه قدرت AC مناسب ناست.

این راه‌کارها با توجه به طراحی شبکه راه‌آهن برقی، در اکثر شبکه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد که موجب بالا بردن راندمان سیستم می‌گردند. با بهره‌گیری از RPC می‌توان یک راه‌کار دیگری را به راه‌کار فوق اضافه نمود؛ زمانی که بارهای یک بخش از حالت موتوری به حالت ژنراتوری می‌روند این بخش تمام توان خود را به سمت پست کشتش می‌فرستد و با استفاده از RPC می‌توان این توان را به بخش دیگر منتقل نمود. استفاده از جبران‌کننده RPC و انرژی برگشتی قطار در حالت ترمز دینامیکی هر کدام در پروژه‌های جدا از هم بررسی شده‌اند، اما این دو موضوع در کنار یکدیگر مورد تحلیل و بررسی قرار

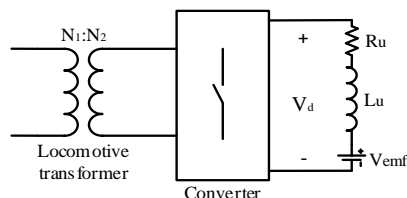
۲-۲ استراتژی‌های توان برگشتی

برای این انرژی برگشتی راه‌کارهای متعددی در نظر گرفته شده است که بستگی به طراحی شبکه راه‌آهنی می‌توان از آن استفاده نمود. براساس آنچه که در شکل (۴) نشان داده شده است، راه‌کارها بصورت کلی در زیر ارائه شده است:

- این انرژی بدست آمده را در بانک‌های مقاومتی که در داخل قطار تعبیه شده‌اند، تلف نمود. از معایب آن ایجاد گرما در داخل قطار است که باید از فن برای خنک‌سازی کمک گرفت.
- می‌توان از ذخیره‌کننده‌های انرژی که در داخل قطار یا در ایستگاه‌ها نصب شده است، بهره گرفت. با این روش، انرژی در این تجهیزات ذخیره شده و در صورت نیاز مجدد به انرژی می‌توان از آن استفاده نمود. با این روش، علاوه بر کاهش مصرف انرژی و پیک‌های توانی، ولتاژ ترکشن دارای پایداری بیشتری خواهد شد. وقتی که ذخیره‌کننده در ایستگاه نصب می‌شود، با انتقال توان از قطار به آن و بالعکس، با تلفات انتقال همراه خواهد بود و راندمان ذخیره‌سازی را کاهش خواهد داد. با قرار دادن ذخیره‌کننده در داخل قطار، تلفات انتقال توان از بین خواهد رفت ولی با افزایش جرم قطار روبرو خواهد

استفاده از جبران‌ساز توان استاتیکی ترکشن AC با در نظر گرفتن انرژی ترمز باززایی قطار

ناحیه نشان از آن دارد که توان از سمت بار به سمت شبکه منتقل می‌شود و بار به ناحیه ژنراتوری وارد شده است. به همین دلیل این مبدل به مبدل دو ربعی معروف است.



شکل ۵. مدل بار ترکشن برای عملکرد در دو ناحیه موتوری و ژنراتوری

۳. تئوری جبران‌سازی

با انتخاب ترانسفورماتور $Y\Delta 11$ به عنوان ترانسفورماتور ترکشن می‌توان ساختار RPC را به همراه این ترانسفورماتور در پست ترکشن در شکل (۷) نشان داد. در RPC با انتقال توان اکتیو، دامنه جریان اکتیو در دو طرف برابر شده و نامتعادلی حذف می‌شود. جریان‌های هارمونیک و توان راکتیو نیز پس از استخراج توسط سیستم کنترل، از طریق کلیدزنی مبدل‌ها تولید شده و به شبکه تزریق می‌شود، در نتیجه سمت اولیه پست کشش عاری از هرگونه نامتعادلی، جریان‌های هارمونیک و جریان راکتیو خواهد بود.

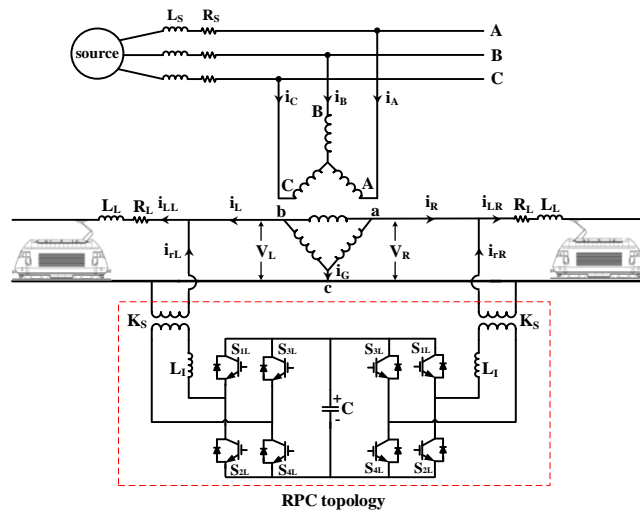
در تئوری‌های جبران‌سازی و روش‌های کنترل که تاکنون در مقالات مختلف مطرح شده است (با توجه به انتخاب سمت اولیه ترانسفورماتور ترکشن به عنوان مرجع معادلات) مختص یک ترانسفورماتور ترکشن خاص است. اما در این مقاله تئوری جبران‌سازی ارائه خواهد شد که بسیار ساده بوده و در عین حال برای تمامی ترانسفورماتورهای ترکشن معتبر خواهد بود. بدین منظور سمت ثانویه ترانسفورماتور ترکشن به عنوان مرجع معادلات فرض شده است.

نگرفته‌اند. لذا در ادامه به استفاده و شبیه‌سازی از RPC با در نظر گرفتن انرژی برگشتی اشاره خواهد شد.

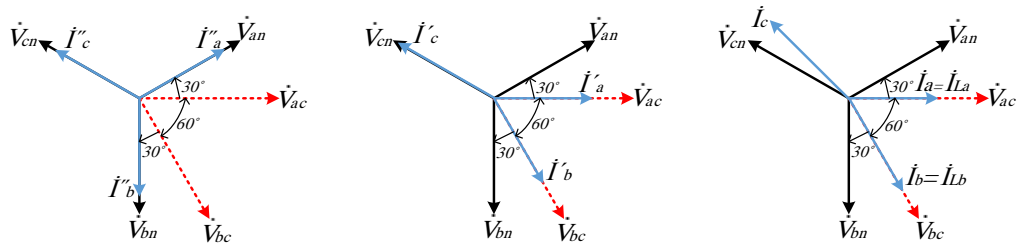
۲-۳ مدل بار برای ترمز باززایی

امروزه موتورهای القایی سه‌فاز بخاطر داشتن مزایای چشم‌گیر، در بارهای ترکشن به صورت گسترده استفاده می‌شوند. در این موتورها با تغییرات سرعت روتور می‌توان ناحیه عملکردی آن را تغییر داد؛ یعنی می‌توان از حالت موتوری به ناحیه ژنراتوری وارد شده و بصورت یک ژنراتور القایی توان را برگرداند. بار ترکشن حقیقی توان اکتیو، راکتیو و جریان هارمونیک از پست کشش می‌کشد که به این دلیل در مدل‌سازی از مدل لکوموتیو متداول در مقالات استفاده می‌شود [Luo et al. 2011; Wu et al. 2012]. در این مدل بار لکوموتیو از نگاه پست ترکشن یک بار با جریان ثابت فرض می‌شود و از آنجایی که ولتاژ شبکه ثابت است می‌توان گفت بار به صورت توان ظاهری ثابت فرض شده است. شکل (۵) مدل مدار الکتریکی این بار را نشان می‌دهد که در آن از یک ترانسفورماتور کاهنده استفاده شده است.

این مدل به صورت یک مقاومت سری (R_u) با یک اندوکتانس (L_u) فرض می‌شود که مجموع این امپدانس با یک یکسوساز تریستوری موازی است تا بتوان هارمونیک مورد نظر را در بار تولید کرد. این مدل برای حالت موتوری بار ترکشن است که در آن مبدل در نقش یکسوساز عمل می‌کند و توان را به امپدانس می‌رساند. اما برای رفتن بار به ناحیه ژنراتوری باید تغییراتی در این مدل ایجاد گردد. ابتدا باید زوایای آتش را فراتر از ۹۰ درجه رساند تا مبدل به عنوان یک اینورتر عمل نماید. سپس باید یک منبع ولتاژ ضد‌محركه (V_{emf}) یا یک باتری با پلاریته معکوس بصورت سری با این امپدانس قرار گیرد. با اعمال این تغییرات ولتاژ در سمت DC منفی شده و در نهایت توان در این سمت منفی خواهد شد. منفی شدن توان در این



شکل ۷. ساختار RPC با ترانسفورماتور YΔ۱۱ در پست کشش



الف) دیاگرام فازوری قبل از جریان سازی ب) دیاگرام فازوری بعد از انتقال توان اکتیو ج) دیاگرام فازوری بعد از انتقال توان اکتیو و راکتیو

شکل ۸. دیاگرام فازوری ولتاژ و جریان در سمت ثانویه پست کشش

که V_{ac} و V_{bc} مقادیر موثر ولتاژهای بار می‌باشند. در صورتی که ضریب توان لکوموتیوها واحد فرض شوند، آنگاه جریان‌های بار در دو بخش راست و چپ و جریان ریل به صورت زیر محاسبه خواهند شد:

$$\begin{cases} \dot{I}'_a = \dot{I}'_{La} = I_{Laf} \angle 0^\circ \\ \dot{I}'_b = \dot{I}'_{Lb} = I_{Lbf} \angle -60^\circ \\ \dot{I}'_c = -(\dot{I}'_{La} + \dot{I}'_{Lb}) = -(I_{Laf} \angle 0^\circ + I_{Lbf} \angle -60^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

که I_{Laf} و I_{Lbf} مقادیر موثر جریان‌های بار می‌باشند. شکل (۸) دیاگرام برداری ولتاژها و جریان‌های مرجع و بار را نشان می‌دهد. این انتخاب مرجع کمک می‌کند تا بدون در نظر گرفتن سمت اولیه و گروه‌برداری ترانسفورماتور به راحتی بتوان در سمت ثانویه کار کرد و این حقیقت را بیان کرد که اگر در سمت ثانویه ترانسفورماتور ترکشن، جریان‌ها متقارن و عاری از هارمونیک و توان راکتیو باشند، آنگاه در سمت اولیه ترانسفورماتور (شبکه تغذیه) نیز شبکه متعادل و متقارن و عاری از هارمونیک و توان راکتیو وجود خواهد داشت. همان گونه که از (۳) و شکل (۸)-الف مشخص است، جریان‌های

برای این مرجع ابتدا باید به این نکته توجه داشت که در ترانسفورماتور ترکشن YΔ۱۱ ولتاژهای بار همواره با یکدیگر ۶۰ درجه اختلاف فاز دارند. بطوری‌که این ولتاژها هر زاویه دلخواهی می‌توانند داشته باشند و معادلات به صورت پارامتری و به طور کلی نوشته می‌شوند. اما اختلاف زاویه بین دو ولتاژ بار با توجه به ترانسفورماتور YΔ۱۱، ۶۰ درجه است. در این جا ابتدا فرض می‌شود که برای اتصال مثلث در ثانویه نقطه نول مجازی وجود دارد بطوری‌که ولتاژهای فاز سمت ثانویه را می‌توان به زیر تعریف کرد:

$$\begin{cases} \dot{V}'_a = V_p \angle 30^\circ \\ \dot{V}'_b = V_p \angle -90^\circ \\ \dot{V}'_c = V_p \angle 150^\circ \end{cases} \quad (1)$$

که V_p مقدار ولتاژ موثر مجازی است. بنابراین با توجه به شکل (۷) ولتاژهای بار در بخش‌ها برابر خواهند بود با:

$$\begin{cases} \dot{V}_{ac} = V_{ac} \angle 0^\circ \\ \dot{V}_{bc} = V_{bc} \angle -60^\circ \end{cases} \quad (2)$$

شبکه سه‌فاز واحد در نظر گرفته شود، مقدار ماکزیمم جریان‌ها برابر است با:

$$\frac{\sqrt{2}}{2}(I_{La} + I_{Lb}) \times \frac{2}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_{La} + I_{Lb}) \quad (8)$$

در نتیجه جریان‌های دو بخش مجاور پست کشش در حالت ایده‌آل و عاری از هارمونیک به صورت (۹) و جریان‌های جبران‌سازی که RPC باید تولید کند به صورت (۱۰) بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} i_{af} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ i_{bf} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} i_{ra} = i_{af} - i_{La} \\ i_{rb} = i_{bf} - i_{Lb} \end{cases} \quad (10)$$

که در آن i_{ra} و i_{rb} جریان‌های جبران‌سازی، i_{La} و i_{Lb} جریان‌های واقعی بار در دو بخش i_{af} و i_{bf} جریان‌های ایده‌آل سینوسی و عاری از هارمونیک بدست آمده در معادلات قبلی است. جریان‌های مرجع ثانویه بدست آمده برای تمامی گروه‌های برداری ترانسفورماتور ΔY و همچنین ترانسفورماتور V/V معتبر است. با به کارگیری همین مفهوم می‌توان جبران‌سازی برای ترانسفورماتور اسکات (و مشتقات آن) را انجام داد.

۴. روش کنترل

۴-۱ استخراج جریان‌های مرجع

برای استخراج جریان‌های مرجع مورد نیاز ابتدا باید تعیین نمود که مشخصه واقعی جریان بار به چه صورتی است تا سیستم کنترل بتواند در شرایط بار واقعی به صورت صحیح عمل کند. از آنجایی که بار قابلیت عملکرد در دو ناحیه موتوری و ژنراتوری را داراست، باید در معادلات جریان آن تغییرات حالت مشخص باشد. با اعمال ضرایب k_a و k_b در معادله جریان بار می‌توان این قابلیت بار را لحاظ کرد. با توجه به اینکه حداکثر مدار توان برگشتی تئوری در حالت ترمز باززایی ۵۰٪ توان دریافتی است، مقدار تغییرات این ضرایب را بین محدوده $[-0.5, 1]$ انتخاب می‌گردد. با تغییر این ضرایب، دامنه جریان دو بخش نسبت به مقدار جریان نامی تغییر خواهد کرد. حال جریان بار ترکشن که به صورت واقعی شامل مولفه‌های

سمت ثانویه پست کشش نامتعادل و نامتقارن می‌باشند. در این حالت شاخص توالی منفی جریان برابر است با:

$$\varepsilon = \frac{|I^-|}{|I^+|} = \frac{\sqrt{I_{Laf}^2 + I_{Lbf}^2} - I_{Laf} I_{Lbf}}{I_{Laf} + I_{Lbf}} \quad (4)$$

این سیستم می‌تواند به منظور جبران نامتعادلی جریان بارها، نیمی از اختلاف جریان دو بخش راست و چپ را از سمت بخش بار سنگین‌تر به سمت بخش با بار سبک‌تر منتقل کند. این اختلاف جریان برابر است با:

$$|\Delta I_p| = \frac{I_{Laf} - I_{Lbf}}{2} \quad (5)$$

باید توجه کرد که جریان‌های انتقالی از نوع اکتیو هستند. پس از انتقال جریان اکتیو، جریان‌های سه‌فاز سمت ثانویه پست کشش به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{cases} I_a^{\&} = I_a^{\&} - |\Delta I_p| \angle 0^\circ = \frac{1}{2}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle 0^\circ \\ I_b^{\&} = I_b^{\&} + |\Delta I_p| \angle -60^\circ = \frac{1}{2}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle -60^\circ \\ I_c^{\&} = -(I_a^{\&} + I_b^{\&}) = \frac{\sqrt{3}}{2}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle 150^\circ \end{cases} \quad (6)$$

براساس (۶) و شکل (۸) -ب دامنه جریان‌های فاز a و b برابر شده‌اند ولی به دلیل این که اختلاف فاز بین آن‌ها ۱۲۰ درجه نیست، دامنه فاز c نابرابر می‌باشد. جریان بخش a ۳۰ درجه نسبت به ولتاژ آن پس‌فاز و جریان بخش b ۳۰ درجه نسبت به ولتاژش پیش‌فاز می‌باشد. این نامتعادلی فازها که ناشی از ترانسفورماتور نامتعادل ΔY است خود موجب مصرف توان راکتیو و کاهش ضریب قدرت در سمت ثانویه پست کشش می‌گردد. در نتیجه برای متعادل کردن فاز جریان‌ها، لازم است که مقداری توان راکتیو از سمت بخش پیش‌فاز به سمت بخش پس‌فاز انتقال یابد. مقدار جریان راکتیو مورد نیاز با توجه به دیاگرام فازوری برابر است با:

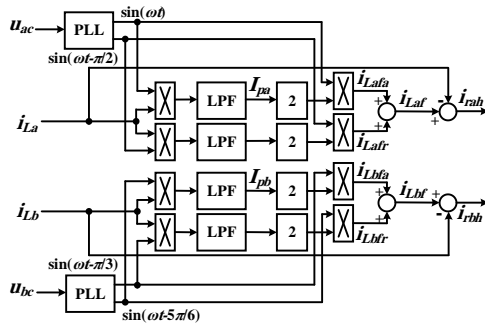
$$|\Delta I_q| = \frac{1}{2}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \tan 30^\circ \quad (7)$$

با این ترتیب بخش b توان راکتیو تولید کرده و جریانش پس‌فاز می‌گردد. در عین حال بخش a توان راکتیو تولیدی را مصرف نموده و پیش‌فاز می‌شود. نهایتاً براساس شکل (۸) -ج جریان‌ها در سمت ثانویه پست کشش به صورت سه‌فاز متعادل و متقارن I_a'' ، I_b'' و I_c'' خواهند شد. اگر مقدار ضریب قدرت

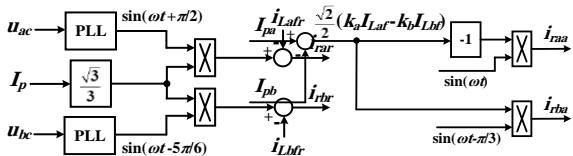
گردد. بر اساس شکل (۹) قسمت DC جریان‌های سمت چپ و راست و در حالت کلی برابرند با:

$$\begin{cases} I_{pa} = \frac{\sqrt{2}}{2} k_a I_{Laf} \\ I_{pb} = \frac{\sqrt{2}}{2} k_b I_{Lbf} \end{cases} \Rightarrow I_p = \frac{\sqrt{2}}{2} (k_a I_{Laf} + k_b I_{Lbf}) \quad (13)$$

جریان‌های فوق اگر در عدد ۲ ضرب شوند دامنه مولفه اصلی اکتیو i_{La} و i_{Lb} بدست خواهند آمد. اگر دامنه مولفه‌های اصلی اکتیو در فازهای سنکرون با ولتاژهای دو بخش ضرب شوند جریان‌های سینوسی مولفه اصلی (i_{Lafa} و i_{Lbfa}) تولید می‌شوند. از طرف دیگر جریان‌های مولفه راکتیو نیز از طریق روش FBD مشابه حالت قبل محاسبه می‌شوند. حال تفاضل جریان بارها از مجموع جریان‌های اکتیو و راکتیو جریان هارمونیکی را به صورت زیر تولید خواهد کرد:



شکل ۹. الگوریتم استخراج جریان هارمونیکی



شکل ۱۱. الگوریتم استخراج جریان مولفه راکتیو

شکل ۱۰. الگوریتم استخراج جریان مولفه اصلی (اکتیو)

$$\begin{cases} i_{Lafa} + i_{Lafr} - i_{La} = i_{rha} \\ i_{Lbfa} + i_{Lbfr} - i_{Lb} = i_{rhb} \end{cases} \quad (14)$$

۴-۱-۲ استخراج جریان‌های اکتیو

شکل (۱۰) بلوک دیاگرام استخراج جریان‌های مولفه اصلی را نشان می‌دهد. از آن جایی که RPC باید مقدار مشخص جریان مولفه اصلی $|\Delta I_p|$ را که در (۵) محاسبه شده، از یک بخش به

اکتیو، راکتیو و هارمونیکی است، می‌توان معادله آن را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} i_{La} = \sqrt{2} k_a I_{Laf} \sin(\omega t) + \sqrt{2} k_a I_{Ldfr} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} k_a I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \\ i_{Lb} = \sqrt{2} k_b I_{Lbf} \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) + \sqrt{2} k_b I_{Lbfr} \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) \\ + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} k_b I_{Lbh} \sin(h\omega t + \phi_{bh}) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن I_{Ldfr} و I_{Lbfr} معرف دامنه مولفه اصلی جریان راکتیو، I_{Lbh} و I_{Lah} معرف دامنه مولفه h ام جریان بار و همچنین θ_{bh} و θ_{ah} فاز مولفه h ام جریان‌های بخش b و a را نشان می‌دهد. از طرف دیگر با نگاهی به معادلات جریان‌های مرجع ثانویه ترانسفورماتور مشخص است که فقط نیاز به مولفه اصلی جزء اکتیو جریان یعنی I_{Lbf} و I_{Laf} است.

۴-۱-۴ استخراج جریان هارمونیکی

برای جدا کردن مولفه‌های هارمونیکی از مولفه‌های اصلی از روش FBD استفاده می‌گردد. هدف اصلی این روش جدا کردن مولفه اصلی اکتیو جریان از مابقی اجزاء غیراکتیو آن است [Depenbrock and Staudt, 1998]. براساس روش FBD اگر فاز ولتاژ بار با موج جریان بار سنکرون گردد (۱۲) برقرار می‌گردد. اگر پس از سنکرون‌سازی، قسمت DC موج حاصله جداسازی شود $(\sqrt{2}/2)k_a I_{Laf}$ بدست می‌آید که مولفه اصلی جریان اکتیو و مورد نیاز می‌باشد. اما برای اینکه در ابتدا بتوان از شکل موج‌های ولتاژ بار $\sin(\omega t)$ را جدا کرد، از روش PLL استفاده می‌شود.

$$\begin{aligned} i_{La} \times \sin(\omega t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} k_a I_{Laf} - \frac{\sqrt{2}}{2} k_a I_{Laf} \cos(2\omega t) \\ &- \frac{\sqrt{2}}{2} k_a I_{Ldfr} \cos(2\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ &+ \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} k_a I_{Lah} \sin(h\omega t + \theta_{ah}) \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (12)$$

برای جداسازی جزء DC از سری فوریه استفاده می‌شود به طوری که مرتبه صفر سری فوریه که در واقع همان جزء DC موج می‌باشد، محاسبه می‌گردد. به همین ترتیب از جریان i_{Lb} بخش سمت چپ قسمت اکتیو $(\sqrt{2}/2)k_b I_{Lbf}$ استخراج می-

ساده‌ای دارد و دارای سریع‌ترین پاسخ دینامیکی در بین کنترل-کننده‌های جریان است. در این کنترل‌کننده جریان مرجع و جریان واقعی اندازه‌گیری و با یکدیگر از طریق یک باند هیستریزس مقایسه می‌شوند و خروجی این مقایسه یک جفت سوئیچ را روشن و جفت دیگر را خاموش می‌کند. روش کنترل هیستریزس دو سطحی برای یک بازوی دو سوئیچه بدین صورت انجام می‌گیرد:

$$S_{1,4} = \begin{cases} 1, & \Delta i < -H \\ 0, & \Delta i > H \\ \text{Hold on,} & |\Delta i| < H \end{cases} \quad (18)$$

که در آن عدد یک به معنای روشن شدن سوئیچ و عدد صفر به معنای خاموش شدن سوئیچ است و H باند هیستریزس مورد نظر است که قرار است جریان در داخل آن کنترل شود. از آنجایی که اختلاف جریان مرجع و جریان واقعی (Δi) در بازه کوچکی کنترل می‌شود لذا جریان واقعی می‌تواند به خوبی جریان مرجع را دنبال کند. از طرف دیگر انتخاب پهنای باند هیستریزس مهم می‌باشد زیرا اگر این پهنای کوچک انتخاب شود با وجود اینکه باعث می‌شود خطای جریان کوچک باشد و جریان واقعی بسیار به جریان مرجع نزدیک گردد اما باعث افزایش فرکانس سوئیچ‌زنی می‌گردد. زیرا سوئیچ‌ها باید تغییرات جریان را در دامنه‌های کوچکتری دنبال کنند. همچنین اگر پهنای باند بزرگ انتخاب شود باعث خطای بزرگ در دنبال کردن جریان مرجع می‌شود.

۳-۴ کنترل ولتاژ خازن لینک DC

به منظور تثبیت ولتاژ خازن در مقادیر مختلف معمولاً از کنترل‌کننده PI استفاده شده است [Luo et al. 2011; Wu et al. 2012]. این کنترل‌کننده ولتاژ مرجع و ولتاژ خازن لینک DC را در هر لحظه دریافت و مقایسه می‌کند و از روی خطای حاصل از آنها سیگنال کنترلی مناسب را تولید می‌کند. بهره حلقه باز این کنترل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (19)$$

که K_p را بهره تناسبی و K_I را بهره انتگرال‌گیر می‌نامند. از آنجایی که خروجی کنترل‌کننده PI تنها یک سیگنال کنترلی است لذا برای تأثیر دادن آن در سیستم کنترل می‌بایست آن را به کمیت جریان نسبت داد. لذا بدین منظور سیگنال خروجی

بخش دیگر انتقال دهد؛ می‌توان از (۱۵) این جریان را بدست آورده و در فاز سنکرون با ولتاژهایشان ضرب کرد تا طبق (۱۶) جریان مولفه اصلی تولید گردد:

$$I_{pa} = \frac{\sqrt{2}}{2} (k_a I_{Laf} - k_b I_{Lbf}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} i_{raa} = \frac{1}{2} (k_b I_{Lbf} - k_a I_{Laf}) \sin(\omega t) \\ i_{rba} = \frac{1}{2} (k_a I_{Laf} - k_b I_{Lbf}) \sin(\omega t - \frac{\pi}{3}) \end{cases} \quad (16)$$

۳-۱-۴ استخراج جریان راکتیو

بلوک دیاگرام استخراج جریان مولفه راکتیو نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است. جریان مرجع راکتیو از دو جزء تشکیل می‌شود. قسمت اول مقدار جریان راکتیوی است که برای جابه‌جا کردن فازور جریان‌های دو بخش به کار می‌رود و مقدار آن در (۷) آمده است. قسمت دوم جریان مرجع راکتیو، جریان راکتیو مصرفی بار می‌باشد که با توجه به این که اغلب مقادیر ضریب قدرت بار را واحد فرض کرده و مبدل‌های موجود در لکوموتیوها را PWM پنداشته‌اند، مقدار آن ناچیز می‌باشد. در نتیجه اگر مقدار I_p که از (۱۳) بدست آمده در ضریب $\sqrt{3}/3$ ضرب شود، دامنه مولفه جریان مرجع راکتیو بدست می‌آید. اما با توجه به این که جریان بخش a پس‌فازی و جریان بخش b پیش‌فازی است به ترتیب بایستی در فازهای $\sin(\omega t + \pi/2)$ و $\sin(\omega t - 5\pi/6)$ ضرب شوند تا جریان‌برداری مرجع مولفه راکتیو تولید گردد که به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} i_{rar} = \frac{\sqrt{3}}{6} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) - i_{Laf} \\ i_{rbr} = \frac{\sqrt{3}}{6} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t - \frac{5\pi}{6}) - i_{Lbf} \end{cases} \quad (17)$$

۳-۲-۴ کنترل‌کننده جریان هیستریزس

با توجه به دینامیک سریع مورد نیاز در این مبحث، به یک کنترل‌کننده جریان نیاز است که بتواند تغییرات جریان را به صورت لحظه‌ای و با سرعت بالا دنبال کند. زیرا بار ترکشن یک بار متغیر می‌باشد و دامنه جریان‌های مرجع می‌تواند بسیار متغیر باشد. با توجه به ملزومات ذکر شده در این مقاله، کنترل‌کننده جریان هیستریزس انتخاب شده است [Holmes, Davoodnezhad and McGrath, 2011]. چرا که این کنترل‌کننده مستقیماً با جریان ارتباط دارد و بسیار ساختار

- بخش سمت راست در حالت ژنراتوری و بخش سمت چپ در حالت موتوری
- هر دو بخش در حالت ژنراتوری
- بخش سمت راست در حالت موتوری و بخش سمت چپ در حالت ژنراتوری

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی

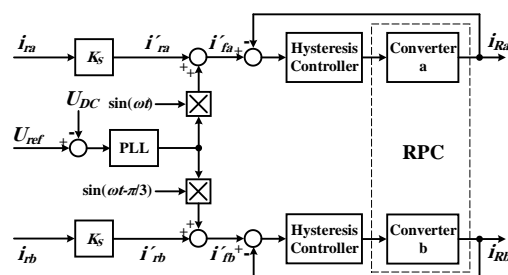
پارامترها	مقادیر
V_{L-L}	۲۳۰ kV
R_s, L_s	$1 \Omega, 1 \text{ mH}$
R_u, L_u	$1 \Omega, 2 \text{ mH}$
V_{enf}	۱۹۰۰ V
R_t, L_t	$0.2 \Omega, 0.1 \text{ mH}$
K_s	۲۷/۵ : ۱
L_t	۱ mH
C	۶۰ mF
V_{dc0}	۱۵۰۰ V

کل فرآیند شبیه‌سازی در بازه [۰، ۰/۷۵] ثانیه انجام می‌گیرد که در ثانیه ۰/۱، RPC وارد سیستم شده و جبران‌سازی شروع می‌گردد. در ابتدا فرض می‌شود که هر دو بخش در ناحیه موتوری قرار دارند. سپس در لحظه ۰/۳ ثانیه بخش سمت راست (a) به ناحیه ژنراتوری می‌رود و در ادامه در لحظه ۰/۴۵ ثانیه بخش سمت چپ (b) نیز به حالت ژنراتوری خواهد رفت. در نهایت در لحظه ۰/۶ ثانیه بخش سمت راست دوباره به حالت موتوری خود برمی‌گردد و بخش سمت چپ همچنان در حالت ژنراتوری باقی می‌ماند.

جریان‌های بار ترکشن در شکل (۱۳) آمده است که دامنه جریان زمانی که بارها در حالت ژنراتوری می‌باشند، به نصف کاهش پیدا کرده است. مقدار THD در حالت موتوری ۸/۲۷٪ و در حالت ژنراتوری ۹/۲۸٪ است.

شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب جریان‌های سه‌فاز شبکه قدرت و محتوای هارمونیک جریان فاز B (i_B) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل‌ها قبل از روشن شدن RPC جریان‌ها دارای هارمونیک ۱۴/۳۹٪ و مقدار توالی منفی قابل توجهی دارند. اما پس از روشن شدن RPC در ثانیه ۰/۱ توالی منفی کاهش یافته و THD جریان به مقدار ۱/۱۲٪ رسیده و جریان‌ها کاملاً سینوسی و هم‌دامنه می‌شوند. در لحظه ۰/۳ ثانیه بخش سمت راست به حالت ژنراتوری می‌رود، THD جریان ۴٪ شده و با انتقال توان از این بخش به سمت بخش چپ، جریان

PI با موج‌های جریان بار سنکرون می‌گردد؛ یعنی خروجی کنترل‌کننده در $\sin(\omega t)$ و $\sin(\omega t - \pi/3)$ ضرب می‌شود. حال مطابق شکل (۱۲) جریان‌های بدست آمده با جریان‌های مرجع جبران‌ساز که از سمت اولیه ترانسفورماتور با ضرب در نسبت تبدیل مناسب (K_s) به سمت ثانویه انتقال می‌شود، جمع می‌شوند. جریان‌های واقعی RPC در سمت ثانویه که با i'_{Ra} و i'_{Rb} نشان داده شده‌اند با جریان‌های مرجع i'_{fa} و i'_{fb} در هر لحظه مقایسه می‌شوند و وارد کنترل‌کننده جریان هیستریز می‌گردند.



شکل ۱۲. کنترل ولتاژ لینک DC به همراه کنترل‌کننده جریان

هیستریز

۵. نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله نتایج‌هایی متشکل از ساختار و روش کنترلی در رابطه با سیستم RPC با در نظر داشتن انرژی برگشتی قطار مطرح گردید. لذا به منظور اعتبارسنجی مطالب ارائه شده سیستم RPC توسط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK مدل‌سازی شده است. براساس شکل (۷) سطح ولتاژ شبکه قدرت سه‌فاز ۲۳۰ kV بوده و نسبت تبدیل ترانسفورماتور YΔ۱۱ برابر ۲۷/۵ : ۲۳۰ است. لذا پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در جدول (۱) نشان داده شده است. برای شبیه‌سازی مدل لکوموتیو از مدل مرسوم می‌گردد که در قبل به آن اشاره شد، استفاده می‌گردد. در مراحل شبیه‌سازی، بار در حالت موتوری دارای ظرفیت ۶/۵ MVA و در حالت ژنراتوری دارای ظرفیت ۳/۲۵ MVA است که از دو برابر شدن مقادیر پارامترهای R_{ii} و L_{ii} در حالت موتوری بدست می‌آید.

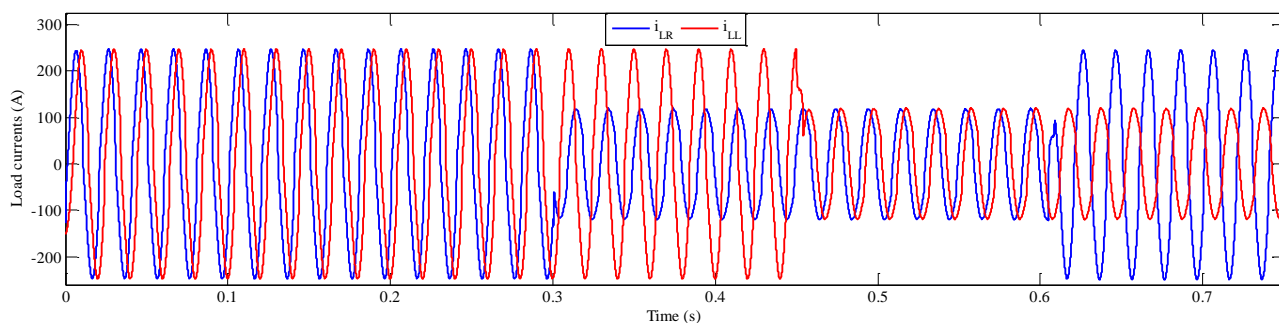
برای ارزیابی عملکرد دینامیکی کنترل‌کننده جریان، سرعت پاسخ‌دهی RPC و اعمال جریان برگشتی قطار، جبران‌سازی در حالت فوق برای چهار مورد شرایط توزیع بار به صورت زیر انجام می‌گیرد:

- هر دو بخش در حالت موتوری

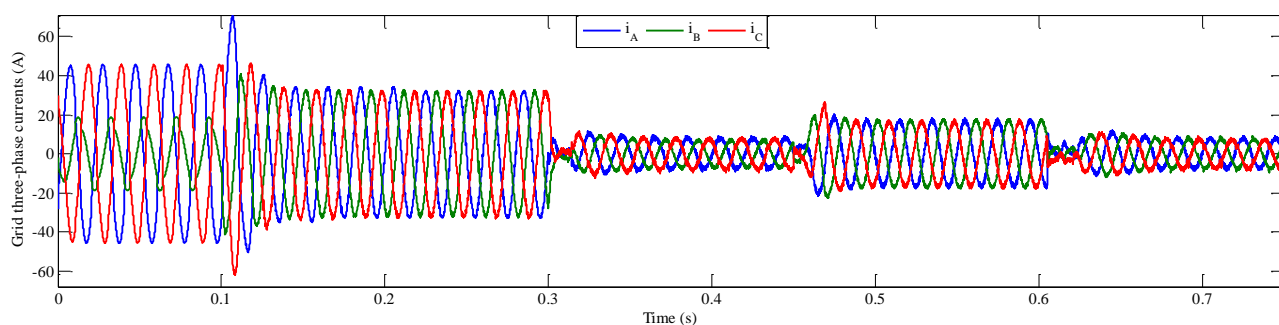
استفاده از جبران‌ساز توان استاتیکی ترکشن AC با در نظر گرفتن اثری ترمز باززایی قطار

منفی جریان (NSC) قبل از روشن شدن RPC مقدار قابل توجهی دارد بطوری‌که شاخص توالی منفی جریان در این حالت برابر ۴۹/۸٪ است. اما پس از روشن شدن RPC توالی منفی کاهش می‌یابد، بطوری‌که نامتعادلی پس از جبران‌سازی کامل به ۰/۶٪ می‌رسد. در ادامه لحظه‌ای که بخش راست به حالت ژنراتوری می‌رود، نامتعادلی به ۲/۷٪ خواهد رسید و لحظه‌ای که دو بخش به حالت ژنراتوری می‌روند، مقدار توالی مثبت جریان (PSC) منفی خواهد شد که نشان از برگشت توان به شبکه قدرت را دارد؛ که نامتعادلی در این حالت برابر با ۱/۲٪ می‌گردد. زمانی که بخش راست به حالت موتوری خود برمی‌گردد، مقدار نامتعادلی جریان برابر با ۲/۶٪ خواهد بود. در نهایت می‌توان گفت جریان‌های سه‌فاز بسیار نزدیک به حالت متقارن و متعادل گشته‌اند.

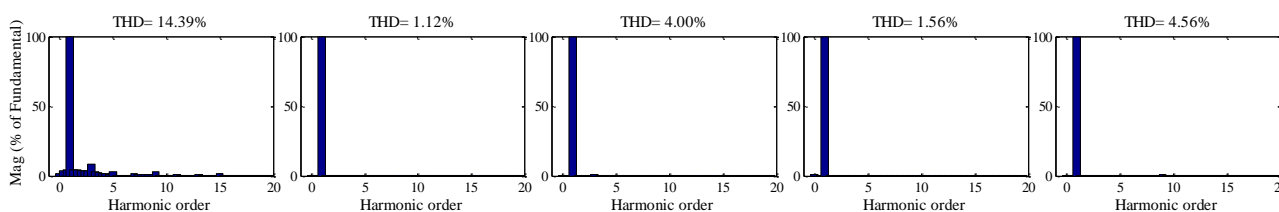
دریافتی از شبکه به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است که به اندازه ۰/۲۵ پریونیت جریان نامی رسیده است. سپس در لحظه ۰/۴۵ ثانیه که هر دو بخش به ناحیه ژنراتوری می‌روند، THD جریان به ۱/۵۶٪ رسیده و دامنه جریان بخش‌ها افزایش می‌یابد که این جریان از سمت پست کشش به سمت شبکه سه‌فاز انتقال پیدا می‌کند؛ یعنی به مقدار ۰/۵ پریونیت جریان نامی به شبکه تزریق می‌نماید. در ادامه در لحظه ۰/۶ ثانیه که بخش راست به حالت موتوری باز می‌گردد، دوباره دامنه جریان کاهش یافته و دامنه جریان دریافتی از شبکه به ۰/۲۵ جریان نامی می‌رسد و THD جریان برابر با ۴/۵۶٪ می‌گردد. بدین ترتیب جبران‌کننده RPC به صورت کاملاً مناسب جبران‌سازی را در پست کشش انجام می‌دهد. توالی مثبت و منفی جریان در شکل (۱۶) نشان داده شده است. از شکل پیداست که توالی



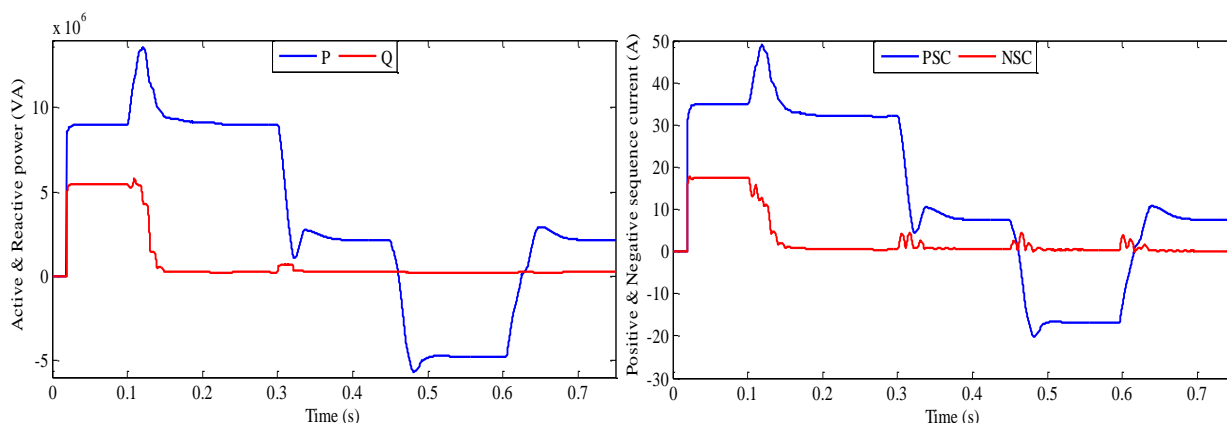
شکل ۱۳. جریان‌های بار ترکشن



شکل ۱۴. جریان‌های سه‌فاز شبکه قدرت در حضور ترانسفورماتور Y11

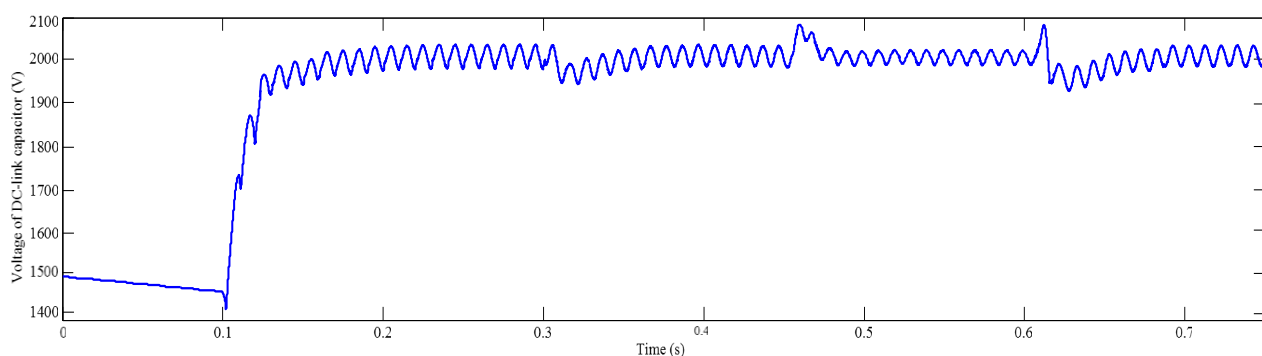


شکل ۱۵. محتوای هارمونیک جریان فاز B در شبکه قدرت (i_B)



شکل ۱۷. توان اکتیو و راکتیو در شبکه سه فاز

شکل ۱۶. توالی مثبت و منفی جریان در شبکه سه فاز



شکل ۱۸. ولتاژ خازن لینک DC در RPC

جدول ۲. نتایج شبیه سازی

پارامترها	بعد از جبران سازی				
	قبل از جبران سازی	بخش <i>a</i> موتوری	بخش <i>a</i> ژنراتوری	بخش <i>a</i> ژنراتوری	بخش <i>a</i> موتوری
THD جریان شبکه (ib)	۱۴/۳۹٪	۱/۱۲٪	۴/۰۰٪	۱/۵۶٪	۴/۵۶٪
ضریب قدرت (PF)	۰/۸۵۴	۰/۹۹۹	۹۹ ۰/۲	۰/۹۹۸	۰/۹۹۲
نامتعادلی جریان (ε)	۴۹/۸٪	۰/۶٪	۲/۷٪	۱/۲٪	۲/۶٪
دامنه جریان شبکه (PU)	+۱	+۱	+۰/۲۵	-۰/۵۰	+۰/۲۵

کنترل مطرح شده کامل و جامع بوده و وابستگی به نوع ترانسفورماتور ندارد و با تغییر در معادلات بار ترکشن و مدل آن، توان از بار به سمت پست کشش منتقل شد. جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی و مقادیر مختلف پارامترها را قبل و بعد از جبران‌سازی نشان می‌دهد. با استفاده از ترمز باززایی مقدار جریان دریافتی از شبکه کاهش یافت و در لحظاتی به آن بازگردانده شده است. مخصوصاً زمانی که هر دو بخش به ناحیه ژنراتوری وارد شدند به مقدار ۰/۵۰ PU توان به شبکه بازگردانده شد که این مقدار از توان قابل توجه است. با این اوصاف راندمان شبکه ترکشن با استفاده از ترمز باززایی به صورت قابل توجهی افزایش یافته است.

۷. پی‌نوشت‌ها

1. Railway static power conditioner
2. Scott
3. Wood bridge
4. Section

۸. مراجع

- Depenbrock, M. and Staudt, V. (1998) "The FBD-method as tool for compensating total nonactive currents," in *Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings. 8th International Conference On*, pp. 320-324.
- Falvo, M., Lamedica, R., Bartoni, R. and Maranzano, G. (2010) "Energy saving in metro-transit systems: impact of braking energy management," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, pp. 1374-1380.
- Gelman, V. (2009) "Braking energy recuperation", *Vehicular Technology Magazine, IEEE, Vol. 4*, pp. 82-89.
- Guiping, Z., Jianye, C. and Xiaoyu, L. (2008) "Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC," in *Industrial Electronics and Applications. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*, pp. 1958-1963.
- Guo, W., Enen, R. and Mingxing, T. (2008) "A hybrid active compensation method for current balance based on Y, d11 connection

با توجه به توان اکتیو و راکتیو موثر شبکه سه‌فاز در شکل (۱۷)، در ابتدا ضریب قدرت از نگاه شبکه برابر ۰/۸۵۴ می‌باشد. این ضریب قدرت پایین نشان‌دهنده این علت است بار ترکشن یک بار تک‌فاز است. پس از روشن شدن RPC، توان راکتیو (Q) کاهش می‌یابد به طوری که ضریب قدرت شبکه به ضریب قدرت ایده‌آل ۰/۹۹۹ می‌رسد. لحظه‌ای که بخش راست به حالت ژنراتوری می‌رود، هر چند که توان اکتیو (P) دریافتی از شبکه نیز کاهش می‌یابد ضریب قدرت شبکه به مقدار ۰/۹۹۲ خواهد رسید. سپس در لحظه‌ای که هر دو بخش به حالت ژنراتوری می‌روند ضریب توان شبکه به ۰/۹۹۸ می‌رسد. لحظه‌ای که بخش راست دوباره به حالت موتوری بازمی‌گردد، ضریب قدرت شبکه به مقدار ۰/۹۹۲ نزدیک می‌شود. در این شکل مشاهده می‌گردد که توان راکتیو توسط RPC تامین می‌شود و عملاً شبکه سه‌فاز هیچ‌گونه توان راکتیوی به پست کشش تحویل نمی‌دهد.

ولتاژ خازن لینک DC در RPC در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در این شکل خازن دارای سطح ولتاژ اولیه ۱۵۰۰ V است. در لحظه‌ای که RPC وارد مدار می‌گردد ولتاژ خازن به آرامی افزایش می‌یابد تا به سطح ولتاژی ماندگار ۲۰۰۰ V برسد که این مدت زمان در کمتر از ۰/۲ ثانیه طول می‌کشد. در لحظاتی که بخش‌های سمت راست و چپ به ناحیه ژنراتوری می‌روند، یک ریپل و اغتشاش در ولتاژ خازن رخ داده که در کمتر از ۰/۰۵ ثانیه به صورت پایدار و ثابت در می‌آید. از عمده‌ترین دلایل این نوسانات می‌توان به انتقال توان اکتیوی اشاره کرد که توسط خازن‌ها صورت گرفته و توالی منفی را حذف می‌کند. به همین دلیل شکل موج‌ها دارای محتوای هارمونیک دوم قابل توجهی می‌باشند. همچنین تزریق مقدار قابل توجهی توان راکتیو توسط مبدل بر ایجاد این نوسانات بی‌تاثیر نخواهد بود. پس می‌توان دریافت که این نوسانات ولتاژ قابل انتظار و غیر قابل حذف اند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم RPC توانست در بدترین شرایط از نظر ضریب قدرت بار و محتوای هارمونیک بالا و نامتعادلی زیاد بهترین عملکرد را نشان دهد و اهداف جبران‌سازی را در کنار قابلیت توان برگشتی قطار برآورده نماید. با توجه به نتایج حاصله برای ترانسفورماتور YA۱۱، مشاهده شد که روش

- Morimoto, H., Ando, M., Mochinaga, Y., Kato, T., Yoshizawa, J. and Gomi, T.,... (2002) "Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen," Power Conversion Conference, PCC Osaka. Proceedings of the, pp. 1108-1111.
- Sirbu, I., Nicolae, P. and Bojoi, R. (2010) "Solution for the power quality improvement in a transportation system", in Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International, pp. T11-32-T11-37.
- Tan, P.-C., Loh, P. C. and Holmes, D. G. (2004) "A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications," Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 19, pp. 1043-1052.
- Terciyanli, A., Acik, A., Cetin, A., Ermis, M., Cadirci, I., Ermis, C.,... (2012) "Power quality solutions for light rail public transportation systems fed by medium-voltage underground cables", Industry Applications, IEEE Transactions, Vol. 48, pp. 1017-1029.
- Uzuka, T., Ikedo, S. and Ueda, K. (2004) "A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway," Power Electronics Specialists Conference, PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, pp. 1869-1873.
- Vasanthi, V. and Ashok, S. (2011) "Harmonic filter for electric traction system," in Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India), 2011 IEEE PES, pp. 282-286.
- Wu, C., Luo, A., Shen, J., Ma, F. J. and Peng, S. (2012) "A negative sequence compensation method based on a two-phase three-wire converter for a high-speed railway traction power supply system," Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 27, pp. 706-717.
- traction transformer", Power Electronics and Intelligent Transportation System, 2008. PEITS'08. Workshop on, pp. 582-586
- Holmes, D. G., Davoodnezhad, R. and McGrath, B. P. (2011) "An improved three phase variable band hysteresis current regulator," in Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th International Conference on, pp. 2274-2281.
- Horita, Y., Morishima, N., Kai, M., Onishi, M., Masui, T. and Noguchi, M. (2010) "Single-phase STATCOM for feeding system of Tokaido Shinkansen," Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International, pp. 2165-2170.
- Joshi P. K. and Bohra, S. S. (2013) "Simulation of single phase Shunt Active Power Filter for domestic non-linear loads," in Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on, pp. 43-48.
- Kalantari, M., Sadeghi, M., Farshad, S. and Fazel, S. (2011) "Modeling and Comparison of Traction Transformers based on the Utilization Factor Definitions," International Review on Modelling and Simulations, Vol. 4., Issue 1, p. 342
- Kulworawanichpong, T. (2004) "Optimizing AC electric railway power flows with power electronic control", Birmingham: University of Birmingham.
- Lee, J., Lee, H. and Kwak, J. (2008) "A study for improvement performance of electric brake for electric train", in Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on, pp. 1345-1348.
- Luo, A., Wu, C., Shen, J., Shuai, Z. and Ma, F. (2011) "Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 26, pp. 2844-2856.