

الله الرحمن الرحيم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت

جبران سازی جریان توالی منفی در سیستم‌های تراکشن راه آهن برقی

نگارنده: محمد عرب احمدی

استاد راهنما:

دکتر مهدی بانژاد

استاد مشاور:

دکتر علی دستفان

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم به

شهدای هشت سال دفاع مقدس

و

شهدای مدافع حرم

تشکر و قدردانی

نخستین سپاس و ستایش از آن خداوندی است که بنده کوچکش را در دریای بیکران اندیشه، قطره‌ای ساخت تا وسعت آن را از دریچه اندیشه‌های ناب آموزگارانی بزرگ به تماشا نشیند. بر خود لازم می‌دانم تا مراتب سپاس را از بزرگواری به جا آورم که اگر دست یاریگرشان نبود هرگز این پایان‌نامه به انجام نمی‌رسید.

سپاس اول را به مهربان‌ترین همراهان زندگی‌ام، پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم که حضورشان در فضای زندگی‌ام مصداق بی‌ریای سخاوت بوده است. از اساتید گران‌قدرم جناب آقایان دکتر مهدی بانژاد و دکتر علی دستفان که زحمت راهنمایی این پایان‌نامه را بر عهده داشتند و همچنین از همه عزیزانی که من را در به سرانجام رسیدن این پایان‌نامه یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و از خداوند منان برای تمامی آن‌ها آرزوی سلامتی و توفیق روز افزون خواستارم.

تعهد نامه

اینجانبمحمد عرب احمدی..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشتهبرق / قدرت..... دانشکدهبرق و رباتیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه جبران سازی جریان توالی منفی در سیستم‌های تراکشن راه آهن برقی.... تحت راهنمایی...دکتر مهدی بانزاد.....متعهد می شوم .

- ♦ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- ♦ در استفاده از نتایج پژوهش محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- ♦ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- ♦ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- ♦ در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- ♦ کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.
- این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- ♦ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

شبکه‌های راه‌آهن برقی به عنوان یک سیستم حیاتی برای حمل و نقل افراد و بارها در سراسر دنیا شناخته می‌شوند. قطارهای برقی به دلیل مزیت‌هایی از قبیل سرعت بیشتر، آلودگی هوای کمتر، قابلیت حمل و نقل سنگین و انبوه، بازده بالاتر، شتاب گیری و ترمز گیری سریع و ... به عنوان جایگزینی مناسب برای انواع دیگر سیستم‌های مرسوم و قدیمی در زمینه حمل و نقل ریلی به شمار می‌آیند. شبکه‌های تراکشن راه‌آهن برقی AC به دلیل ماهیت غیرخطی بارهای خود و تک فاز بودن و استفاده از موتورهای القایی در این بارها، دارای برخی مشکلات کیفیت توان از جمله تزریق هارمونیک‌ها، تولید مقدار قابل توجه ای جریان توالی منفی و مصرف توان راکتیو، در شبکه‌ی سراسری می‌باشند. متداول‌ترین جبران سازهایی که برای بهبود مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن AC کاربرد دارند، جبران سازهای جامع کیفیت توان ریلی می‌باشند که با توجه به ساختارشان با عناوین مختلفی نام برده می‌شوند. از آنجائیکه این جبران‌سازها هر سه مشکل مذکور را به طور همزمان بهبود می‌دهند و از طرف دیگر بارهای تراکشن، بارهایی سنگین برای شبکه قدرت محسوب می‌شوند؛ بنابراین دارای ظرفیت بالایی هستند. در این پایان‌نامه به منظور کاهش ظرفیت این جبران‌سازها و همچنین بهبود شاخص‌های کیفیت توان در سیستم تغذیه راه‌آهن برقی AC، از یک جبران ساز کمکی در کنار جبران ساز اصلی استفاده گردیده است. جبران‌کننده‌ی توان راکتیو استاتیکی (SVC) به عنوان جبران ساز کمکی پیشنهاد شده است تا در کنار جبران ساز اصلی (RPC)، وظیفه‌ی بخشی از جبران سازی را برعهده گیرد. SVC مورد استفاده در این پایان‌نامه از نوع راکتور کنترل شده‌ی تریستوری (TCR) می‌باشد. این سیستم جبران‌کنندگی پیشنهادی، ظرفیت جبران ساز اصلی را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش خواهد داد؛ به گونه‌ای که از این جبران ساز فقط برای متعادل سازی توان اکتیو و حذف هارمونیک‌ها استفاده خواهد شد و توان راکتیو تماماً توسط SVC جبران می‌گردد و در نهایت با کاهش ظرفیت جبران ساز اصلی، هزینه سرمایه گذاری اولیه را پایین می‌آورد. همچنین در این پایان‌نامه اصول ریاضی جبران سازی شاخص‌های کیفیت توان به طور کامل بیان خواهد شد و به کمک تئوری توان لحظه‌ای، جریان‌های مرجع برای جبران ساز استخراج می‌شوند و از روش کلید زنی هیستریزیس جهت ردیابی جریان‌های مرجع استفاده خواهد شد و نیز کنترل‌کننده مناسب برای SVC پیشنهاد می‌گردد و در نهایت با استفاده از شبیه سازی توسط نرم افزار MATLAB/SIMULINK صحت مطالب ارائه شده اثبات خواهد شد.

کلمات کلیدی: راه‌آهن برقی AC، جبران سازهای کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن، جبران‌کننده‌ی توان راکتیو استاتیکی، کنترل‌کننده SVC، کلید زنی هیستریزیس، تئوری توان لحظه‌ای

مقالات مستخرج از پایان نامه:

- [1] M. Arabahmadi, M. Banejad and A. Dastfan, "Hybrid Traction Power Quality Compensation System in Electrified Railway for Nominal Rating Reduction of Three-Phase Converter Power Switches," 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), Feb. 2017
- [2] M. Arabahmadi, M. Banejad and A. Dastfan, "Hybrid Railway Traction Power Quality Compensator for Power Rating Reduction of Converters," Ready to submit in conference

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱ پیشگفتار.....	۲
۲-۱ آشنایی با راه آهن برقی.....	۲
۱-۲-۱ لکوموتیو برقی.....	۲
۲-۲-۱ خط کنتاکت.....	۳
۳-۲-۱ سیستم تغذیه راه آهن برقی.....	۴
۱-۳-۲-۱ سیستم تغذیه ساده.....	۵
۲-۳-۲-۱ سیستم تغذیه همراه با ترانسفورماتور تقویت کننده.....	۶
۳-۳-۲-۱ سیستم تغذیه کابل های هم محور.....	۷
۴-۳-۲-۱ سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور.....	۷
۳-۱ اهداف پایان نامه.....	۱۱
۴-۱ ساختار پایان نامه.....	۱۲
فصل ۲: شاخص های کیفیت توان در شبکه های تراکشن.....	۱۵
۱-۲ مقدمه.....	۱۶
۲-۲ شبکه تغذیه راه آهن برقی پرسرعت.....	۱۶
۱-۲-۲ پست تراکشن.....	۱۸
۲-۲-۲ شبکه تراکشن.....	۱۹
۳-۲-۲ بار راه آهن برقی (بار تراکشن).....	۲۰
۳-۲ مشکلات کیفیت توان در شبکه های تراکشن.....	۲۱
۱-۳-۲ عدم تعادل.....	۲۱
۱-۳-۲ عدم تعادل ولتاژ.....	۲۱
۲-۳-۲ عدم تعادل جریان.....	۲۳
۲-۳-۲ مؤلفه های هارمونیکي.....	۲۴
۳-۳-۲ توان راکتیو.....	۲۷
۴-۲ جمع بندی.....	۲۹
فصل ۳: بررسی انواع روش های موجود جبران سازی در شبکه های تراکشن برقی.....	۳۱
۱-۳ مقدمه.....	۳۲
۲-۳ روش های بهبود عدم تعادل جریان.....	۳۲
۱-۲-۳ استفاده از تکنیک چرخش فاز.....	۳۳

۳۴.....	۲-۲-۳ استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل کننده
۳۵.....	۳-۲-۳ استفاده از ادوات FACTS
۳۷.....	۳-۳ روش‌های کاهش هارمونیک
۳۷.....	۱-۳-۳ فیلترهای پسیو (غیرفعال)
۳۸.....	۲-۳-۳ فیلتر اکتیو (فعال)
۳۸.....	۱-۲-۳-۳ فیلترهای اکتیو سری
۳۹.....	۲-۲-۳-۳ فیلترهای اکتیو موازی
۳۹.....	۳-۲-۳-۳ فیلتر هیبریدی
۴۰.....	۳-۳-۳ روش‌های جبران سازی توان راکتیو
۴۰.....	۴-۳ جبران سازهای جامع کیفیت توان
۴۱.....	۱-۴-۳ بهبوددهنده توان ریلی (RPC)
۴۳.....	۲-۴-۳ جبران ساز اکتیو کیفیت توان (APQC)
۴۴.....	۳-۴-۳ جبران سازی بر اساس مبدل دوفاز سه سیمه
۴۵.....	۴-۴-۳ جبران ساز مبتنی بر مبدل نیم‌پل (HBRPC)
۴۷.....	۵-۴-۳ سیستم جبران ساز هم‌فاز
۴۷.....	۱-۵-۴-۳ شبکه تغذیه هم‌فاز ساده
۴۸.....	۲-۵-۴-۳ شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته
۴۹.....	۶-۴-۳ جبران سازهای هیبریدی (ترکیبی)
۴۹.....	۱-۶-۴-۳ جبران ساز کیفیت توان هیبریدی (HPQC)
۴۹.....	۲-۶-۴-۳ سیستم جبران کننده هیبریدی الکتریکی مغناطیسی (EMHCS)
۵۱.....	۳-۶-۴-۳ جبران ساز کیفیت توان هیبریدی الکتریکی مغناطیسی (HEMPQC)
۵۱.....	۴-۶-۴-۳ جبران ساز هیبریدی کنترل کیفیت توان ریلی (HRPQC)
۵۳.....	۵-۶-۴-۳ بهبوددهنده توان ریلی مبتنی بر مبدل نیم‌پل و سیم‌پیچ جبران کننده (HBWCRPC)
۵۴.....	۵-۳ جمع‌بندی
۵۷.....	فصل ۴ : سیستم جبران کننده هیبریدی HTPQCS
۵۸.....	۱-۴ مقدمه
۵۸.....	۲-۴ ترانسفورماتورهای تراکشن
۶۰.....	۱-۲-۴ مقایسه ترانسفورماتورهای تراکشن
۶۱.....	۲-۲-۴ شاخص توالی منفی
۶۲.....	۱-۲-۲-۴ ترانسفورماتور تک فاز
۶۳.....	۲-۲-۲-۴ ترانسفورماتور V-V
۶۶.....	۳-۲-۲-۴ ترانسفورماتور ستاره- مثلث (YNd11)

۶۸.....	۴-۲-۲-۴ ترانسفورماتورهای متعادل کننده
۶۹.....	۴-۲-۲-۴ ترانسفورماتور اسکات
۷۲.....	۴-۲-۳ ضریب استفاده
۷۵.....	۴-۳ معرفی سیستم جبران ساز HTPQCS
۷۷.....	۴-۳-۱ تئوری و اصول ریاضی جبران سازی
۸۲.....	۴-۳-۲ اصول کنترل جبران کننده ها
۸۳.....	۴-۳-۱ استخراج سیگنال های مرجع جبران سازی
۸۵.....	۴-۳-۲-۱-۱ استخراج سیگنال های مرجع جبران سازی RPC
۸۷.....	۴-۳-۲-۱-۲ استخراج سیگنال های مرجع جبران سازی SVC
۹۰.....	۴-۳-۲-۲ تثبیت ولتاژ لینک DC
۹۲.....	۴-۳-۲-۳ تولید سیگنال آتش
۹۴.....	۴-۴ طراحی پارامترهای SVC
۹۵.....	۴-۵ تحلیل اقتصادی سیستم HTPQCS
۹۷.....	۴-۶ جمع بندی
۹۹	فصل ۵ : شبیه سازی و نتایج
۱۰۰.....	۵-۱ مقدمه
۱۰۰.....	۵-۲ مدل سازی الکتریکی اجزای سیستم
۱۰۰.....	۵-۲-۱ شبکه قدرت و ترانسفورماتور تراکشن
۱۰۰.....	۵-۲-۲ بار تراکشن
۱۰۱.....	۵-۲-۳ سیستم HTPQCS
۱۰۱.....	۵-۲-۳-۱ مدار قدرت SVC
۱۰۲.....	۵-۲-۳-۲ مدار قدرت RPC
۱۰۴.....	۵-۳ شبیه سازی و تحلیل نتایج
۱۰۴.....	۵-۳-۱ شبیه سازی شبکه تراکشن بدون جبران ساز
۱۰۸.....	۵-۳-۲ شبیه سازی شبکه تراکشن با حضور جبران ساز RPC
۱۱۳.....	۵-۳-۳ شبیه سازی شبکه تراکشن با سیستم جبران ساز HTPQCS
۱۱۳.....	۵-۳-۳-۱ تحلیل نتایج مربوط به شاخص های کیفیت توان
۱۱۷.....	۵-۳-۳-۲ تحلیل نتایج مربوط به کاهش نرخ توان RPC
۱۲۰.....	۵-۴ جمع بندی
۱۲۱.....	فصل ۶ : نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۲.....	۶-۱ نتیجه گیری

۱۲۳..... ۲-۶ پیشنهادات

۱۲۵..... منابع و مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱) سیستم تغذیه الکتریکی ساده ۵
- شکل (۲-۱) سیستم تغذیه همراه با ترانسفورماتور تقویت‌کننده ۶
- شکل (۳-۱) ساختار تغذیه اتو ترانسفورماتوری ۷
- شکل (۴-۱) نمونه‌ای از منحنی جریان بار تراکشن بر حسب زمان ۱۰
- شکل (۱-۲) نمای کلی سیستم تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت ۱۷
- شکل (۲-۲) دیاگرام تک خطی پست تراکشن برای یک مسیر دو خطه ۱۸
- شکل (۳-۲) شبکه تراکشن با یک پست جداساز بین هر پست تراکشن و پست‌های موازی ساز ۲۰
- شکل (۴-۲) مدار الکتریکی لکوموتیو با پل دیودی ۲۴
- شکل (۵-۲) تغذیه پست تراکشن با ترانسفورماتور تک فاز ۲۸
- شکل (۱-۳) استفاده از تکنیک چرخش فاز در پست‌های تراکشن برای ترانسفورماتور V-V ۳۴
- شکل (۲-۳) استفاده از تکنیک چرخش فاز در پست‌های تراکشن برای ترانسفورماتورهای YD5 و YD11 ۳۴
- شکل (۳-۳) مدار الکتریکی جبران سازی جریان توالی منفی بر طبق قانون اشتاین متر ۳۶
- شکل (۴-۳) دیاگرام فازوری مربوط به مدار الکتریکی شکل (۳-۳) ۳۶
- شکل (۵-۳) اتصال SVC در سمت فشارقوی پست تراکشن ۳۷
- شکل (۶-۳) (الف) نحوه اتصال فیلتر اکتیو سری به شبکه (ب) نحوه اتصال فیلتر اکتیو موازی به شبکه ۳۹
- شکل (۷-۳) استفاده از فیلتر هیبرید در شبکه راه‌آهن برقی ۴۰
- شکل (۸-۳) ساختار بهبوددهنده توان ریلی ۴۲
- شکل (۹-۳) بهبوددهنده توان ریلی (RPC) در ساختار ترانسفورماتوری V-V ۴۳
- شکل (۱۰-۳) ساختار جبران‌کننده اکتیو کیفیت توان (APQC) ۴۴
- شکل (۱۱-۳) ساختار جبران ساز دوفاز سه سیمه ۴۵
- شکل (۱۲-۳) جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل نیم پل (HBRPC) ۴۶
- شکل (۱۳-۳) جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل‌های نیم پل با ترانسفورماتور تراکشن V-V ۴۷
- شکل (۱۴-۳) ساختار شبکه تغذیه هم‌فاز ساده به همراه شبکه تغذیه متداول ۴۸
- شکل (۱۵-۳) ساختار شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته ۴۸
- شکل (۱۶-۳) ساختار HPQC در شبکه تغذیه هم‌فاز ۵۰
- شکل (۱۷-۳) جبران ساز هیبریدی مغناطیسی الکتریکی (EMHCS) ۵۰
- شکل (۱۸-۳) ساختار جبران ساز MCR ۵۱
- شکل (۱۹-۳) جبران ساز کیفیت توان هیبریدی الکتریکی مغناطیسی (HEMPQC) ۵۲
- شکل (۲۰-۳) جبران ساز هیبریدی کنترل کیفیت توان ریلی (HRPQC) ۵۲
- شکل (۲۱-۳) ساختار جبران ساز HBWCRPC ۵۴

- شکل (۱-۴) نحوه اتصال ترانسفورماتور تراکشن نوعی به شبکه تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت ۶۱
- شکل (۲-۴) اتصال ترانسفورماتور تک فاز در پست تراکشن ۶۳
- شکل (۳-۴) اتصال ترانسفورماتور V-V در پست تراکشن ۶۴
- شکل (۴-۴) ترانسفورماتور با اتصال V-V (الف) نحوه اتصال سیم‌پیچ‌ها (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان ۶۵
- شکل (۵-۴) اتصال ترانسفورماتور YND11 در پست تراکشن ۶۶
- شکل (۶-۴) ترانسفورماتور ستاره-مثلث (الف) نحوه اتصال سیم‌پیچ‌ها (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان ۶۷
- شکل (۷-۴) اتصال ترانسفورماتور اسکات در پست تراکشن ۶۹
- شکل (۸-۴) ترانسفورماتور اسکات (الف) ساختار ترانسفورماتور (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان ۷۰
- شکل (۹-۴) ساختار پست تراکشن با ترانسفورماتور V-V و سیستم جبران سازی HTPQCS ۷۶
- شکل (۱۰-۴) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور تراکشن قبل از جبران سازی ۷۹
- شکل (۱۱-۴) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور بعد از متعادل سازی توان اکتیو ۸۰
- شکل (۱۲-۴) نحوه برابر شدن جریان‌های بار سمت ثانویه ترانسفورماتور تراکشن توسط RPC ۸۱
- شکل (۱۳-۴) دیاگرام جریان و ولتاژ ترانسفورماتور تراکشن بعد از جبران سازی کامل ۸۲
- شکل (۱۴-۴) تولید جریان مرجع جهت جبران سازی کامل کیفیت توان ۸۷
- شکل (۱۵-۴) SVC نوع TCR-FC ۸۷
- شکل (۱۶-۴) نحوه استخراج مؤلفه راکتیو بار از جریان لحظه‌ای ۸۹
- شکل (۱۷-۴) تولید جریان مرجع برای SVC‌های بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن ۸۹
- شکل (۱۸-۴) نحوه کنترل ولتاژ لینک DC با استفاده از کنترل‌کننده PI ۹۱
- شکل (۱۹-۴) ساختار و نحوه عملکرد کنترل‌کننده جریان هیستریزیس ۹۲
- شکل (۲۰-۴) کنترل‌کننده جامع RPC ۹۳
- شکل (۱-۵) مدل الکتریکی بار تراکشن ۱۰۱
- شکل (۲-۵) مدار قدرت SVC نوع TCR-FC ۱۰۲
- شکل (۳-۵) مدار قدرت RPC ۱۰۲
- شکل (۴-۵) منحنی جریان بارها در دو طرف پست تراکشن ۱۰۵
- شکل (۵-۵) منحنی جریان‌های سه‌فاز شبکه ۱۰۵
- شکل (۶-۵) جریان‌های توالی مثبت و منفی سمت شبکه سه‌فاز ۱۰۶
- شکل (۷-۵) منحنی ولتاژهای سه‌فاز سمت اولیه ترانسفورماتور V-V ۱۰۶
- شکل (۸-۵) منحنی ولتاژ بارها سمت ثانویه ترانسفورماتور V-V ۱۰۷
- شکل (۹-۵) وضعیت هارمونیک بار بخش شمالی پست تراکشن ۱۰۷
- شکل (۱۰-۵) وضعیت هارمونیک بار بخش جنوبی پست تراکشن ۱۰۸
- شکل (۱۱-۵) وضعیت هارمونیک جریان فاز C در سمت شبکه سه‌فاز بعد از اتصال هر دو بار ۱۰۸
- شکل (۱۲-۵) جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور تراکشن ۱۰۹

- شکل (۱۳-۵) جریان‌های اولیه ترانسفورماتور تراکشن..... ۱۱۰
- شکل (۱۴-۵) جریان‌های جبران‌سازی برای مبدل‌های فاز A و B..... ۱۱۱
- شکل (۱۵-۵) ولتاژ لینک DC جبران ساز RPC..... ۱۱۲
- شکل (۱۶-۵) جریان‌های توالی مثبت و منفی سمت شبکه سه‌فاز قبل و بعد از جبران‌سازی..... ۱۱۲
- شکل (۱۷-۵) هارمونیک‌های سمت اولیه ترانسفورماتور بعد از وصل RPC و در حضور هر دو بار..... ۱۱۳
- شکل (۱۸-۵) جریان‌های سمت اولیه ترانسفورماتور در حضور جبران ساز HTPQCS..... ۱۱۴
- شکل (۱۹-۵) جریان مبدل‌های سیستم جبران ساز RPC..... ۱۱۵
- شکل (۲۰-۵) جریان‌های توالی منفی و مثبت قبل و بعد از ورود RPC و SVC..... ۱۱۶
- شکل (۲۱-۵) ولتاژ لینک DC جبران ساز RPC در سیستم HTPQCS..... ۱۱۶
- شکل (۲۲-۵) وضعیت هارمونیک‌ها در سمت اولیه ترانسفورماتور برای فاز A..... ۱۱۷
- شکل (۲۳-۵) جریان جبران ساز SVC مربوط به بخش شمالی..... ۱۱۷
- شکل (۲۴-۵) توان راکتیو انتقالی از مبدل‌های RPC قبل و بعد از اتصال SVC..... ۱۱۸
- شکل (۲۵-۵) توان ظاهری انتقالی از مبدل‌های RPC قبل و بعد از اتصال SVC..... ۱۱۹

فهرست جداول

- جدول (۱-۱) ولتاژهای مجاز برای سیستم تغذیه برق راه آهن بر طبق استاندارد BS EN 50163 ۴
- جدول (۲-۱) سیستم تغذیه الکتریکی ساده و سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور ۸
- جدول (۱-۲) ظرفیت اتصال کوتاه سیستم برای سطوح مختلف ولتاژ بر طبق استاندارد IEC60909 ۱۷
- جدول (۲-۲) حدود مجاز عدم تعادل ولتاژ مطابق با استاندارد شرکت توانیر ۲۳
- جدول (۳-۲) حدود مجاز عدم تعادل جریان مطابق با استاندارد شرکت توانیر ۲۳
- جدول (۴-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک ولتاژ ۲۵
- جدول (۵-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک های جریان در شبکه های (۱۲۰V تا ۶۹KV) ۲۶
- جدول (۶-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک های جریان در شبکه های (۶۹KV تا ۱۶۱KV) ۲۶
- جدول (۷-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک های جریان در شبکه های (بالا تر از ۱۶۱KV) ۲۶
- جدول (۱-۴) مقایسه انواع ترانسفورماتورهای تراکشن رایج از لحاظ شاخص توالی منفی جریان ۷۲
- جدول (۲-۴) مقایسه اتصال های رایج ترانسفورماتورهای تراکشن بر حسب ضریب استفاده از ترانسفورماتور و خط انتقال ۷۴
- جدول (۱-۵) پارامترهای شبیه سازی ۱۰۳
- جدول (۲-۵) خلاصه عملکرد شبکه تراکشن بدون جبران ساز و در حضور جبران سازهای RPC و HTPQCS ۱۱۹

فصل ۱ :

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

راه آهن برقی از سیستم‌های حمل و نقل سریع و سازگار با محیط زیست به شمار می‌آید که در اوایل قرن بیستم میلادی شروع به توسعه نموده است و به دلیل مزیت‌هایی از جمله آلودگی هوای کمتر، قابلیت حمل و نقل انبوه و سنگین و بازده بالاتر در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است [۱]. رشد جمعیت باعث افزایش تقاضا برای سفرهای برون شهری شده است. شبکه‌های حمل و نقل مرسوم همچون گذشته قادر به پاسخ‌گویی به این تقاضا نمی‌باشند و همچنین افزایش قیمت سوخت سبب گردیده است که سفر کردن به شکل متعارف برای مصرف‌کننده گران تمام شود. در همین حال نگرانی‌های جهانی در مورد تغییر آب و هوای کره زمین سبب افزایش فشار بر سیاستمداران برای بهینه‌سازی انرژی و همچنین افزایش تقاضا برای حمل و نقلی ایمن، کارآمد و مقرون به صرفه شده است.

توجه روز افزون به کاهش آلودگی هوای کلان‌شهرها، مسئولین حمل و نقل شهری را به استفاده از سامانه‌های مدرن مثل متروها و اتوبوس‌های برقی داخل شهری تشویق می‌سازد. همچنین حجم زیاد ترافیک بین کلان‌شهرها، مسئولین حمل و نقل بین شهری در دنیا را تشویق به احداث سیستم حمل و نقلی می‌کند که قادر باشد حجم بیشتری از مسافری را در زمان کوتاه‌تر و با هزینه کمتری جابه‌جا نماید. بنابراین برای مسافت‌های طولانی‌تر با احداث خطوط ریلی پر سرعت می‌توان حجم بیشتری از مسافری را با سرعت بیشتری در مقایسه با سایر روش‌های حمل و نقل عمومی، بین شهرهای بزرگ جا به جا کرد.

۱-۲ آشنایی با راه آهن برقی

۱-۲-۱ لکوموتیو برقی

الکتروموتورهای محرکه در لکوموتیو برقی، انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را به جای دریافت از دیزل ژنراتور داخل لکوموتیو (در لکوموتیوهای غیر برقی) از یک مدار الکتریکی نصب شده در بیرون از لکوموتیو، دریافت می‌کنند. در لکوموتیو برقی الکتروموتورهای محرکه از یک سر به چرخ‌ها و از سر

دیگر به دستگاهی به نام پانتوگراف متصل می‌شوند. پانتوگراف دستگاهی است که در زیر یا بالای لکوموتیو برقی قرار داشته و در هر سرعتی، قطار می‌تواند اتصال الکتریکی خود را با یک هادی یا سیم برق نگه داشته و از آن جدا نشود. چرخ‌ها و پانتوگراف لکوموتیو برقی با اتصال به مدار تغذیه می‌توانند انرژی الکتریکی را در هر سرعتی دریافت کنند.

۱-۲-۲ خط کنتاکت

مدار تغذیه راه‌آهن برقی مانند هر مدار تغذیه الکتریکی دیگری از دو هادی جدا از هم تشکیل می‌شود. در راه‌آهن‌های برقی یکی از این هادی‌ها را ریل اصلی و هادی دیگر آن را یک ریل سوم که در کنار ریل‌های اصلی کشیده می‌شود، قرار می‌دهند. ریل‌های اصلی و ریل سوم به عنوان مدار تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی به منبع برق یعنی پست تراکشن^۱ متصل می‌گردد. با قرار گرفتن چرخ‌های لکوموتیو برقی بر روی ریل‌های اصلی و پانتوگراف بر روی ریل سوم مدار برقرار می‌شود و بدین گونه لکوموتیو برقی انرژی الکتریکی خود را از پست تراکشن دریافت می‌کند. در راه‌آهن برقی مدار تغذیه الکتریکی را خط کنتاکت می‌نامند و هر خط کنتاکت برای ولتاژ و جریان الکتریکی مشخصی طراحی می‌شود. در خط کنتاکت ریل سوم، با افزایش ترافیک قطارها جریان الکتریکی مدار زیادتر شده و باید پست‌های تراکشن در فواصل کوتاه‌تر از همدیگر نصب شوند و یا سطح ولتاژ مدار بالاتر انتخاب گردد. کوتاه‌تر شدن فواصل پست‌های تراکشن تعداد آن‌ها را افزایش داده و اقتصادی نخواهد بود و افزایش سطح ولتاژ مدار به دلیل آنکه ریل سوم بر روی زمین قرار دارد و در دسترس عموم می‌باشد و ولتاژ آن برای جان افراد خطرناک است، امکان‌پذیر نیست. در تلاش برای حل این معضل سیم‌کشی هوایی در بالای محور ریل‌های اصلی ابداع گردید و خط کنتاکت ریل سوم به خط کنتاکت هوایی تبدیل شده و خط کنتاکت بالاسری نام گرفت. در خط کنتاکت بالاسری، پانتوگراف لکوموتیو برقی در سقف آن قرار دارد. در راه‌آهن‌های شهری و بین شهری از خط کنتاکت بالاسری و در راه‌آهن‌های زیرزمینی (مترو) از ریل سوم به عنوان خط کنتاکت، استفاده می‌گردد؛ زیرا در راه‌آهن‌های زیرزمینی خط کنتاکت در دسترس عموم قرار ندارد.

^۱ Traction Substation

۳-۲-۱ سیستم تغذیه راه آهن برقی

شبکه‌های راه آهن برقی به طور کلی به دو دسته شبکه‌های درون شهری و شبکه‌های برون شهری طبقه‌بندی می‌شوند. شبکه‌های درون شهری معمولاً از ولتاژ DC و شبکه‌های برون شهری از ولتاژ AC تغذیه می‌شوند [۲]. در این پایان‌نامه، تمرکز بر روی سامانه حمل و نقل ریلی برون شهری است که اغلب از سیستم تغذیه AC استفاده می‌کنند. برخی از تمایزهای بین سیستم AC و DC در زیر بیان شده است.

❑ تعداد پست‌های تراکشن مورد نیاز در خطوط راه آهن برقی با سیستم AC کمتر از سیستم DC است.

❑ سیستم AC اثرات تداخلی مزاحم و شدیدتری نسبت به سیستم DC بر روی خطوط ارتباطات و علائم می‌گذارد.

❑ در سیستم AC نسبت به DC تدابیر ویژه‌ای برای مسیر جریان برگشت نیاز است. این کار به خاطر زیاد بودن امپدانس شبکه در سیستم AC است.

برخی از ولتاژهای مجاز بر طبق استاندارد BS EN 50163 برای ولتاژهای AC و DC در سیستم تغذیه برق راه آهن برقی متعارف و پرسرعت در جدول (۱-۱) آورده شده است.

جدول (۱-۱) ولتاژهای مجاز برای سیستم تغذیه برق راه آهن بر طبق استاندارد BS EN 50163 [۲]

ردیف	نوع سیستم تغذیه	کمترین ولتاژ غیر دائمی	کمترین ولتاژ دائمی	ولتاژ نامی	بیشترین ولتاژ دائمی	بیشترین ولتاژ غیر دائمی
۱	۶۰۰ ولت DC	۴۰۰ ولت	۴۰۰ ولت	۶۰۰ ولت	۷۲۰ ولت	۸۰۰ ولت
۲	۷۵۰ ولت DC	۵۰۰ ولت	۵۰۰ ولت	۷۵۰ ولت	۹۰۰ ولت	۱۰۰۰ ولت
۳	۱۵۰۰ ولت DC	۱۰۰۰ ولت	۱۰۰۰ ولت	۱۵۰۰ ولت	۱۸۰۰ ولت	۱۹۵۰ ولت
۴	۳۰۰۰ ولت DC	۲۰۰۰ ولت	۲۰۰۰ ولت	۳۰۰۰ ولت	۳۰۰۰ ولت	۳۰۰۰ ولت
۵	۱۵ کیلوولت AC ۱۶.۷ هرتز	۱۱ کیلوولت	۱۲ کیلوولت	۱۵ کیلوولت	۱۷.۲۵ کیلوولت	۱۸ کیلوولت
۶	۲۵ کیلوولت AC ۵۰ هرتز	۱۷.۵ کیلوولت	۱۹ کیلوولت	۲۵ کیلوولت	۲۷.۵ کیلوولت	۲۹ کیلوولت

در حالت کلی چهار نوع سیستم الکتریکی برای تأمین برق مورد نیاز قطار در دسترس است که عبارت‌اند از [۳]:

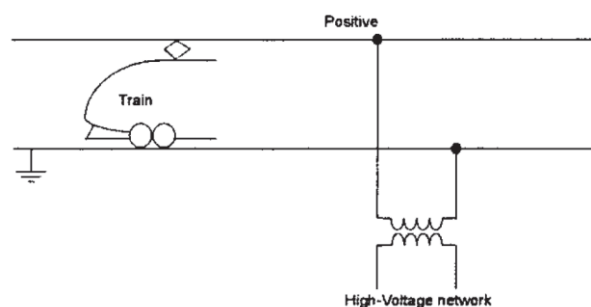
- (۱) سیستم تغذیه DC
 - (۲) سیستم تغذیه AC در فرکانس غیر قدرت
 - (۳) سیستم تغذیه AC در فرکانس قدرت
 - (۴) ترکیبی از سیستم تغذیه DC و AC
- برای تغذیه قطارهای پرسرعت از سیستم تغذیه AC در فرکانس قدرت استفاده می‌شود.

سیستم تغذیه AC در فرکانس قدرت خود به چهار دسته تقسیم می‌شود [۳]:

- (۱) سیستم تغذیه ساده یا مستقیم
- (۲) سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور
- (۳) سیستم تغذیه همراه با ترانسفورماتور تقویت‌کننده^۱
- (۴) سیستم تغذیه کابل‌های هم محور^۲

۱-۳-۲-۱ سیستم تغذیه ساده

این سیستم که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است، اولین نوع سیستم تغذیه قطارهای برقی می‌باشد. در این سیستم قیمت تمام‌شده سیستم برقی کمتر از سایر روش‌ها بوده، لیکن در این ساختار مشکل تداخل امواج القایی^۳ روی کابل‌های مخابراتی و افزایش پتانسیل ریل وجود دارد.

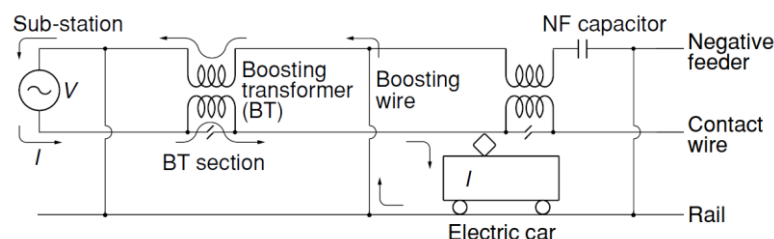


شکل (۱-۱) سیستم تغذیه الکتریکی ساده [۴]

^۱ Booster Transformer
^۲ Coaxial Cable
^۳ Inductive Interference

۲-۳-۲-۱ سیستم تغذیه همراه با ترانسفورماتور تقویت کننده

ترانسفورماتور تقویت کننده در واقع یک ترانسفورماتور ساده با نسبت تبدیل یک به یک است که اولیه آن با هادی رفت شبکه بالاسری و ثانویه آن با هادی برگشت سری می شود. به این ترتیب سیم پیچ ثانویه با ایجاد ولتاژ با فاز و دامنه مناسب در مسیر برگشت، جریانی برابر و در جهت عکس مسیر رفت ایجاد می کند تا ضمن جلوگیری از نشت جریان به زمین اطراف ریل، طبق قوانین الکترومغناطیسی این جریان سبب خنثی کردن میدان ناشی از جریان هادی رفت نیز شود. امروزه استفاده از این سیستم تغذیه در دنیا تقریباً منسوخ شده است؛ زیرا در قسمت های نصب ترانسفورماتور تقویت کننده، سیم تماس احتیاج به عایق کاری بالایی دارد و همچنین هنگام عبور قطار از محل نصب ترانسفورماتور تقویت کننده به دلیل وجود فاصله هوایی یک جرقه شدید زده می شود که می تواند منجر به افت ولتاژ شود و در نتیجه برای قطارهای پرسرعت که نیاز به جریان های بالایی دارند این سیستم مناسب نیست. در این سیستم نیاز به محل هایی به نام پست ترانسفورماتور تقویت کننده می باشد که در فواصل معینی از یکدیگر قرار گرفته اند (تقریباً هر ۴ km) [۵]. این روش تغذیه صرفاً در مکان هایی بکار گرفته می شود که پدیده تداخل امواج القایی مشکل زا باشد. به جز این مورد، این سیستم هیچ مزیتی نداشته و از نظر مخارج نیز به دلیل اضافه شدن ترانسفورماتور تقویت کننده و پیچیده شدن ساختار شبکه بالاسری، پرهزینه بوده و به طور کلی امپدانس کل رفت و برگشت نیز افزایش یافته و به همین دلیل فاصله بین پست های تراکشن در مقایسه با سیستم ساده، کاهش و تعداد کل پست های تراکشن در طول مسیر افزایش می یابد. نمونه این سیستم در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. خازن نشان داده شده در این شکل برای کاهش راکتانس خط، کاهش شدت جرقه و در نتیجه کاهش افت ولتاژ قرار داده شده است.



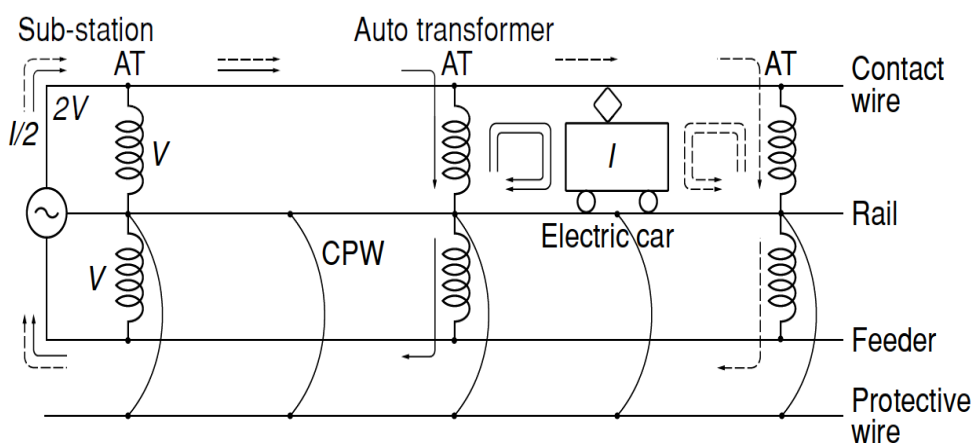
شکل (۲-۱) سیستم تغذیه همراه با ترانسفورماتور تقویت کننده [۶]

۳-۳-۲-۱ سیستم تغذیه کابل‌های هم محور

سیستم تغذیه کابل هم محور نیز یک سیستم تغذیه بسیار گران است. از این سیستم تغذیه تنها در تونل‌های بعضی از خطوط پرسرعت شینکansen^۱ استفاده شده است [۵].

۴-۳-۲-۱ سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور

در سیستم تغذیه اتو ترانسفورماتوری ولتاژ خروجی پست تراکشن به جای ۲۵ kV، ۵۰ kV بوده و این ولتاژ وارد یک اتو ترانسفورماتور با سر وسط، که سر وسط آن به ریل وصل شده است، می‌شود و در خروجی اتو ترانسفورماتور دو سطح ولتاژ ۲۵ kV+ و ۲۵ kV- حاصل می‌گردد که سطح ولتاژ ۲۵ kV+ برای تغذیه شبکه بالاسری استفاده می‌شود. بنابراین می‌توان تصور نمود هرچند شبکه بالاسری به ولتاژ ۲۵ kV متصل است اما در حقیقت از یک منبع ولتاژ ۵۰ kV تغذیه می‌نماید، بدین جهت با صرف نظر کردن از بعضی موارد الکتریکی، تقریباً مقدار جریان کلی از منبع ولتاژ، نصف حالت تغذیه‌ی ساده با ولتاژ ۲۵ kV است. بنابراین مقدار افت ولتاژ کمتر بوده و می‌توان فواصل بین پست‌های تراکشن را افزایش داد. سیستم اتو ترانسفورماتوری یکی از سیستم‌هایی است که برای جبران اثر تداخل امواج القایی استفاده می‌شود. در این سیستم نیاز به محلی به نام پست اتو ترانسفورماتور برای نصب تجهیزات آن است که در فواصل مشخصی از یکدیگر قرار گرفته‌اند. آرایش سیستم تغذیه اتو ترانسفورماتوری در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱) ساختار تغذیه اتو ترانسفورماتوری [۶]

^۱ Shinkansen

سیستم خطوط ریلی پرسرعت در حال سرویس دهی در نقاط مختلف دنیا از هر دو سیستم تغذیه AC ساده (۲۵-۱۵ kV) و سیستم تغذیه AC همراه با اتو ترانسفورماتور (۲×۲۵ kV) استفاده می کنند. سیستم تغذیه الکتریکی همراه با اتو ترانسفورماتور به دلیل مزایای متعددی که نسبت به سیستم تغذیه الکتریکی ساده دارد؛ به عنوان یک سیستم تغذیه الکتریکی استاندارد برای خطوط ریلی پرسرعت شناخته شده است و تقریباً تمامی خطوط در حال طراحی و خطوطی که در آینده نزدیک مورد بهره برداری قرار می گیرند از این سیستم تغذیه استفاده می کنند [۶]. جدول (۱-۲) به مقایسه سیستم تغذیه الکتریکی AC همراه با اتو ترانسفورماتور (۲×۲۵ kV) و سیستم تغذیه الکتریکی AC ساده (۱×۲۵ kV) پرداخته است. همان طور که مشاهده می شود سیستم تغذیه ۲×۲۵ kV به دلیل استفاده از اتو ترانسفورماتور در طول مسیر خود نسبت به سیستم تغذیه الکتریکی ساده (۱×۲۵ kV) گران تر است ولی از لحاظ مشخصه های الکتریکی مانند افت ولتاژ، تلفات، جریان خط و ... در سطح مطلوب تری به سر می برد و همچنین در این سیستم فاصله بین دو پست تراکشن مجاور هم نسبت به سیستم تغذیه الکتریکی ساده بیشتر است و بنابراین به تعداد پست تراکشن کمتری نیاز دارد.

جدول (۱-۲) سیستم تغذیه الکتریکی ساده و سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور [۶]

ردیف	پارامتر	۲×۲۵ kV	۱×۲۵ kV
۱	ولتاژ پانتوگراف	۲۵ kV	۲۵ kV
۲	افت ولتاژ خط*	$\approx \frac{\Delta V}{3}$	ΔV
۳	جریان خط	$\frac{I}{2}$	I
۴	تلفات RI^2	$\frac{W}{4}$	W
۵	فاصله تقریبی بین پست های تراکشن	۴۰-۸۰ km	۲۵-۳۰ km
۶	فاصله تقریبی اتو ترانسفورماتورها	۱۰-۱۵ km	اتو ترانسفورماتور ندارد
۷	ظرفیت تقریبی پست های تراکشن	۲×۴۰ MVA	۲×۲۰ MVA
۸	ظرفیت تقریبی اتو ترانسفورماتورها	۱۰-۲۰ MVA	اتو ترانسفورماتور ندارد
۹	تداخلات EMI و EMF	پایین	بالا
۱۰	تلفات انرژی	متوسط	بالا
۱۱	هزینه راه اندازی اولیه	بالا	متوسط
۱۲	هزینه تعمیر و نگهداری	بالا	متوسط

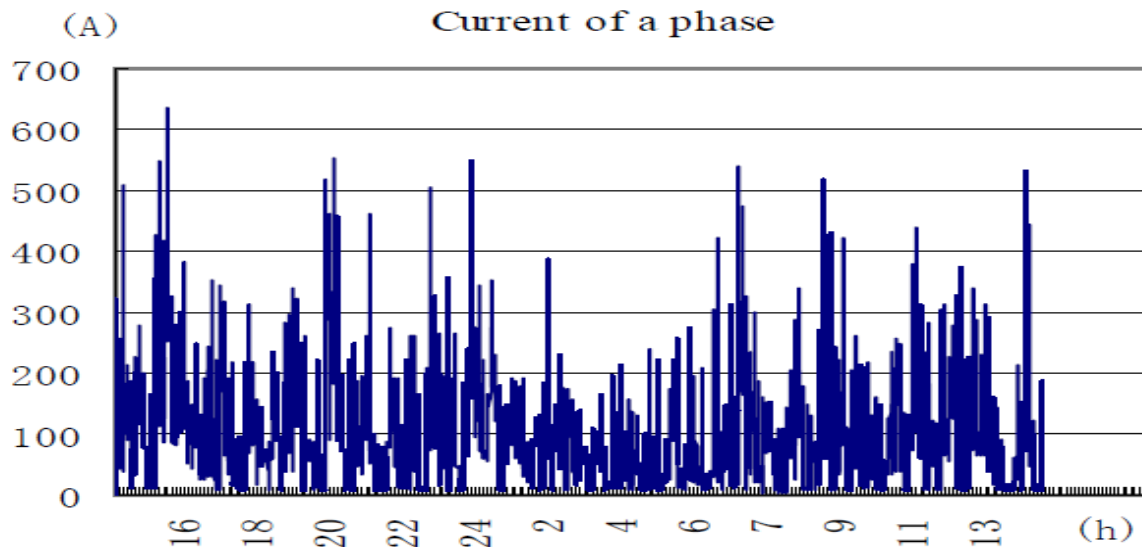
* اگر حداکثر افت ولتاژ برای سیستم تغذیه ساده برابر ΔV در نظر گرفته شود، این مقدار افت ولتاژ برای سیستم تغذیه همراه با اتو ترانسفورماتور برابر $\Delta V/3$ است.

با توجه به سنگین بودن بارهای تراکشن و در نتیجه بالا بودن ظرفیت پست‌های تراکشن راه‌آهن برقی پرسرعت، شبکه قدرت در محل اتصال این پست‌ها (PCC^1) باید از ظرفیت اتصال کوتاه بسیار بالایی برخوردار باشد. عموماً شبکه تغذیه قطارهای پرسرعت انرژی مورد نیاز خود را از خطوط انتقال با سطح ولتاژ $132kV$ و بالاتر (معمولاً $500kV-200kV$) دریافت می‌کنند [۷، ۸]، بنابراین بارهای تراکشن، بارهایی حساس برای شبکه سراسری محسوب می‌شوند و هرگونه اختلال در این سیستم‌ها موجب بروز اغتشاشات و مشکلات زیادی در شبکه و سایر مصرف‌کننده‌های مجاور خواهد شد.

بار تراکشن از نظر رفتار دینامیکی و استاتیکی با بارهای صنعتی معمولی تفاوت بسیاری دارد. متغیر بودن اندازه و محل بار با زمان که منجر به تغییرات ولتاژ در سیستم می‌شود، تغذیه بار به صورت تک فاز که سبب تزریق مقدار زیادی مؤلفه منفی جریان به شبکه قدرت می‌گردد، مصرف زیاد توان راکتیو به علت وجود موتورهای القایی و انتشار حجم بالای هارمونیک‌های جریان از مهم‌ترین ویژگی‌های بارهای تراکشن هستند. تأثیر تک فاز بودن بار تراکشن بر روی شبکه قدرت به گونه‌ای است که در بعضی موارد ضریب توان شبکه را خود به تنهایی و با فرض واحد بودن ضریب توان بار مصرفی تا مقدار 0.86 کاهش می‌دهد [۹].

شکل (۱-۴) نشان‌دهنده مقدار مؤثر جریان یک‌بار تراکشن نوعی بر حسب زمان می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان تغییرات جریان بار تراکشن در مقایسه با سایر بارهای صنعتی بسیار زیاد است و با توجه به تک فاز بودن این بارها، مؤلفه توالی منفی زیادی به شبکه قدرت تزریق می‌شود. مؤلفه توالی منفی جریان بر روی تجهیزات شبکه قدرت تأثیر نامطلوبی می‌گذارد، از جمله اینکه تلفات توان در تجهیزات و فیدر مربوطه افزایش می‌یابد، بازده، عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها کاهش می‌یابد و عملکرد سیستم‌های حفاظتی مختل می‌شود. بنابراین مؤلفه منفی جریان و هارمونیک‌ها باید تا حد امکان کاهش یابد تا امنیت و پایداری شبکه بهبود یابد.

¹ Point of Common Coupling



شکل (۴-۱) نمونه‌ای از منحنی جریان بار تراکشن بر حسب زمان [۱۱]

در سال‌های اخیر، مطالعات و تحقیقات زیادی برای غلبه بر مشکلات مذکور صورت پذیرفته و روش‌های مختلفی به منظور بهبود کیفیت توان در شبکه تراکشن معرفی شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان به دو گروه کلی استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های استاتیکی قابلیت جبران سازی به صورت لحظه‌ای را ندارند و بنابراین به هزینه اولیه کمتری نیاز دارند؛ همچنین دارای پیچیدگی کمتری نسبت به روش‌های دینامیکی هستند. استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده و همچنین استفاده از تکنیک چرخش فاز^۱ از مهم‌ترین روش‌های استاتیکی جهت کاهش جریان توالی منفی است [۱۰، ۱۱]. استفاده از اتو ترانسفورماتور دارای تپ‌چنجر برای جبران سازی توان راکتیو و استفاده از فیلترهای غیرفعال به منظور کاهش سطح هارمونیک‌های جریان شبکه از جمله روش‌های استاتیکی بهبود کیفیت توان در شبکه راه‌آهن برقی هستند [۱۲، ۱۳].

روش‌های فوق قابلیت انعطاف با تغییرات بار را نداشته و جبران سازی توسط آن‌ها به صورت نسبی انجام می‌شود، در نتیجه از جبران سازهای دینامیکی باید استفاده کرد. روش‌های دینامیکی قادر به جبران سازی لحظه‌ای هستند و در مورد پارامتر تحت جبران سازی خود معمولاً بهبود کامل را بدست می‌دهند. یکی از روش‌های دینامیکی استفاده از ادوات FACTS^۲ به ویژه جبران سازهای استاتیکی سنکرون^۳ (STATCOM) و جبران سازهای توان راکتیو استاتیکی^۴ (SVC) است.

^۱ Phase Rotation

^۲ Flexible AC Transmission Systems

^۳ Static Synchronous Compensator

^۴ Static VAr Compensator

جبران سازه‌های استاتیکی توان راکتیو پتانسیل جبران جریان توالی منفی و توان راکتیو را دارند. با این وجود نصب این تجهیزات در سمت اولیه ترانسفورماتور تراکشن به دلیل سطح بالای ولتاژ از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. از طرف دیگر چنانچه جبران ساز توان راکتیو استاتیکی صرفاً به منظور جبران سازی جریان توالی منفی در سمت ثانویه ترانسفورماتور به کار گرفته شود، باعث بروز مشکلاتی از قبیل تولید هارمونیک و کاهش ضریب توان می‌گردد [۱۴]. جبران‌کننده‌های استاتیکی سنکرون و همچنین فیلترهای اکتیو نیز امکان بهبود کامل کیفیت توان شبکه تغذیه راه‌آهن برقی را ندارند [۱۵].

در سال‌های اخیر روش‌های جبران سازی نوین مبتنی بر اتصالات ترانسفورماتوری و مبدل‌های الکترونیک قدرت برای رفع مشکلات سیستم تغذیه تراکشن پیشنهاد شده است. در دهه ۹۰ میلادی انستیتو تحقیقات ژاپن یک جبران ساز جدید به نام بهبوددهنده توان ریلی^۱ (RPC) معرفی نمود که توانایی بهبود کیفیت توان شبکه تغذیه تراکشن را به طور کامل دارد [۱۶]. این جبران ساز که در سمت ثانویه ترانسفورماتور تراکشن نصب می‌شود، از دو مبدل پشت به پشت تشکیل شده است که دارای خازن لینک DC مشترک هستند. RPC از طریق ترانسفورماتورهای کاهنده و سلف‌های واسط به سیستم تغذیه تراکشن در پست تراکشن متصل می‌شود. از آنجائیکه اساس عملکرد RPC انتقال توان اکتیو از یک فاز به فاز دیگر است، کلیدهای استفاده شده در مبدل باید دو طرفه باشند [۱۷-۱۹]. در نتیجه در هر لحظه یکی از مبدل‌ها به‌عنوان یکسوکننده^۲ PWM عمل کرده و خازن لینک DC را شارژ می‌کند و مبدل دیگر به صورت اینورتر عمل کرده و بدین‌صورت توان اکتیو از یک فاز به فاز دیگر انتقال داده می‌شود. جریان‌های هارمونیک و توان راکتیو نیز پس از استخراج توسط سیستم کنترلی، از طریق کلید زنی مبدل‌ها تولید شده و به شبکه تزریق می‌شود، در نتیجه سمت شبکه قدرت عاری از هرگونه عدم تعادل، هارمونیک و توان راکتیو خواهد بود.

۱-۳ اهداف پایان‌نامه

همان‌طور که اشاره گردید، شبکه‌های تراکشن منجر به پدید آمدن مشکلاتی در کیفیت توان شبکه قدرت می‌شوند. برای رفع این مشکلات، از جبران سازه‌های کیفیت توان که در تحقیقات جدید، عمدتاً

^۱ Railway Power Conditioner

^۲ Pulse Width Modulation

مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت و اتصالات ترانسفورماتورهای خاص هستند، استفاده می‌شود. یکی از اهداف این پایان‌نامه، مقایسه انواع ترانسفورماتورهای رایج در شبکه تغذیه تراکشن و انتخاب بهترین اتصال ترانسفورماتور تراکشن برای استفاده در سیستم تغذیه الکتریکی قطار پرسرعت می‌باشد. یکی دیگر از اهداف این پایان‌نامه بررسی و مقایسه ساختارهای مختلف تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت می‌باشد. همچنین مروری بر ساختار جبران سازه‌های مختلف مورد استفاده در این سیستم صورت گرفته است. در نهایت به منظور کاهش ظرفیت جبران ساز، یک سیستم جبران سازی ترکیبی برای سیستم تغذیه ریلی پیشنهاد شده است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های جبران سازی در سیستم تغذیه ریلی، استخراج جریان‌های مرجع جبران سازی و کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت آن است. سیگنال‌های مرجع مورد نیاز جهت جبران سازی کامل با استفاده از روش تئوری توان لحظه‌ای استخراج می‌گردند. در این پایان‌نامه در درجه اول به یک کنترل‌کننده جریان نیاز است که بتواند تغییرات جریان را به صورت لحظه‌ای و با سرعت بالا دنبال کند، زیرا بار تراکشن دارای تغییرات بسیار زیاد است و در نتیجه دامنه جریان‌های مرجع می‌تواند بسیار متغیر باشد. از این‌رو هرگونه تأخیری در دنبال کردن این تغییرات می‌تواند عملکرد صحیح جبران ساز را مختل کند. با توجه به ملزومات اشاره‌شده، در این پایان‌نامه کنترل‌کننده جریان هیستریزس انتخاب شده است. این کنترل‌کننده مستقیماً با جریان ارتباط دارد و دارای ساختار بسیار ساده‌ای است. همچنین دارای سریع‌ترین پاسخ دینامیکی در بین کنترل‌کننده‌های دینامیکی است.

۱-۴ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در قالب شش فصل تدوین شده است. در فصل اول انواع سیستم‌های تغذیه الکتریکی به‌کار رفته در شبکه راه‌آهن برقی معرفی شده و مزایا و معایب هر سیستم بررسی خواهد شد. در فصل دوم، ابتدا سیستم تغذیه الکتریکی مورد استفاده در شبکه راه‌آهن برقی با قید پرسرعت انتخاب شده و سپس در مورد اجزاء این سیستم تغذیه توضیحات کلی داده می‌شود. پس از آن مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های تغذیه الکتریکی قطارهای برقی پرسرعت مطالعه می‌شود و استانداردهای مربوط به هر کدام از شاخص‌های کیفیت توان بیان می‌شود. در فصل سوم برخی از مهم‌ترین راهکارهایی که در مقالات مختلف به منظور بهبود مشکلات کیفیت توان ارائه شده‌اند، بیان خواهد شد

و مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در فصل چهارم ابتدا مقایسه‌ای بین ترانسفورماتورهای موجود در شبکه تراکشن انجام گرفته است و پس از بررسی فاکتورهای تعیین‌کننده در انتخاب نوع ترانسفورماتور، ترانسفورماتور V-V به عنوان مناسب‌ترین گزینه، انتخاب می‌شود. در ادامه به منظور جبران سازی مشکلات کیفیت توان و بهبود شاخص‌های آن در شبکه‌های تراکشن یک سیستم جبران‌کنندگی هیبریدی (ترکیبی) مبتنی بر جبران ساز RPC به عنوان جبران ساز اصلی و همچنین دو جبران ساز کمکی که در اینجا SVC می‌باشد، پیشنهاد گردیده است. هدف از اتخاذ SVC در شبکه تراکشن جبران سازی توان راکتیو می‌باشد تا با برداشتن وظیفه‌ی جبران توان راکتیو از دوش جبران ساز اصلی، به کاهش ظرفیت این جبران ساز که از قیمت بالایی برخوردار است، کمک نموده و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را کاهش دهد. در فصل پنجم به منظور بررسی کارآمدی سیستم جبران‌کنندگی پیشنهادی و صحت روابط ریاضی، بر روی یک شبکه نمونه، شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است.

فصل ششم به بیان نتایج و ارائه پیشنهادها اختصاص داده شده است.

فصل ۲ :

شاخص‌های کیفیت توان در شبکه‌های

تراکشن

۱-۲ مقدمه

مسئله کیفیت توان یک اصل مهم برای شرکت‌های برق و مشترکین به شمار می‌آید. دلیل اصلی توجه به مسئله کیفیت توان در شبکه‌های قدرت، مسائل اقتصادی می‌باشد. مشکلات کیفیت توان، اثرات نامطلوبی برای شرکت‌های برق و مشترکین آن‌ها به وجود می‌آورند؛ به طوری که دولت آمریکا سالانه بین ۱۵ تا ۲۴ میلیون دلار از سرانه بودجه خود را به دلیل مشکلات کیفیت توان از دست می‌دهد [۲۰]. بارهای راه‌آهن برقی به دلیل مصرف بالای توان، از بارهای مهم و حساس برای شبکه قدرت محسوب می‌شوند. با توجه به اینکه در خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت، پست‌های تراکشن به خطوط انتقال با سطح ولتاژ بالا (معمولاً ۵۰۰-۲۰۰ kV) متصل می‌شوند؛ بنابراین جزء بارهای درجه یک شبکه قدرت به حساب می‌آیند و هرگونه اختلال در این بارها بر روی عملکرد سیستم قدرت و همچنین بارهای مجاور به شدت تأثیر می‌گذارد. آنچه باید به آن توجه داشت این است که بارهای تراکشن خصوصیتی همچون جریان توالی منفی بالا، ضریب قدرت پایین و محتوای هارمونیک بالا دارند که شبکه قدرت تغذیه کننده خود را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. البته باید متذکر شد که در خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت به علت استفاده گسترده از لکوموتیوهایی با مبدل‌های PWM مشکلات ناشی از جریان هارمونیک و ضریب توان پایین، نسبت به بارهای تراکشن معمولی تا حدی کاهش یافته است؛ ولی به دلیل ظرفیت بالای این بارها، مشکلات ناشی از توالی منفی جریان همچنان به قوت خود باقی است [۲۱، ۲۲].

برای بررسی دقیق‌تر مسئله کیفیت توان در شبکه راه‌آهن برقی، قبل از هر چیزی باید یک شناخت کلی از بار راه‌آهن برقی پرسرعت و همچنین شبکه تغذیه کننده آن بدست آورد. بنابراین در این فصل ابتدا مروری کلی بر شبکه تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت کرده و ویژگی‌های بار آن بیان خواهد شد، سپس توضیح مختصری در مورد شاخص‌های کیفیت توان داده می‌شود و مقادیر استاندارد آن‌ها بیان می‌شود.

۲-۲ شبکه تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت

با توجه به اینکه پست‌های تراکشن دارای ظرفیت بسیار بالایی هستند؛ بنابراین باید به نقاطی از شبکه

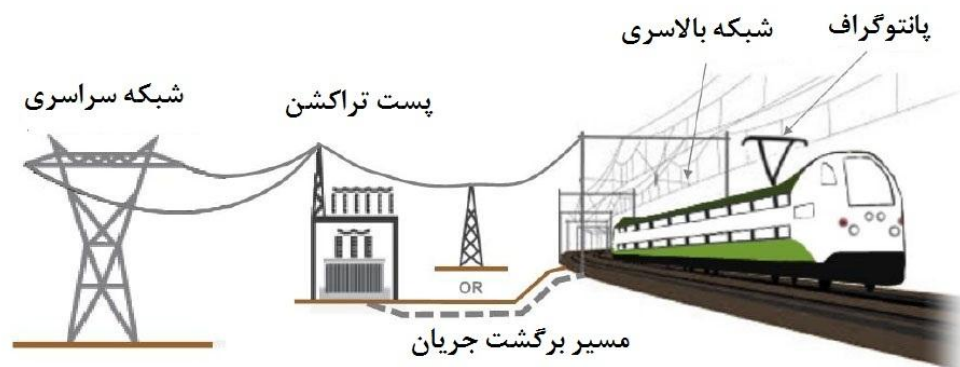
قدرت متصل گردند که دارای ظرفیت اتصال کوتاه نسبتاً بزرگ هستند و به همین خاطر مناسب است تا به خطوط انتقال با سطح ولتاژ بالاتر از ۱۰۰ kV متصل می‌شوند [۲۳]. ظرفیت اتصال کوتاه شبکه قدرت بر طبق استاندارد IEC60909 و برای سطح ولتاژهای مختلف مطابق با جدول (۱-۲) است.

جدول (۱-۲) ظرفیت اتصال کوتاه سیستم برای سطوح مختلف ولتاژ بر طبق استاندارد IEC60909 [24]

ظرفیت اتصال کوتاه سیستم (MVA)	حداکثر ولتاژ سیستم (kV)	ردیف
۳۵۰۰	۷۲/۵	۱
۶۰۰۰	۱۲۳	۲
۱۰۰۰۰	۱۴۵	۳
۲۰۰۰۰	۲۴۵	۴

اجزای اصلی یک شبکه راه‌آهن برقی همان طور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود عبارت‌اند از:

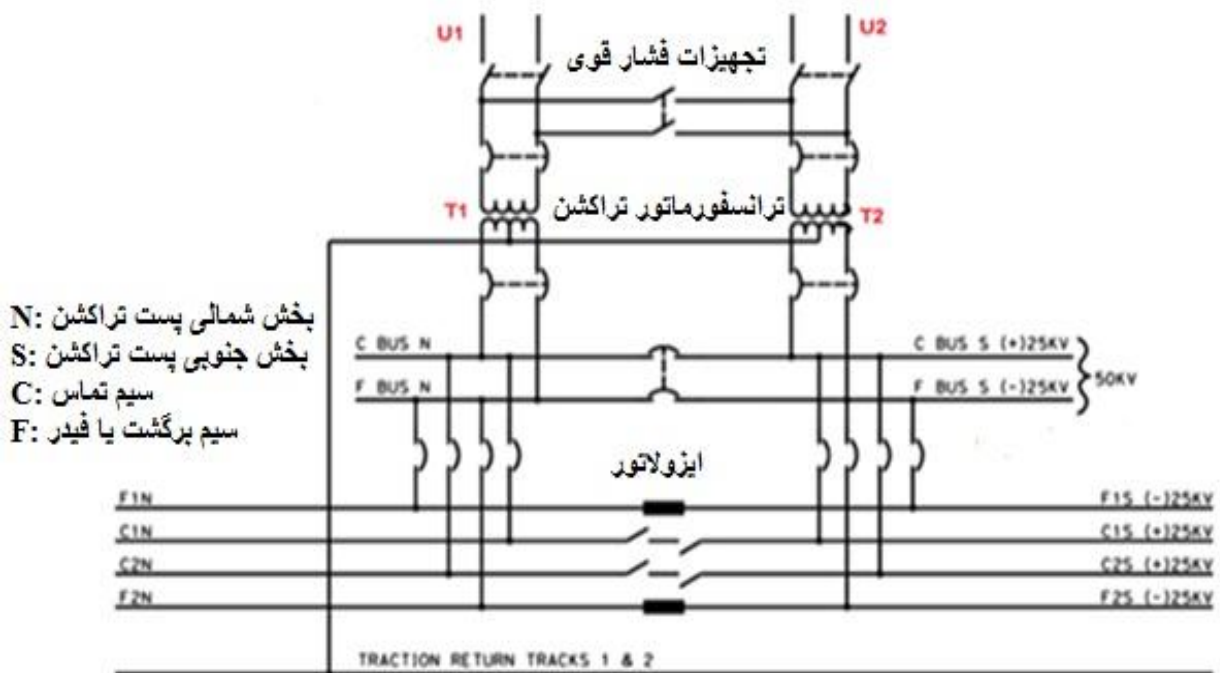
- شبکه سراسری (قدرت)
- پست‌های تراکشن
- شبکه تغذیه توان لکوموتیو (شبکه تراکشن) شامل شبکه بالاسری، پست‌های جداساز و پست-های موازی ساز
- لکوموتیو
- مسیر برگشت جریان



شکل (۱-۲) نمای کلی سیستم تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت

۲-۲-۱ پست تراکشن

پست تراکشن وظیفه دریافت انرژی الکتریکی از شبکه قدرت و تبدیل آن به سطح ولتاژ مناسب برای لکوموتیو را بر عهده دارد. همان طور که قبلاً نیز اشاره شد امروزه از سیستم تغذیه $25 \times 25 \text{ kV AC}$ جهت تغذیه قطارهای برقی پرسرعت استفاده می‌کنند؛ بنابراین وظیفه اصلی پست تراکشن کاهش ولتاژ شبکه انتقال تا مقدار 25 kV برای سیم تماس خواهد بود. پست تراکشن مانند قلب یک شبکه تغذیه راه‌آهن برقی است و از این رو طراحی صحیح پست تراکشن و مدار تغذیه آن می‌تواند ضمن تضمین کارکرد سیستم با ضریب اطمینان قابل قبول، آثار سوء راه‌آهن برقی بر شبکه تغذیه اصلی را نیز به حداقل برساند. محل پست‌های تراکشن باید با محاسبات دقیق پخش بار در شبکه بالاسری انتخاب شود. نتیجه محاسبات تابع پارامترهای مهمی از جمله: پروفیل مسیر، حجم ترافیک، نوع تغذیه (مستقیم یا با استفاده از اتو ترانسفورماتور)، توان مصرفی هر لکوموتیو و همچنین تعداد آن‌ها است. معمولاً فاصله بین پست‌های تراکشن راه‌آهن برقی پرسرعت برای سیستم تغذیه AC همراه با اتو ترانسفورماتور بین ۴۰ تا ۸۰ کیلومتر و ظرفیت این پست‌ها بین ۵۰ تا ۸۰ مگا ولت‌آمپر است [۷].



شکل (۲-۲) دیاگرام تک خطی پست تراکشن برای یک مسیر دو خطه [۲۵]

شکل (۲-۲) نشان‌دهنده دیاگرام تک خطی پست تراکشن برای یک مسیر دو خطه است. همان طور که مشخص است شبکه بالاسری در محل پست تراکشن توسط یک بخش خنثی^۱، به دو بخش شمالی و جنوبی تقسیم می‌شود. در صورت استفاده از ترانسفورماتور تک فاز هر بخش توسط یک ترانسفورماتور به صورت جداگانه تغذیه می‌شود و اگر از ترانسفورماتورهای سه فاز به دو فاز استفاده شود؛ هر بخش توسط یکی از پایانه‌های ثانویه تغذیه می‌شود.

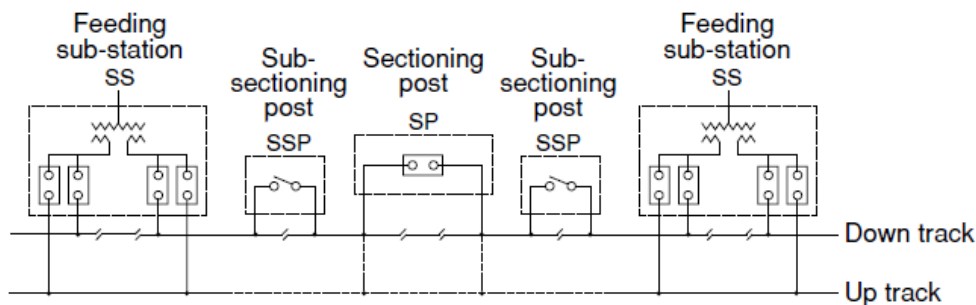
۲-۲-۲ شبکه تراکشن

پس از تبدیل انرژی الکتریکی به سطح ولتاژ مناسب برای استفاده در شبکه تراکشن توسط پست‌های تراکشن؛ این انرژی توسط شبکه بالاسری به محل لکوموتیو انتقال داده می‌شود و موتورهای موجود در لکوموتیو انرژی مورد نیاز خود را از طریق پانتوگراف از سیم تماس دریافت می‌کنند. شبکه تراکشن از شبکه بالاسری، پست‌های موازی ساز^۲ (SSP) و پست جداساز^۳ (SP) تشکیل شده است. شکل (۲-۳) یک شبکه توزیع توان تراکشن را نشان می‌دهد. بین هر دو پست تراکشن مجاور یک پست جداساز یا سوئیچینگ قرار می‌گیرد. عمل جداسازی به علت اختلاف پتانسیل موجود بین دو بخش مجاور و جلوگیری از ایجاد جریان گردشی بین دو پست تراکشن مجاور از طریق شبکه بالاسری می‌باشد. بعلاوه دو بخش در دو طرف یک پست جداساز را توسط یک سکسیونر یا دژنکتور به یکدیگر متصل می‌کنند. این کلیدها در شرایط عادی باز هستند و در صورت بروز خطا در یک پست تراکشن، با بسته شدن کلیدهای پست جداساز می‌توان بخش‌های متصل به پست تراکشن آسیب دیده را از طریق پست‌های تراکشن مجاور تغذیه نمود و بدین ترتیب عمل برق‌رسانی به لکوموتیو بدون وقفه ادامه پیدا کند [۶، ۲۵]. برای خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت با توجه به فاصله بین پست‌های تراکشن و همچنین ترافیک خط، بین پست تراکشن و پست جداساز یک یا دو پست موازی ساز نیز قرار می‌گیرد. پست موازی ساز امکان برقراری اتصالات الکتریکی در مدار طولی (در امتداد مسیر) و عرضی (دو خط هم‌جهت) را به صورت انتخابی در شبکه بالاسری میسر می‌سازد. به این ترتیب ضمن افزایش ضریب اطمینان مدار (با ایجاد مسیرهای مختلف برای بار)، باعث کاهش افت ولتاژ در شبکه بالاسری می‌شود. [۲۵].

¹ Neutral Section

² Sub-Sectioning Post

³ Sectioning Post



شکل (۳-۲) شبکه تراکشن با یک پست جداساز بین هر پست تراکشن و پست‌های موازی ساز [۵]

۳-۲-۲ بار راه‌آهن برقی (بار تراکشن)

بارهای تراکشن، بارهایی خاص برای شبکه سراسری محسوب می‌شوند. لذا برای مواجهه صحیح با آن می‌بایست شناخت دقیقی از بار مورد نظر داشت. از ویژگی‌های بارز بار تراکشن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

- متغیر بودن با زمان و مکان
- تک فاز بودن (عامل وجود مؤلفه توالی منفی)
- مصرف توان راکتیو زیاد (به دلیل حضور موتورهای القایی)
- وجود هارمونیک بالا (به علت وجود ادوات غیرخطی)
- ضریب قدرت پایین
- دارای ضریب استفاده کوچک برای کلیه تجهیزات

با توجه به اینکه در لکوموتیوهای برقی پرسرعت امروزی به صورت گسترده از مبدل‌های PWM استفاده می‌شود؛ میزان THD جریان و همچنین مصرف توان راکتیو نسبت به لکوموتیوهای برقی معمولی تا حدودی کمتر است؛ ولی با توجه به ظرفیت بالای این لکوموتیوها مشکلات ناشی از عدم تعادل جریان در این بارها همچنان به قوت خود باقی است [۲۱].

با حرکت لکوموتیو و دور شدن از پست تراکشن، دائماً افت ولتاژ در محل اتصال پانتوگراف به سیم تماس تغییر می‌کند. از طرفی در شبکه‌های تراکشن همواره لکوموتیوها یا در حال شتاب‌گیری و یا در حال توقف هستند و در نتیجه بار تراکشن از دیدگاه شبکه سراسری باری متغیر است؛ لذا این متغیر بودن با زمان و مکان، تحلیل شبکه‌های تراکشن را متفاوت خواهد کرد. از طرف دیگر از آنجائیکه قطعی برق در شبکه تراکشن مجاز نمی‌باشد؛ معمولاً برای تمامی تجهیزات قدرت می‌بایست یک

یونیت رزرو در نظر گرفت که این امر منجر به کاهش ضریب استفاده تجهیزات می‌گردد. شکل (۴-۱) نشان‌دهنده منحنی تغییرات یک بار تراکشن با گذشت زمان است که خود گویای ویژگی‌های گفته شده برای بار تراکشن است.

۳-۲ مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن

با توجه به ویژگی‌های مطرح شده برای بار تراکشن می‌توان نتیجه گرفت که شبکه تراکشن دارای مشکلات جدی در رابطه با کیفیت توان از دیدگاه شبکه سراسری می‌باشد. این مشکلات می‌تواند طیف وسیعی از مباحث کیفیت توان را به خود اختصاص دهد که به برخی از آن‌ها در بخش‌های قبل اشاره گردید اما در این بخش به ۳ مشکل رایج و اساسی پرداخته خواهد شد که بیش‌ترین آثار سوء را بر روی شبکه سراسری دارند و عبارت‌اند از: جریان توالی منفی، محتوای بالای هارمونیک جریان شبکه و توان راکتیو [۱، ۱۰، ۱۷-۱۹، ۲۶-۲۸].

۱-۳-۲ عدم تعادل

طراحی سیستم‌های قدرت بر اساس عملکرد متقارن می‌باشند و عملکرد نامتقارن منجر به ایجاد مؤلفه‌های توالی صفر و منفی می‌گردد. این گونه مؤلفه‌ها باعث اثرات نامطلوبی در شبکه می‌گردند. روش‌های بسیاری برای محاسبه عدم تعادل در شبکه قدرت ارائه گردیده است؛ ولی بدون شک کارآمدترین روش برای بررسی و محاسبه عدم تعادل، روش "مؤلفه‌های متقارن" است که در سال ۱۹۱۸ توسط فورسکیو^۱ برای اولین بار مطرح شد [۲۹]. عدم تعادل از دو منظر قابل بررسی می‌باشد؛ عدم تعادل ولتاژ و عدم تعادل جریان.

۱-۱-۳-۲ عدم تعادل ولتاژ

عدم تعادل ولتاژ اثرات سوپی بر مصرف‌کنندگان سه فاز به خصوص موتورهای الکتریکی داشته و باعث افزایش تلفات و در نتیجه افزایش درجه حرارت ماشین، کاهش گشتاور بار و در نتیجه کاهش توان موتور و افزایش لرزش در موتور می‌شود؛ همچنین سبب کاهش راندمان و افزایش جریان بلبرینگ‌ها و

^۱ C. L. Fortescue

کاهش پایداری آن می‌گردد. ماشینی که به یک شبکه نامتعادل متصل است جریانی به مراتب نامتعادل‌تر از ولتاژ اصلی می‌کشد. در نتیجه جریان‌ها کاملاً متفاوت بوده و افزایش حرارت در ماشین به وقوع می‌پیوندد. این مشکلات مهندسیین برق را بر آن داشت تا استانداردهایی جهت بررسی عدم تعادل مطرح کنند. سه تعریف عمده از عدم تعادل در طول سال‌های مختلف توسط IEEE، IEC و NEMA ارائه شده است [۳۰].

تعریف اول بر حسب استاندارد^۱ IEEE:

بیش‌ترین انحراف ولتاژ از میانگین مقدار مؤثر ولتاژ فاز، نسبت به میانگین مقدار مؤثر ولتاژ فاز (PVUR^۲)

تعریف دوم بر حسب استاندارد^۳ NEMA:

بیش‌ترین انحراف ولتاژ از میانگین مقدار مؤثر ولتاژ خط، نسبت به میانگین مقدار مؤثر ولتاژ خط (LVUR^۴)

تعریف سوم بر حسب استاندارد IEC:

نسبت توالی منفی ولتاژ به توالی مثبت ولتاژ (VUF^۵)

$$\% VUF = \frac{V^-}{V^+} \times 100 \quad (۱-۲)$$

پس از محاسبه عدم تعادل ولتاژ، باید دید که آیا مقدار بدست آمده برای شبکه قدرت مناسب است یا خیر؟ حدود مجاز درصد عدم تعادل در شینه‌های مختلف شبکه سراسری مطابق با استاندارد شرکت توانیر که برگرفته از استانداردهای بین‌المللی مذکور است در جدول (۲-۲) نمایش داده شده است.

^۱ Institute of Electrical and Electronics Engineers

^۲ Phase Voltage Unbalance Rate

^۳ National Equipment Manufacturer's Association

^۴ Line Voltage Unbalance Rate

^۵ Voltage Unbalance Factor

جدول (۲-۲) حدود مجاز عدم تعادل ولتاژ مطابق با استاندارد شرکت توانیر [۳۱]

حدود مجاز درصد عدم تعادل ولتاژ		
شبهه شبکه	شبهه فشار ضعیف و فشار متوسط	شبهه توزیع و فوق توزیع و انتقال
درصد عدم تعادل ولتاژ	۲	۱

۲-۱-۳-۲ عدم تعادل جریان

این مشکل به دلیل تک فاز بودن بار تراکشن ایجاد می‌شود. چون بار تراکشن یک بار بسیار بزرگ است، بنابراین باعث تزریق مقدار زیادی جریان توالی منفی به شبکه سراسری می‌شود؛ در نتیجه یکی از مهم‌ترین و جدی‌ترین مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن، تزریق مقدار عظیمی جریان توالی منفی به شبکه قدرت می‌باشد [۱۰، ۱]. وجود جریان توالی منفی مشکلاتی را به همراه خواهد آورد که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: جاری شدن جریان در سیم نول، افزایش ولتاژ در سیم نول، افزایش تلفات، افزایش بهای برق مصرفی و تزریق مؤلفه توالی منفی جریان به ژنراتورها.

اگر بار الکتریکی متقارن نباشد، هر سه مؤلفه جریان (مؤلفه توالی صفر، توالی مثبت و منفی) در ژنراتورها وجود خواهد داشت. اثر مؤلفه مثبت همانند بار متعادل است و مشکلی به وجود نمی‌آورد. مؤلفه صفر نیز میدان گردان پدید نمی‌آورد اما مؤلفه منفی، میدانی در خلاف جهت گردش روتور پدید می‌آورد. این میدان نسبت به روتور با دو برابر سرعت سنکرون گردش می‌کند و به همین جهت جریان‌هایی با دو برابر فرکانس سیستم در سطح روتور القاء می‌کند و باعث تلفات اضافی در روتور، افزایش شدید درجه حرارت هسته روتور و خرابی عایق سیم‌پیچی روتور در یک‌زمان بسیار کوتاه می‌شود. حدود مجاز عدم تعادل جریان طبق استاندارد شرکت توانیر در جدول (۲-۳) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۲) حدود مجاز عدم تعادل جریان مطابق با استاندارد شرکت توانیر [۳۱]

ولتاژ شبهه (kV)	شبهه فشار ضعیف و فشار متوسط	شبهه توزیع و فوق توزیع و انتقال
درصد مجاز عدم تعادل جریان	$\frac{2(1-Z_1)}{Z_2}$	$\frac{(1-Z_1)}{Z_2}$

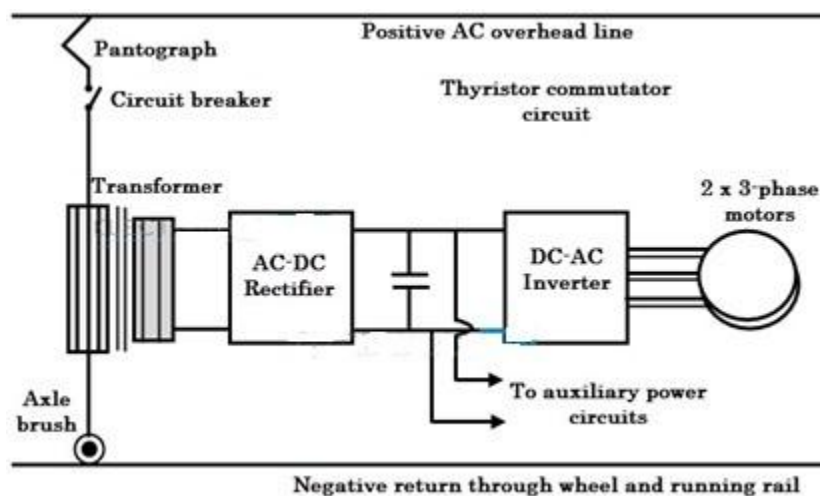
در جدول (۲-۳)، Z_1 و Z_2 به ترتیب امپدانس توالی مثبت و منفی بر حسب پریونیت از دید مشترک است. Z_1 را می‌توان با توجه به ظرفیت اتصال کوتاه شبکه بدست آورد و Z_2 را می‌توان با توجه به ظرفیت اتصال کوتاه تک فاز شبکه محاسبه نمود. میزان عدم تعادل جریان باید به اندازه‌ای باشد تا میزان عدم تعادل ولتاژ از حد مجاز تعیین شده در جدول (۲-۲) بالاتر نرود.

برای محاسبه عدم تعادل جریان در این پایان‌نامه از تعریف ارائه شده در استاندارد IEC60034-26 استفاده شده است. بر طبق این استاندارد مقدار عدم تعادل جریان برابر اندازه مؤلفه توالی منفی

جریان به اندازه مؤلفه توالی مثبت جریان $\left(\frac{I^-}{I^+}\right)$ است.

۲-۳-۲ مؤلفه‌های هارمونیکی

از آنجائیکه معمولاً در لکوموتیوهای راه‌آهن برقی از یکسو سازهای دیودی و یا تریستوری استفاده می‌گردد، لذا مشکلاتی از قبیل جریان هارمونیکی شدید سمت شبکه، ضریب قدرت پایین، غیر قابل برگشت بودن انرژی ترمزی، غیر قابل کنترل بودن ولتاژ لینک DC و تلفات بالا همگی ناشی از این گونه یکسو سازها می‌باشد [۳۲، ۳۳]. در شبکه‌های تراکشن از یکسو سازهای دیودی تک فاز استفاده می‌گردد. در این شبکه‌ها محل نصب یکسو ساز در داخل لکوموتیو می‌باشد که ولتاژ AC و ۲۵ kV با کاهش سطح ولتاژ از طریق ترانسفورماتور ورودی به یکسو ساز دیودی مطابق شکل (۲-۴) در داخل لکوموتیو می‌رسد.



شکل (۲-۴) مدار الکتریکی لکوموتیو با پل دیودی [۱۰]

هارمونیک‌های ولتاژ و جریان به هم وابسته هستند و وجود یکی باعث ایجاد دیگری در شبکه قدرت خواهد شد. اکثر اعوجاج ایجاد شده در شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه قدرت، ناشی از بارهایی هستند که دارای مشخصه غیرخطی بوده و یا در آن‌ها از عناصر الکترونیک قدرت استفاده می‌شود. در لکوموتیوهای معمولی به دلیل استفاده از یکسو سازهای دیودی و تریستوری میزان هارمونیک موجود در جریان بسیار بالا است. این مشکل در لکوموتیوهای پرسرعت تا حد زیادی برطرف شده است، با این حال همچنان برای خطوط پرسرعت نیز مشکلات ناشی از هارمونیک‌های جریان وجود دارد. در صورت عدم جبران سازی مؤلفه‌های هارمونیکی، این مؤلفه‌ها در تمامی سیستم قدرت پخش می‌شوند و سبب ایجاد مشکلات اساسی برای سایر مصرف‌کنندگان شبکه قدرت می‌شوند [۳۲]. با توجه به اثرات مخرب هارمونیک‌های ولتاژ و جریان در سیستم‌های قدرت، مهندسين و متخصصين برق استانداردهایی جهت سنجش هارمونیک مطرح کرده‌اند که معیار مشخصی برای سنجش میزان مجاز هارمونیک قسمت‌های مختلف شبکه قدرت باشد. استاندارد IEEE-519 که اولین بار در سال ۱۹۸۱ تدوین شد و سپس در سال ۱۹۹۲ نسخه تجدید نظر شده آن توسط IEEE منتشر شد؛ به عنوان یکی از مهم‌ترین استانداردهای کیفیت توان، مورد استفاده و استناد مهندسين مشاور و پیمانکاران قرار گرفته است و در تدوین استانداردهای داخلی شرکت‌های توزیع برق به عنوان یکی از مرجع‌های اصلی استفاده شده است. حدود مجاز برای هارمونیک‌های ولتاژ در جدول (۴-۲) آورده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح ولتاژ شبکه حداکثر درصد هارمونیک ولتاژ مجاز کاهش می‌یابد. در جدول (۴-۲) منظور از درصد مجاز اعوجاج تکی ولتاژ، حداکثر مقدار مجاز برای هر کدام از مؤلفه‌های هارمونیکی ولتاژ است.

جدول (۴-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک ولتاژ [۳۴]

ردیف	ولتاژ شین در PCC (kV)	اعوجاج تکی ولتاژ (%)	THD (%)
۱	۶۹ و کمتر از آن	۳	۵
۲	۶۹-۱۶۱	۱/۵	۲/۵
۳	بالتر از ۱۶۱	۱	۱/۵

جدول (۵-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک‌های جریان در شبکه‌های (۱۲۰۷ تا ۶۹kV) [۳۴]

TDD	مرتبه هارمونیک‌های فرد					$\frac{I_{sc}}{I_L}$	ردیف
	$n \geq 35$	$23 \leq n < 35$	$17 \leq n < 23$	$11 \leq n < 17$	$n < 11$		
۵	۰/۳	۰/۶	۱/۵	۲	۴	<۲۰	۱
۸	۰/۵	۱	۲/۵	۳/۵	۷	۲۰-۵۰	۲
۱۲	۰/۷	۱/۵	۴	۴/۵	۱۰	۵۰-۱۰۰	۳
۱۵	۱	۲	۵	۵/۵	۱۲	۱۰۰-۱۰۰۰	۴
۲۰	۱/۴	۲/۵	۶	۷	۱۵	>۱۰۰۰	۵

جدول (۶-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک‌های جریان در شبکه‌های (۶۹kV تا ۱۶۱kV) [۳۴]

TDD	مرتبه هارمونیک‌های فرد					$\frac{I_{sc}}{I_L}$	ردیف
	$n \geq 35$	$23 \leq n < 35$	$17 \leq n < 23$	$11 \leq n < 17$	$n < 11$		
۲/۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۷۵	۱	۲	<۲۰	۱
۴	۰/۲۵	۰/۵	۱/۲۵	۱/۷۵	۳/۵	۲۰-۵۰	۲
۶	۰/۳۵	۰/۷۵	۲	۲/۲۵	۵	۵۰-۱۰۰	۳
۷/۵	۰/۵	۱	۲/۵	۲/۷۵	۶	۱۰۰-۱۰۰۰	۴
۱۰	۰/۷	۱/۲۵	۳	۳/۵	۷/۵	>۱۰۰۰	۵

جدول (۷-۲) حداکثر درصد مجاز هارمونیک‌های جریان در شبکه‌های (بالتر از ۱۶۱kV) [۳۴]

TDD	مرتبه هارمونیک‌های فرد					$\frac{I_{sc}}{I_L}$	ردیف
	$n \geq 35$	$23 \leq n < 35$	$17 \leq n < 23$	$11 \leq n < 17$	$n < 11$		
۲/۵	۰/۱۵	۰/۳	۰/۷۵	۱	۲	<۵۰	۱
۳/۷۵	۰/۲۲	۰/۴۵	۱/۱۵	۱/۵	۳	>۵۰	۲

حدود مجاز هارمونیک‌های جریان در استاندارد IEEE-519 بر اساس نسبت جریان اتصال کوتاه به حداکثر تقاضای جریان بار در نقطه اتصال مشترک با شبکه (PCC) تعیین می‌شوند. حدود مجاز مربوط به هارمونیک‌های فرد در

جدول (۵-۲) الی جدول (۷-۲) به ازای ولتاژهای مختلف شبکه قدرت نشان داده شده‌اند. حداکثر

مقدار هارمونیک‌های زوج نیز به ۲۵٪ حدود مجاز برای هارمونیک‌های فرد متناظر خود محدود شده‌اند [۳۴]. منظور از TDD اعوجاج تقاضای کل^۱ است که به صورت رابطه (۲-۲) تعریف می‌شود. در این رابطه I_L برابر حداکثر تقاضای جریان بار است که حداقل برای مدت زمان ۱۵ تا ۳۰ دقیقه توسط بار مصرف می‌شود [۳۴].

$$TDD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_L} \times 100 \quad (2-2)$$

۳-۳-۲ توان راکتیو

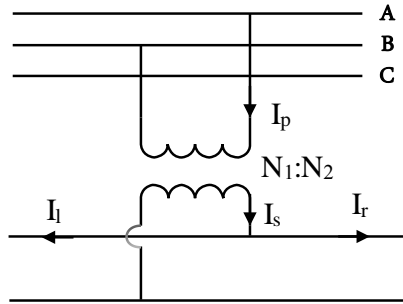
یکی از شاخص‌های مهم کیفیت توان در شبکه قدرت، ضرایب قدرت بار و شبکه تغذیه است. ضریب قدرت در حالت کلی برابر نسبت توان اکتیو به توان ظاهری است. شبکه راه‌آهن برقی AC شامل لکوموتیوهای برقی با موتورهای القایی، خطوط انتقال و شبکه تغذیه بالاسری است؛ بنابراین از دید شبکه سراسری بار تراکشن یک‌بار القایی بسیار بزرگ محسوب می‌شود. از طرف دیگر این بار بزرگ القایی دائماً در حال تغییر می‌باشد و لذا توان راکتیو در این شبکه ثابت نیست و ضریب قدرت مرتباً در حال تغییر است. همین امر مانع از بکارگیری جبران سازه‌های توان ثابت همچون جبران‌کننده‌های پسیو سلفی و خازنی می‌گردد و از سوی دیگر چون این بارها نیاز به جبران سازهایی با سرعت پاسخ بالا دارند، لذا از جبران سازه‌های چرخان مانند کندانسور سنکرون نیز نمی‌توان استفاده کرد.

امروزه در لکوموتیوهای پرسرعت به علت استفاده از مبدل‌های PWM می‌توان ضریب توان بار را نزدیک یک فرض کرد ولی با این حال تأثیر تک فاز بودن بار تراکشن بر روی شبکه قدرت به گونه‌ای است که در بعضی موارد می‌توان ضریب توان شبکه را خود به تنهایی و با فرض واحد بودن ضریب توان بار مصرفی تا مقدار ۰/۸۶ کاهش دهد [۹، ۱۰]. شکل (۲-۵) را در نظر بگیرید: اگر پست تراکشن در سمت ثانویه از ولتاژ ab تغذیه گردد و فرض کنیم که سمت اولیه با ولتاژ فاز مرجع $V_A \angle 0^\circ$ باشد. معادلات ولتاژ و جریان اولیه و ثانویه به صورت زیر خواهد بود.

^۱ Total Demand Distortion

$$\begin{cases} \dot{V}_P = \dot{V}_{AB} = V \angle 30 \\ \dot{V}_S = V_S \angle 30 = \frac{N_2}{N_1} V \angle 30 \end{cases} \quad (3-2)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_S = \dot{I}_l + \dot{I}_r = I \angle (30 - \varphi) \\ \dot{I}_P = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_S = \frac{N_2}{N_1} I \angle (30 - \varphi) = I_P \angle (30 - \varphi) \end{cases} \quad (4-2)$$



شکل (۵-۲) تغذیه پست تراکشن با ترانسفورماتور تک فاز

در معادلات (۳-۲) و (۴-۲)، V_P و I_P جریان و ولتاژ سمت اولیه (شبکه سراسری) و V_S و I_S جریان و ولتاژ سمت ثانویه (بار تراکشن) می‌باشد. φ زاویه بار می‌باشد که نشان دهنده اختلاف فاز ولتاژ و جریان بار است. در این صورت همان طور که از این معادلات بر می‌آید حتی اگر ضریب توان بار در سمت ثانویه واحد باشد ($\varphi = 0$)، جریان سمت اولیه دارای اختلاف فاز 30° درجه‌ای با ولتاژ فاز متناظر خود خواهد بود که ضریب توان بار تراکشن را از دید شبکه، بسیار کم خواهد کرد.

$$\begin{cases} \dot{V}_A = V \angle 0 \\ \dot{V}_B = V \angle 120 \\ \dot{V}_C = V \angle -120 \end{cases} \quad (5-2)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_P = I_P \angle (30 - \varphi) \\ \dot{I}_B = -\dot{I}_P = I_P \angle (-150 - \varphi) \\ \dot{I}_C = 0 \end{cases} \quad (6-2)$$

$$\begin{cases} \varphi_A = \varphi_i - \varphi_V = 30 - \varphi \\ \varphi_B = \varphi_i - \varphi_V = -30 - \varphi \end{cases} \quad (7-2)$$

پایین بودن ضریب توان سبب افزایش جریان مؤثر کشیده شده از خط می‌شود و بنابراین علاوه بر

افزایش تلفات خط انتقال که سبب اتلاف بیشتر انرژی الکتریکی می‌شود، نیاز به نصب خطوط انتقال با هادی‌هایی با سطح مقطع بزرگ‌تر و همچنین ترانسفورماتورها، کلیدها و رله‌های حفاظتی با ظرفیت بالاتر در خط انتقال است که خود منجر به افزایش هزینه‌ها می‌گردد و علاوه بر همه این موارد؛ به دلیل اینکه افت ولتاژ در شبکه پدید می‌آید بنابراین نیازمند احداث پست‌های تراکشن بیشتری برای تأمین ولتاژ مطلوب می‌باشد. بنابراین شرکت‌های برق محدودیت‌هایی را در زمینه ضریب توان برای مصرف‌کنندگان خود در نظر گرفته‌اند که در صورت عدم رعایت آن مصرف‌کننده ملزم به پرداخت جریمه‌های سنگینی می‌شود.

۲-۴ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا سیستم تغذیه الکتریکی قطارهای پرسرعت مورد بررسی قرار گرفت و توضیح مختصری در مورد بخش‌های مختلف این سیستم تغذیه ارائه شد. پس از آن مشخصات بار راه‌آهن برقی معرفی شد و تأثیر این بار بر روی شبکه تغذیه سه فاز مورد ارزیابی قرار گرفت و مشکلات مربوط به کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن بررسی گردید. در این شبکه‌ها سه مشکل عمده وجود دارد که عبارت‌اند از:

□ مؤلفه توالی منفی جریان به سبب تک فاز بودن بار

□ مصرف توان راکتیو

□ تزریق هارمونیک‌ها به سبب استفاده گسترده از ادوات الکترونیک قدرت

پس از بیان مشکلات مربوطه، استانداردهای مربوط به هر یک معرفی گردید که در صورت خروج از حدود این استانداردها، نیازمند تدابیری جهت جبران سازی می‌باشند.

فصل ۳ :

بررسی انواع روش‌های موجود جبران
سازی در شبکه‌های تراکشن برقی

۳-۱ مقدمه

انرژی الکتریکی مورد نیاز جهت تغذیه قطارهای برقی پرسرعت را می‌توان از طریق احداث نیروگاه اختصاصی تأمین کرد و در نتیجه نیازی به رعایت استانداردهای شرکت توانیر در مورد کیفیت توان نیست، اما به این نکته باید توجه کرد که ظرفیت بارهای تراکشن بسیار بالا است و در نتیجه نیاز به احداث نیروگاه با ظرفیت بالا دارد که خود نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه بسیار زیادی است. با توجه به اینکه خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت معمولاً برای مسیرهای بین شهری که دارای مسافت زیادی هستند؛ احداث می‌شوند، بنابراین جهت انتقال قدرت از نیروگاه به محل پست‌های تراکشن به خطوط انتقال برق نیاز است که خود سبب افزایش بسیار چشمگیر هزینه‌ها می‌شود و در نتیجه این روش از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نیست. از طرفی برای آنکه بتوان انرژی الکتریکی مورد نیاز پست‌های تراکشن را از شبکه سراسری برق گرفت، باید استانداردهای شرکت توانیر در مورد حداکثر میزان تزریق جریان توالی منفی به شبکه قدرت، حداکثر میزان تزریق هارمونیک در شبکه و همچنین استانداردهای مربوط به حداقل ضریب توان بار رعایت شود، در غیر این صورت مستلزم پرداخت جریمه‌های بسیار سنگین به شرکت توانیر خواهیم بود که از لحاظ اقتصادی به هیچ‌وجه قابل توجیه نیست، پس جبران سازی شاخص‌های کیفیت توان به شدت احساس می‌شود. در سال‌های اخیر، مطالعات و تحقیقات زیادی برای غلبه بر مشکلات مذکور صورت گرفته و روش‌های مختلفی به منظور بهبود کیفیت توان در شبکه راه‌آهن برقی معرفی شده‌اند. این روش‌ها را می‌توان در دو گروه کلی روش‌های استاتیکی و روش‌های دینامیکی تقسیم‌بندی کرد. روش‌های استاتیکی قابلیت جبران سازی به صورت لحظه‌ای را ندارند و در نتیجه این روش‌ها به سرمایه‌گذاری اولیه کمی احتیاج دارند و نسبت به روش‌های دینامیکی از پیچیدگی کمتری برخوردار هستند. روش‌های دینامیکی قادر به جبران سازی لحظه‌ای هستند و در مورد پارامتر تحت جبران سازی خود معمولاً بهبود کامل را بدست می‌دهند.

۳-۲ روش‌های بهبود عدم تعادل جریان

مهم‌ترین مشکل شبکه‌های تغذیه کننده راه‌آهن برقی AC عدم تعادل جریان می‌باشد. این مشکل در شبکه‌های تغذیه کننده قطارهای پرسرعت تشدید شده و تبعات ناشی از آن در صورت عدم جبران

سازی بر روی این شبکه‌ها بسیار حاد خواهد بود. معمولاً سه روش عمده برای جبران سازی جریان توالی منفی در شبکه‌های تراکشن استفاده می‌شود که جبران سازی از طریق دو روش ابتدایی به صورت استاتیکی و سومی به صورت دینامیکی انجام می‌شود.

□ استفاده از تکنیک چرخش فاز

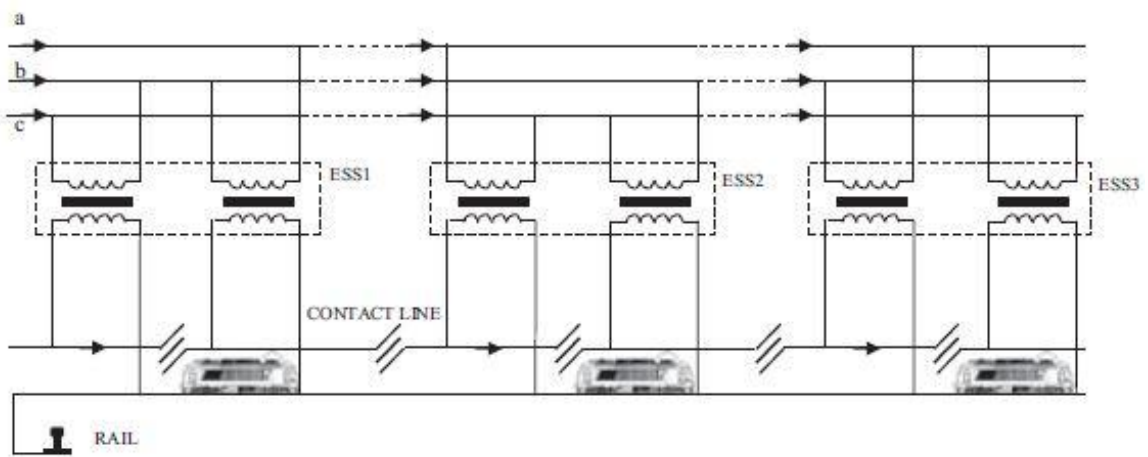
□ استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل کننده

□ استفاده از ادوات FACTS

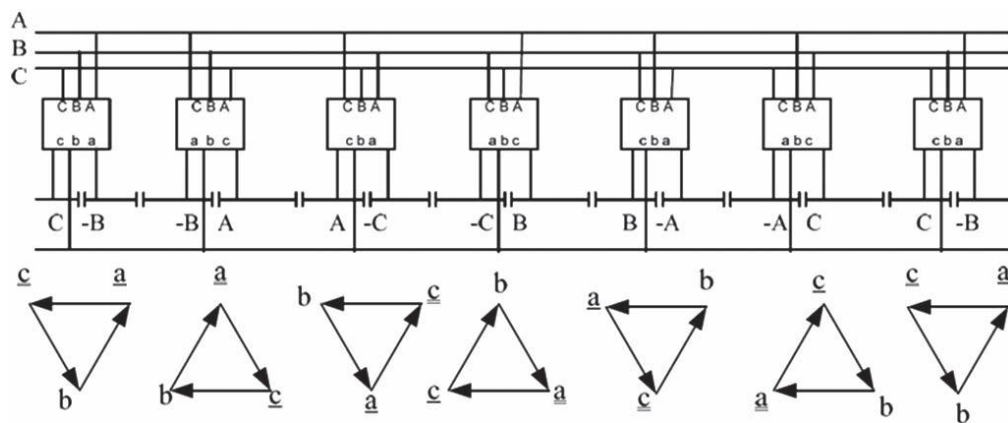
۳-۲-۱ استفاده از تکنیک چرخش فاز

در روش چرخش فاز پست‌های تراکشن متوالی توسط فازهای مختلف تغذیه می‌شوند به این منظور که مجموعه پست‌های تراکشن که هر کدام از دید شبکه قدرت همانند یک بار نامتقارن هستند؛ در مجموع رفتار یک بار متقارن را از خود نشان بدهند [۳۵]. شکل (۳-۱) و شکل (۳-۲) نحوه استفاده از تکنیک چرخش فاز برای کاهش عدم تعادل جریان در سمت شبکه قدرت را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است تکنیک چرخش فاز برای پست‌هایی با ترانسفورماتور V-V، Yd11 و Yd5 در سه پست متوالی کامل می‌شود. به علت اختلاف ولتاژ بین دو بخش مجاور، یک بخش ایزوله برای عایق کردن دو بخش در پست تراکشن مورد نیاز است. تعدادی از مهم‌ترین معایب استفاده از تکنیک چرخش فاز جهت کاهش عدم تعادل جریان در ادامه آورده شده است:

- زمانی جبران سازی کامل سیستم میسر می‌شود که بخش‌های تغذیه شده با فازهای مختلف دارای بار مشابهی باشند. تحقق این امر با توجه به برنامه حرکتی قطار و توزیع تصادفی آن‌ها تقریباً غیره ممکن است.
- برای جبران سازی کامل عدم تعادل جریان در این روش باید حتماً تعداد پست‌های تراکشن مضرب ۳ باشند.
- موقع وارد شدن قطار از یک بخش به بخش دیگر، به علت وجود خط ایزوله (به خاطر تغذیه بخش‌های مجاور با فازهای متفاوت) پانتوگراف باید از سیم تماس جدا شود. این مسئله سرعت قطار را به خصوص در راه آهن پرسرعت محدود خواهد کرد.



شکل (۱-۳) استفاده از تکنیک چرخش فاز در پست‌های تراکشن برای ترانسفورماتور V-V [۳۵]



شکل (۲-۳) استفاده از تکنیک چرخش فاز در پست‌های تراکشن برای ترانسفورماتورهای Yd5 و Yd11 [۱]

۲-۲-۳ استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده

سیستم راه‌آهن برقی AC به صورت تک فاز تغذیه می‌شود بنابراین در پست‌های تراکشن از ترانسفورماتورها با ساختارهای متفاوت به منظور تبدیل ولتاژ سه فاز به تک فاز استفاده می‌گردد. برخی از مهم‌ترین انواع ترانسفورماتورهای مورد استفاده در راه‌آهن برقی؛ اتصال تک فاز، اتصال اسکات^۱، اتصال V-V، اتصال لبلان^۲ و اتصال ستاره- مثلث است.

انتخاب نوع ترانسفورماتور تراکشن بر روی میزان عدم تعادل جریان تأثیرگذار است [۱۱، ۳۶، ۳۷]، ولی با این روش هرگز نمی‌توان به جبران سازی به صورت کامل دست پیدا کرد. برای اتصال تک فاز

^۱ Scott

^۲ Leblanc

میزان عدم تعادل جریان بدون توجه به مقدار بار تراکشن موجود در دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن همیشه ۱۰۰٪ خواهد بود. این مقدار برای ترانسفورماتورهای V-V و ستاره-مثلث در بهترین حالت (برابری بار تراکشن در دو بخش شمالی و جنوبی) تا ۵۰٪ نیز کاهش می‌یابد. ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده مثل اسکات، لبلان، وودبریج^۱ و تطبیق امپدانس^۲ تنها در صورت برابری بار در دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن می‌توانند مقدار عدم تعادل جریان را تا مقدار صفر نیز کاهش دهند [۱۱، ۳۶-۴۰]. اما باید به این نکته توجه داشت که متعادل بودن بار در دو بخش شمالی و جنوبی پست پدیده‌ای نادر است. در فصل چهارم پیرامون ترانسفورماتورهای تراکشن و نقش آن‌ها در کاهش عدم تعادل جریان مفصل بحث شده است.

۳-۲-۳ استفاده از ادوات FACTS

با استفاده از ادوات FACTS جبران سازی به صورت دینامیکی و لحظه‌ای انجام می‌شود و معمولاً با این روش بهبود کامل برای پارامتر تحت جبران سازی بدست می‌آید. ادوات FACTS به طور کلی شامل STATCOM، SVC و UPFC هستند. از این سه مورد، SVCها به صورت گسترده‌تری در شبکه‌های تراکشن حضور یافته‌اند زیرا SVCها دارای ساختاری ساده‌تر و ارزان‌تر از دو نوع دیگر هستند [۱۴، ۴۱]، ولی باید توجه داشت که STATCOM و UPFC دارای جبران سازی بهتر و کامل‌تری در زمینه کیفیت توان نسبت به SVCها هستند.

SVC شامل مدار معادلی با خازن و سلف متغیر است که با توجه به خاصیت القایی یا خازنی شبکه، به طور خودکار کلید زنی می‌شوند. SVCها در واقع یک امپدانس و یا ادمیتانس متغیر هستند که با توجه به شرایط بار و سیستم کنترل خود، عمل می‌کنند. طبق قانون اشتاین‌متر^۳، اگر یک بار مقاومتی بین فازهای A و B قرار گیرد و اندازه این بار G باشد؛ طبق شکل (۳-۳) می‌توان این بار را از طریق یک بار خازنی به اندازه $\frac{G}{\sqrt{3}}$ بین فازهای B و C و یک بار القایی به اندازه $\frac{G}{\sqrt{3}}$ - بین فازهای A و C معادل کرد.

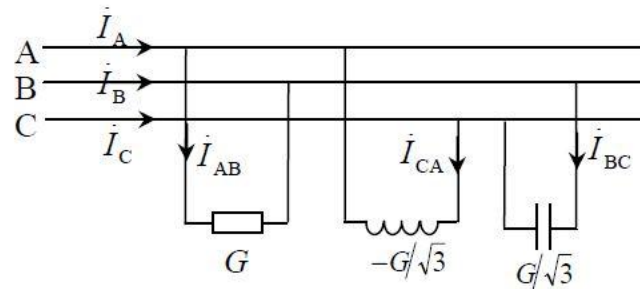
دیگرام فازوری مدار الکتریکی جبران سازی بر طبق قانون اشتاین‌متر در شکل (۳-۴) نشان داده شده

¹ Woodbridge

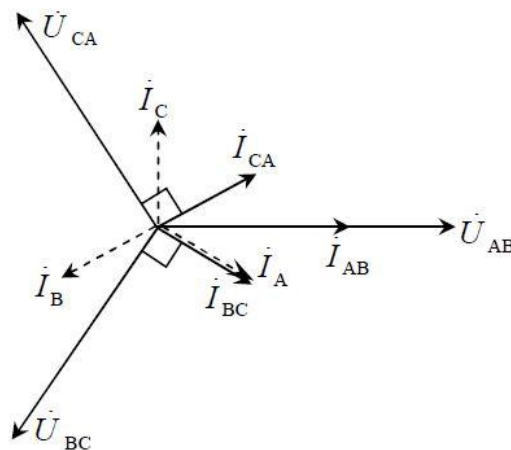
² Impedance-Matching

³ Steinmetz's Law

است. مشاهده می‌شود که جریان‌های سمت اولیه کاملاً متعادل هستند. بنابراین با استفاده از SVC می‌توان توالی منفی جریان را در بارهای تراکشن جبران سازی نمود. در این روش SVC باید در سمت شبکه قدرت نصب شود و با توجه به اینکه پست‌های تراکشن در راه‌آهن پرسرعت به خطوط نیرو با ولتاژ بسیار بالا نصب می‌شوند، باید تعداد زیادی کلید باهم سری گردد تا بتوانند این سطح ولتاژ را تحمل کنند [۴۲]، لذا قابلیت اطمینان SVC به شدت کاهش پیدا می‌کند؛ ضمن اینکه از نظر اقتصادی نیز مناسب نیست. اگر SVC در سمت ثانویه ترانسفورماتور نصب شود، اتصال ترانسفورماتور نیز مهم می‌شود. یکی از عیب‌های بزرگ SVC تولید هارمونیک‌های سوم، پنجم و هفتم زیاد است. ضریب قدرت شبکه به دلیل تولید هارمونیک کاهش می‌یابد بنابراین نمی‌توان به طور همزمان هر دو شاخص توالی منفی جریان و توان راکتیو را بهبود داد [۱۷].



شکل (۳-۳) مدار الکتریکی جبران سازی جریان توالی منفی بر طبق قانون اشتاین متز [۴۱]

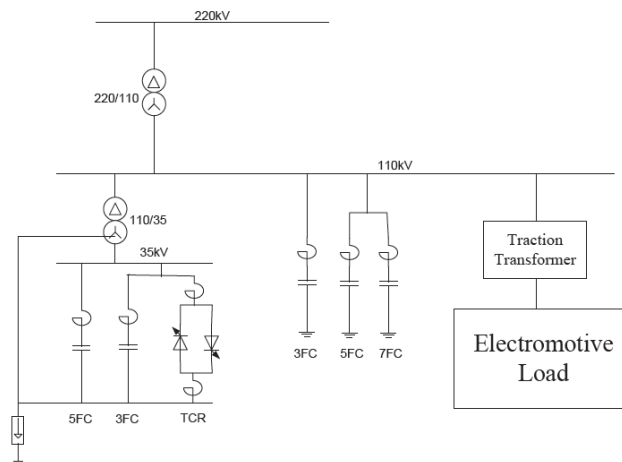


شکل (۴-۳) دیاگرام فازوری مربوط به مدار الکتریکی شکل (۳-۳) [۴۱]

شکل (۵-۳) چگونگی اتصال یک SVC نوع راکتور کنترل شده تریستوری^۱ (TCR-FC)، در سمت

^۱ Thyristor Controlled Reactor-Fix Capacitor

شبکه قدرت را نمایش می‌دهد. در این ساختار، برای حذف هارمونیک‌های تولیدشده توسط TCR از فیلترهای تک تنظیمه^۱ مرتبه سه و پنج در سمت ۳۵ kV و برای حذف هارمونیک‌های تولید شده توسط شبکه تراکشن از فیلترهای مرتبه سه و پنج و هفت در سمت ۱۱۰ kV استفاده شده است.



شکل (۳-۵) اتصال SVC در سمت فشارقوی پست تراکشن [۴۳]

۳-۳ روش‌های کاهش هارمونیک

افزایش محتوای هارمونیکی جریان شبکه باعث اعوجاجی شدن شکل موج جریان می‌شود که مستقیماً بر روی ضریب قدرت شبکه تأثیر دارد. به منظور کاهش یا حذف هارمونیک در شبکه‌های تراکشن از فیلترها استفاده می‌گردد. فیلترها در دو دسته استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرند.

۱-۳-۳ فیلترهای پسیو (غیرفعال)

فیلترهای پسیو به صورت استاتیکی قادر به کاهش هارمونیک‌های جریان هستند و یکی از ابتدایی‌ترین روش‌ها برای حذف هارمونیک هستند. این فیلترها از مدارهای LC تشکیل شده‌اند و به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که برای یک فرکانس خاص به حالت تشدید درآمده و باعث فیلتر کردن هارمونیک مورد نظر می‌شوند. مزیت عمده این گونه فیلترها نصب آسان و هزینه کم آن‌ها است و دارای معایب زیر هستند [۱۳، ۴۴].

^۱ Single-Tuned Filters

- ایجاد تشدید موازی در شبکه
- عدم پاسخ دینامیکی مناسب به دلیل ثابت بودن مقادیر C و L
- اندازه بزرگ و حجیم بودن فیلترهای پسیو

۳-۳-۲ فیلتر اکتیو (فعال)

یکی از روش‌های مرسوم حذف هارمونیک، استفاده از فیلترهای اکتیو است که به عنوان یک جبران-کننده توان راکتیو و حذف‌کننده هارمونیک‌های ناخواسته، در ساختار خود از اینورترهایی با ساختارهای مختلف بهره می‌برند. در واقع تولید جریان هارمونیک مورد نیاز برای بارهای غیرخطی، توسط کلید زنی درست اینورترها صورت می‌گیرد. فیلترهای اکتیو برای مقاصد گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند، این مقاصد به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند [۴۵].

- تقلیل اغتشاشات ولتاژ که به دلیل وجود اغتشاشات جریان تولید شده‌اند
- تقلیل هارمونیک‌های جریان در خطوط تغذیه
- متعادل نمودن سه فاز
- بهبود ضریب توان شبکه

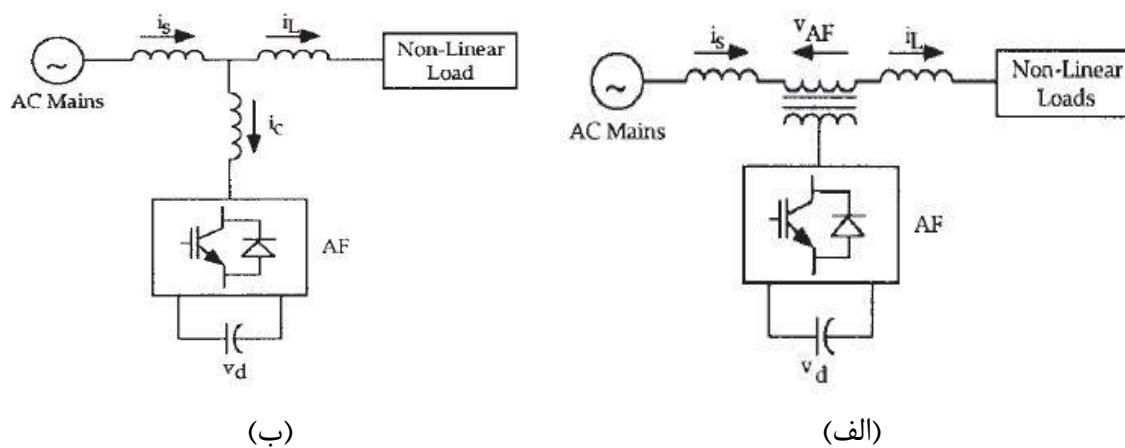
فیلترهای اکتیو را بر اساس روش اتصال آن‌ها به شبکه قدرت می‌توان به صورت موازی، سری و هیبرید استفاده نمود [۴۶-۴۸]

۳-۳-۲-۱ فیلترهای اکتیو سری

فیلترهای اکتیو سری با استفاده از یک ترانسفورماتور تطبیقی به صورت سری با شبکه قرار می‌گیرد. این نوع فیلتر برخلاف فیلترهای اکتیو موازی برای حذف هارمونیک‌های ولتاژ، تنظیم ولتاژ، کاهش توالی منفی و استهلاک هارمونیک‌های ناشی از رزونانس امپدانس خط با فیلترهای پسیو مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۳-۶-الف) یک فیلتر اکتیو سری را نشان می‌دهد.

۲-۲-۳-۳ فیلترهای اکتیو موازی

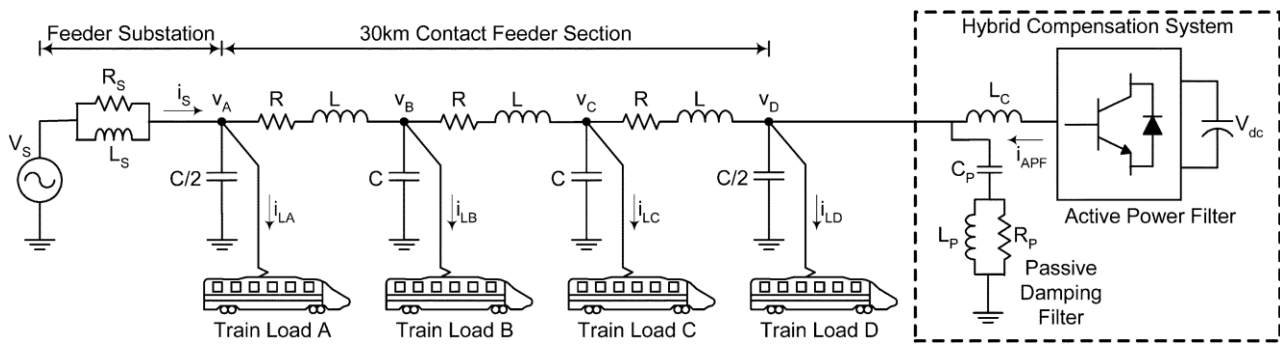
این فیلترها به صورت موازی با بار به شبکه متصل می‌شوند و با تزریق جریان‌های هارمونیکی مانع از هارمونیکی شدن جریان سمت شبکه شده و توان راکتیو مورد نیاز شبکه را توسط تولید جریان راکتیو جبران می‌کند. از فیلترهای فعال برای افزایش قابلیت اطمینان در شبکه‌های قدرت و پایداری و بهبود پروفیل ولتاژ نیز استفاده می‌شود. شکل (۳-۶-ب) یک نمونه فیلتر فعال موازی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶) نحوه اتصال فیلتر اکتیو سری به شبکه (الف) نحوه اتصال فیلتر اکتیو موازی به شبکه [۴۸]

۳-۲-۳-۳ فیلتر هیبریدی

فیلترهای هیبریدی، ترکیبی از فیلترهای اکتیو و پسیو هستند. این نوع فیلترها به دلیل حذف بخش زیادی از هارمونیک‌های مرتبه پایین توسط بخش پسیو و کاهش هزینه، دارای کاربرد زیاد هستند. نمونه یک فیلتر هیبرید که در شبکه راه‌آهن برقی مورد استفاده قرار گرفته است؛ در شکل (۳-۷) نشان داده شده است. فیلترهای هیبرید با حذف عیوب فیلترهای پسیو مانند پدیده تشدید و همچنین عدم پاسخ مناسب به شرایط دینامیکی و همچنین با عملکرد فیلترهای اکتیو، می‌توانند با قیمت کمتر مزایای فیلترهای پسیو و اکتیو را توأمان دارا باشند.



شکل (۷-۳) استفاده از فیلتر هیبرید در شبکه راه آهن برقی [۱۵]

۳-۳-۳ روش‌های جبران سازی توان راکتیو

توان راکتیو در زمان کم باری یا بی‌باری سیستم باعث اضافه ولتاژ در شبکه می‌شود، همچنین مقداری از ظرفیت سیستم را اشغال می‌کند و در نتیجه میزان بهره‌برداری از سیستم را کاهش می‌دهد. تاکنون روش‌های متفاوتی برای جبران سازی توان راکتیو در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته که برخی از متداول‌ترین آن‌ها، استفاده از کندانسورهای سنکرون و تنظیم‌کننده‌های ولتاژ استاتیک مثل استفاده از اتو ترانسفورماتور، استفاده از ادوات FACTS و فیلترهای فعال ظرفیت بالا هستند [۴۹].

استفاده از کندانسورهای سنکرون به دلیل نیاز به تعمیر و نگهداری زیاد و در نتیجه قابلیت اطمینان پایین آن کمتر در شبکه‌های تراکشن مورد استفاده قرار می‌گیرد. از بین روش‌های استاتیکی بهبود جبران سازی توان راکتیو، جبران سازی با اتو ترانسفورماتور به صورت گسترده در شبکه‌های تراکشن پرسرعت استفاده می‌شود [۱۳] که در فصل اول در مورد نحوه جبران سازی و اتصال آن‌ها به شبکه تراکشن مختصری توضیح داده شد.

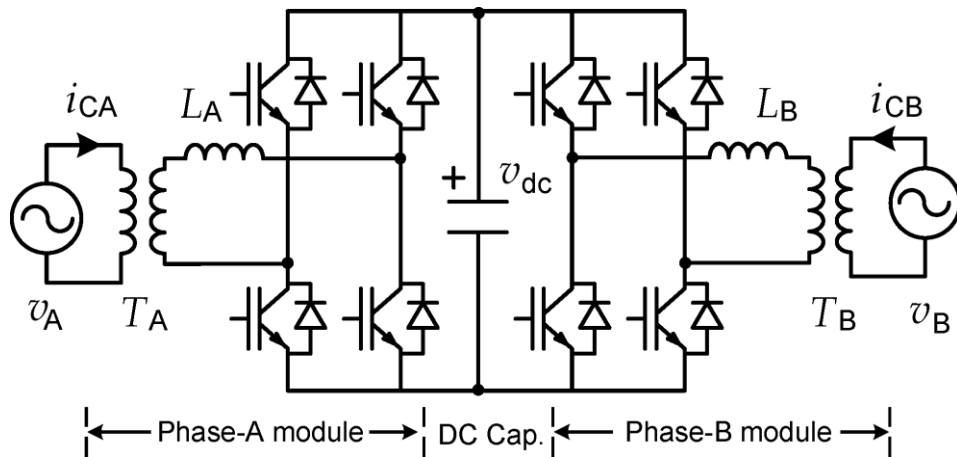
۳-۴ جبران سازهای جامع کیفیت توان

در سال‌های اخیر جبران سازهای مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت در شبکه‌های تراکشن پیشنهاد و ارائه گردیده است که علاوه بر سرعت بالا، قادرند هر سه مشکل کیفیت توان را به طور همزمان جبران نموده و شاخص‌های کیفیت توان را بهبود دهند. در ادامه، به برخی از انواع این جبران سازها که در مقالات مختلف پیشنهاد شده است، اشاره می‌گردد و مزایا و معایب آن‌ها بررسی می‌شود.

۳-۴-۱ بهبوددهنده توان ریلی (RPC)

سیستم بهبوددهنده توان ریلی برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط محققین ژاپنی ارائه شد و در راه آهن برقی پرسرعت شینکانسن ژاپن مورد استفاده قرار گرفت [۱۶]. این جبران ساز قادر است به طور همزمان هر سه شاخص مهم کیفیت توان را به طور کامل جبران کند و در نتیجه بهبودی کامل کیفیت توان بدست می آید. RPC در سمت ثانویه پست تراکشن نصب می شود و از دو مبدل پشت به پشت^۱ تشکیل شده است که دارای یک خازن لینک DC مشترک هستند. سیستم RPC از طریق ترانسفورماتور کاهنده و سلف های واسط به سیستم تغذیه تراکشن در پست تراکشن وصل می شود. اساس عملکرد RPC انتقال توان اکتیو از یک سمت شبکه به سمت دیگر است. بنابراین کلیدهای استفاده شده در مبدل ها از نوع دوطرفه هستند. شکل (۳-۸) نشان دهنده یک سیستم بهبوددهنده توان ریلی است. در شکل (۳-۸) منابع V_A و V_B نماینده ولتاژهای دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن هستند. RPC از طریق ترانسفورماتورهای کاهنده T_A و T_B و سلف های واسط L_A و L_B به شبکه تغذیه تراکشن در پست تراکشن وصل می شود. استفاده از ترانسفورماتورهای کاهنده باعث می شود به کلید کمتر برای سری شدن در مبدل ها نیاز باشد و در نتیجه ساخت مبدل دارای توجیه اقتصادی شود و از مشکلات ناشی از سری شدن کلیدهای قدرت کاسته شود. مهم ترین مشکل کیفیت توان در شبکه تغذیه راه آهن برقی پرسرعت، بحث عدم تعادل جریان و مشکلات ناشی از آن است. بنابراین اساس عملکرد RPC بر انتقال توان اکتیو از بخش دارای بار بیشتر به بخش دارای بار سبک تر است. بدین منظور در هر لحظه یکی از مبدل ها به عنوان یکسو کننده عمل می کند و خازن لینک DC را شارژ می کند و مبدل دیگر جریان اکتیو را از طریق کلید زنی به سمت دیگر شبکه تزریق کرده و مانند یک اینورتر عمل می کند. با انتقال توان اکتیو، دامنه جریان اکتیو دو طرف برابر شده و عدم تعادل به طور کامل حذف می گردد. جریان های هارمونیک و توان اکتیو نیز پس از استخراج توسط سیستم کنترلی، از طریق کلید زنی مبدل ها تولید شده و به شبکه تزریق می شود.

^۱ Back To Back (BTB)



شکل (۸-۳) ساختار بهبوددهنده توان ریلی [۲۱]

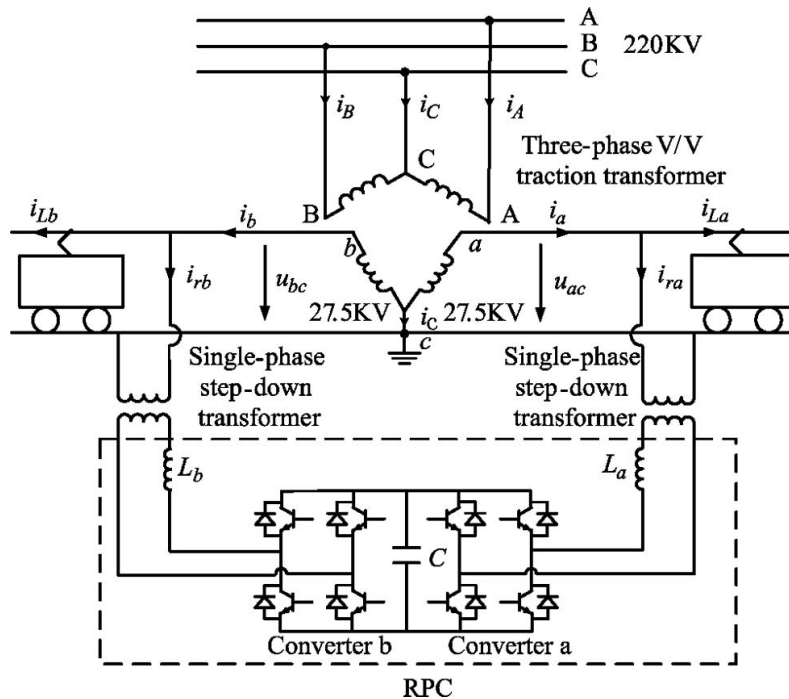
تا به حال کارهای زیادی در زمینه بهبود کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن با استفاده از جبران ساز RPC ارائه شده است که هر کدام در مورد بخش‌های گوناگون سیستم RPC اعم از ساختار و اصول کنترلی و تئوری جبران سازی مطالبی را بیان کرده‌اند. بررسی و مطالعات روی سیستم‌های RPC را می‌توان در دو حوزه اصلی زیر تقسیم‌بندی کرد [۱۶]:

- تئوری جبران سازی و اصول کنترلی آن
- مدار قدرت و ساختار مبدل‌ها

در حوزه مدار قدرت و ساختار مبدل‌ها عمده‌ترین مباحث را می‌توان در نوع ترانسفورماتور مورد استفاده در پست تراکشن، ساختار مبدل‌های پشت به پشت و استفاده از سایر جبران سازها مثل فیلترهای غیرفعال در کنار RPC مطرح نمود. در حوزه تئوری جبران سازی و روش‌های کنترلی آن، علاوه بر اینکه روش‌های جدید مطرح شده در مورد RPC مدنظر قرار می‌گیرند، از روش‌های کنترلی مرسوم در جبران سازهای دیگر نیز می‌توان کمک گرفت. روش‌های کنترلی را به طور کلی در دو حوزه فرکانس و زمان قرار می‌گیرند. استخراج سیگنال‌های مرجع جبران ساز در روش‌های کنترلی حوزه فرکانس، بر اساس آنالیز فوریه سیگنال‌های هارمونیک ولتاژ یا جریان است. کاربرد آنالیز تبدیل فوریه و حل تعداد زیادی معادله غیرخطی باعث افزایش زمان پاسخ‌گویی الگوریتم‌های کنترلی حوزه فرکانس می‌شود؛ لذا در کارهای تحقیقاتی پیشین بیشتر از روش‌های کنترلی حوزه زمان استفاده شده است. این روش‌ها بر اساس استخراج مقادیر لحظه‌ای سیگنال‌های جبران ساز بنا شده‌اند و تنوع زیادی دارند [۱۶].

ساختار RPC با انواع مختلف ترانسفورماتورهای تراکشن مثل V-V، YNd11 و اسکات تاکنون مورد

مطالعه و بررسی قرار گرفته است [۱۶، ۱۷، ۱۵۰]. شکل (۹-۳) اتصال این جبران ساز به پست تراکشن با ترانسفورماتور V-V را نشان می‌دهد.

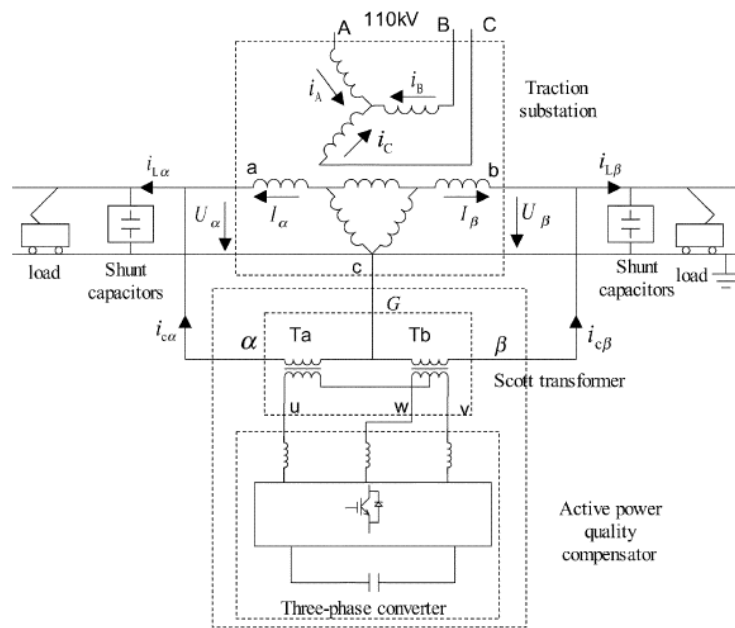


شکل (۹-۳) بهبوددهنده توان ریلی (RPC) در ساختار ترانسفورماتوری V-V [۱۷]

۲-۴-۳ جبران ساز اکتیو کیفیت توان^۱ (APQC)

این جبران کننده به منظور ارتقاء سطح کیفیت توان شبکه راه آهن برقی در محل پست تراکشن طراحی و معرفی گردید. این جبران ساز شامل یک ترانسفورماتور اسکات و یک مبدل منبع ولتاژ سه بازو است. ترانسفورماتور اسکات وظیفه متعادل کردن توان اکتیو در دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن را بر عهده دارد. همچنین به عنوان یک ترانسفورماتور ایزوله کار کرده و مبدل سه فاز را به شبکه متصل می‌کند [۱۹]. شکل (۱۰-۳) ساختار جبران کننده APQC را در پست تراکشن با ترانسفورماتور تطبیق امپدانس نشان می‌دهد.

^۱ Active Power Quality Compensator



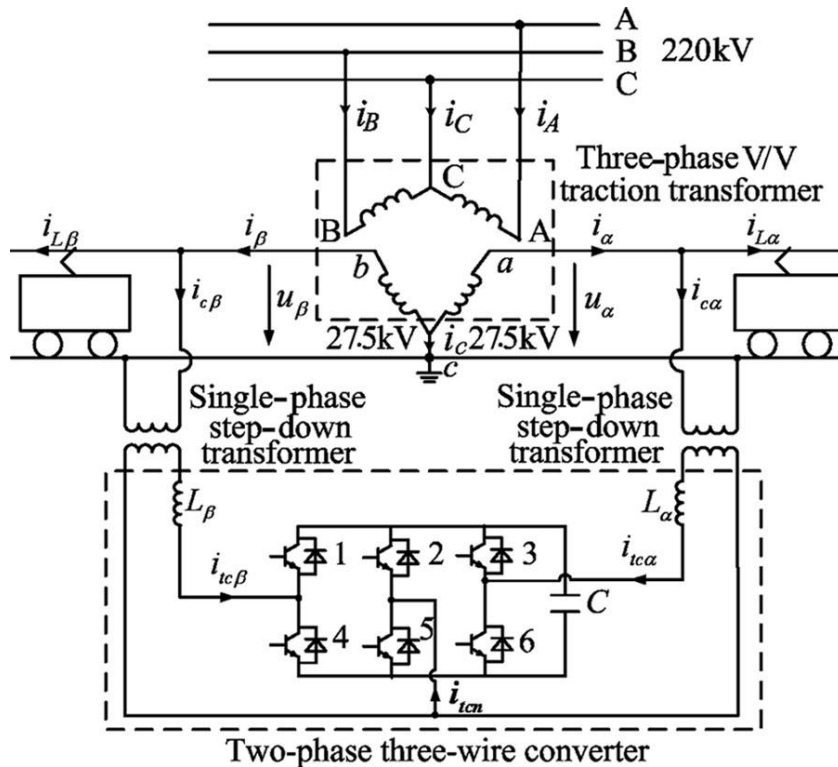
شکل (۳-۱۰) ساختار جبران کننده اکتیو کیفیت توان (APQC) [۱۹]

جریان‌های جبران سازی از طریق ترانسفورماتور اسکات و سلف‌های واسط به دو طرف پست تراکشن تزریق می‌گردد و جبران سازی را انجام می‌دهند. استفاده از مبدل مرسوم دو سطحی با سه بازو و شش کلید یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های جبران کننده اکتیو کیفیت توان است. این موضوع باعث کاهش هزینه مبدل و همچنین سادگی کنترل و پیاده‌سازی این جبران کننده می‌شود. اما عدم استفاده برای ساختارهای مختلف ترانسفورماتور تراکشن را می‌توان بزرگ‌ترین عیب آن دانست. ترانسفورماتور تراکشن استفاده شده در این ساختار باید قابلیت تبدیل ولتاژ سه فاز به دو ولتاژ عمود بر هم (از نظر برداری) را دارا باشد؛ چون ترانسفورماتور اسکات ایزوله کننده مبدل فقط زمانی می‌تواند جبران سازی صحیح انجام دهد که دو طرف پست تراکشن دارای ولتاژهای عمود بر هم باشند.

۳-۴-۳ جبران سازی بر اساس مبدل دوفاز سه سیمه

سیستم APQC با وجود مزایای زیاد، دارای معایب مهمی مثل محدودیت در انتخاب ترانسفورماتور پست تراکشن است. به عبارت دیگر چون این مبدل به صورت سه فاز است حتماً به یک ترانسفورماتور ایزوله کننده سه فاز به دو فاز نیاز است و از طرفی باید ترانسفورماتور پست تراکشن نیز حتماً از نوع ترانسفورماتورهای متعادل کننده انتخاب شود. به منظور غلبه بر این محدودیت‌ها ساختار جدیدی از RPC با مبدل سه بازو و سه سیمه معرفی می‌شود [۵۱]. ساختار این جبران ساز با حضور

ترانسفورماتور V-V در پست تراکشن در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۱) ساختار جبران ساز دوفاز سه سیمه [۵۱]

در این ساختار دو فاز عمل جبران سازی را بر عهده دارند و فاز سوم جمع جریان‌های دو فاز مربوطه می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این ساختار قابلیت استفاده با هر نوع ترانسفورماتور تراکشن است. در مقایسه با ساختار RPC متداول، تعداد کلیدهای نیمه هادی در این جبران ساز از ۸ عدد به ۶ عدد کاهش پیدا کرده است. اما باید توجه داشت که برخلاف مبدل‌های سه فاز، در این جبران ساز هر یک از بازوها، به صورت کاملاً مجزا و مستقل از بقیه کنترل شده و هر بازو دارای سیستم کنترلی خاص خود هستند [۵۱].

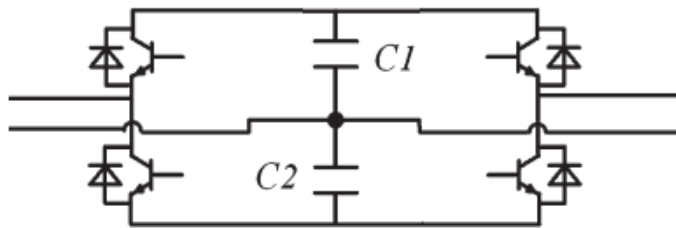
۳-۴-۴ جبران ساز مبتنی بر مبدل نیم پل^۱ (HBRPC)

جبران سازی از طریق مبدل‌های نیم پل مانند سایر جبران سازهای توان ریلی به صورت پشت به پشت صورت می‌گیرد. شکل (۳-۱۲) شماتیک یک جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل‌های نیم پل را نمایش داده است. این ساختار از دو مبدل نیم پل پشت به پشت و دو خازن سری تشکیل شده

^۱ Half-Bridge Railway Power Conditioner

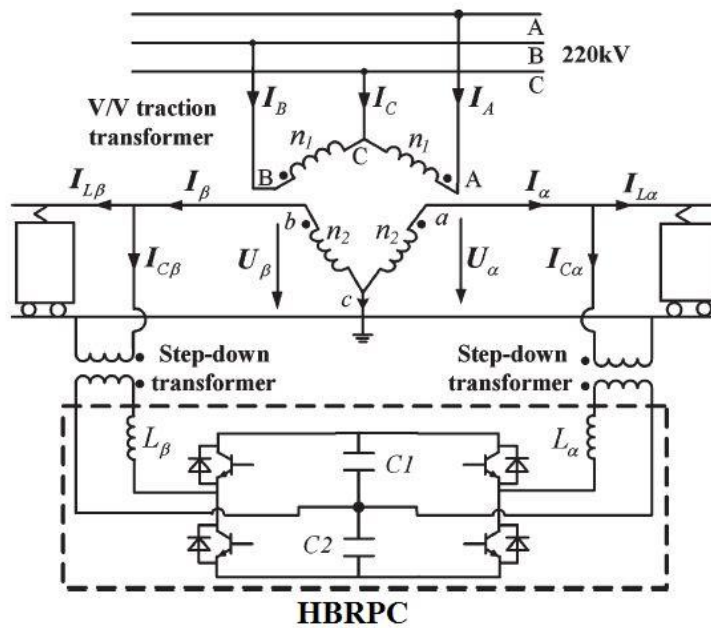
است که نقطه وسط دو خازن به عنوان نقطه مشترک دو طرف تک فاز خواهد بود.

جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل‌های نیم پل به همراه اتصال ترانسفورماتوری V-V در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده است. در مقایسه با RPC متداول، HBRPC می‌تواند تعداد کلیدها را با همان عملکرد RPC، به نصف کاهش دهد؛ بنابراین می‌تواند پیچیدگی مدار سخت‌افزار و هزینه را کاهش دهد و قابلیت اطمینان سیستم جبران سازی را افزایش دهد؛ ولی سیستم کنترلی این جبران‌کننده بسیار پیچیده‌تر از جبران‌سازهای متداول است. تنش ولتاژ کلیدهای جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل‌های نیم پل دو برابر است و فرکانس کلید زنی معادل ۵۰٪ کم می‌شود که قادر است مؤلفه‌های هارمونیک را زیاد کند [۱۸].



شکل (۳-۱۲) جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل نیم پل (HBRPC) [۱۸]

از سوی دیگر در این جبران ساز چون ولتاژ لینک DC توسط دو خازن سری نگه داشته می‌شود، مشکل تعادل ولتاژ وجود خواهد داشت. اگر ولتاژهای دو خازن DC نامتعادل باشند، منجر به اعوجاج در جریان خروجی شده و در ادامه باعث نوسانات و نامتعادلی‌های بزرگ‌تر در ولتاژ لینک DC می‌گردد، لذا در عملکرد عادی و پایدار سیستم تأثیر گذاشته و باید راهکاری برای کنترل ولتاژ لینک DC پیدا کرد [۱۸].



شکل (۳-۱۳) جبران ساز توان ریلی مبتنی بر مبدل‌های نیم پل با ترانسفورماتور تراکشن V-V [۱۸]

۳-۴-۵ سیستم جبران ساز هم‌فاز^۱

این ساختار جبران‌کنندگی به تازگی در برخی مقالات مطرح شده است و ساختار نو ظهوری می‌باشد که تکنولوژی آن هنوز کامل نشده است و دارای دو نوع پیکربندی می‌باشد [۷, ۲۱, ۵۲-۵۹]: شبکه تغذیه هم‌فاز ساده و پیشرفته

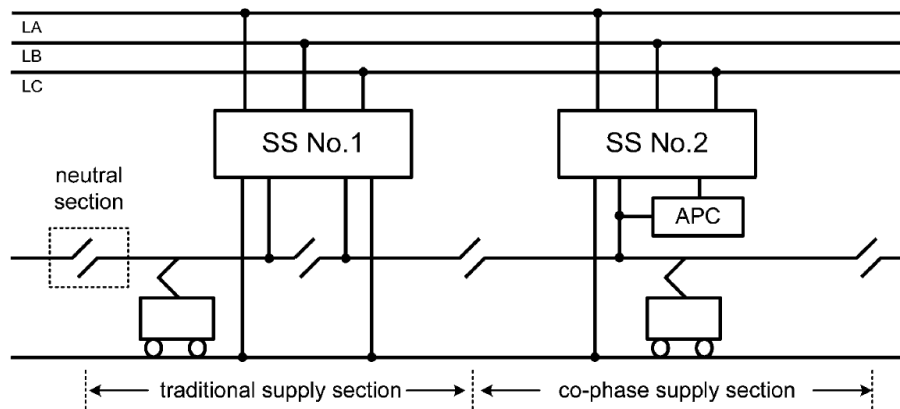
۳-۴-۵-۱ شبکه تغذیه هم‌فاز ساده

در این روش، مسیر برگشت جریان (ریل بازگشت) مستقیماً به یکی از فازهای منبع سه فاز متصل می‌گردد و سیم تماس از طریق دو فاز دیگر به وسیله جبران ساز اکتیو توان^۲ (APC) که در واقع یک مبدل پشت به پشت است، تغذیه می‌شود تا توان را بین فازها به طور مساوی تقسیم نموده و از عدم تعادل جریان جلوگیری نماید. این سیستم علاوه بر جبران سازی جریان توالی منفی، توان راکتیو و هارمونیک‌ها را نیز جبران می‌کند. مزیت دیگر شبکه تغذیه هم‌فاز ساده عدم حضور بخش جداساز در محل پست تراکشن می‌باشد و در نتیجه پست تراکشن دارای بخش شمالی و جنوبی نمی‌باشد. حضور جداسازها در پست‌های تراکشن سبب محدودیت در سرعت قطارها می‌گردد و لازم است تا قطارها در

^۱ Co-phase

^۲ Active Power Compensator

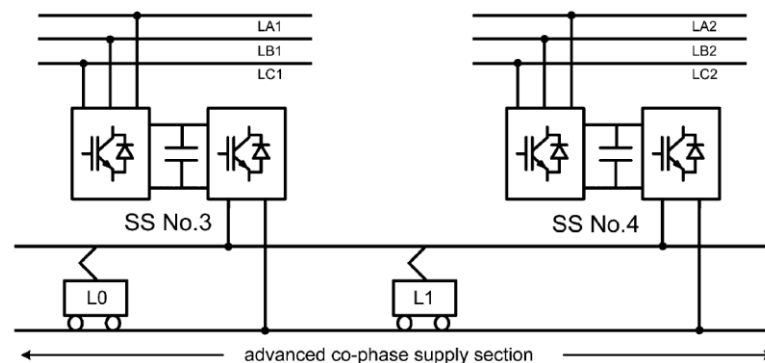
هنگام عبور از پست‌های تراکشن سرعت خود را کاهش دهند و همچنین وجود این جداسازها منجر به ایجاد جرقه در هنگام عبور قطار از محل پست می‌شود. شماتیک مداری شبکه تغذیه هم‌فاز ساده به همراه شبکه تغذیه متداول در شکل (۳-۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۴) ساختار شبکه تغذیه هم‌فاز ساده به همراه شبکه تغذیه متداول [۵۲]

۳-۴-۵-۲ شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته^۱

ساختار شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته در شکل (۳-۱۵) نشان داده شده است. در این سیستم، مبدل سه فاز از طریق اشتراک‌گذاری لینک DC با مبدل تک فاز مستقیماً به شبکه تراکشن متصل شده است. در شبکه تغذیه هم‌فاز ساده، پست‌های تراکشن از طریق یک پست جداساز از یکدیگر جدا می‌شوند در حالیکه در شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته، دامنه و فاز ولتاژ در تمام بخش‌های شبکه تراکشن یکسان بوده و دیگر نیازی به پست جداساز در هیچ نقطه‌ای از مسیر نمی‌باشد و محدودیت سرعت و ایجاد جرقه که به دلیل وجود پست‌های جداساز به وجود می‌آید، در این تکنولوژی وجود ندارد.



شکل (۳-۱۵) ساختار شبکه تغذیه هم‌فاز پیشرفته [۵۲]

^۱ Advanced Co-phase

در این سیستم تمام توان قطارها از مبدل عبور می‌کند؛ لذا این مبدل‌ها دارای ظرفیت بالایی می‌باشند و از قابلیت اطمینان قابل قبولی برخوردار نیستند [۱] و همین امر پیاده‌سازی آن‌ها را در شبکه‌های تراکشن دچار معضل کرده است که با رفع این مشکل، عملی شدن آن‌ها میسر خواهد شد.

۳-۴-۶ جبران سازه‌های هیبریدی (ترکیبی)

از آنجائیکه جبران سازه‌های جامع کیفیت توان ریلی اعم از موارد ذکر شده، هر سه مؤلفه توالی منفی جریان، توان راکتیو و مؤلفه‌های هارمونیک را جبران می‌کنند، بنابراین دارای ظرفیت بسیار بالایی هستند؛ لذا به منظور کاهش ظرفیت و بهبود عملکرد این جبران‌کننده‌ها، از یک جبران‌ساز کمکی استفاده می‌شود. در ادامه به بررسی برخی از روش‌های پیشنهاد شده در مقالات مختلف در این زمینه خواهیم پرداخت.

۳-۴-۶-۱ جبران ساز کیفیت توان هیبریدی^۱ (HPQC)

شکل (۳-۱۶) نشان دهنده ساختار این جبران‌کننده در حضور ترانسفورماتور V-V در شبکه تغذیه هم‌فاز است. همان‌طور که در شکل مشخص است، HPQC مشابه RPC است که در خروجی آن از فیلتر پسیو LC استفاده شده است. این جبران‌ساز با بکارگیری فیلتر پسیو در خروجی خود، اهدافی مانند بهبود عملکرد، کاهش ظرفیت اجزای RPC، کاهش ولتاژ لینک DC و در نهایت کاهش ظرفیت RPC را دنبال می‌کند. فیلتر پسیو جایگذاری شده در خروجی، برای یک هارمونیک خاص بار تراکشن تنظیم می‌شود، به گونه‌ای که فقط اجازه عبور جریان با فرکانس مورد طراحی را می‌دهد. بدین ترتیب میزان جریان‌های عبوری از مبدل نیز کاسته شده و سطح ولتاژ لینک DC نیز پایین‌تر می‌آید.

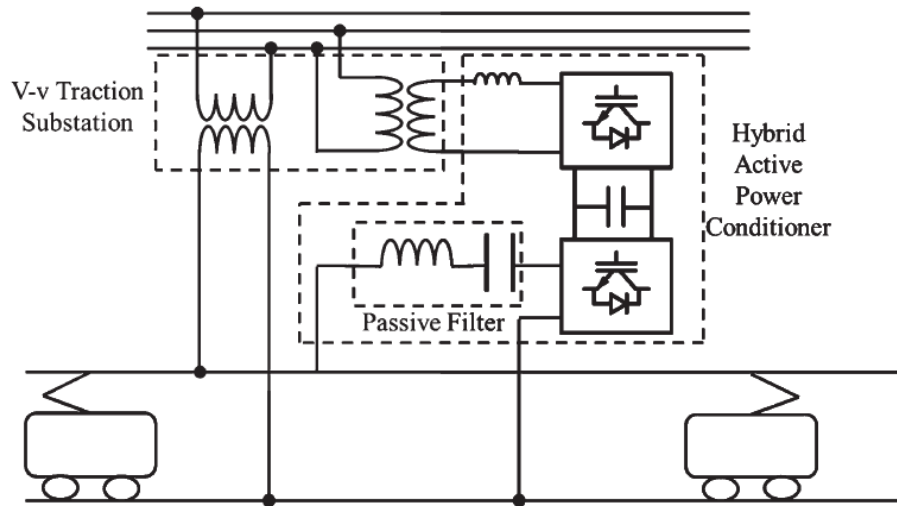
۳-۴-۶-۲ سیستم جبران‌کننده هیبریدی الکتریکی مغناطیسی^۲ (EMHCS)

اساس کار این سیستم جبران‌سازی بر مبنای کاهش ظرفیت مبدل‌های RPC و همچنین کاهش ولتاژ لینک DC و در نهایت کاهش ظرفیت خازن DC است. شکل (۳-۱۷) نشان دهنده ساختار جبران‌ساز EMHCS و چگونگی اتصال این جبران‌ساز به پست تراکشن دارای ترانسفورماتور V-V می‌باشد.

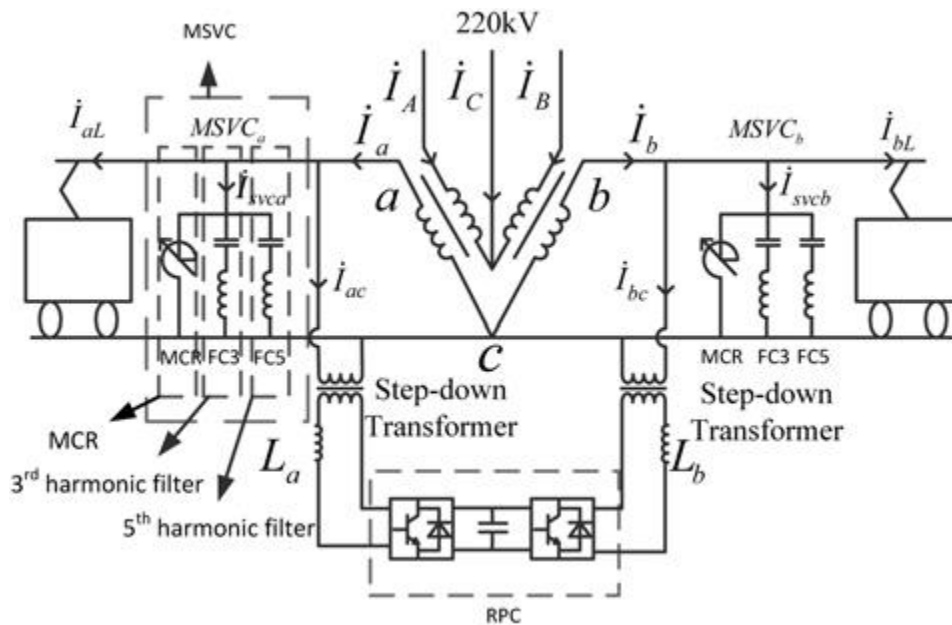
^۱ Hybrid Power Quality Compensator

^۲ Electrical Magnetic Hybrid Compensation System

همان طور که مشاهده می‌شود در ساختار این جبران ساز، از RPC به همراه دو جبران کننده‌ی توان راکتیو استاتیکی مغناطیسی^۱ (MSVC) در طرفین پست تراکشن استفاده شده است که MSVC خود متشکل از یک راکتور کنترل شده مغناطیسی^۲ (MCR) به همراه فیلترهای پسیو مرتبه سه و پنج می‌باشد.



شکل (۱۶-۳) ساختار HPQC در شبکه تغذیه هم‌فاز [۵۳]

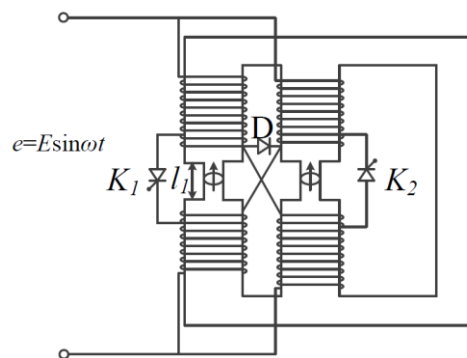


شکل (۱۷-۳) جبران ساز هیبریدی مغناطیسی الکتریکی (EMHCS) [۲۶]

در جبران ساز هیبریدی مغناطیسی الکتریکی، وظیفه تأمین توان راکتیو از دوش RPC برداشته شده

^۱ Magnetic Static Var Compensator
^۲ Magnetic Controlled Reactor

و در نتیجه در این ساختار RPC فقط وظیفه جا به جایی توان اکتیو و جبران سازی هارمونیک را بر عهده دارد و MSVC وظیفه جبران توان راکتیو و حذف هارمونیک‌های مرتبه سوم و پنجم را عهده‌دار می‌باشد. سیستم کنترلی با اندازه‌گیری میزان توان راکتیو در دو سمت پست تراکشن، پالس‌های لازم با زوایای آتش مورد نظر را برای تریستورها تولید می‌کند. اما جبران ساز MCR که ساختار آن در شکل (۱۸-۳) نشان داده شده است دارای معایبی نیز می‌باشد که عبارت‌اند از: ساختار پیچیده، دشوار بودن پیاده‌سازی کنترل‌کننده، تولید محتوای هارمونیک بالا به دلیل اشباع هسته سیم‌پیچ و سرعت پاسخ پایین به دلیل استفاده از المان‌های پسیو.



شکل (۱۸-۳) ساختار جبران ساز MCR [۲۷]

۳-۴-۴-۳ جبران ساز کیفیت توان هیبریدی الکتریکی مغناطیسی^۱ (HEMPQC)

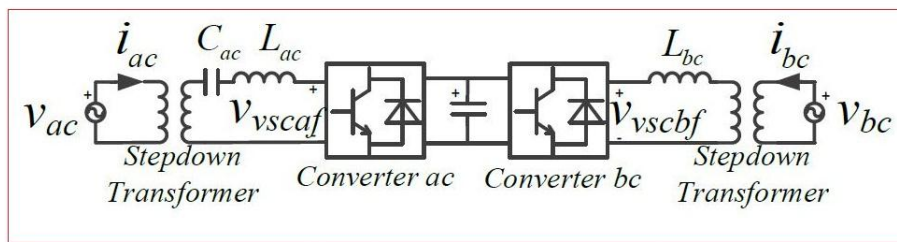
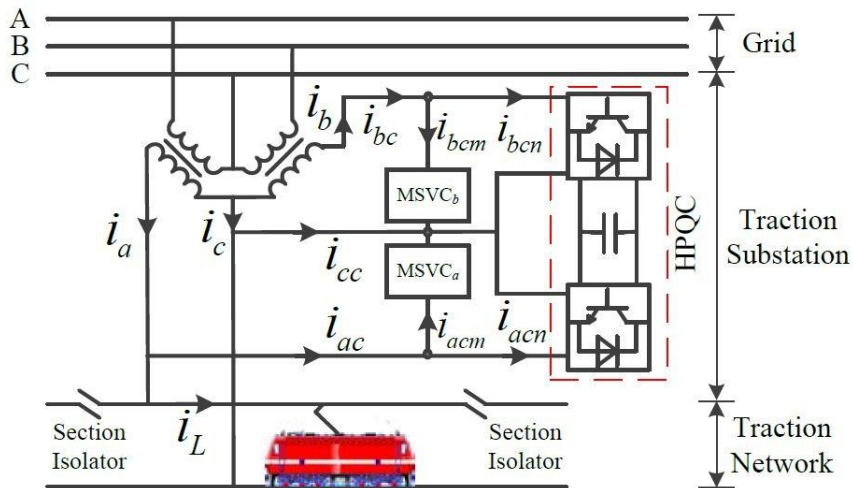
این جبران ساز مشابه EMHCS بوده با این تفاوت که در آن بجای RPC از تکنولوژی HPQC استفاده شده است. ساختار این سیستم جبران سازی در شکل (۱۹-۳) نشان داده شده است. این سیستم مزایای HPQC و EMHCS را همزمان داراست.

۴-۴-۴-۳ جبران ساز هیبریدی کنترل کیفیت توان ریلی^۲ (HRPQC)

در جبران ساز APQC که قبلاً بررسی گردید، به دلیل استفاده از ترانسفورماتورهای خاصی همچون ترانسفورماتور اسکات و ترانسفورماتور تطبیق امپدانس که علاوه بر پیچیده بودن ساختار این ترانسفورماتورها، از قیمت گزافی نیز برخوردار هستند، هزینه سیستم جبران سازی بالا می‌باشد. مدل بهبودیافته APQC، HRPQC می‌باشد که پیکربندی آن در شکل (۲۰-۳) نشان داده است.

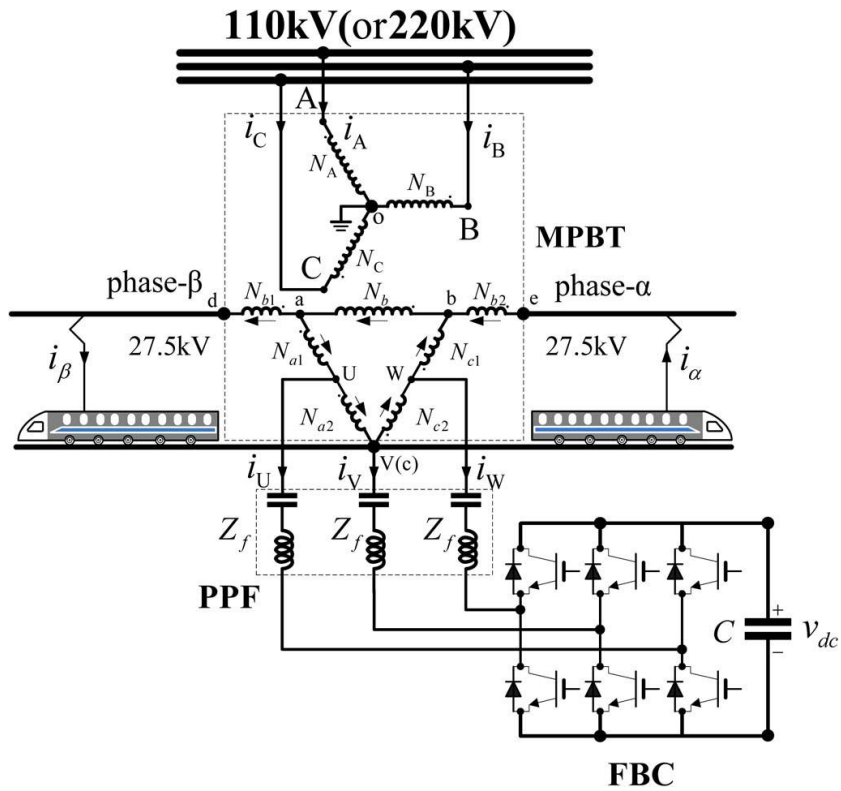
^۱ Hybrid Electrical Magnetic Power Quality Compensator

^۲ Hybrid Railway Power Quality Control



Detailed structure of HPQC

شکل (۳-۱۹) جبران ساز کیفیت توان هیبریدی الکتریکی مغناطیسی (HEMPQC) [۲۷]



شکل (۳-۲۰) جبران ساز هیبریدی کنترل کیفیت توان ریلی (HRPQC) [۶۰]

همان طور که در شکل (۳-۲۰) مشخص است؛ HRPQC متشکل از یک ترانسفورماتور متعادل کننده چند هدفه^۱ (MPBT) که در واقع مدل ارتقاء یافته ترانسفورماتور تطبیق امپدانس است [۶۱] به همراه فیلتر پسیو و مبدل تمام پل^۲ (FBC) سه فاز می باشد. نسبت تبدیل $\frac{N_{a2}}{N_{a1}}$ و $\frac{N_{c2}}{N_{c1}}$ در ترانسفورماتور MPBT می تواند به گونه ای تنظیم شود که FBC قادر باشد مستقیماً و بدون نیاز به ترانسفورماتور کمکی، به ترانسفورماتور تراکشن متصل شود و عمل جبران سازی را انجام دهد که این امر ساختار سیستم جبران سازی را نسبت به APQC ساده تر می کند [۶۰، ۶۲]. فیلترهای قدرت پسیو با حذف هارمونیک های مرتبه پایین عملکرد سیستم را بهبود داده و ظرفیت نامی FBC را کاهش می دهند. لازم به ذکر است که وجود فیلتر پسیو موجب بروز پدیده تشدید می گردد که این مشکل توسط FBC برطرف خواهد شد.

در این ساختار با حذف ترانسفورماتور اسکات و کاهش ظرفیت مبدل تمام پل، هزینه سرمایه گذاری اولیه و فضای اشغال شده کاهش پیدا خواهد کرد.

۳-۴-۵ بهبوددهنده توان ریلی مبتنی بر مبدل نیم پل و سیم پیچ جبران کننده^۳ (HBWCRPC)

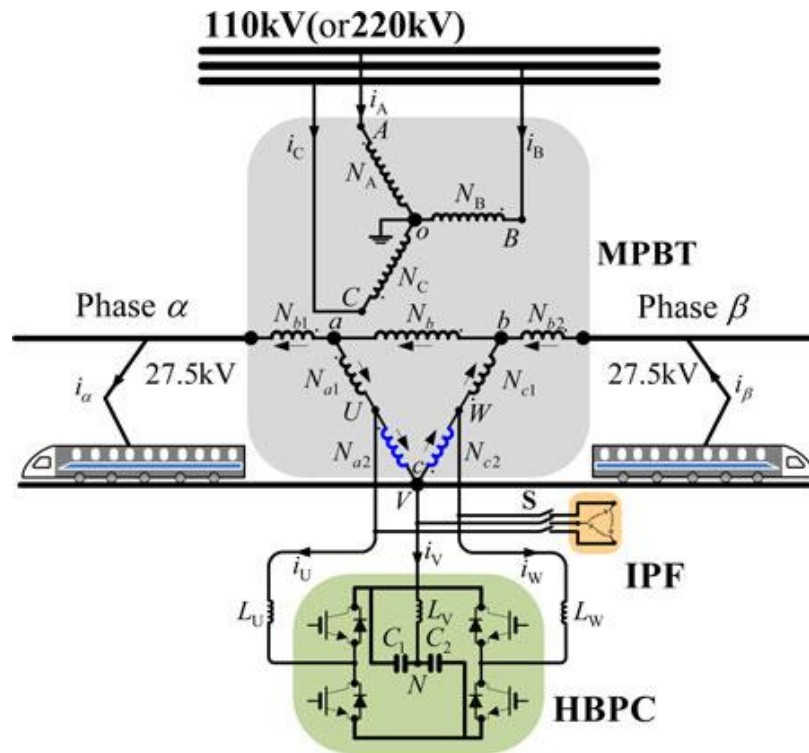
ساختار مداری HBWCRPC در شکل (۳-۲۱) نمایش داده شده است. همان طور که از این شکل برمی آید، در این تکنولوژی از مبدل نیم پل استفاده گردیده است. درباره عملکرد و ساختار HBRPC در بخش (۳-۴-۴) توضیح داده شده است. در HBWCRPC بجای استفاده از ترانسفورماتور V-V از ترانسفورماتور MPBT استفاده گردیده است که نسبت به ترانسفورماتور V-V دارای ضریب استفاده کمتری است [۶۳] اما به دلیل مزیت های که دارد، کاربرد آن را توجیه می نماید. در ترانسفورماتور MPBT می توان با تنظیم تپ های سیم پیچ های UV و WV، مبدل نیم پل را مستقیماً و بدون نیاز به ترانسفورماتور کمکی به ترانسفورماتور تراکشن متصل کرده و عمل جبران سازی را تحقق بخشید. در این سیستم به دلیل حذف دو ترانسفورماتور کمکی تک فاز، ساختار سیستم تغذیه ساده تر گردیده و هزینه سرمایه گذاری اولیه کاهش یافته و فضای کمتری را اشغال می کند. در این سیستم تغذیه، امکان یکپارچه سازی جبران ساز و ترانسفورماتور و همچنین امکان اتصال فیلتر پسیو برای جبران

^۱ Multi-Purpose Balanced Transformer

^۲ Full-Bridge Converter

^۳ Half-Bridge Winding Compensating Railway Power Conditioner

هارمونیک‌ها و جبران توان راکتیو و در نتیجه کاهش ظرفیت مبدل نیم‌پل وجود دارد که این امور منجر به افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد [۶۳].



شکل (۲۱-۳) ساختار جبران ساز HBWCRPC [۶۳]

۳-۵ جمع‌بندی

همان طور که مشاهده شد سیستم تغذیه راه‌آهن برقی از لحاظ شاخص‌های کیفیت توان در سطح مطلوبی به سر نمی‌برد و باید کیفیت توان این بار را به طریقی بهبود داد. روش‌های بهبود شاخص‌های کیفیت توان را می‌توان در دو دسته کلی روش‌های استاتیکی و دینامیکی تقسیم‌بندی نمود که در این فصل پیرامون هر کدام از آنها توضیحات لازم داده شد. روش‌های استاتیکی برخلاف روش‌های دینامیکی قادر به جبران سازی لحظه‌ای پارامتر تحت جبران سازی خود نیستند ولی نسبت به روش‌های دینامیکی ارزان‌ترند. اگرچه جبران سازهای دینامیکی قادرند کمیت تحت جبران سازی خود را بهبود کامل دهند اما این جبران سازها نیز توانایی جبران سازی هر سه مشکل کیفیت توان را به طور همزمان ندارند لذا در پی حل این مشکل جبران سازهای جامع توان ریلی معرفی شدند که پرکاربردترین آنها RPC بود. این جبران سازها به دلیل بهبود همزمان هر سه مشکل کیفیت توان و

سنگین بودن بار تراکشن، دارای ظرفیت بالایی هستند که برخی راهکارهای کاهش ظرفیت RPC در این فصل مورد مطالعه قرار گرفت.

فصل ۴ :

سیستم جبران کننده هیبریدی

HTPQCS

۴-۱ مقدمه

در فصل گذشته پیرامون راهکارهای بهبود کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن بحث شد و انواع راهکارهای موجود در این زمینه بررسی گردید. متأسفانه جبران سازهای RPC به دلایلی که در فصل قبل بیان گردید، دارای ظرفیت بالایی هستند و از آنجائیکه در عمل، مسائل اقتصادی در درجه اول می‌باشند، لذا بزرگ انتخاب کردن ظرفیت سیستم منجر به تحمیل هزینه‌های اضافی شده و مقرون به صرفه نخواهد بود. در سال‌های اخیر توجه اکثر محققان به سمت کاهش ظرفیت مبدل‌های RPC معطوف گردیده است و راهکارهایی در این زمینه ارائه شده است که در فصل قبل به برخی از آن‌ها اشاره شد. در این پایان‌نامه نیز به منظور کاهش ظرفیت این جبران ساز و کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، سیستم جبران‌کنندگی هیبریدی کیفیت توان تراکشن^۱ (HTPQCS) پیشنهاد شده است.

همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد علاوه بر جبران ساز، ترانسفورماتور تراکشن نیز در میزان سرمایه‌گذاری سیستم نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. لذا در ابتدا به بررسی فاکتورهای مهم در انتخاب یک ترانسفورماتور مناسب پرداخته خواهد شد و بهترین نوع اتصال ترانسفورماتور برای شبکه تراکشن انتخاب می‌گردد. سپس جبران سازهای مورد استفاده در سیستم HTPQCS معرفی شده و پارامترهای آن طراحی خواهد شد. در ادامه اصول ریاضی جبران سازی شاخص‌های کیفیت توان بررسی خواهد شد و سیگنال‌های مرجع جبران سازی برای اعمال به سیستم کنترلی استخراج می‌گردند.

۴-۲ ترانسفورماتورهای تراکشن

با توجه به اینکه بار تراکشن به صورت تک فاز تغذیه می‌شود و معمولاً انرژی مورد نیاز خود را از شبکه قدرت سه فاز دریافت می‌کند؛ بنابراین شبکه تغذیه‌کننده راه‌آهن برقی یا از ترانسفورماتور با اتصال تک فاز استفاده می‌کند و یا اینکه از ترانسفورماتورهای با اتصال خاص^۲ که توانایی تبدیل ولتاژ سه فاز به تک فاز و یا دو فاز را دارند، بهره می‌برد. تاکنون اتصالات متنوعی از ترانسفورماتورهای تراکشن در خطوط راه‌آهن برقی احداث شده در نقاط مختلف جهان مورد استفاده قرار گرفته است که

^۱ Hybrid Traction Power Quality Compensation System

^۲ Specially Connected Transformers

در زیر به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود. ساده‌ترین نوع ترانسفورماتور با اتصال خاص؛ ترانسفورماتور V- است که از دو ترانسفورماتور تک فاز دو سیم‌پیچه تشکیل شده است و در خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت TGV فرانسه، راه‌آهن¹ ECML بریتانیا و راه‌آهن دولتی فنلاند مورد استفاده قرار گرفته است. ترانسفورماتور ستاره- مثلث (YNd11) که از سه ترانسفورماتور تک فاز دو سیم‌پیچه تشکیل شده است از دیگر ترانسفورماتورهای تراکشن است که در خطوط راه‌آهن برقی چین مورد استفاده قرار گرفته شده است. ترانسفورماتور اسکات که از یک ترانسفورماتور تک فاز دو سیم‌پیچه و یک ترانسفورماتور تک فاز سه سیم‌پیچه تشکیل شده است به طور گسترده در خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت شینکانسن مورد استفاده قرار گرفته است. ترانسفورماتور با اتصال لبلان نوع دیگری از ترانسفورماتورهای با اتصال خاص است که از دو ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه و یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه تشکیل شده است و از آن در راه‌آهن پرسرعت تایوان استفاده شده است. راه‌آهن پرسرعت سانئو-شینکانسن² ژاپن از ترانسفورماتور با اتصال اصلاح شده وودبریج³ استفاده می‌کند. این ترانسفورماتور از چهار ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه تشکیل شده است. ترانسفورماتور YNvd نوع دیگری از ترانسفورماتورهای سه فاز به دو فاز است که از دو ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه و یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه تشکیل شده است و در خطوط راه‌آهن پرسرعت چین مورد استفاده قرار گرفته است. یکی دیگر از ترانسفورماتورهای با اتصال خاص که در خطوط راه‌آهن پرسرعت کشور چین استفاده می‌شود، ترانسفورماتور متعادل‌کننده تطبیق امپدانس⁴ است. این ترانسفورماتور نوع اصلاح شده ترانسفورماتور ستاره- مثلث است که از دو ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه و یک ترانسفورماتور چهار سیم‌پیچه تشکیل شده است [۶۴].

ترانسفورماتورهای تراکشن از مهم‌ترین و اساسی‌ترین تجهیزات الکتریکی به کار رفته در پست تراکشن هستند که نقش بسیار مهمی را از نقطه نظر فنی و اقتصادی ایفا می‌کنند. نوع اتصال ترانسفورماتور تراکشن بر عوامل مهمی همچون تأثیر عدم تعادل بار بر روی شبکه قدرت، ضریب استفاده از ترانسفورماتور، ضریب استفاده از خطوط انتقال، سرمایه‌گذاری اولیه، شرایط تعمیر و نگهداری، رزرو مورد نیاز شبکه و ... تأثیر می‌گذارد. با توجه به تنوع ترانسفورماتورهای تراکشن و استفاده از انواع مختلف آن‌ها در خطوط راه‌آهن برقی پرسرعت در کشورهای مختلف جهان و همچنین تأثیر بسیار

¹ East Cost Main Line

² Sanyo-Shinkansen

³ Modified-Woodbridge Transformer

⁴ Impedance Matching Balanced Transformer

زیاد نوع اتصال این ترانسفورماتورها میزان سرمایه‌گذاری اولیه در سیستم تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی، نیاز به یک مقایسه جامع بین ترانسفورماتورهای تراکشن احساس می‌شود. در این بخش به مقایسه بین ترانسفورماتورهای تراکشن و نقش ترانسفورماتور در کاهش اثر عدم تعادل بار روی شبکه قدرت پرداخته خواهد شد. سه فاکتور اساسی برای انتخاب یک ترانسفورماتور تراکشن که به صورت کاملاً عملی در بحث بهره‌برداری از خطوط راه‌آهن برقی به آن‌ها استناد می‌شود، عبارت‌اند از [۳۶، ۳۷]:

✓ ضریب استفاده از ترانسفورماتور

✓ ضریب استفاده از خط

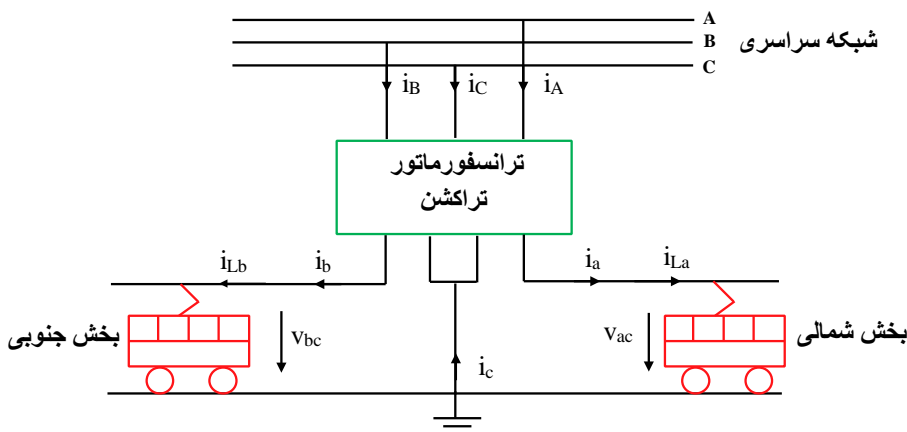
✓ شاخص توالی منفی

در ادامه این بخش، تأثیر عدم تعادل بار بر روی شاخص‌های بالا برای اتصالات مختلف ترانسفورماتور تراکشن مورد بررسی قرار می‌گیرد و در انتها ترانسفورماتور V-V به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای مدل پیشنهادی انتخاب خواهد شد.

۴-۲-۱ مقایسه ترانسفورماتورهای تراکشن

شکل (۴-۱) نحوه اتصال ترانسفورماتور تراکشن به شبکه تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی پرسرعت در یک پست تراکشن نوعی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه شبکه‌های تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی به صورت تک فاز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند و مقدار بار آن‌ها به عوامل مختلفی از جمله مکان لکوموتیوها و همچنین تعداد لکوموتیوهای موجود در هر بخش پست تراکشن بستگی دارد؛ بنابراین شرایط برابری بار تراکشن در دو بخش پست تراکشن به ندرت اتفاق می‌افتد. عدم تعادل بار اصلی‌ترین مشکل شبکه‌های تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی پرسرعت است که بر عملکرد تجهیزات الکتریکی موجود در شبکه قدرت تأثیر زیادی دارد. در این میان نقش ترانسفورماتورهای تراکشن در کاهش اثرات عدم تعادل بار بسیار برجسته خواهد بود. شاخص‌های توالی منفی و ضریب استفاده از ترانسفورماتور و خط انتقال اصلی‌ترین شاخص‌های انتخاب ترانسفورماتور برای شبکه تغذیه راه‌آهن برقی می‌باشند. البته شاخص‌های دیگری مانند سادگی ساختار و قیمت ترانسفورماتور نیز در این انتخاب مؤثر هستند. در این بخش اثر عدم تعادل بار بر شاخص‌های انتخاب ترانسفورماتور تراکشن

برای انواع رایج آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل (۱-۴) نحوه اتصال ترانسفورماتور تراکشن نوعی به شبکه تغذیه راه‌آهن برقی پرسرعت

۲-۲-۴ شاخص توالی منفی

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد در شبکه‌های راه‌آهن برقی پرسرعت عدم تعادل بار و در نتیجه تزریق حجم بسیار بالای جریان توالی منفی به شبکه قدرت به عنوان اصلی‌ترین مشکل کیفیت توان در سیستم تغذیه الکتریکی قطارهای پرسرعت است. استفاده از ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده^۱ به همراه برنامه زمان‌بندی^۲ مناسب جهت تردد لکوموتیوها، یکی از ساده‌ترین و ارزان‌ترین روش‌های کاهش مقدار مؤلفه جریان توالی منفی در شبکه‌های تغذیه الکتریکی قطارهای برقی است [۳۸]؛ بنابراین در این بخش به تأثیر نوع اتصال ترانسفورماتور در تزریق مقدار مؤلفه جریان توالی منفی به شبکه قدرت پرداخته می‌شود. برای این منظور از ضریب تعادل بار^۳ استفاده می‌شود که برابر با نسبت جریان بخش دارای بار کمتر به بخش دارای بار بیشتر است و به صورت رابطه (۱-۴) تعریف می‌شود.

$$k = \begin{cases} \frac{I_{Lb}}{I_{La}} & ; \quad \text{if} \quad I_{La} \geq I_{Lb} \\ \frac{I_{La}}{I_{Lb}} & ; \quad \text{if} \quad I_{Lb} \geq I_{La} \end{cases} \quad (1-4)$$

در این رابطه I_{Lb} و I_{La} به ترتیب جریان بار در بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن است. طبق رابطه (۱-۴) همواره $0 \leq k \leq 1$ است؛ به طوری که $k=0$ یعنی تنها یک طرف پست تراکشن دارای بار و

¹ Balanced Transformer

² Train Schedule

³ Balance Degree

طرف دیگر در حالت بی‌باری است و $k=I$ به معنی برابر بودن بار دو طرف پست تراکشن است. در ادامه فرض می‌شود که همواره $I_{La} \geq I_{Lb}$ است. به منظور محاسبه درصد تزریق مؤلفه جریان توالی منفی به شبکه قدرت از روش مؤلفه‌های متقارن و طبق تعریف ارائه شده در استاندارد IEC60034-26 استفاده می‌شود. روابط مربوط به جریان شبکه قدرت برحسب جریان بار ($I_{A,B,C} = f(I_{La}, I_{Lb})$) برای اتصال‌های رایج ترانسفورماتورهای تراکشن در ادامه آورده شده است.

در تمامی روابط تحلیلی این فصل برای بدست آوردن جریان شبکه قدرت از فرضیات زیر استفاده شده است:

- به دلیل استفاده گسترده از مبدل‌های PWM در لکوموتیوهای پرسرعت، ضریب قدرت بار واحد فرض می‌شود. همچنین از مؤلفه‌های هارمونیک بار صرف نظر شده است.
- از آنجائیکه پست‌های تراکشن به نقاطی از شبکه قدرت که دارای ظرفیت اتصال کوتاه بسیار بزرگی هستند متصل می‌شوند و عدم تعادل ولتاژ با معکوس ظرفیت اتصال کوتاه شبکه قدرت در محل پست تراکشن نسبت دارد [۳۸]؛ فرض می‌شود که میزان عدم تعادل ولتاژ ناچیز است و در نتیجه ولتاژهای شبکه قدرت متعادل هستند.

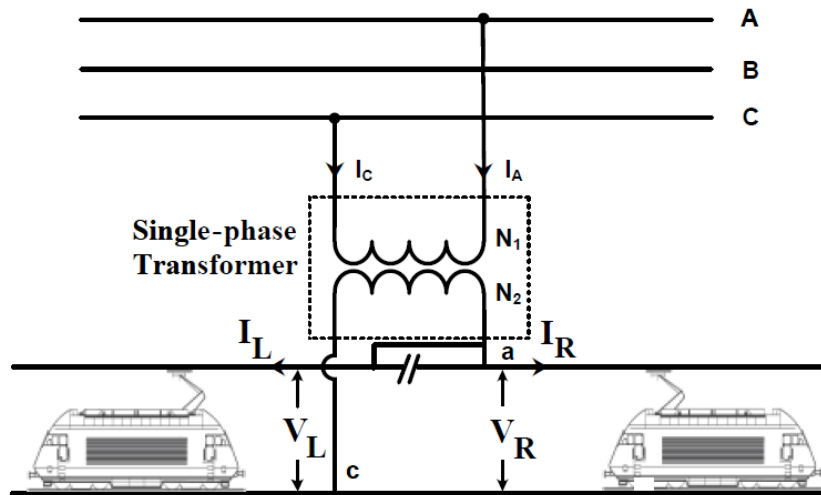
ضریب تعادل بار (k) از رابطه (۴-۱) محاسبه می‌شود. همچنین فرض می‌شود که همواره مقدار I_{La} بزرگ‌تر از I_{Lb} است.

۴-۲-۲-۱ ترانسفورماتور تک فاز

این ترانسفورماتور ساده‌ترین نوع اتصال ترانسفورماتور تراکشن است که در برخی از خطوط راه‌آهن پرسرعت کشور ایتالیا، برخی از خطوط TGV فرانسه و همچنین در شبکه راه‌آهن برقی نیوزیلند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۴]. شکل (۴-۲) نشان دهنده نحوه اتصال ترانسفورماتور تک فاز در پست‌های تراکشن و همین‌طور مدار معادل این ترانسفورماتور است.

ترانسفورماتور تک فاز تنها به دو فاز از سه فاز شبکه قدرت متصل می‌شود، بنابراین در هر صورت یکی از فازها بدون بار خواهد بود و از بدین جهت عدم تعادل در سمت شبکه سه فاز فشار قوی برای یک پست تراکشن برابر ۱۰۰٪ خواهد بود و تنها راه عملی برای کاهش عدم تعادل استفاده از روش چرخش فازها است (رجوع شود به بخش (۳-۲-۱)) و در صورتی که تعداد پست‌های تراکشن مضرری از

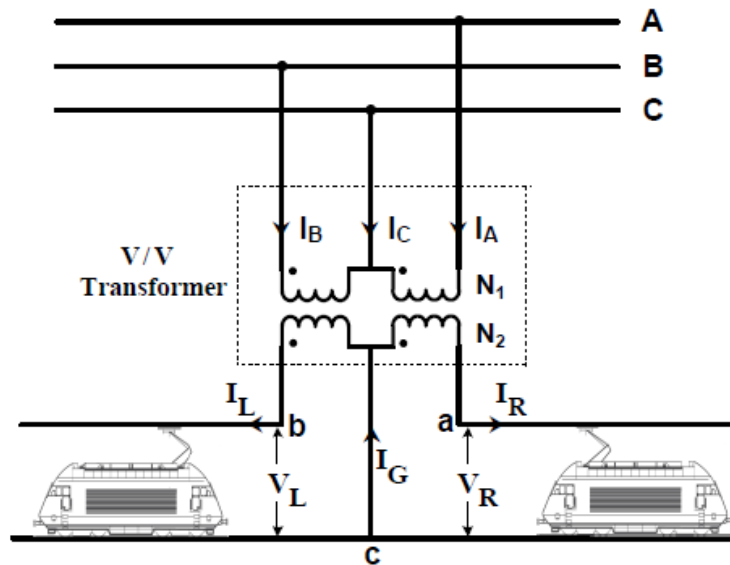
سه باشد عدم تعادل تا حدودی جبران خواهد شد [۳۶]. به همین منظور برای ترانسفورماتور تک فاز تنها به منظور اصلاح ضریب توان و کاهش مؤلفه‌های هارمونیک از جبران سازه‌های دینامیکی استفاده می‌شود.



شکل (۲-۴) اتصال ترانسفورماتور تک فاز در پست تراکشن [۳۶]

۲-۲-۲-۴ ترانسفورماتور V-V

شکل (۳-۴) نحوه اتصال ترانسفورماتور V-V در پست تراکشن را نشان می‌دهد. در این ترانسفورماتور بار تراکشن تک فاز بین سه فاز شبکه قدرت تقسیم می‌شود و بنابراین انتظار می‌رود که میزان عدم تعادل کمتر از ترانسفورماتور تک فاز باشد. در این ساختار می‌توان به جهت کاهش اثر عدم تعادل بار روی شبکه قدرت سه فاز از روش چرخش فازها استفاده کرد که در فصل قبل توضیح داده شد. این ترانسفورماتور به عنوان ترانسفورماتور تراکشن در برخی از خطوط TGV فرانسه، راه‌آهن بریتانیا و راه‌آهن دولتی فنلاند مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۴].

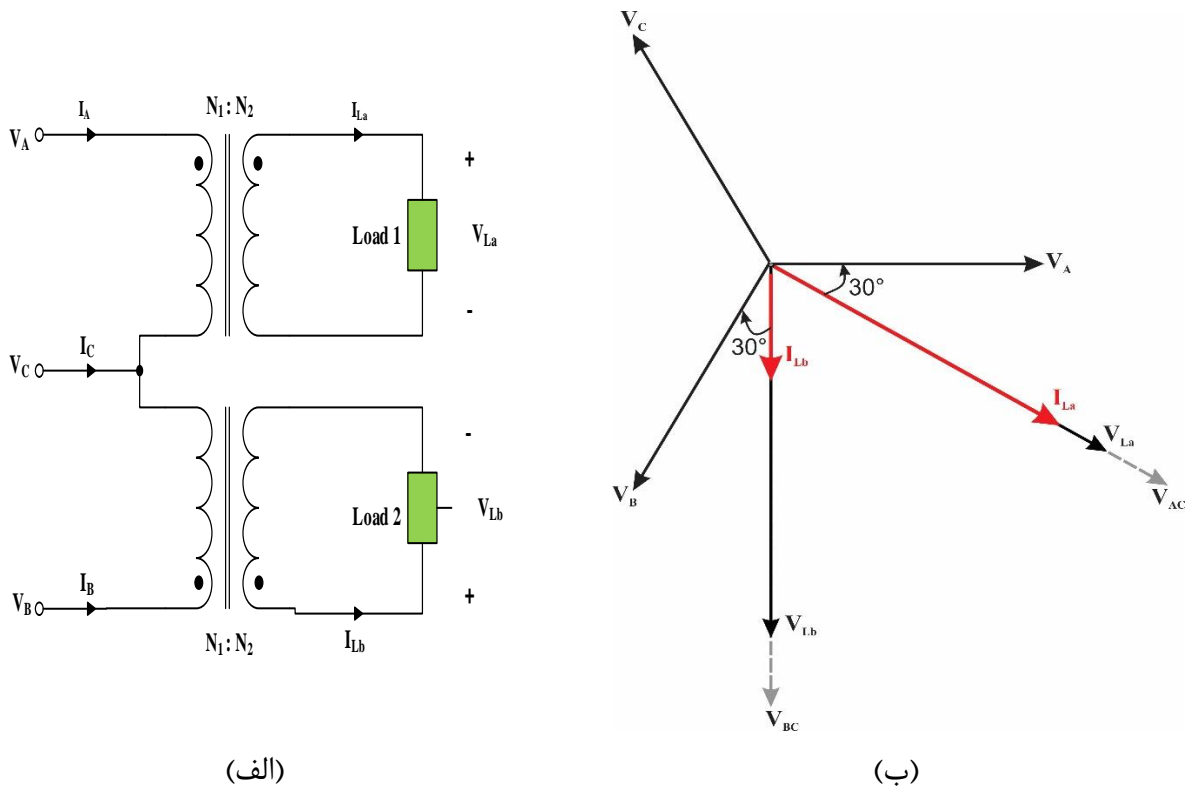


شکل (۳-۴) اتصال ترانسفورماتور V-V در پست تراکشن [۳۶]

شکل (۴-۴) نشان دهنده ساختار ترانسفورماتور و همچنین نمودار برداری ولتاژها و جریان‌های اولیه و ثانویه این ترانسفورماتور است که با فرض واحد بودن ضریب توان بار رسم شده است. همان طور که مشخص است ترانسفورماتور V-V از اتصال دو ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه با نسبت تبدیل $\beta = \frac{N_2}{N_1}$ تشکیل شده است. در صورتی که ترانسفورماتور مطابق شکل (۴-۴) به شبکه بالاسری متصل شود؛ ولتاژهای ثانویه آن دارای دامنه برابر و اختلاف فاز 60° درجه نسبت به یکدیگر هستند.

با در نظر گرفتن ولتاژ فاز A به عنوان مرجع، ولتاژ فاز و خط اولیه از رابطه (۲-۴) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} V_A = V_{ph} \angle 0 \\ V_B = V_{ph} \angle -120 \\ V_C = V_{ph} \angle +120 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{AB} = \sqrt{3}V_{ph} \angle +30 \\ V_{BC} = \sqrt{3}V_{ph} \angle -90 \\ V_{CA} = \sqrt{3}V_{ph} \angle +150 \end{cases} \quad (۲-۴)$$



شکل (۴-۴) ترانسفورماتور با اتصال V-V (الف) نحوه اتصال سیم‌پیچ‌ها (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان [۴۰]

ولتاژ پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور مطابق با رابطه (۳-۴) است.

$$\begin{cases} V_{La} = \beta V_{AC} = \sqrt{3} \beta V_{ph} \angle -30 = V' \angle -30 \\ V_{Lb} = \beta V_{BC} = \sqrt{3} \beta V_{ph} \angle -90 = V' \angle -90 \end{cases} \quad (۳-۴)$$

که در آن $V' = \sqrt{3} \beta V_{ph}$ است. با فرض واحد بودن ضریب توان بار، جریان دو طرف پست تراکشن از رابطه (۴-۴) قابل محاسبه است. در این روابط I_{Lbf} و I_{Laf} به ترتیب مؤلفه‌های اصلی جریان بار در دو طرف پست تراکشن هستند.

$$\begin{cases} I_{La} = I_{Laf} \angle -30 \\ I_{Lb} = I_{Lbf} \angle -90 = k I_{Laf} \angle -90 \end{cases} \quad (۴-۴)$$

جریان‌های شبکه قدرت سه فاز بر حسب جریان بارهای متصل به پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور از رابطه (۵-۴) بدست می‌آیند.

$$\begin{cases} I_A = \beta I_{La} = \beta I_{Laf} \angle -30 \\ I_B = \beta I_{Lb} = \beta I_{Lbf} \angle -90 = \beta k I_{Laf} \angle -90 \\ I_C = -(I_A + I_B) \end{cases} \quad (۵-۴)$$

با استفاده از تبدیل مؤلفه‌های متقارن، مقدار جریان مؤلفه صفر، مثبت و منفی جریان شبکه قدرت در این حالت برابر است با:

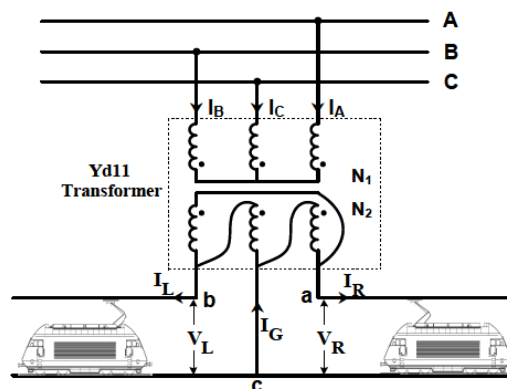
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{Lcf} \times (1+k) \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{Lcf} \times \sqrt{1-k+k^2} \end{bmatrix} \quad (6-4)$$

نسبت عدم تعادل جریان^۱ (CUR) در این حالت برابر است:

$$CUR = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\sqrt{1-k+k^2}}{1+k} \quad (7-4)$$

۳-۲-۲-۴ ترانسفورماتور ستاره- مثلث (YNd11)

شکل (۵-۴) نحوه اتصال ترانسفورماتور ستاره- مثلث به شبکه بالاسری در پست‌های تراکشن را نشان می‌دهد. این ترانسفورماتور یکی از پرکاربردترین ترانسفورماتورهای مورد استفاده در سیستم‌های قدرت است ولی در شبکه تغذیه قطارهای برقی پرسرعت با توجه به ضریب استفاده پایین، این اتصال کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نوع اتصال نیز می‌توان جهت کاهش اثر عدم تعادل بار تراکشن بر روی شبکه قدرت سه فاز از روش چرخش فازها کرد. این ترانسفورماتور در خطوط راه‌آهن پرسرعت چین مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۴].



شکل (۵-۴) اتصال ترانسفورماتور YNd11 در پست تراکشن [۳۶]

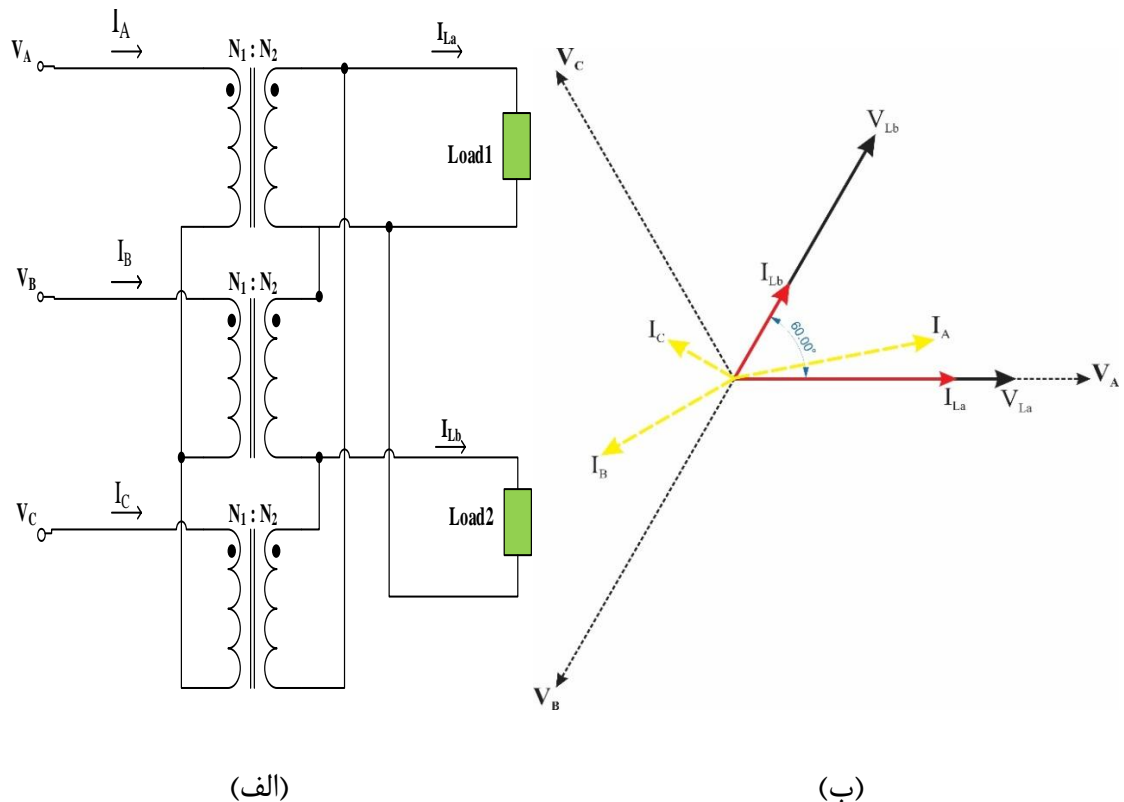
^۱ Current Unbalanced Ratio

ترانسفورماتور ستاره- مثلث از سه ترانسفورماتور تک فاز دو سیم پیچه با نسبت تبدیل $\beta = \frac{N_2}{N_1}$ تشکیل شده است. قسمت (الف) در شکل (۴-۶) نحوه اتصال سه ترانسفورماتور تک فاز به همدیگر و ایجاد ترانسفورماتور ستاره- مثلث را نشان می‌دهد. یکی از گره‌ها در ثانویه به ریل وصل می‌شود و دو گره دیگر به دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن متصل می‌شوند.

با در نظر گرفتن ولتاژ فاز A به عنوان مرجع، ولتاژهای خط و فاز اولیه این ترانسفورماتور به صورت روابط (۴-۲) خواهد بود. در نتیجه ولتاژ دو سر بارهای تراکشن متصل به این ترانسفورماتور از رابطه (۴-۸) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} V_{La} = \beta V_A = \beta V \angle 0 \\ V_{Lb} = \beta(V_C + V_A) = \beta V \angle 60 \end{cases} \quad (۴-۸)$$

دیاگرام برداری مربوط به ولتاژ و جریان اولیه و ثانویه ترانسفورماتور ستاره- مثلث در قسمت (ب) شکل (۴-۶) با فرض واحد بودن ضریب توان بار رسم شده است. جریان دو طرف پست تراکشن طبق رابطه (۴-۹) می‌باشد.



شکل (۴-۶) ترانسفورماتور ستاره-مثلث (الف) نحوه اتصال سیم‌پیچ‌ها (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان [۴۰]

$$\begin{cases} I_{La} = I_{Laf} \angle 0 \\ I_{Lb} = I_{Lbf} \angle + 60 = k I_{Laf} \angle + 60 \end{cases} \quad (9-4)$$

سهم جریان هر فاز شبکه در تأمین بار تراکشن برای ترانسفورماتور با اتصال ستاره- مثلث از رابطه (۱۰-۴) مشخص می‌شود.

$$\begin{cases} I_A = \frac{\beta}{3}(2I_{La} + I_{Lb}) \\ I_B = -\frac{\beta}{3}(2I_{La} + I_{Lb}) \\ I_C = \frac{\beta}{3}(-I_{La} + I_{Lb}) \end{cases} \quad (10-4)$$

با استفاده از تبدیل مؤلفه‌های متقارن، مقدار جریان مؤلفه صفر، مثبت و منفی جریان شبکه قدرت در این حالت برابر است با:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}\beta |I_{La}| \times (1+k) \\ \frac{1}{3}\beta |I_{La}| \times \sqrt{1-k+k^2} \end{bmatrix} \quad (11-4)$$

نسبت عدم تعادل جریان در این ترانسفورماتور برابر است:

$$CUR = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\sqrt{1-k+k^2}}{1+k} \quad (12-4)$$

۴-۲-۲-۴ ترانسفورماتورهای متعادل کننده

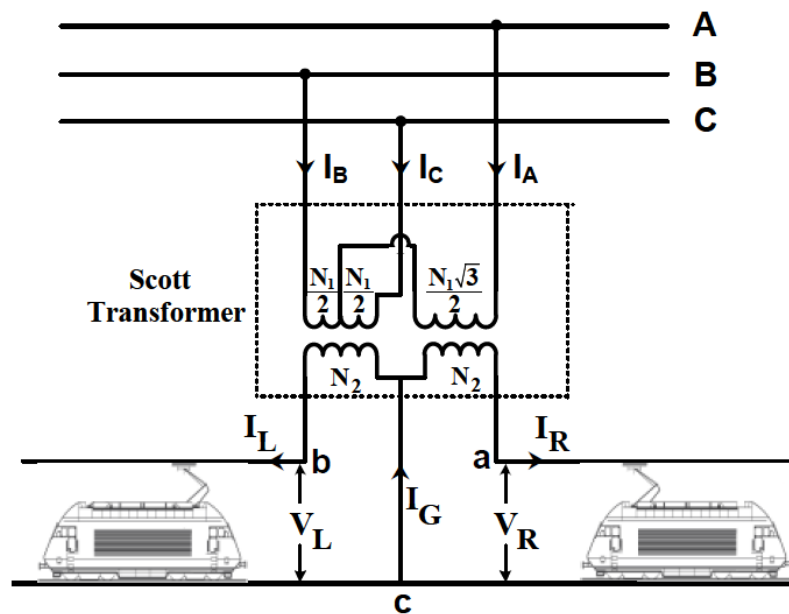
ترانسفورماتورهای متعادل کننده قادرند توان سه فاز را به دو فاز و بالعکس تبدیل کنند. اگر جریان عبوری از پایانه‌های ثانویه این نوع ترانسفورماتورها با یکدیگر برابر باشند؛ جریان عبوری از فازهای شبکه قدرت کاملاً متعادل خواهد بود. برخی از مهم‌ترین و رایج‌ترین ترانسفورماتورهای متعادل کننده که در سیستم تغذیه الکتریکی قطارهای برقی پرسرعت مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت‌اند از: اتصال اسکات، لبلان، وودبریج اصلاح شده، YNvd و امیدانس تطبیقی.

ترانسفورماتور اسکات یکی از شناخته‌ترین و پرکاربردترین نوع ترانسفورماتورهای متعادل کننده در شبکه‌های تغذیه الکتریکی قطارهای برقی پرسرعت است؛ بنابراین در ادامه به بررسی نقش

ترانسفورماتور اسکات در کاهش اثرات عدم تعادل بار پرداخته می‌شود. بدیهی است که نتایج بدست آمده برای ترانسفورماتور اسکات، برای سایر ترانسفورماتورهای متعادل کننده مثل لبلان، وودبریج اصلاح شده، YNvd و امپدانس تطبیقی نیز صادق است.

۱-۴-۲-۲-۴ ترانسفورماتور اسکات

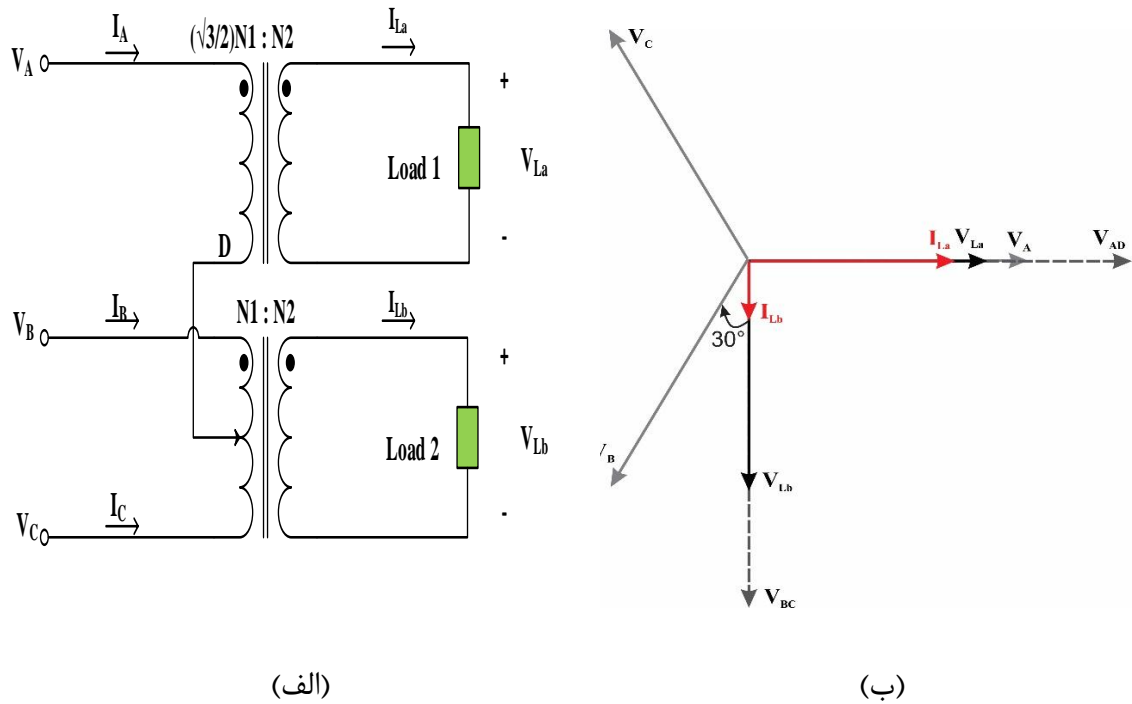
ترانسفورماتور اسکات برای اولین بار در سال ۱۸۹۶ میلادی برای تبدیل توان دو فاز به توان سه فاز در نیروگاه هیدروالکتریکی واقع در آبشار نیاگارا مورد استفاده قرار گرفت. این ترانسفورماتور به صورت گسترده در راه آهن برقی پرسرعت شینکانسن ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۴]. شکل (۷-۴) چگونگی اتصال ترانسفورماتور اسکات در پست تراکشن را نشان می‌دهد. در این اتصال نیز جهت کاهش هرچه بیشتر اثر عدم تعادل بار روی شبکه قدرت، می‌توان از روش چرخش فازها استفاده کرد. در این اتصال اگر بار دو بازوی ثانویه ترانسفورماتور کاملاً برابر باشند؛ در سمت اولیه این ترانسفورماتور، جریان‌ها کاملاً متعادل خواهند بود و عدم تعادل به صفر کاهش می‌یابد.



شکل (۷-۴) اتصال ترانسفورماتور اسکات در پست تراکشن [۳۶]

قسمت (الف) در شکل (۸-۴) نشان دهنده ساختار این ترانسفورماتور و قسمت (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان آن را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است این ترانسفورماتور از یک ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه با نسبت دور $\frac{\sqrt{3} N_1}{2 N_2}$ و یک ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه با نسبت

تبدیل $\frac{N_1}{2}, \frac{N_1}{2} / N_2$ تشکیل شده است.



شکل (۸-۴) ترانسفورماتور اسکات (الف) ساختار ترانسفورماتور (ب) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان [۴۰]

با در نظر گرفتن ولتاژ فاز A به عنوان مرجع، روابط ولتاژ فاز و خط اولیه ترانسفورماتور مطابق با رابطه (۲-۴) خواهد بود. همچنین ولتاژ V_{AD} که معرف ولتاژ پایانه ورودی ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه است از رابطه (۱۳-۴) محاسبه می‌شود:

$$V_{AD} = V_{AB} + \frac{1}{2}V_{BC} = \frac{3}{2}V_{ph} \angle 0 \quad (۱۳-۴)$$

تحت این شرایط، ولتاژ پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور اسکات از رابطه (۱۴-۴) بدست می‌آید. همچنین جریان دو طرف ترانسفورماتور تراکشن مطابق رابطه (۱۵-۴) می‌باشد.

$$\begin{cases} V_{La} = \frac{2}{\sqrt{3}} \beta V_{AD} = \frac{2}{\sqrt{3}} \beta V_{AB} + \frac{1}{\sqrt{3}} \beta V_{BC} = \sqrt{3} \beta V_{ph} \angle 0 \\ V_{Lb} = \beta V_{BC} = \sqrt{3} \beta V_{ph} \angle -90 \end{cases} \quad (۱۴-۴)$$

$$\begin{cases} I_{La} = I_{Laf} \angle 0 \\ I_{Lb} = I_{Lbf} \angle -90 = k I_{Laf} \angle -90 \end{cases} \quad (۱۵-۴)$$

میزان مشارکت فازهای شبکه سه فاز در تأمین بار تراکشن از رابطه (۱۶-۴) بدست می‌آید. دیاگرام برداری مربوط به ولتاژ و جریان بار متصل به پایانه‌های ثانویه این ترانسفورماتور با فرض واحد بودن

ضریب توان بار در شکل (۸-۴) نشان داده شده است.

$$\begin{cases} I_A = \frac{2}{\sqrt{3}} \beta I_{La} \\ I_C = -\beta I_{Lb} - \frac{1}{\sqrt{3}} \beta I_{La} \\ I_B = -(I_A + I_C) = \beta I_{Lb} - \frac{1}{\sqrt{3}} \beta I_{La} \end{cases} \quad (۱۶-۴)$$

با استفاده از تبدیل مؤلفه‌های متقارن، مقدار جریان مؤلفه صفر، مثبت و منفی جریان شبکه قدرت در این حالت برابر است با:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \beta |I_{La}| \times (1+k) \\ \frac{\sqrt{3}}{3} \beta |I_{La}| \times (1-k) \end{bmatrix} \quad (۱۷-۴)$$

نسبت عدم تعادل جریان در این ترانسفورماتور برابر است:

$$CUR = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{|1-k|}{|1+k|} \quad (۱۸-۴)$$

همان طور که مشاهده شد، اتصال تک فاز بیش‌ترین جریان توالی منفی را به شبکه قدرت تحمیل می‌کند. در این اتصال میزان جریان توالی منفی صرف نظر از مقدار بار موجود در دو طرف پست تراکشن همواره برابر با جریان توالی مثبت است و به همین خاطر میزان عدم تعادل جریان برابر ۱۰۰٪ است. اتصال‌های V-V و ستاره- مثلث دارای رفتار مشابهی هستند. پست‌های تراکشن که از ترانسفورماتورهای با اتصال V-V و یا ستاره- مثلث استفاده می‌کنند، با توجه به مقدار بار موجود در دو طرف پست تراکشن، میزان جریان توالی منفی را می‌توانند تا ۵۰٪ نیز برای حالت تعادل کامل بار ($k=1$) کاهش دهند. اتصال‌های اسکات، لبلان، وودبریج اصلاح‌شده، YNvd و تطبیق امپدانس همگی از نوع ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده هستند و تأثیر مشابهی بر روی عدم تعادل جریان شبکه قدرت دارند. اگر بار موجود در دو طرف پست تراکشن باهم برابر باشند ($k=1$)، ترانسفورماتورهای متعادل‌کننده قادر هستند تا میزان جریان توالی منفی را تا مقدار صفر کاهش دهند. این در حالی است که اگر تنها یک طرف پست تراکشن دارای بار باشد و طرف دیگر بدون بار باشد ($k=0$)، عملکرد تمامی ترانسفورماتورهای تراکشن در کاهش عدم تعادل بار یکسان است و مقدار جریان توالی منفی

تزیقی توسط همگی آنها برابر ۱۰۰٪ است. با فرض واحد بودن ضریب توان بار، روابط مربوط به مؤلفه‌های منفی و مثبت جریان و همچنین نسبت عدم تعادل جریان بر حسب ضریب تعادل بار (k) برای تمامی ترانسفورماتورهای تراکشن در جدول (۴-۱) آورده شده است.

۴-۲-۳ ضریب استفاده

برای تغذیه بار تراکشن در حالت نامتعادل، ظرفیت تجهیزات نصب شده باید بیشتر از مقدار برآورد شده باشد. از آنجاکه قیمت تجهیزات شبکه با افزایش ظرفیت بار به شدت افزایش می‌یابد، اهمیت بحث ضریب استفاده از تجهیزات برجسته‌تر می‌شود و برای کاهش هزینه‌های اولیه، ضریب استفاده باید در شرایط نامتعادل کنترل شود [۳۷].

جدول (۴-۱) مقایسه انواع ترانسفورماتورهای تراکشن رایج از لحاظ شاخص توالی منفی جریان [۳۶]

ردیف	نوع ترانسفورماتور	اندازه مؤلفه مثبت جریان (I^+)	اندازه مؤلفه منفی جریان (I^-)	نسبت عدم تعادل جریان ($\frac{I^-}{I^+}$)
۱	تک فاز	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} $	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} $	1.0
۲	V-V	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times \sqrt{1-k+k^2}$	$\frac{\sqrt{1-k+k^2}}{1+k}$
۳	ستاره-مثلث (YNd11)	$\frac{1}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{1}{3} \beta I_{La} \times \sqrt{1-k+k^2}$	$\frac{\sqrt{1-k+k^2}}{1+k}$
۴	اسکات	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1-k)$	$\left(\frac{1-k}{1+k}\right)$
۵	لبلان	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1-k)$	$\left(\frac{1-k}{1+k}\right)$
۶	اصلاح‌شده وودبریج	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{\sqrt{3}}{3} \beta I_{La} \times (1-k)$	$\left(\frac{1-k}{1+k}\right)$
۷	YNvd	$\frac{1}{3} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{1}{3} \beta I_{La} \times (1-k)$	$\left(\frac{1-k}{1+k}\right)$
۸	تطبيق امپدانس	$\frac{\sqrt{6}}{6} \beta I_{La} \times (1+k)$	$\frac{\sqrt{6}}{6} \beta I_{La} \times (1-k)$	$\left(\frac{1-k}{1+k}\right)$

ترانسفورماتورهای تراکشن و خطوط انتقال سه فاز دو پارامتر مهم و تأثیرگذار در میزان سرمایه‌گذاری اولیه هستند، از این رو ضریب استفاده از ترانسفورماتور و خطوط انتقال به‌عنوان یک شاخص مهم در ارزیابی ظرفیت واقعی تجهیزات معرفی می‌شود. ضریب استفاده از ترانسفورماتور^۱ (TUF) و ضریب استفاده از خط^۲ (LUF) به ترتیب از روابط (۱۹-۴) و (۲۰-۴) محاسبه می‌شوند [۳۷].

$$TUF = \frac{S_R}{S_T} \quad (19-4)$$

$$LUF = \frac{S_R}{S_L} \quad (20-4)$$

در این روابط S_R نشان دهنده حداکثر ظرفیت مورد استفاده از تجهیزات شبکه قدرت شامل ترانسفورماتورهای تراکشن و خطوط انتقال است. حداکثر ظرفیت مورد استفاده تحت تأثیر هارمونیک‌های بار و همچنین عدم تعادل بار محاسبه می‌شود و می‌توان آن را از رابطه (۲۱-۴) محاسبه نمود:

$$S_R = |S_A + S_B + S_C| \quad (21-4)$$

که در آن S_A ، S_B و S_C توان ظاهری هر فاز شبکه هستند.

در رابطه (۱۹-۴) بیانگر ظرفیت ترانسفورماتور است و با توجه به حداکثر بار در شرایط متعادل محاسبه می‌شود. این پارامتر از رابطه (۲۲-۴) محاسبه می‌شود که در آن S_j ظرفیت سیم‌پیچ j ام ترانسفورماتور است و N تعداد سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور است.

$$S_T = \sum_{j=1}^N S_j \quad (22-4)$$

در رابطه (۲۰-۴) بیانگر ظرفیت خط انتقال است و بر اساس حداکثر جریان خط محاسبه می‌شود. در رابطه (۲۳-۴)، V ولتاژ فاز شبکه است و I_{max} برابر حداکثر جریان اندازه‌گیری شده بین جریان‌های عبوری از سه فاز شبکه قدرت (I_A, I_B, I_C) است.

$$S_L = 3 VI_{max}^* \quad (23-4)$$

روابط مربوط به ضریب استفاده از خط انتقال و ضریب استفاده از ترانسفورماتور تراکشن بر حسب

¹ Transformer Utilization Factor

² Line Utilization Factor

درجه تعادل بار (k) برای انواع مختلف ترانسفورماتورهای تراکشن در جدول (۲-۴) آورده شده است.

از جدول (۲-۴) مشاهده می‌شود که ترانسفورماتور تک فاز کمترین ضریب استفاده از خط انتقال را دارد و ترانسفورماتورهای متعادل کننده بیشترین ضریب استفاده از خط انتقال را خواهند داشت. ضریب استفاده از خط انتقال در صورتیکه محل احداث پست تراکشن فاصله زیادی تا خطوط انتقال نیرو داشته باشد، یک شاخص بسیار تاثیرگذار در مقدار سرمایه‌گذاری اولیه سیستم تغذیه الکتریکی قطارهای برقی پرسرعت است [۳۷]. ظرفیت خط انتقال در شرایطی که هر دو بخش پست تراکشن در حداکثر بار خود قرار دارند محاسبه می‌شود. تحت این شرایط ترانسفورماتورهای متعادل کننده رفتار یکسانی بر روی جریان سمت شبکه قدرت دارند و بنابراین دارای ظرفیت خط انتقال یکسانی خواهند بود.

جدول (۲-۴) مقایسه اتصال‌های رایج ترانسفورماتورهای تراکشن برحسب ضریب استفاده از ترانسفورماتور و خط انتقال [۳۶]

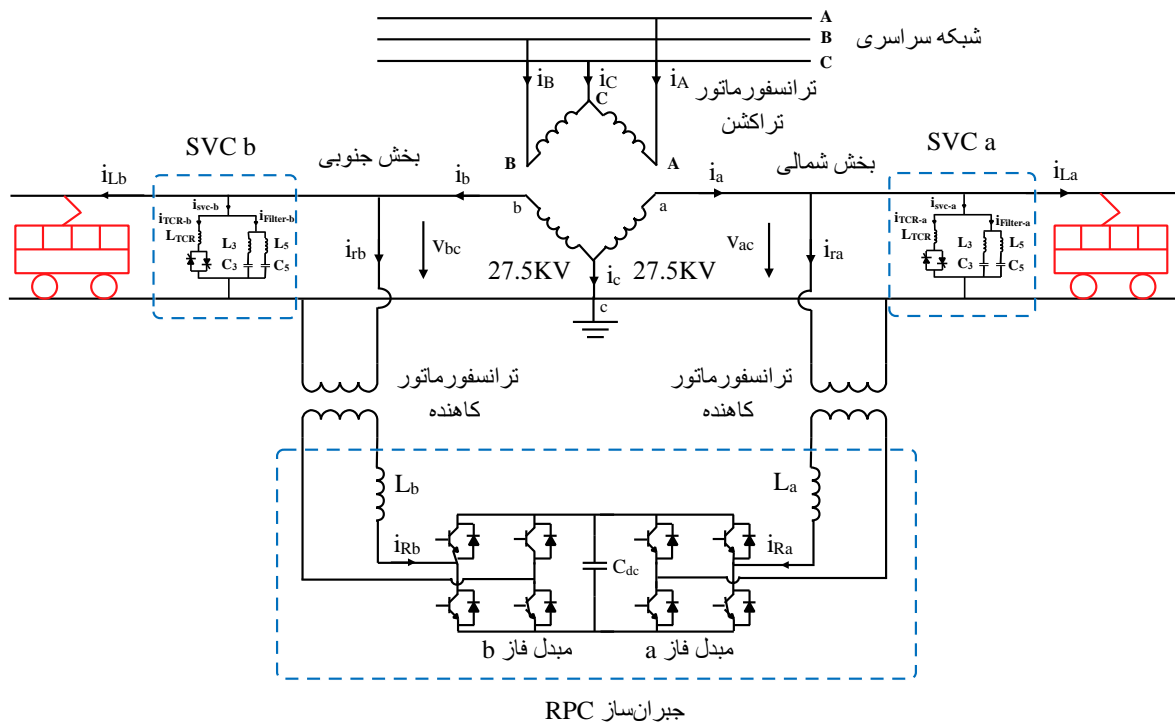
ردیف	اتصال ترانسفورماتور	ضریب استفاده از ترانسفورماتور (TUF)	ضریب استفاده از خط انتقال (LUF)
۱	تک فاز	$\frac{1+k}{2}$	$\frac{1+k}{2\sqrt{3}}$
۲	V-V	$\frac{1+k}{2}$	$\frac{1+k}{3}$
۳	ستاره-مثلث YNd11	$\frac{1+k}{2.64}$	$\frac{1+k}{2.64}$
۴	اسکات	$\frac{3(1+k)}{3+2\sqrt{3}}$	$\frac{1+k}{2}$
۵	لبان	$\frac{3(1+k)}{4+2\sqrt{3}}$	$\frac{1+k}{2}$
۶	وودبریج اصلاح شده	$\frac{1+k}{2.8225}$	$\frac{1+k}{2}$
۷	YNvd	$\frac{3(1+k)}{4+2\sqrt{3}}$	$\frac{1+k}{2}$
۸	تطبيق امپدانس	$\frac{1+k}{2.175}$	$\frac{1+k}{2}$

طبق جدول (۴-۲) ترانسفورماتورهای تک فاز و V-V بیشترین ضریب استفاده از ترانسفورماتور را دارا هستند، در حالیکه ترانسفورماتور با اتصال وودبریج اصلاح شده کمترین ضریب استفاده از ترانسفورماتور را دارد. اتصال ستاره- مثلث دارای ضریب استفاده از ترانسفورماتور و ضریب استفاده از خط انتقال ۷۵٪ در شرایط تعادل کامل بار ($k=1$) است. این شاخصها با افزایش عدم تعادل بار تا مقدار ۳۷/۸۷٪ برای حالت عدم تعادل کامل ($k=0$) کاهش می‌یابد. یکی از دلایلی که ترانسفورماتور ستاره- مثلث در سیستم تغذیه قطارهای برقی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ عملکرد نسبتاً ضعیف این ترانسفورماتور در شرایط عدم تعادل بار نسبت به سایر اتصال‌های ترانسفورماتورهای تراکشن است. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت؛ هرچند ترانسفورماتورهای متعادل کننده در شرایطی که بار موجود در دو بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن برابر باشند عملکرد مناسبی از لحاظ کاهش عدم تعادل جریان خواهند داشت، ولی می‌دانیم این حالت به ندرت اتفاق می‌افتد. همچنین این ترانسفورماتورها دارای ضریب استفاده از خط انتقال بالایی هستند اما همان طور که اشاره شد؛ این فاکتور در مواقعی که فاصله پست تراکشن از محل تولید زیاد باشد، تأثیرگذار است بعلاوه ترانسفورماتورهای متعادل کننده دارای ساختاری پیچیده نسبت به انواع دیگر ترانسفورماتورهای تراکشن هستند و همچنین از قیمت بالایی برخوردارند بنابراین برای استفاده در شبکه‌های تراکشن گزینه مناسبی نمی‌باشند. در میان ترانسفورماتورهای V-V و ستاره- مثلث، نسبت عدم تعادل جریان در این دو ترانسفورماتور یکسان است ولی ضریب استفاده از ترانسفورماتور در ترانسفورماتور V-V بیشتر از ترانسفورماتور ستاره- مثلث می‌باشد و همچنین ترانسفورماتور V-V به دلیل حذف یک ترانسفورماتور، نسبت به ترانسفورماتور ستاره- مثلث دارای ساختاری ساده‌تر و در نتیجه قیمت کمتر می‌باشد. به همین منظور ترانسفورماتور V-V یک انتخاب مناسب برای استفاده در سیستم تغذیه الکتریکی قطارهای پرسرعت می‌باشد.

۴-۳ معرفی سیستم جبران ساز HTPQCS

سیستم جبران ساز HTPQCS به همراه ترانسفورماتور V-V در شکل (۴-۹) نمایش داده شده است. HTPQCS متشکل از یک جبران ساز RPC به عنوان جبران ساز اصلی و دو SVC در طرفین پست تراکشن به عنوان جبران ساز کمکی می‌باشد. جبران ساز اصلی وظیفه متعادل‌سازی جریان و حذف

هارمونیک‌ها و SVC‌ها وظیفه جبران توان راکتیو را برعهده دارند. SVC‌ها با جبران توان راکتیو سیستم، این وظیفه را از دوش RPC برداشته و ظرفیت آن را کاهش می‌دهند و موجب کاهش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه می‌گردند. علاوه بر این در مواقعی که بار سیستم به مرور زمان و با رشد جمعیت افزایش یافته و نیاز به ارتقاء و بالابردن ظرفیت اجزای سیستم احساس می‌شود، می‌توان با بکارگیری این SVC‌ها در کنار RPC، از تحمیل هزینه‌های اضافی که به علت تعویض این جبران ساز گران‌قیمت بر سیستم اعمال می‌شود جلوگیری بعمل آورد. با توجه به شکل (۴-۹)، در ابتدا ترانسفورماتور V-V ولتاژ تغذیه ۲۳۰ kV را به ولتاژ ۲۷/۵ kV که مناسب برای اتصال به سیم تماس است تبدیل می‌کند. در این ساختار فازهای "a" و "b" به شبکه بالاسری متصل شده است و فاز "c" برای برگشت جریان به ریل و زمین متصل می‌شود.



شکل (۴-۹) ساختار پست تراکشن با ترانسفورماتور V-V و سیستم جبران سازی HTPQCS

به دلیل کاهش هزینه‌ها، ولتاژ ۲۷/۵kV شبکه بالاسری از طریق دو ترانسفورماتور کاهنده تک فاز به سطح ولتاژ مناسب برای مبدل‌های RPC تبدیل می‌شود و بدین ترتیب به تعداد کلید کمتری جهت سری شدن در مبدل‌ها نیاز است. در ادامه جریان از طریق دو سلف واسط که نقش فیلتر را برعهده دارند، وارد کلیدهای RPC می‌شود. در انتخاب مقدار اندوکتانس ورودی باید دقت کرد زیرا مقدار کم اندوکتانس باعث افزایش اعوجاج جریان می‌شود و طراحی را وابسته به امپدانس خط می‌کند و

اندوکتانس زیاد باعث کاهش اعوجاج و گستره عملکرد مبدل می‌شود. با توجه به رابطه (۴-۲۴)، مقدار حداقل اندوکتانس به فرکانس کلید زنی مبدل‌ها وابسته است [۶۵]. در این رابطه f_{sw} فرکانس کلید زنی، V_{dc} ولتاژ لینک dc و ΔI مقدار ریپل مجاز جریان است.

$$\frac{V_{dc}}{8f_{sw} \times \Delta I} \leq L \quad (۴-۲۴)$$

باید توجه داشت که اگرچه بارهای تراکشن در شکل (۴-۹) با یک لکوموتیو نشان داده شده‌اند، اما این به معنای یک لکوموتیو تنها نیست؛ بلکه به معنای کل بار موجود در هر طرف پست تراکشن مورد مطالعه است. در این پایان‌نامه برای مدل‌سازی بار تراکشن، مدل جریان ثابت بار در نظر گرفته شده است.

با توجه به ساختار نشان داده شده در شکل (۴-۹) سیستم HTPQCS به سه بخش کلی زیر تقسیم بندی می‌شود:

- تئوری جبران سازی و یافتن جریان‌های مرجع جبران‌سازها
- سیستم کنترل جبران ساز RPC و SVC
- راه‌اندازی کردن^۱ کلیدهای RPC و SVC

۴-۳-۱ تئوری و اصول ریاضی جبران سازی

با توجه به شکل (۴-۹)، سیستم HTPQCS باید به گونه‌ای توان اکتیو و راکتیو را جبران نماید تا از دید اولیه ترانسفورماتور V-V بار تراکشن کاملاً متعادل و با ضریب قدرت نزدیک به واحد و بدون هارمونیک به نظر رسد.

RPC با یک سیستم کنترل مناسب قادر است توان اکتیو را بین دو بخش مجاور به گونه‌ای جا به جا کند که توان اکتیو از طرف دارای بار سنگین‌تر به طرف دارای بار سبک‌تر انتقال یابد و همچنین SVCها توان راکتیو مورد نیاز سیستم را تأمین نموده و بدین ترتیب دامنه جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های ثانویه ترانسفورماتور V-V در هر لحظه با هم برابر شوند. با برابر شدن دامنه جریان ثانویه ترانسفورماتور V-V، میزان جریان توالی منفی در سمت اولیه ترانسفورماتور به صفر کاهش می‌یابد و

^۱ Trig

اصلی ترین هدف جبران سازی که همان جبران سازی مؤلفه توالی منفی جریان است تحقق می یابد. در واقع با توجه به شکل (۹-۴) سیستم HTPQCS باید به گونه ای عمل نماید که اختلاف جریان بین دو طرف پست تراکشن جبران شود و همچنین مؤلفه های هارمونیک جریانی بار نیز از طریق RPC به بار منتقل شود. در صورت عملکرد صحیح HTPQCS، جریان عبوری از سیم پیچ های ثانویه ترانسفورماتور دارای دامنه برابر و نیز هم فاز با ولتاژ متناظر خود می شوند. به این ترتیب جریانی که پست تراکشن از شبکه قدرت دریافت می کند کاملاً متعادل و بدون مؤلفه های هارمونیک و راکتیو است. بنابراین یافتن جریان های مرجع جبران سازه ها، کلید حل این مسئله است.

با در نظر گرفتن ترانسفورماتور V-V به عنوان ترانسفورماتور مورد استفاده در پست تراکشن و با در نظر گرفتن ولتاژ فاز A به عنوان مرجع، ولتاژ فاز و خط اولیه از رابطه (۲۵-۴) بدست می آید.

$$\begin{cases} V_A = V_{ph} \angle 0 \\ V_B = V_{ph} \angle -120 \\ V_C = V_{ph} \angle +120 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{AB} = \sqrt{3}V_{ph} \angle +30 \\ V_{BC} = \sqrt{3}V_{ph} \angle -90 \\ V_{CA} = \sqrt{3}V_{ph} \angle +150 \end{cases} \quad (25-4)$$

بنابراین ولتاژ دو سر بار متصل به ترانسفورماتور V-V از طریق رابطه (۲۶-۴) بدست می آید.

$$\begin{cases} V_{La} = V_{ac} = \beta V_{AC} = \sqrt{3}\beta V_{ph} \angle -30 = V' \angle -30 \\ V_{Lb} = V_{bc} = \beta V_{BC} = \sqrt{3}\beta V_{ph} \angle -90 = V' \angle -90 \end{cases} \quad (26-4)$$

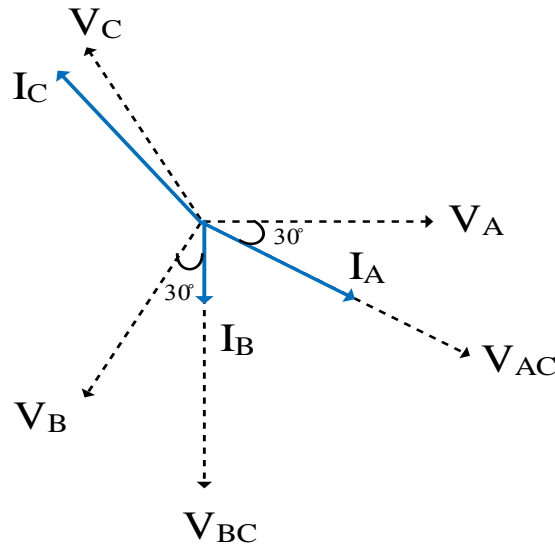
که در آن $V' = \sqrt{3}\beta V_{ph}$ است. β برابر نسبت تبدیل سمت ثانویه به سمت اولیه می باشد. با فرض واحد بودن ضریب توان بار، جریان دو طرف پست تراکشن از رابطه (۲۷-۴) قابل محاسبه است. در این روابط I_{Lbf} و I_{Laf} مؤلفه های اصلی جریان بار در دو طرف پست تراکشن هستند.

$$\begin{cases} I_{La} = I_{Laf} \angle -30 \\ I_{Lb} = I_{Lbf} \angle -90 = kI_{Laf} \angle -90 \end{cases} \quad (27-4)$$

همان طور که مشاهده می شود جریان I_{La} نسبت به ولتاژ فاز A، 30° درجه پس فاز است و جریان I_{Lb} نسبت به ولتاژ فاز B، 30° درجه پیش فاز است. جریان های سمت اولیه ترانسفورماتور برابر است با:

$$\begin{cases} I_A = \beta I_{Laf} \angle -30 \\ I_B = \beta I_{Lbf} \angle -90 \\ I_C = -(I_A + I_B) = -\beta(I_{Laf} \angle -30 + I_{Lbf} \angle -90) \end{cases} \quad (28-4)$$

با فرض اینکه I_{La} بزرگتر از I_{Lb} باشد؛ دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور V-V قبل از جبران سازی در شکل (۱۰-۴) نمایش داده شده است.



شکل (۴-۱۰) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور تراکشن قبل از جبران سازی

برای جبران سازی ابتدا باید اندازه جریان بار دو طرف پست تراکشن برابر باشد؛ بنابراین جبران ساز باید در هر لحظه اختلاف بین اندازه جریان دو طرف پست تراکشن را محاسبه کرده و نیمی از این اختلاف جریان را از بخش دارای بار بیشتر، کم کند و به بخش دارای بار کم تر اضافه کند. این مقدار جریان برابر است با:

$$\Delta I_L = \frac{1}{2}(I_{Laf} - I_{Lbf}) \quad (۲۹-۴)$$

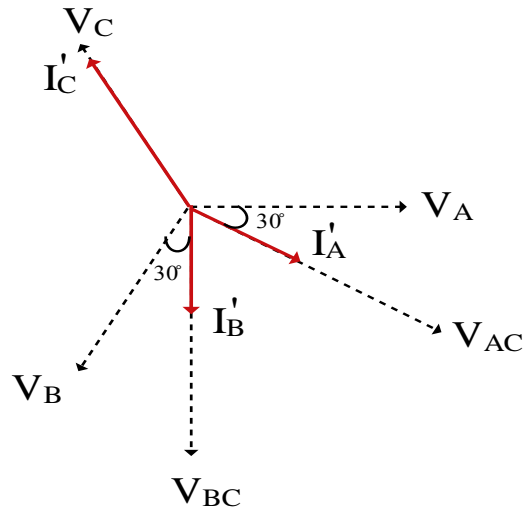
در این رابطه ΔI_L مقدار جریانی است که RPC برای جبران سازی توان اکتیو یا به عبارت بهتر متعادل سازی توان اکتیو از خود انتقال می دهد. با جا به جایی جریان ΔI_L توسط جبران ساز RPC، جریان های ثانویه ترانسفورماتور از رابطه (۴-۳۰) بدست می آیند.

$$\begin{cases} I'_{La} = I_{Laf} - \Delta I \angle -30 = I_{Laf} \angle -30 - \frac{1}{2}(I_{Laf} - I_{Lbf}) \angle -30 = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{2} \angle -30 \\ I'_{Lb} = I_{Lbf} + \Delta I \angle -90 = I_{Lbf} \angle -90 + \frac{1}{2}(I_{Laf} - I_{Lbf}) \angle -90 = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{2} \angle -90 \end{cases} \quad (۳۰-۴)$$

از رابطه (۴-۳۰) مشاهده می شود که با جا به جایی جریان ΔI_L ، دامنه جریان های ثانویه ترانسفورماتور برابر می شود و بنابراین جریان های عبوری از شبکه قدرت سه فاز مطابق با رابطه (۴-۳۱) است.

$$\begin{cases} I'_A = \beta I'_{La} = \frac{1}{2} \beta (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle -30 \\ I'_B = \beta I'_{Lb} = \frac{1}{2} \beta (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle -90 \\ I'_C = -(I'_A + I'_B) = \frac{\sqrt{3}}{2} \beta (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle +120 \end{cases} \quad (۳۱-۴)$$

شکل (۱۱-۴) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور V-V را بعد از متعادل سازی توان اکتیو نشان می‌دهد. همان طور که از شکل بر می‌آید جریان‌های فاز A و B دارای اندازه برابر هستند اما جریان فاز C هنوز برابر نشده است.



شکل (۱۱-۴) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان سمت اولیه ترانسفورماتور بعد از متعادل سازی توان اکتیو

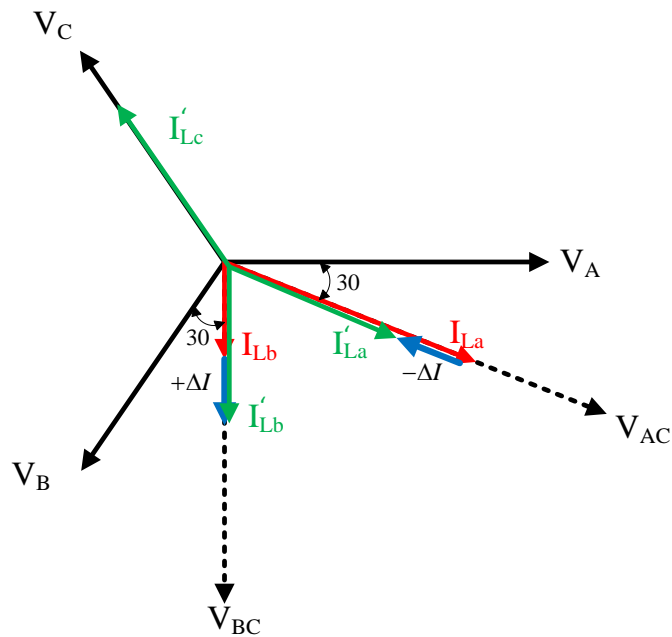
با توجه به مقادیر بدست آمده برای جریان‌های سمت شبکه قدرت، جبران سازی کامل انجام نشده است. با استفاده از تبدیل مؤلفه‌های متقارن، مقدار جریان مؤلفه صفر، مثبت و منفی جریان شبکه در این حالت برابر است با:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\beta}{\sqrt{3}}(I_{Lcf} + I_{Lbf}) \angle 0 \\ \frac{\beta}{2\sqrt{3}}(I_{Lcf} + I_{Lbf}) \angle -120 \end{bmatrix} \quad (۳۲-۴)$$

همان طور که از رابطه (۳۲-۴) مشاهده می‌شود میزان مؤلفه توالی منفی جریان قابل توجه است. درصد عدم تعادل جریان در این حالت برابر است:

$$\%CUR = \frac{|I_2|}{|I_1|} \times 100 = 50\% \quad (۳۳-۴)$$

شکل (۱۲-۴) دیاگرام برداری ولتاژ و جریان ترانسفورماتور V-V و همچنین نحوه برابر شدن جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور توسط جبران ساز را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است با برابر شدن جریان ثانویه ترانسفورماتور، جریان کشیده شده از شبکه قدرت همچنان نا متعادل است.



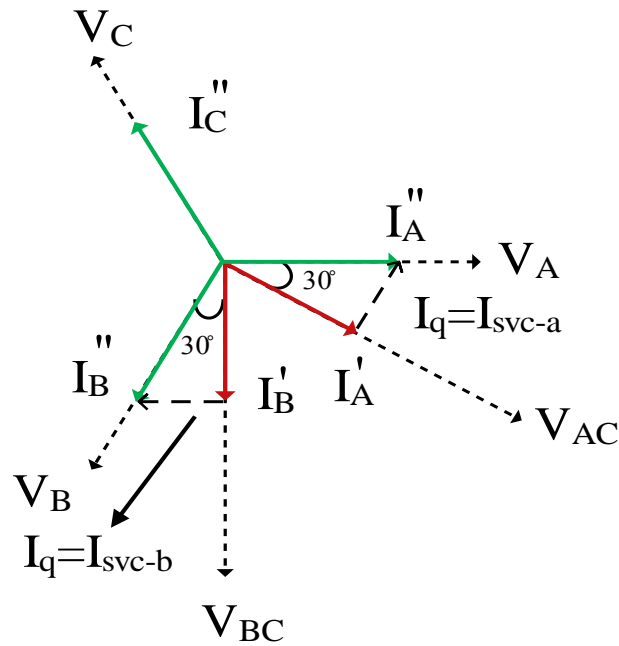
شکل (۱۲-۴) نحوه برابر شدن جریان‌های بار سمت ثانویه ترانسفورماتور تراکشن توسط RPC

مطابق با دیاگرام برداری نشان داده شده در شکل (۱۳-۴) برای اینکه جبران سازی کامل حاصل شود باید جبران ساز SVC متصل به بخش شمالی پست تراکشن (دارای بار I_{La}) به میزان 30° درجه توان راکتیو تولید کند و جبران ساز SVC متصل به بخش جنوبی پست تراکشن (دارای بار I_{Lb}) به میزان 30° درجه توان راکتیو مصرف کند. بدین ترتیب در سمت اولیه جریان‌های سه فاز کاملاً متعادل به وجود می‌آید. مقدار توان راکتیو تولیدی و مصرفی توسط جبران سازها در اینجا با هم برابر است و مقدار جریان آن از رابطه (۳۴-۴) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} |I'_{La}| = |I'_{Lb}| = \frac{1}{2}(I_{Laf} + I_{Lbf}) \\ |I_q| = |I'_{La}| \times \tan\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{2\sqrt{3}} \end{cases} \quad (34-4)$$

در نتیجه جریان عبوری از پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور در این حالت از رابطه (۳۵-۴) بدست می‌آید.

$$\begin{cases} I''_{La} = I'_{La} + |I_q| \angle 60 = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{2} \left(1 \angle -30 + \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 60\right) = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{\sqrt{3}} \angle 0 \\ I''_{Lb} = I'_{Lb} + |I_q| \angle 180 = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{2} \left(1 \angle -90 + \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 180\right) = \frac{I_{Laf} + I_{Lbf}}{\sqrt{3}} \angle -120 \end{cases} \quad (35-4)$$



شکل (۴-۱۳) دیاگرام جریان و ولتاژ ترانسفورماتور تراکشن بعد از جبران سازی کامل

جریان‌های لحظه‌ای عبوری از پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور به صورت معادله (۴-۳۶) می‌باشد. این جریان‌ها همان جریان‌های مطلوبی هستند که با جبران سازی در پی آن هستیم.

$$\begin{cases} i_{af} = \sqrt{2} I_{La}'' \sin(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t) \\ i_{bf} = \sqrt{2} I_{Lb}'' \sin(\omega t - 120) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \sin(\omega t - 120) \end{cases} \quad (۴-۳۶)$$

جریان‌های عبوری از شبکه قدرت مطابق با رابطه (۴-۳۷) است. همان‌طور که دیده می‌شود جریان‌های بدست آمده کاملاً متعادل هستند.

$$\begin{cases} I_A'' = \beta I_{La}'' = \frac{\beta}{\sqrt{3}} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle 0 \\ I_B'' = \beta I_{Lb}'' = \frac{\beta}{\sqrt{3}} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle -120 \\ I_C'' = -(I_A'' + I_B'') = \frac{\beta}{\sqrt{3}} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \angle 120 \end{cases} \quad (۴-۳۷)$$

۴-۳-۲ اصول کنترل جبران‌کننده‌ها

سیستم‌های کنترل به‌عنوان قلب جبران سازه‌های جامع توان ریلی به شمار می‌روند. برای داشتن یک

سیستم کنترل مناسب اولین قدم جمع‌آوری دقیق اطلاعات سیستم است و بنابراین در این مرحله ولتاژها و جریان‌های سیستم توسط ترانسفورماتورهای ولتاژ^۱ (PT)، ترانسفورماتورهای جریان^۲ (CT)، حس‌گرهای اثر هال و ... از شبکه تراکشن و همچنین شبکه قدرت به صورت دقیق اندازه‌گیری می‌شوند. در مرحله بعدی داده‌های بدست آمده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند و فرمان‌های جبران سازی به صورت ولتاژ و یا جریان‌های مرجع (عموماً به صورت جریان) ایجاد می‌شوند. در مرحله سوم، سیگنال‌های آتش کلیدهای نیمه‌هادی مبدل‌ها با استفاده از یکی از روش‌های PWM، کنترل هیستریزیس، کنترل منطق فازی و یا مد لغزشی ایجاد می‌گردد. کنترل این جبران‌سازها با توجه به حجم زیاد محاسبات عموماً توسط میکروکمپیوترها، میکروپروسورها و یا DSPها انجام می‌گیرد. در سیستم کنترل سه هدف کلی زیر دنبال می‌شود:

- استخراج سیگنال‌های مرجع جبران ساز
- ثابت نگه داشتن ولتاژ خازن لینک DC
- کنترل‌کننده جریان مناسب به منظور ردیابی جریان‌های مرجع جبران ساز

۱-۲-۳-۴ استخراج سیگنال‌های مرجع جبران سازی

اولین و مهم‌ترین قدم در طراحی یک سیستم کنترل، استخراج سیگنال‌های مرجع است؛ به طوری که در مراحل بعدی با ردیابی مناسب آن‌ها توسط مبدل‌ها بتوان عملکرد صحیح سیستم کنترل را تضمین کرد. به منظور اجرای درست الگوریتم کنترلی، مقادیر ولتاژ و جریان برخی از قسمت‌های سیستم تغذیه الکتریکی مورد نیاز است. این سیگنال‌ها برای مانیتورینگ، اندازه‌گیری و ثبت شاخص‌های عملکردی جبران ساز نظیر THD، ضریب قدرت، توان اکتیو و راکتیو، جریان توالی منفی و ... مورد نیاز هستند.

معمولاً سیگنال‌های ولتاژ اندازه‌گیری شده عبارت‌اند از:

- ولتاژ بین سیم تماس و ریل در دو طرف پست تراکشن (V_{Lb} و V_{La})
- ولتاژ لینک DC (V_{dc})
- ولتاژ یکی از فازهای سمت اولیه ترانسفورماتور تراکشن (V_A ، V_B و یا V_C)

¹ Potential Transformer

² Current Transformer

همچنین معمولاً باید از جریان‌های زیر نمونه برداری انجام شود:

- جریان بارهای دو طرف پست تراکشن (I_{Lb} و I_{La})
 - جریان‌های عبوری از مبدل‌های جبران سازی (I_{Rb} و I_{Ra})
 - جریان‌های عبوری از SVCها
 - جریان‌های عبوری از اولیه و ثانویه ترانسفورماتور تراکشن
- سیگنال‌های ولتاژ توسط ترانسفورماتورهای ولتاژ (PT) یا حس‌گرهای ولتاژ اثر هال اندازه‌گیری می‌شوند و سیگنال‌های جریان توسط ترانسفورماتورهای جریان (CT) و یا حس‌گرهای جریان اثر هال اندازه‌گیری می‌شوند. روش‌های کنترل برای تولید سیگنال‌های جبران سازی را می‌توان در دو دسته کلی حوزه زمان و حوزه فرکانس تقسیم‌بندی کرد.

□ جبران سازی در حوزه فرکانس

این روش بر اساس آنالیز فوریه سیگنال‌های ولتاژ و یا جریان استوار است. با استفاده از تبدیل فوریه مؤلفه‌های هارمونیک از سیگنال‌های آلوده به هارمونیک جدا شده و این مؤلفه‌ها به جریان مرجع افزوده می‌شود و توسط جبران ساز به بار انتقال می‌یابد و بدین ترتیب جریان کشیده شده از شبکه سه فاز قدرت عاری از این مؤلفه‌های هارمونیک خواهد شد. با توجه به اینکه استفاده از تبدیل فوریه به صورت آنالین نیازمند حل تعداد زیادی معادله غیرخطی است، بنابراین باعث افزایش زمان پاسخ الگوریتم‌های کنترلی حوزه فرکانس می‌شود.

□ جبران سازی در حوزه زمان

روش‌های کنترلی جبران‌سازها در حوزه زمان بر اساس استخراج مقادیر لحظه‌ای سیگنال‌های جبران ساز است. این سیگنال‌های جبران ساز می‌توانند به صورت ولتاژ و یا جریان از سیگنال‌های ولتاژ و جریان جبران سازی نشده استخراج شوند. روش‌های کنترلی زیادی در حوزه زمان تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل جریان مبتنی بر منطق فازی [۶۶]، تئوری توان اکتیو و راکتیو لحظه-ای pq [۷، ۵۱]، تئوری قاب مرجع سنکرون dq [۸]، کنترل PI [۵۰]، کنترل زمان مرده^۱ [۶۷] و روش FBD^2 [۱۹] از جمله روش‌های کنترلی مورد استفاده در کنترل جریان جبران سازهای کیفیت توان در حوزه زمان می‌باشند.

¹ Deadbeat

² Fryze-Buchholz-Depenbrock

نظریه توان لحظه‌ای به طور گسترده در فیلترهای توان اکتیو مورد استفاده است، ولی نمی‌توان از آن به صورت مستقیم در شبکه‌های قدرت تراکشن استفاده کرد؛ زیرا این نظریه بر اساس مدار سه فاز می‌باشد، بنابراین در این بررسی از ترکیب دو روش توان لحظه‌ای و FBD استفاده می‌شود. محققى به نام فرایز در سال ۱۹۳۲ روشی را برای تحلیل ارتباط بین کمیت‌های جریان، ولتاژ و توان ارائه نمود. در سال‌های بعد از آن بوخهلز و دینبروک این روش را اصلاح و تکمیل کرده و آن را روش FBD نامیدند. هدف اصلی این روش جدا کردن مؤلفه اصلی اکتیو جریان از بقیه اجزاء غیر اکتیو آن است [۶۸].

۴-۳-۱-۲-۱ استخراج سیگنال‌های مرجع جبران سازی RPC

برای استخراج سیگنال‌های مرجع در RPC، جریان بار تراکشن به صورت معادله (۴-۳۸) فرض می‌شود. در اینجا مؤلفه‌های اکتیو و راکتیو و هارمونیکى بارهای تراکشن از یکدیگر تفکیک شده‌اند.

$$\begin{cases} i_{La} = \sqrt{2}i_{Laf} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{2}I_{Ldfr} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \\ i_{Lb} = \sqrt{2}i_{Lbf} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \sqrt{2}I_{Lbfr} \sin(\omega t - \pi) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lbh} \sin(h\omega t + \phi_{bh}) \end{cases} \quad (۴-۳۸)$$

در این رابطه I_{Laf} و I_{Lbf} معرف مقدار مؤثر مؤلفه اصلی جریان اکتیو بار هستند و I_{Ldfr} و I_{Lbfr} بیانگر مقدار مؤثر مولفه اصلی راکتیو جریان بار هستند و I_{Lah} و I_{Lbh} نشان دهنده مولفه‌های هارمونیکى مرتبه h بار هستند.

بر اساس روش FBD، اگر فاز ولتاژ بار با موج جریان بار سنکرون گردد؛ آنگاه مؤلفه‌های جریان به صورت معادله (۴-۳۹) می‌شوند.

$$\begin{aligned} i_{La} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) &= \sqrt{2}i_{Laf} \sin^2\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + \sqrt{2}I_{Ldfr} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + \\ &\sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2}I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \right\} = \frac{\sqrt{2}}{2}I_{Laf} - \frac{\sqrt{2}}{2}I_{Laf} \cos\left(2\omega t - \frac{\pi}{3}\right) - \\ &\frac{\sqrt{2}}{2}I_{Ldfr} \cos\left(2\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \end{aligned} \quad (۴-۳۹)$$

برای سنکرون‌سازی و جداسازی فاز ولتاژ هر بخش از PLL^۱ استفاده می‌شود. با دقت در معادله

^۱ Phase Lock Loop

(۴-۳۹) می‌توان دریافت که با جداسازی مؤلفه DC پس از سنکرون سازی، $\frac{\sqrt{2}}{2} I_{Laf}$ بدست می‌آید که با مقایسه با رابطه (۴-۳۸) همان مؤلفه اکتیو جریان بار است. این امر با عبور از یک فیلتر پایین-گذر^۱ (LPF) محقق خواهد شد. برای جریان I_{Lb} نیز همانند جریان بخش شمالی پست تراکشن یعنی I_{La} خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} I_{Lb} \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) &= \sqrt{2} I_{Lbf} \sin^2(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \sqrt{2} I_{Lbfr} \sin(\omega t - \pi) \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ &+ \sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2} I_{Lbh} \sin(h\omega t + \varphi_{bh}) \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \right\} \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lbf} - \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lbf} \cos(2\omega t - \pi) - \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lbfr} \cos(2\omega t - \frac{3\pi}{2}) \\ &+ \sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2} I_{Lbh} \sin(h\omega t + \varphi_{bh}) \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \right\} \end{aligned} \quad (۴۰-۴)$$

پس از سنکرون سازی جریان بار با ولتاژ متناظر خود مقدار مؤلفه DC موج حاصله، مؤلفه اصلی اکتیو جریان بار را می‌دهد. مؤلفه DC جریان بار را می‌توان با عبور از یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع کمتر از $\frac{\omega}{2\pi}$ جداسازی کرد [۲۱].

$$\begin{cases} I_{La} \times \sin(\omega t) \\ I_{Lb} \times \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \xrightarrow{LPF} \begin{cases} I_{pa} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Laf} \\ I_{pb} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lbf} \end{cases} \quad (۴۱-۴)$$

مجموع دو مؤلفه dc را با I_p نمایش داده و برابر است با:

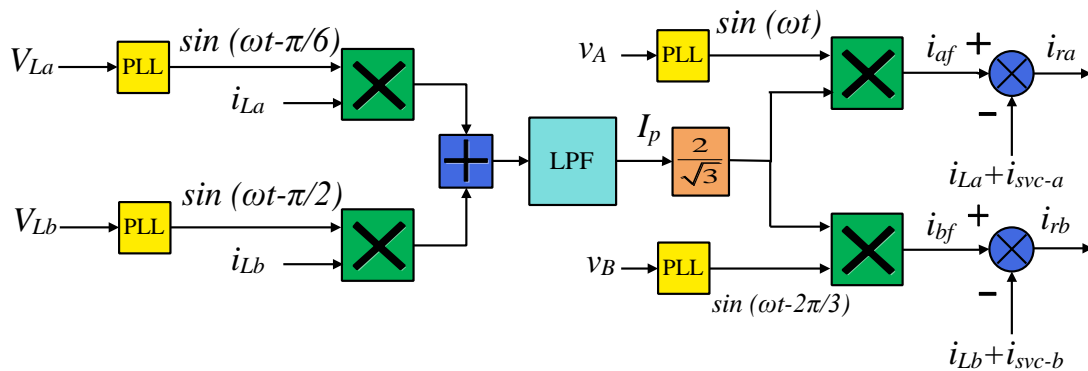
$$I_p = \frac{\sqrt{2}}{2} (I_{Laf} + I_{Lbf}) \quad (۴۲-۴)$$

با ضرب I_p در $\frac{2}{\sqrt{3}}$ مقدار حداکثر دامنه جریان‌های i_{af} و i_{bf} در معادله (۴-۳۶) بدست می‌آید.

i_{af} و i_{bf} نشان دهنده جریان عبوری از پایانه‌های ثانویه ترانسفورماتور پس از جبران سازی کامل می‌باشد. شکل (۴-۱۴) بلوک دیاگرام تولید سیگنال‌های مرجع جهت جبران سازی کامل کیفیت توان را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود از PLL جهت سنکرون سازی جریان بار با ولتاژ متناظر خود استفاده شده است. جریان‌های i_{ra} و i_{rb} به ترتیب جریان‌های مرجع مبدل‌های متصل به بخش-

^۱ Low Pass Filter

های a و b هستند.

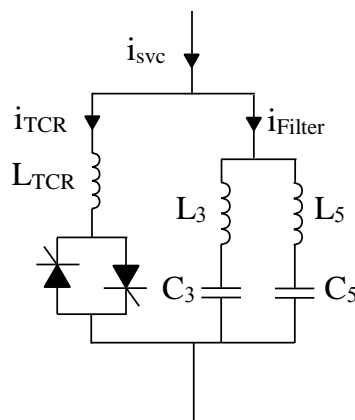


شکل (۴-۱۴) تولید جریان مرجع جهت جبران سازی کامل کیفیت توان

در شکل (۴-۱۴) پس از اینکه جریان‌های مطلوب (i_{af} و i_{bf}) توسط سیستم کنترلی ساخته شد، با کم کردن جریان مطلوب از مجموع جریان‌های بار و SVC، جریان مرجع مورد نیاز برای جبران سازی توسط RPC تولید می‌گردد.

۴-۳-۲-۱-۲-۳-۴ استخراج سیگنال‌های مرجع جبران سازی SVC

SVC استفاده شده در این پایان‌نامه همان طور که در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است از نوع TCR-FC می‌باشد که در ساختار آن بجای استفاده از یک خازن تنها، از فیلترهای هارمونیک مرتبه ۳ و ۵ استفاده شده است تا هارمونیک‌های اساسی را حذف کند و مابقی هارمونیک‌ها توسط RPC جبران خواهد شد.



شکل (۴-۱۵) نوع SVC TCR-FC

فیلترهای پسیو در فرکانس‌های کمتر از فرکانس حذف، در مود خازنی عمل می‌کنند، به عبارتی خازن

فیلتر بر سلف آن غلبه دارد و می‌تواند علاوه بر حذف هارمونیک همزمان جبران سازی توان راکتیو را نیز انجام دهند. نحوه کنترل SVC از طریق کنترل جریان TCR به وسیله کنترل زاویه آتش تریستور است. می‌توان جریان TCR را بر حسب تابعی از زاویه آتش به صورت زیر نوشت.

$$I_{TCR}(\alpha) = \frac{V_{PCC}}{\omega L_{TCR}} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin(2\alpha) \right) \quad (43-4)$$

V_{PCC} ، ولتاژ محل اتصال SVC به شبکه می‌باشد. توان راکتیو شبکه تراکشن شامل دو مؤلفه می‌باشد. بخش اول مربوط به جریان بار می‌باشد که با توجه به معادله (4-38) برای بخش‌های شمالی و جنوبی به ترتیب با I_{Laf} و I_{Lbf} نمایش داده شد و بخش دوم مربوط به توان راکتیوی است که به واسطه نوع ساختار شبکه و ترانسفورماتور ایجاد می‌شود؛ که در شکل (4-13) با I_q نمایش داده شده است و به منظور هم‌فاز شدن جریان‌ها با ولتاژهای فاز متناظرشان به سیستم تزریق می‌شود. این توان مورد نیاز برای بخش شمالی پست خازنی و برای بخش جنوبی پست سلفی است. با توجه به معادله (4-34) مقادیر مؤثر جریان مرجع برای SVCها از رابطه (4-44) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} I_{svc-a}^{ref} = -\left(\frac{1}{\sqrt{6}} I_p + I_{Laf} \right) \\ I_{svc-b}^{ref} = \frac{1}{\sqrt{6}} I_p - I_{Lbf} \end{cases} \quad (44-4)$$

I_p مجموع جریان مؤلفه‌های DC بارها می‌باشد و برابر رابطه (4-42) است. علامت منفی معرف خازنی بودن جریان جبران سازی است. برای تولید مؤلفه راکتیو جریان بارها می‌توان از روش FBD استفاده کرد. با ضرب جریان بارها (i_{Lb} و i_{La}) به ترتیب در سیگنال‌های $\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$ و $\sin(\omega t - \pi)$ داریم:

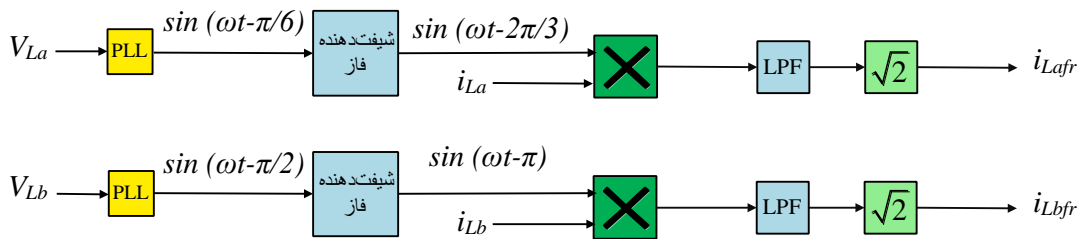
$$\begin{aligned} i_{La} \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) &= \sqrt{2} i_{Laf} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2} I_{Laf} \sin^2\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ \sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2} I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} &= -\frac{\sqrt{2}}{2} i_{Laf} \cos\left(2\omega t - \frac{5\pi}{6}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2} i_{Laf} - \\ \frac{\sqrt{2}}{2} i_{Laf} \cos\left(2\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) &+ \sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2} I_{Lah} \sin(h\omega t + \phi_{ah}) \times \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right\} \end{aligned} \quad (45-4)$$

$$i_{Lb} \times \sin(\omega t - \pi) = \sqrt{2}i_{Lbf} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \times \sin(\omega t - \pi) + \sqrt{2}I_{Lbfr} \sin^2(\omega t - \pi) +$$

$$\sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2}I_{Lbh} \sin(h\omega t + \phi_{bh}) \times \sin(\omega t - \pi) \right\} = -\frac{\sqrt{2}}{2}i_{Lbf} \cos\left(2\omega t - \frac{3\pi}{2}\right) + \frac{\sqrt{2}}{2}i_{Lbfr} -$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2}i_{Lbfr} \cos(2\omega t - 2\pi) + \sum_{h=2}^{\infty} \left\{ \sqrt{2}I_{Lbh} \sin(h\omega t + \phi_{bh}) \times \sin(\omega t - \pi) \right\}$$

با عبور دادن جریان بارها از فیلتر پایین گذر، مؤلفه راکتیو جریان بارها مطابق شکل (۱۶-۴) بدست می آید.

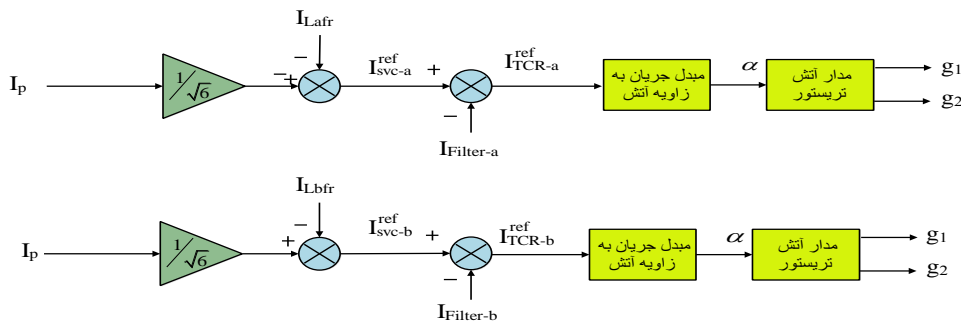


شکل (۱۶-۴) نحوه استخراج مؤلفه راکتیو بار از جریان لحظه‌ای

با توجه به شکل (۱۵-۴) جریان‌های مرجع برای TCR برابر است با:

$$\begin{cases} I_{TCR-a}^{ref} = I_{svc-a}^{ref} - I_{Filter-a} = -\left(\frac{1}{\sqrt{6}}I_P + I_{Lafr} + I_{Filter-a}\right) \\ I_{TCR-b}^{ref} = I_{svc-b}^{ref} - I_{Filter-b} = \frac{1}{\sqrt{6}}I_P - I_{Lbfr} - I_{Filter-b} \end{cases} \quad (۴۷-۴)$$

با تولید جریان مرجع TCR، این جریان توسط رابطه (۴۳-۴) به زاویه آتش تبدیل شده و به سوئیچ‌های تریستور اعمال می‌گردد. در شکل (۱۷-۴) نحوه کنترل SVC و تولید زاویه آتش تریستورها برای SVC بخش‌های شمالی و جنوبی نشان داده شده است.



شکل (۱۷-۴) تولید جریان مرجع برای SVC بخش شمالی و جنوبی پست تراکشن

۴-۳-۲-۲ تثبیت ولتاژ لینک DC

وظیفه اصلی RPC انتقال توان اکتیو بین دو بخش مجاور هم در یک پست تراکشن است. خازن لینک DC قلب این انتقال توان است که بین دو مبدل به صورت مشترک قرار گرفته است. اگر ولتاژ لینک DC دچار اغتشاش و نوسانات گردد، عملکرد انتقال توان به صورت کامل تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

در جبران ساز RPC همواره یکی از مبدل‌ها با توجه به شرایط بار به صورت یکسوساز عمل کرده و توان را به خازن تحویل می‌دهد و به اصطلاح خازن را شارژ می‌کند و مبدل دیگر به صورت اینورتری عمل کرده و توان را از خازن دریافت می‌کند و به شبکه تحویل می‌دهد. اگر به دلایلی عمل یکسوسازی متوقف شود انرژی خازن به سرعت تخلیه می‌شود و عمل انتقال توان صورت نمی‌گیرد. اگر عمل اینورتری متوقف شود و کنترل مشخصی بر روی ولتاژ لینک DC صورت نگرفته باشد؛ ولتاژ خازن به سرعت افزایش یافته و منجر به ناپایداری سیستم و حتی ترکیدن خازن خواهد شد. از طرف دیگر اگر تبادل توان به صورت همزمان و مساوی صورت پذیرد، به دلیل وجود هارمونیک (به‌ویژه هارمونیک مرتبه دوم)، ولتاژ خازن دچار ریزش و نوسان خواهد بود و منجر به انتقال توان با کیفیت پایین خواهد شد که به دلیل تک فاز بودن سیستم تغذیه تراکشن، توان ضربانی در سیستم به وجود خواهد آمد.

انتخاب مقدار مناسب برای خازن لینک DC بسیار مهم است. انتخاب مقدار کوچک برای این خازن سبب می‌شود تا میزان توان انتقالی کاهش یابد و انتخاب مقدار بزرگ برای خازن لینک DC سبب افزایش حجم جبران ساز و همچنین افزایش زمان پاسخگویی سیستم و در نتیجه کند شدن دینامیک سیستم می‌شود. برای تعیین مقدار مناسب خازن لینک DC از روابط مربوط به شرکت ABB استفاده شده است که در آن مقدار انرژی خازن لینک DC بر اساس سطح توان مورد نیاز تعیین می‌شود. بر اساس این روابط به ازای هر kVA توان انتقالی، ۶ الی ۱۲ ژول انرژی برای خازن مد نظر قرار می‌گیرد [۶۹]. به این ترتیب می‌توان مقدار تقریبی خازن لینک DC را از روابط (۴-۴۸) بدست آورد. در این رابطه $S_{RPC}^{(kVA)}$ برابر توان انتقالی از طریق جبران ساز برحسب kVA است.

$$\begin{cases} E_C = (6 \sim 12)^{(J)} \times S_{RPC}^{(kVA)} \\ E_C = \frac{1}{2} C_{dc} \times V_{dc}^2 \end{cases} \Rightarrow C_{dc} = \frac{(6 \sim 12)^{(J)} \times S_{RPC}^{(kVA)}}{\frac{1}{2} V_{dc}^2} \quad (4-48)$$

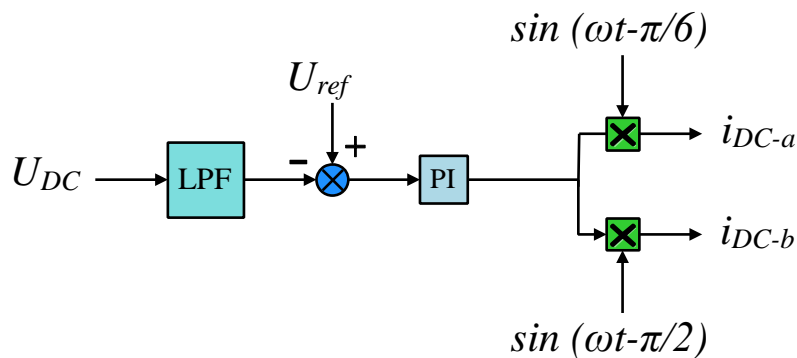
به منظور تثبیت ولتاژ خازن در این پایان‌نامه از کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی (PI) استفاده شده

است. کنترل کننده PI، کنترل کننده‌ای پرکاربرد برای تنظیم ولتاژ در شبکه‌های قدرت و همچنین شبکه‌های تراکشن است. این کنترل کننده ولتاژ مرجع و ولتاژ 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 کننده به صورت رابطه (۴-۴۹) تعریف می‌شود که در آن K_P و K_I به ترتیب بهره تناسبی و انتگرالی هستند.

$$G_C = K_P + \frac{K_I}{S} \quad (۴-۴۹)$$

با توجه به وجود هارمونیک مرتبه دوم در محتوای ولتاژ لینک DC، ورود این هارمونیک به کنترل کننده PI منجر به تولید هارمونیک مرتبه سوم در خروجی کنترل کننده می‌شود. به منظور جلوگیری از وقوع چنین پیشامدی باید هارمونیک مرتبه دوم از محتوای ولتاژ لینک DC فیلتر شود و از ورود آن به کنترل کننده PI، جلوگیری بعمل آید. این کار با استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر صورت می‌گیرد.

خروجی کنترل کننده PI تنها یک سیگنال کنترلی است، بنابراین برای تأثیر دادن آن در سیستم کنترل باید آن را به یک کمیت نسبت داد و در اینجا کمیت مورد نظر جریان است. بدین منظور سیگنال خروجی PI با موج‌های جریان بار سنکرون می‌گردد. جریان‌های مرجع برای کنترل ولتاژ لینک DC به جریان‌های مرجع برای جبران سازی شاخص‌های کیفیت توان اضافه می‌شود و بدین ترتیب جریان مرجع کامل تولید می‌شود. شکل (۴-۱۸) نشان دهنده نحوه کنترل ولتاژ لینک DC با استفاده از کنترل کننده PI است. همان طور مشاهده می‌شود خروجی کنترل کننده PI با ولتاژهای دو طرف پست تراکشن سنکرون شده و سیگنال بدست آمده به جریان مرجع جبران ساز اضافه می‌شود.

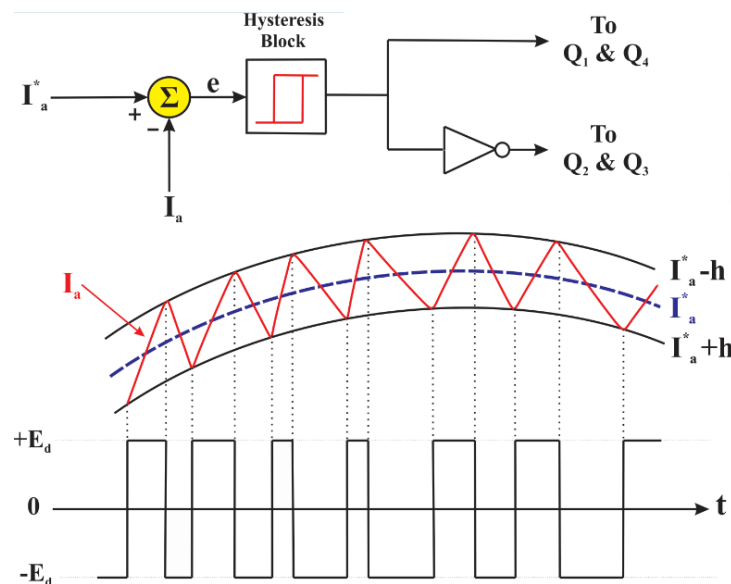


شکل (۴-۱۸) نحوه کنترل ولتاژ لینک DC با استفاده از کنترل کننده PI

۳-۲-۳-۴ تولید سیگنال آتش

پس از تولید سیگنال‌های مرجع جبران ساز، مهم‌ترین مسئله دنبال کردن این سیگنال‌ها توسط مبدل‌ها است. روش‌های متعددی نظیر کنترل جریان هیستریزیس، کنترل PWM، کنترل زمان مرده و کنترل جریان مبتنی بر منطق فازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این روش‌ها به صورت سخت‌افزاری یا به صورت نرم‌افزاری (جبران سازهای مبتنی بر DSP) در جبران سازهای کیفیت توان پیاده‌سازی شده‌اند [۶۶].

در این پایان‌نامه در درجه اول به یک کنترل‌کننده جریان نیاز است که بتواند تغییرات جریان را به صورت لحظه‌ای و با سرعت بالا دنبال کند؛ زیرا بار تراکشن دارای تغییرات بسیار زیاد است و لذا دامنه جریان‌های مرجع می‌تواند بسیار متغیر باشد. از این‌رو هرگونه تأخیری در دنبال کردن این تغییرات می‌تواند عملکرد صحیح RPC را مختل کند. با توجه به ملزومات اشاره شده، در این پایان‌نامه کنترل‌کننده جریان هیستریزیس انتخاب شده است. این کنترل‌کننده مستقیماً با جریان ارتباط دارد و دارای ساختار بسیار ساده‌ای است. همچنین دارای سریع‌ترین پاسخ دینامیکی در بین کنترل‌کننده‌های جریان است. شکل (۴-۱۹) نشان دهنده ساختار و همچنین نحوه عملکرد یک کنترل‌کننده جریان هیستریزیس است.



شکل (۴-۱۹) ساختار و نحوه عملکرد کنترل‌کننده جریان هیستریزیس [۷۰]

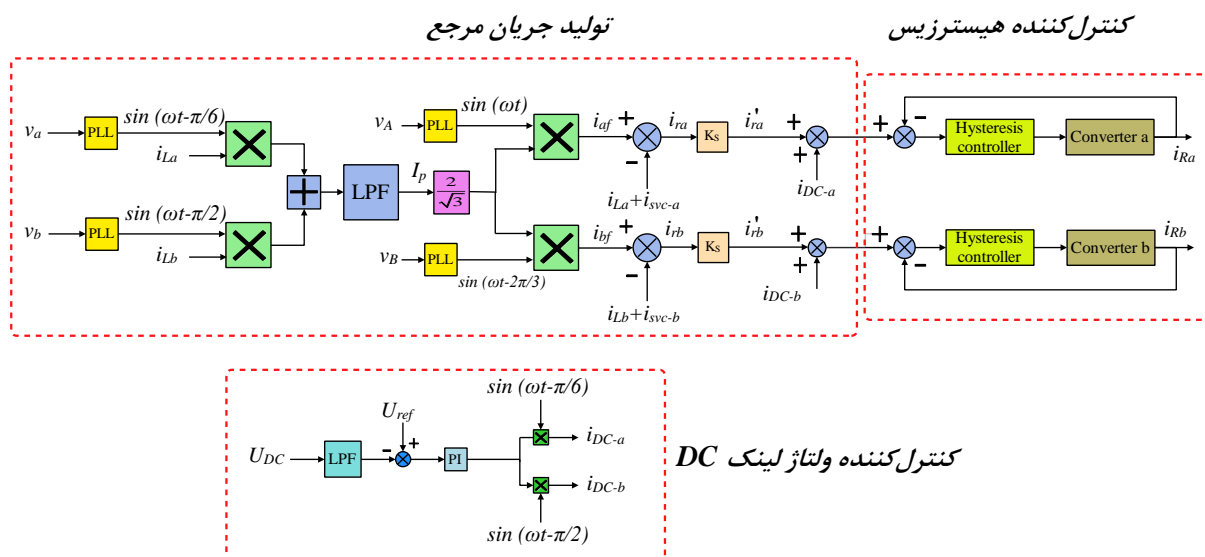
در این کنترل‌کننده جریان مرجع و جریان اندازه‌گیری شده با یکدیگر از طریق یک باند هیستریزیس

مقایسه می‌شوند و خروجی این مقایسه کننده مطابق با رابطه (۴-۵۰) یک جفت کلید را روشن و جفت دیگر را خاموش می‌کند.

$$Q_1, Q_4 = \begin{cases} 1 & ; \Delta I = e < -h \\ 0 & ; \Delta I = e > +h \\ \text{Hold On} & ; |\Delta I = e| < h \end{cases} \quad (۴-۵۰)$$

در رابطه (۴-۵۰)، عدد یک به معنای روشن شدن کلید و عدد صفر به معنای خاموش شدن کلید است و h معرف پهنای باند هیستریزس است که جریان در داخل آن کنترل می‌شود. اگر اختلاف جریان (e) کمتر از $-h$ شود در این صورت کلیدهای Q_4 و Q_1 روشن شده و ولتاژ $+E_d$ دو سر بار قرار گرفته و جریان افزایش می‌یابد و اگر اختلاف جریان بیشتر از $+h$ شود، کلیدهای Q_1 و Q_4 خاموش شده و ولتاژ $-E_d$ دو سر بار قرار می‌گیرد و در نتیجه جریان کاهش می‌یابد. در مقایسه با سایر روش‌های کنترل جریان، روش کنترل جریان هیستریزس دارای مزیت‌های زیادی همچون ساختار و روش پیاده‌سازی بسیار ساده، پاسخ دینامیکی سریع، حساس نبودن به پارامترهای بار و خطای ردیابی جریان کم است.

در شکل (۴-۲۰) کنترل کننده کامل RPC به همراه کنترل کننده‌های ولتاژ لینک DC و کنترل کننده هیستریزس و کنترل کننده تولید جریان مرجع نشان داده شده است.



شکل (۴-۲۰) کنترل کننده جامع RPC

۴-۴ طراحی پارامترهای SVC

برای طراحی پارامترهای SVC به منظور کنترل جریان راکتیو مراحل زیر باید در نظر گرفته شود.

(۱) تعیین پارامترهای فیلترهای پسیو .

در سیستم HTPQCS، همان طور که در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است، SVC از نوع TCR-FC می باشد که در آن بجای استفاده از خازن منفرد، از فیلترهای پسیو تک تنظیمه مرتبه ۳ و ۵ استفاده شده است. در این صورت برای جبران توان راکتیو مورد نیاز سیستم باید این مقدار توان راکتیو را بین فیلترها تقسیم نمود و از روابط زیر مقادیر سلف و خازن را مشخص نمود.

با فرض اینکه توان راکتیو مورد نیاز فیلتر برابر Q_F و ولتاژ نقطه اتصال فیلتر به شبکه V_{PCC} و امپدانس فیلتر Z_F باشد در این صورت خواهیم داشت:

$$\begin{cases} Q_F = \frac{V_{PCC}^2}{Z_F} \\ Z_F = L_F \omega - \frac{1}{C_F \omega}, \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (۵۱-۴)$$

f در رابطه (۵۱-۴) فرکانس اصلی سیستم می باشد. برای جبران سازی هارمونیک در فرکانس مورد نظر باید رابطه زیر برقرار باشد.

$$h = \frac{1}{\omega \sqrt{L_F C_F}} \quad (۵۲-۴)$$

h مرتبه هارمونیک است که فیلتر پسیو تک تنظیمه در آن تنظیم شده است و در اینجا برای هارمونیک های مرتبه ۳ و ۵ فیلترها طراحی می شوند. با استفاده از معادلات (۴-۵۱) و (۴-۵۲) روابط زیر قابل استخراج است:

$$\begin{cases} C_F = \frac{Q_F}{\omega^2 V_{PCC}^2} \left(1 - \frac{1}{h^2}\right) \\ L_F = \frac{1}{h^2 \omega^2 C_F} \end{cases} \quad (۵۳-۴)$$

(۲) تعیین مقدار راکتور TCR

مقدار راکتور باید به نحوی تنظیم شود تا زمانیکه سوئیچها در حال هدایت کامل هستند ($\alpha = 0$)،

سلف قادر باشد تمام توان راکتیو تولید شده توسط فیلترها را جذب نماید. این حالت زمانی است که سلف و خازن در حال تشدید بوده و اثر یکدیگر را خنثی می کنند. رابطه بین سلف و خازن در حالت تشدید موازی به صورت رابطه (۴-۵۴) است.

$$L_{TCR} = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (۴-۵۴)$$

توجه شود در رابطه بالا C معادل کل مقدار خازنی است که تمام توان راکتیو سیستم را جبران می کند و آن را می توان از رابطه (۴-۵۵) محاسبه نمود.

$$Q_s = C \omega V_{PCC}^2 \rightarrow C = \frac{Q_s}{\omega V_{PCC}^2} \quad (۴-۵۵)$$

Q_s توان راکتیو کل سیستم است که برابر مجموع توان راکتیو فیلترها می باشد.

۵-۴ تحلیل اقتصادی سیستم HTPQCS

سؤالی که مطرح می شود این است که به لحاظ اقتصادی چطور ممکن است با وجود اضافه شدن یک جبران ساز جدید (SVC) در کنار جبران ساز اصلی، قیمت سرمایه گذاری اولیه کاهش پیدا کند؟ جواب اینجاست؛ جبران ساز RPC همانگونه که قبلاً اشاره گردید از قیمت بالایی برخوردار می باشد و هزینه آن با افزایش ظرفیت این جبران ساز افزایش می یابد یا به عبارتی قیمت آن متناسب با ظرفیت آن می باشد. از سوی دیگر همان طور که در فصل های گذشته بیان گردید بارهای تراکشن، بارهایی سنگین برای شبکه قدرت محسوب می شوند و دارای توان ظاهری بالایی می باشند و چون RPC هر سه فاکتور جریان توالی منفی، توان راکتیو و هارمونیک های بار را به طور همزمان جبران می کند، بنابراین دارای هزینه بالایی می باشد. در این بخش ابتدا به محاسبه ظرفیت هر کدام از مبدل های جبران ساز RPC بر حسب توان نامی بار و بدون حضور جبران کننده SVC خواهیم پرداخت و پس از آن به محاسبه ظرفیت جبران ساز RPC در حضور SVC می پردازیم. در آخر به بررسی اقتصادی خواهیم پرداخت و مشاهده می کنیم که سیستم HTPQCS نسبت به زمانیکه جبران ساز RPC تنها بکار گرفته شود، اقتصادی تر و به صرفه تر خواهد بود.

اکنون فرض شود که لکوموتیوهای مورد استفاده در شبکه تراکشن از نوع SS6B باشد [۷۱]. THD بار برابر با ۲۳.۴٪ و ضریب توان آن ۰.۸۲ است و توان ظاهری بار برابر ۱۰ MVA باشد. با فرض اینکه بار

فقط در بخش شمالی پست تراکشن موجود باشد، در این صورت توان‌های اکتیو و راکتیو و هارمونیک بار به شرح زیر می‌باشد.

$$P_{La} = S_L \times \cos \varphi = 10 \times 0.82 = 8.2 \text{ MW} \quad (56-4)$$

$$Q_{La} = S_L \times \sin \varphi = 10 \times \sqrt{1 - 0.82^2} = 5.723 \text{ MVAR} \quad (57-4)$$

$$P_{ha} = S_L \times THD = 10 \times 0.234 = 2.34 \text{ MW} \quad (58-4)$$

با توجه به شکل (۹-۴) و با استفاده از روابط (۲۹-۴) و (۳۴-۴) توان‌های اکتیو و راکتیو و هارمونیک عبوری از هر یک مبدل‌های فاز a و b یا به عبارتی توان‌های جبران‌کنندگی که توسط هر یک از مبدل‌های مذکور تولید می‌شود به ترتیب برابر است با:

$$\begin{cases} P_{ra} = -\frac{1}{2}(P_{La} - P_{Lb}) = -\frac{1}{2}(8.2) = 4.1 \text{ MW} \\ Q_{ra} = -\frac{1}{2\sqrt{3}}(P_{La} + P_{Lb}) - Q_{La} = -\frac{1}{2\sqrt{3}}(8.2) - 5.723 = -8.1 \text{ MVAR} \\ P_{rha} = P_{ha} = 2.34 \text{ MW} \end{cases} \quad (59-4)$$

$$\begin{cases} P_{rb} = \frac{1}{2}(P_{La} - P_{Lb}) = \frac{1}{2}(8.2) = 4.1 \text{ MW} \\ Q_{rb} = \frac{1}{2\sqrt{3}}(P_{La} + P_{Lb}) - Q_{Lb} = \frac{1}{2\sqrt{3}}(8.2) - 0 = 2.4 \text{ MVAR} \\ P_{rhb} = P_{hb} = 0 \text{ MW} \end{cases} \quad (60-4)$$

از روابط (۵۹-۴) و (۶۰-۴) ظرفیت هر یک از مبدل‌های a و b برابر است با:

$$\begin{cases} S_{Conv}^a = \sqrt{P_{ra}^2 + Q_{ra}^2 + P_{rha}^2} = 9.375 \text{ MVA} \\ S_{Conv}^b = \sqrt{P_{rb}^2 + Q_{rb}^2 + P_{rhb}^2} = 4.75 \text{ MVA} \end{cases} \quad (61-4)$$

نکته‌ای که حائز اهمیت می‌باشد این است که در عمل ظرفیت مبدل‌های جبران ساز باید بایکدیگر برابر باشد و مبدل با ظرفیت بیشتر تعیین‌کننده‌ی ظرفیت هر کدام از مبدل‌ها می‌باشد [۹] که در اینجا مبدل فاز a می‌باشد، بنابراین ظرفیت جبران ساز RPC برابر است با:

$$S_{RPC} = 2 \times S_{Conv}^a = 2 \times 9.375 = 18.75 \text{ MVA} \quad (62-4)$$

حال ظرفیت مبدل‌ها را در صورت استفاده از SVC محاسبه می‌کنیم. در این حالت توان راکتیو کاملاً توسط SVC جبران می‌شود و همچنین با فرض اینکه ۷۰ درصد از توان هارمونیکی به وسیله فیلترهای پسیو جبران شود و فقط ۳۰ درصد آن توسط مبدل‌ها جبران گردد بنابراین ظرفیت مبدل‌ها را محاسبه می‌کنیم.

$$\begin{cases} \bar{S}_{Conv}^a = \sqrt{P_{ra}^2 + (0.3 \times P_{rha})^2} = 4.159 \text{ MVA} \\ \bar{S}_{Conv}^b = \sqrt{P_{rb}^2 + (0.3 \times P_{rhb})^2} = 4.1 \text{ MVA} \end{cases} \quad (۴-۶۳)$$

ظرفیت‌های RPC و SVC برابر است با:

$$\begin{cases} \bar{S}_{RPC} = 2 \times \bar{S}_{Conv}^a = 2 \times 4.159 = 8.318 \text{ MVA} \\ S_{SVC}^a = \sqrt{Q_{ra}^2 + (0.7 \times P_{rha})^2} = 8.26 \text{ MVA} \\ S_{SVC}^b = \sqrt{Q_{rb}^2 + (0.7 \times P_{rhb})^2} = 2.4 \text{ MVA} \end{cases} \quad (۴-۶۴)$$

اگر قیمت RPC، x/MVA باشد؛ در صورت بکارگیری RPC به عنوان تنها جبران کننده موجود در سیستم، قیمت تمام شده سیستم جبران ساز برابر است با $۱۸.۷۵x$. در مقاله [۲۶] مقایسه‌ای بین RPC و MSVC به لحاظ قیمت انجام گرفته است و قیمت MSVC حدود $\frac{1}{8}$ جبران ساز RPC ذکر شده است. در ابتدا با در نظر گرفتن همین فرض قیمتی برای SVC، هزینه تمام شده سیستم ترکیبی برابر است با $۹.۶۵x$ $\left[8.318x + \frac{(8.26+2.4)}{8}x = 9.65x \right]$. در این صورت قیمت سیستم ترکیبی حدود ۵۱ درصد جبران ساز مرسوم RPC خواهد بود.

با توجه به اینکه SVC دارای ساختار ساده‌تری نسبت به MSVC می‌باشد (رجوع شود به شکل (۳-۱۷) و شکل (۳-۱۸) و شکل (۴-۱۵)) بنابراین قیمت کمتری نسبت به آن خواهد داشت؛ اگر فرض کنیم قیمت SVC حدود ۰.۸ قیمت MSVC باشد؛ در این صورت قیمت سیستم پیشنهادی HTPQCS حدود ۴۱ درصد جبران ساز RPC خواهد بود.

۴-۶ جمع بندی

در شبکه‌های تغذیه الکتریکی راه‌آهن برقی، ترانسفورماتورهای تراکشن یکی از مهم‌ترین تجهیزات به شمار می‌روند که در میزان سرمایه گذاری اولیه شبکه تراکشن نقش به سزایی دارند. در این فصل

انواع مختلف ترانسفورماتورهای تراکشن با هم مقایسه گردید و نهایتاً ترانسفورماتور V-V به عنوان بهترین اتصال برای شبکه تراکشن انتخاب شد. در ادامه به منظور جبران سازی مشکلات کیفیت توان و بهبود شاخص‌های آن در شبکه‌های تراکشن، سیستم HTPQCS معرفی شد. این سیستم مبتنی بر جبران سازهای RPC و SVC است. هدف از اتخاذ SVC، جبران سازی توان راکتیو می‌باشد تا با برداشتن وظیفه‌ی جبران توان راکتیو از دوش جبران ساز RPC، به کاهش ظرفیت این جبران ساز که از قیمت بالایی برخوردار است، کمک نموده و هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را کاهش دهد. اصول جبران سازی کامل کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن مورد مطالعه قرار گرفت و در انتهای این فصل تحلیلی اقتصادی بر روی سیستم جبران ساز HTPQCS صورت گرفت.

فصل ۵ :

شبیه سازی و نتایج

۵-۱ مقدمه

در فصل گذشته سیستم جبران ساز HTPQCS ارائه گردید و گفته شد این سیستم جبران کنندگی قادر است ظرفیت نامی RPC را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و در نتیجه هزینه سرمایه‌گذاری اولیه را تقلیل دهد. در این فصل به منظور اثبات مباحث مطرح شده و بررسی صحت و سقم روابط فصل قبل، سیستم پیشنهادی HTPQCS بر روی یک شبکه نمونه مورد آزمایش و شبیه سازی قرار می‌گیرد. برای شبیه سازی سیستم HTPQCS از نرم افزار MATLAB/SIMULINK استفاده شده است.

۵-۲ مدل سازی الکتریکی اجزای سیستم

برای شبیه سازی لازم است ابتدا به مدل سازی الکتریکی اجزای اصلی سیستم شامل بار تراکشن، شبکه قدرت (سراسری)، شبکه تراکشن و سیستم HTPQCS پردازیم.

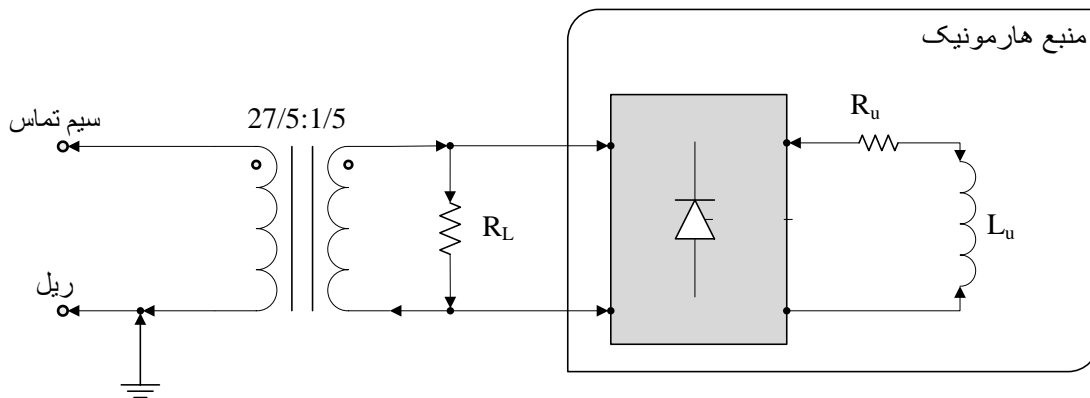
۵-۲-۱ شبکه قدرت و ترانسفورماتور تراکشن

در این پایان نامه برای شبیه سازی سیستم قدرت، از یک منبع سه فاز با سطح ولتاژ ۲۳۰ kV استفاده شده است. با توجه به استاندارد IEC60609 و جدول (۱-۲) مقدار ظرفیت اتصال کوتاه برای این شبکه ۲۰۰۰۰ MVA در نظر گرفته شده است. شبکه قدرت یک پست تراکشن با ترانسفورماتور V-V را تغذیه می‌کند. ترانسفورماتور V-V ولتاژ ۲۳۰ kV را به ولتاژ ۲۷.۵ kV تبدیل می‌کند. نحوه اتصال ثانویه ترانسفورماتور به گونه‌ای است که فاز a به بخش شمالی پست تراکشن، فاز b به بخش جنوبی پست تراکشن و فاز c به ریل و زمین متصل می‌شود.

۵-۲-۲ بار تراکشن

در عمل لکوموتیوهای پر سرعت از مبدل‌های PWM بهره می‌برند و بنابراین ضریب توان نزدیک به واحد دارند و همچنین میزان انتشار هارمونیک‌ها توسط آن‌ها کم است. در این پایان نامه علاوه بر

جبران سازی مؤلفه منفی جریان، عملکرد RPC در جبران سازی مؤلفه‌های هارمونیک و راکتیو بار نیز بررسی می‌شود. مقدار بار موجود در یک طرف پست تراکشن برابر 10 MVA در نظر گرفته می‌شود و مقدار THD آن برابر 14.36٪ و ضریب توان آن برابر 0.98 پس فاز فرض می‌شود. در طرف دیگر بار برابر 5 MVA در نظر گرفته شده و مقدار THD آن 14.30٪ است و ضریب توان آن نیز برابر 0.96 است. مدل بار تراکشن به صورت شکل (1-5) در نظر گرفته می‌شود. مقادیر R_L ، R_u و L_u در جدول (1-5) آورده شده است.



شکل (1-5) مدل الکتریکی بار تراکشن

۲-۲-۵ سیستم HTPQCS

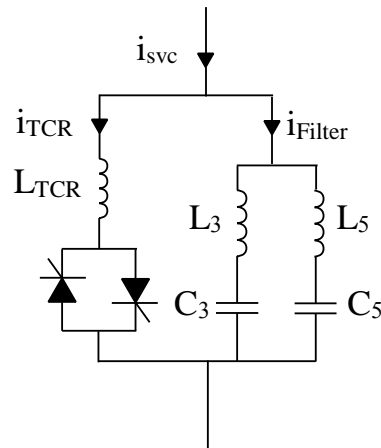
سیستم HTPQCS شامل دو نوع جبران ساز RPC و SVC می‌باشد که در ادامه به مدل سازی هر یک می‌پردازیم.

۱-۳-۲-۵ مدار قدرت SVC

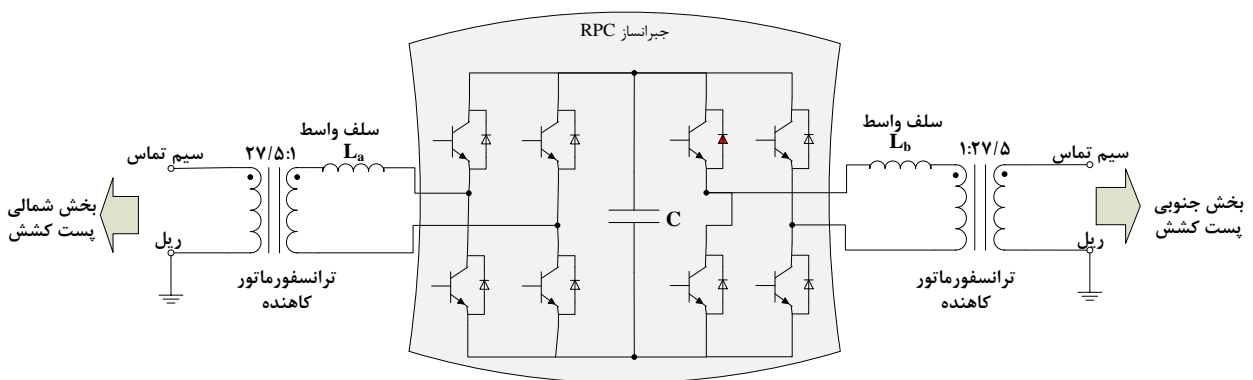
مدل الکتریکی SVC در شکل (2-5) نمایش داده شده است. SVC از نوع TCR-FC می‌باشد که در ساختار آن به جای استفاده از یک خازن تنها، از فیلترهای هارمونیک مرتبه 3 و 5 استفاده شده است تا علاوه بر حذف هارمونیک‌های اساسی، در کاهش ظرفیت RPC مؤثر باشد. در مورد نحوه عملکرد و طراحی SVC در فصل قبل مفصل توضیح داده شد. مقادیر سلف و خازن فیلترها و سلف TCR در جدول (1-5) مشخص شده است.

۲-۳-۲-۵ مدار قدرت RPC

شکل (۳-۵) مدار قدرت RPC را نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است این مدار شامل ترانسفورماتورهای کاهنده، سلف‌های واسط، مبدل‌های تک فاز تمام پل و خازن لینک DC است.



شکل (۲-۵) مدار قدرت SVC نوع TCR-FC



شکل (۳-۵) مدار قدرت RPC

ترانسفورماتورهای کاهنده از نوع تک فاز هستند و ولتاژ ۲۷.۵ kV بین شبکه بالاسری و ریل را به ولتاژ ۱ kV برای اتصال به مبدل‌ها تبدیل می‌کنند. استفاده از این ترانسفورماتورها و کاهش سطح ولتاژ ورودی به مبدل‌ها سبب می‌شود که نیازی به سری کردن کلیدهای نیمه هادی نباشد. سلف‌های واسط بین مبدل‌ها و ترانسفورماتورهای کاهنده قرار می‌گیرند و علاوه بر فیلتر کردن هارمونیک‌های فرکانس بالا ناشی از کلید زنی، نقش مهمی در کنترل $\frac{di}{dt}$ دارند که برای انتخاب کلیدها و همچنین دنبال کردن جریان با پاسخ مناسب اهمیت دارد. مقدار سلف‌های واسط در این پایان‌نامه برابر ۱۵ mH انتخاب شده‌اند.

RPC از دو مبدل تک فاز تشکیل شده است که توسط یک خازن DC به صورت پشت به پشت به هم متصل شده‌اند. خازن لینک DC قلب این انتقال توان است که بین دو مبدل به صورت مشترک قرار گرفته است. اگر ولتاژ لینک DC دچار اغتشاش و نوسانات گردد، عملکرد انتقال توان به صورت کامل تحت تأثیر قرار می‌گیرد. همان طور که در بخش (۴-۳-۲) اشاره شد، برای انتخاب مقدار خازن لینک DC از روابط شرکت ABB استفاده می‌شود. بر اساس این روابط ظرفیت خازن لینک DC باید به صورت $0.037(F) \leq C \leq 0.074(F)$ باشد. در این پایان‌نامه ظرفیت خازن برابر $F = 0.074$ انتخاب شده است.

به صورت کلی پارامترهای شبیه‌سازی را به صورت جدول (۵-۱) می‌توان ارائه داد.

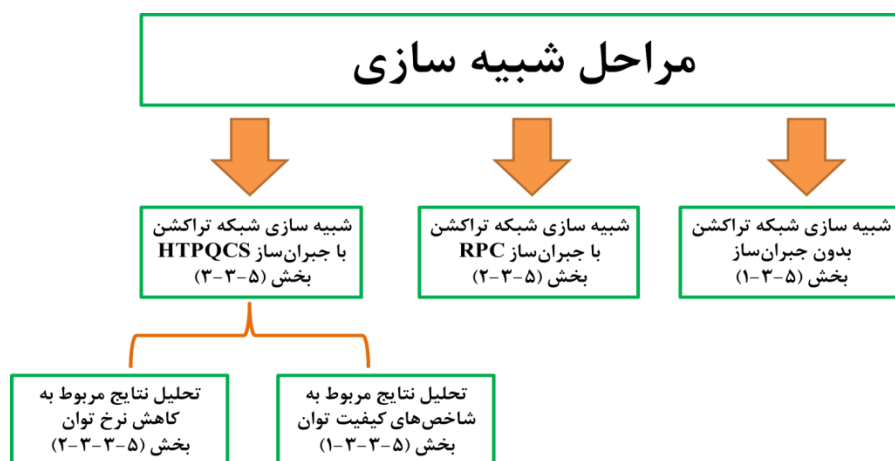
جدول (۵-۱) پارامترهای شبیه‌سازی

ردیف	پارامترهای شبیه‌سازی	واحد	مقدار
۱	ولتاژ شبکه سه فاز	kV	230
۲	ظرفیت اتصال کوتاه شبکه قدرت	MVA	20000
۳	ظرفیت ترانسفورماتور تراکشن	MVA	40
۴	نسبت تبدیل ترانسفورماتور تراکشن	-	230:27.5
۵	امپدانس شبکه تراکشن	Ω	$Z=0.2+j0.005$
۶	نسبت تبدیل ترانسفورماتور کاهنده	-	27.5:1
۷	سلف‌های واسط (L_b و L_a)	mH	0.15
۸	خازن لینک DC	μF	74000
۹	ولتاژ مرجع لینک DC	V	2000
۱۰	ضرایب کنترل کننده PI در RPC	-	$K_P=6$ & $K_I=0.2$
۱۱	پهنای باند هیستریزس	-	0.5
۱۲	بار تراکشن بخش شمالی پست تراکشن	MVA	10
۱۳	بار تراکشن بخش جنوبی پست تراکشن	MVA	5
۱۴	مقدار سلف TCR	H	$L_{TCR} = 0.418$
۱۵	مقادیر فیلتر هارمونیک سوم	H μF	$L_3 = 0.075$ $C_3 = 15$
۱۶	مقادیر فیلتر هارمونیک پنجم	H μF	$L_5 = 0.06$ $C_5 = 7.5$

۵-۳ شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است. شماتیک مداری سیستم HTPQCS در شکل (۴-۹) نشان داده شده است. ترانسفورماتور V-V از دو ترانسفورماتور ۲۰ MVA تک فاز تشکیل شده است که نسبت تبدیل آن ۲۷.۵:۲۳۰ است. بار توسط یک بار خطی به صورت موازی با منبع هارمونیک جریان شبیه‌سازی شده است. پارامترهای مداری جبران ساز پیشنهادی در جدول (۵-۱) نشان داده شده است. شبیه‌سازی در سه بخش مختلف انجام شده است:

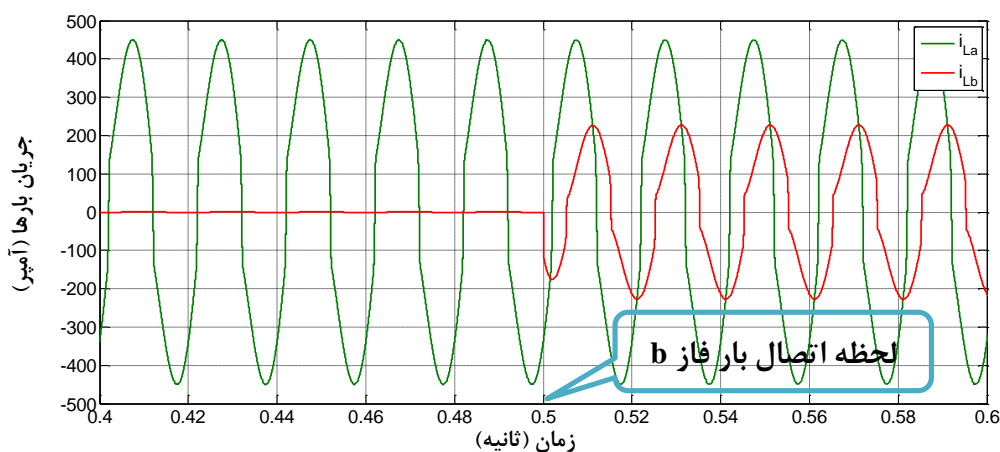
در بخش اول، شبیه‌سازی سیستم تغذیه راه‌آهن بدون دخالت هیچ‌گونه جبران‌سازی انجام شده است تا مسائل و مشکلات کیفیت توان در شبکه تراکشن عیناً رؤیت شود. در بخش دوم، شبکه تراکشن به همراه جبران ساز RPC شبیه‌سازی می‌شود و نتایج مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در بخش سوم، شبکه تراکشن با سیستم جبران‌سازی HTPQCS شبیه‌سازی شده و نتایج آن تحلیل می‌گردد.



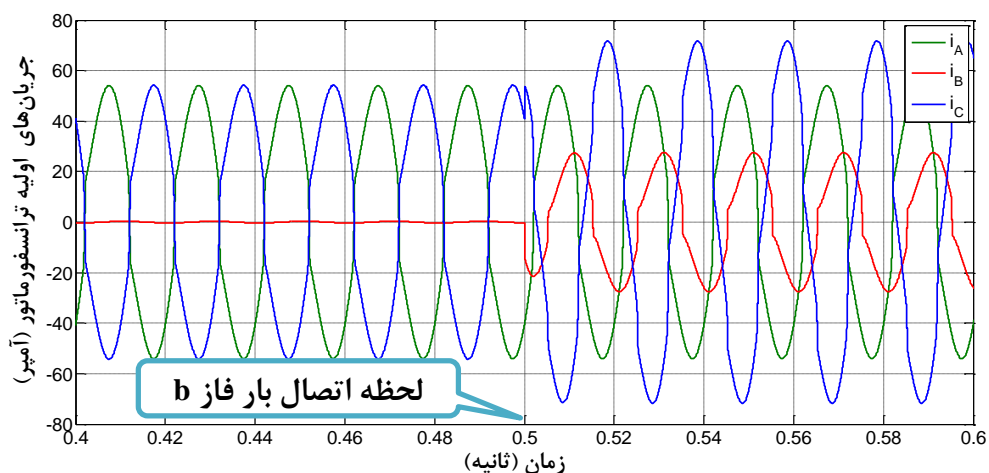
۵-۳-۱ شبیه‌سازی شبکه تراکشن بدون جبران ساز

در این بخش شبکه تراکشن بدون هیچ‌گونه جبران‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا ضریب تعادل را برابر صفر در نظر می‌گیریم یعنی فقط بخش شمالی پست تراکشن (فاز a) دارای بار ۱۰ MVA است. سپس بعد از مدت ۰.۵ ثانیه بخش جنوبی پست تراکشن (فاز b) دارای بار ۵ MVA هم وارد مدار می‌شود و ضریب تعادل برابر ۰.۵ می‌شود. شکل (۴-۵) منحنی جریان بارها در دو طرف پست تراکشن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشخص است جریان‌ها سینوسی کامل نبوده و دارای هارمونیک است، از طرفی دامنه جریان در فاز b نصف a است. در شکل (۵-۵) منحنی

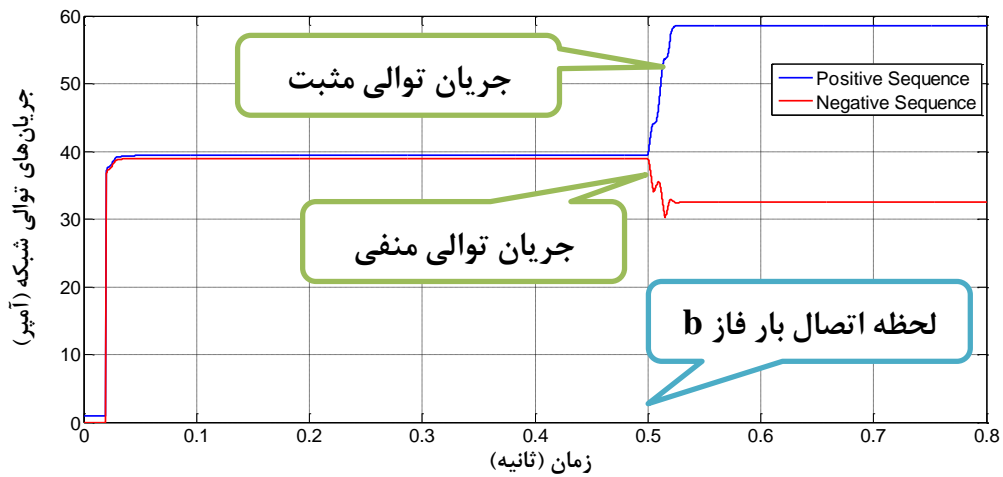
جریان‌های سمت اولیه ترانسفورماتور (شبکه سه فاز) نشان داده شده است. این جریان‌ها نامتعادل بوده و سینوسی کامل نمی‌باشد و دارای هارمونیک است. در شکل (۵-۶) جریان‌های توالی منفی و مثبت در سمت اولیه ترانسفورماتور قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که وقتی ضریب تعادل برابر صفر است جریان فاز C در اولیه ترانسفورماتور تقریباً برابر صفر است و فازهای A و B تقریباً دارای اندازه برابر هستند. در این حالت طبق رابطه (۴-۷) نسبت عدم تعادل جریان (CUR) برابر ۱۰۰ درصد است و زمانیکه ضریب تعادل ۰.۵ می‌شود، شرایط بهتر گشته و CUR تا مقدار ۵۷.۷۳٪ کاهش می‌یابد ولی همچنان این مقدار عدم تعادل برای شبکه غیر قابل قبول می‌باشد و نیازمند یک جبران سازی کامل است.



شکل (۴-۵) منحنی جریان بارها در دو طرف پست تراکشن

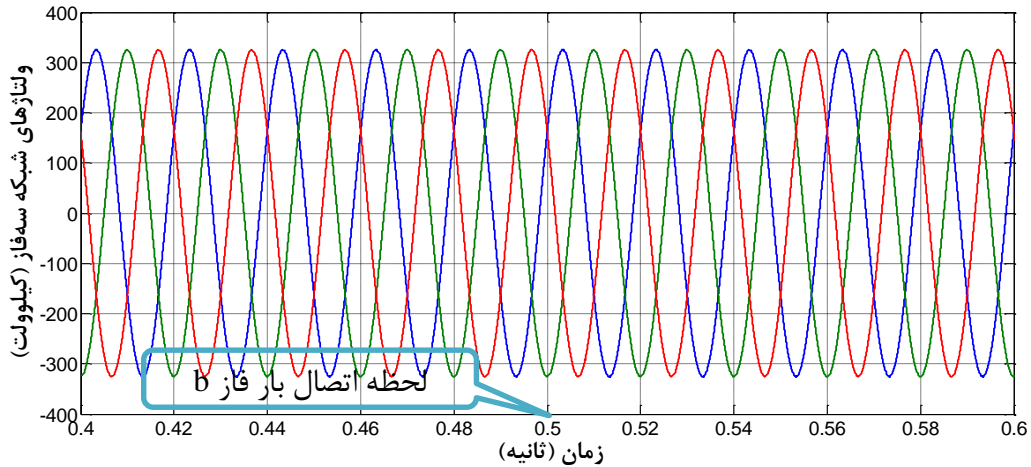


شکل (۵-۵) منحنی جریان‌های سه‌فاز شبکه

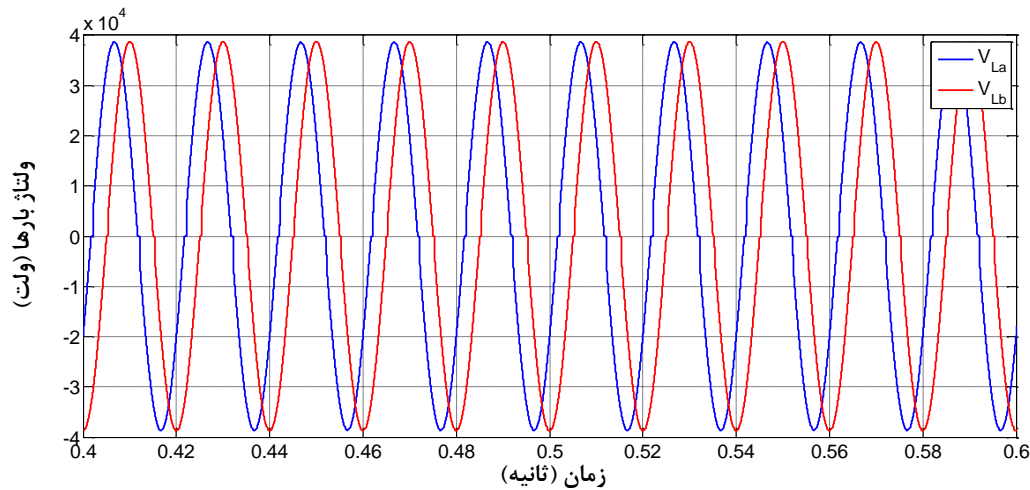


شکل (۵-۶) جریان‌های توالی مثبت و منفی سمت شبکه سه‌فاز

همان طور که در شکل (۵-۷) و شکل (۵-۸) مشخص است در صورتی که ضریب تعادل صفر باشد ولتاژهای اولیه ترانسفورماتور و ثانویه ترانسفورماتور همچنان متعادل هستند. لذا ضریب تعادل بر روی ولتاژهای شبکه تأثیر ندارد. ولتاژهای ثانویه ترانسفورماتور دارای اختلاف فاز ۶۰ درجه است که در روابط فصل گذشته نشان داده شد.

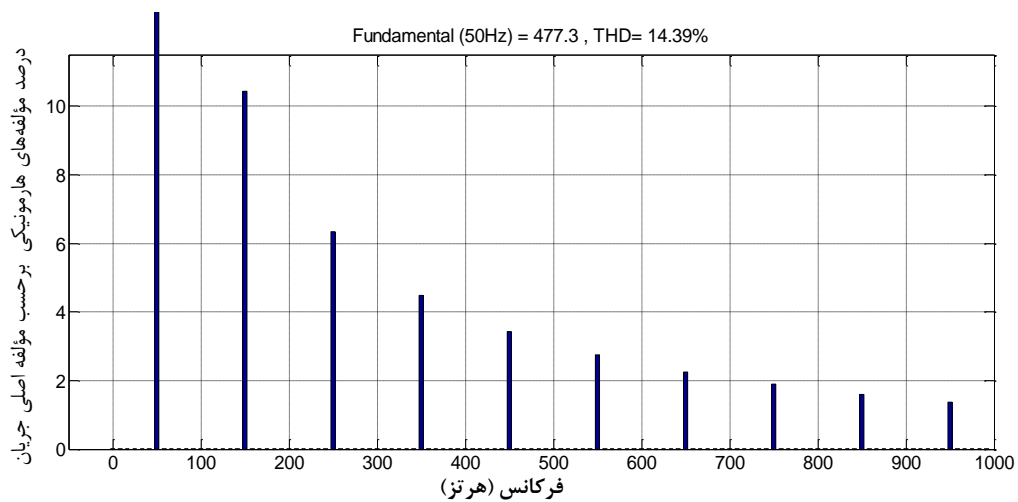


شکل (۵-۷) منحنی ولتاژهای سه‌فاز سمت اولیه ترانسفورماتور V-V

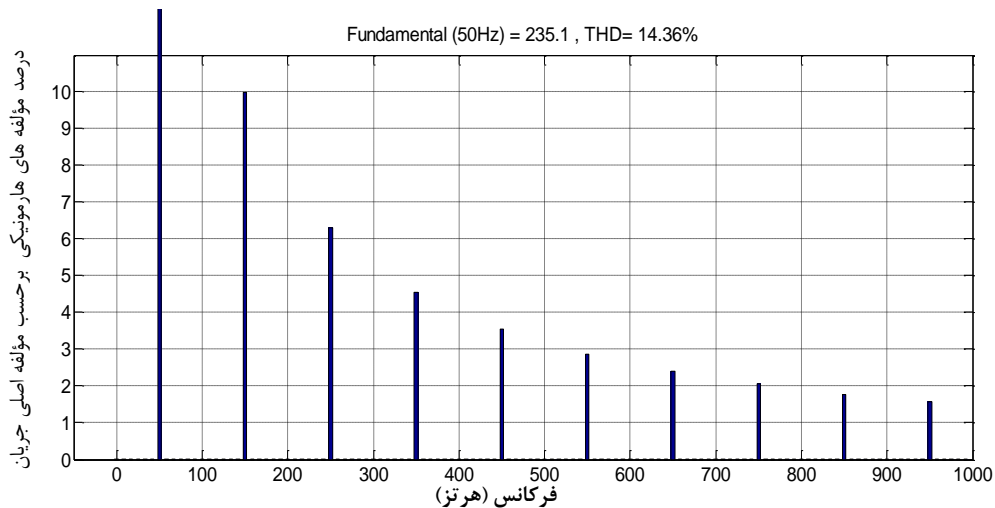


شکل (۸-۵) منحنی ولتاژ بارها سمت ثانویه ترانسفورماتور V-V

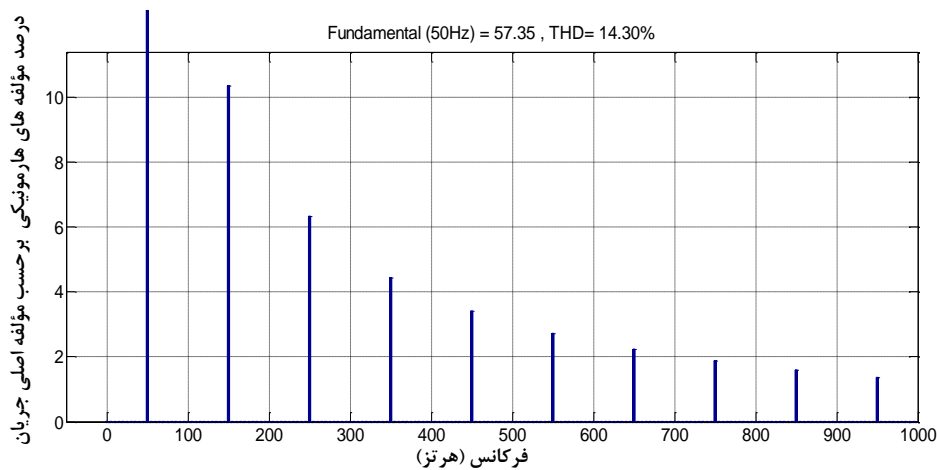
شکل (۹-۵) وضعیت هارمونیک بار بخش شمالی پست و شکل (۱۰-۵) وضعیت هارمونیک بار بخش جنوبی پست را نشان می‌دهد و شکل (۱۱-۵) نشان دهنده وضعیت هارمونیک‌های موجود در سمت شبکه سه فاز بعد از اتصال هردو بار است. مشاهده می‌شود که عمده هارمونیک‌ها مربوط به هارمونیک سوم و پنجم است لذا برای حذف آن‌ها از فیلتر پسیو استفاده شده است که هم کیفیت توان را بهبود می‌دهد و هم ظرفیت RPC را کاهش می‌دهد.



شکل (۹-۵) وضعیت هارمونیک بار بخش شمالی پست تراکشن



شکل (۵-۱۰) وضعیت هارمونیک بار بخش جنوبی پست تراکشن



شکل (۵-۱۱) وضعیت هارمونیک جریان فاز C در سمت شبکه سه فاز بعد از اتصال هر دو بار

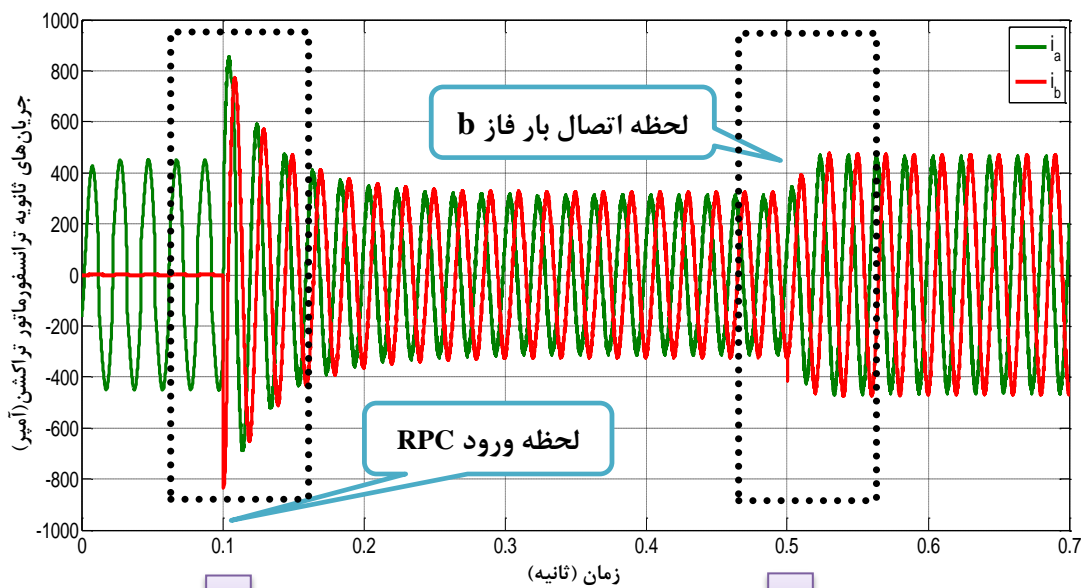
در این بخش یک شبکه تراکشن نوعی شبیه‌سازی شد و مشکلات مربوط به کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن به طور شهودی بررسی گردید. در ادامه به بررسی شبکه تراکشن در حضور جبران ساز RPC پرداخته خواهد شد.

۵-۳-۲ شبیه‌سازی شبکه تراکشن با حضور جبران ساز RPC

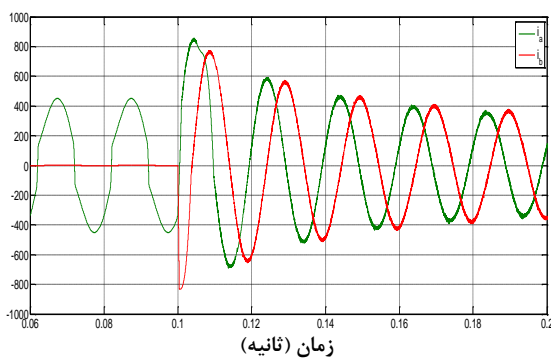
در این مرحله جبران ساز RPC در شبکه نصب شده است و جبران سازی انجام می‌گردد. جریان‌های دو طرف پست تراکشن در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. در این بخش در لحظه $t = 0.1$ ثانیه در حالتی که ضریب تعادل برابر صفر بوده و فقط پست شمالی دارای بار است، RPC وارد مدار

می‌شود و عمل جبران سازی را انجام می‌دهد. در شکل (۵-۱۲) دیده می‌شود که با اتصال جبران ساز RPC به مدار جریان‌های دو طرف پست تراکشن پس از اندک مدتی برابر گشته و باعث متعادل شدن جریان‌ها از دید اولیه ترانسفورماتور پست تراکشن می‌شود. بعلاوه ضریب توان نزدیک واحد گشته و هارمونیک‌های موجود بار را نیز حذف می‌کند.

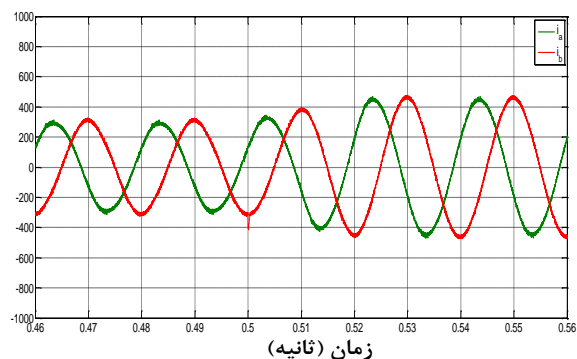
در لحظه $t = 0.5$ ثانیه بار بخش جنوبی پست که مقدار آن ۵ MVA است به مدار اضافه می‌شود، دیده می‌شود که جبران سازی RPC سریعاً واکنش نشان داده و دوباره جریان‌های دو طرف را برابر می‌کند.



(الف)



(ب)



(ج)

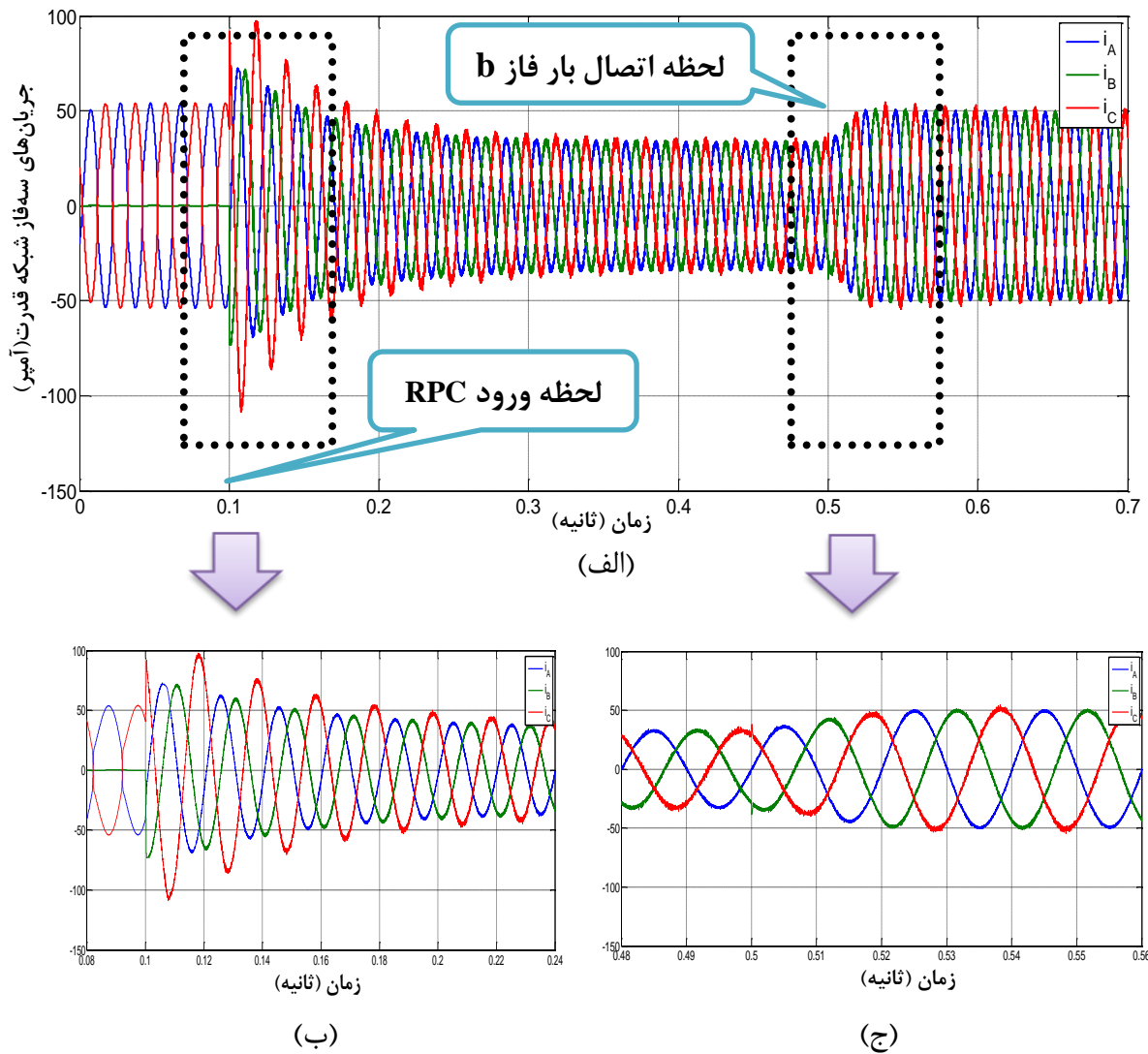
شکل (۵-۱۲) جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور تراکشن

(الف) جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور تراکشن قبل و بعد از وصل RPC و اتصال بارها

(ب) نمای نزدیک جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور وقتی RPC وارد مدار می‌شود

(ج) نمای نزدیک جریان‌های ثانویه ترانسفورماتور وقتی در لحظه ۰.۵ ثانیه ضریب تعادل از صفر به ۰.۵ افزایش می‌یابد

جریان‌های اولیه ترانسفورماتور در شکل (۵-۱۳) نشان داده شده است. دیده می‌شود که با اعمال تغییرات بار، RPC عمل جبران سازی را کاملاً انجام داده و با متعادل سازی توان اکتیو، جبران توان راکتیو و هارمونیک‌های بار، جریان‌های اولیه را کاملاً متعادل می‌کند.



شکل (۵-۱۳) جریان‌های اولیه ترانسفورماتور تراکشن

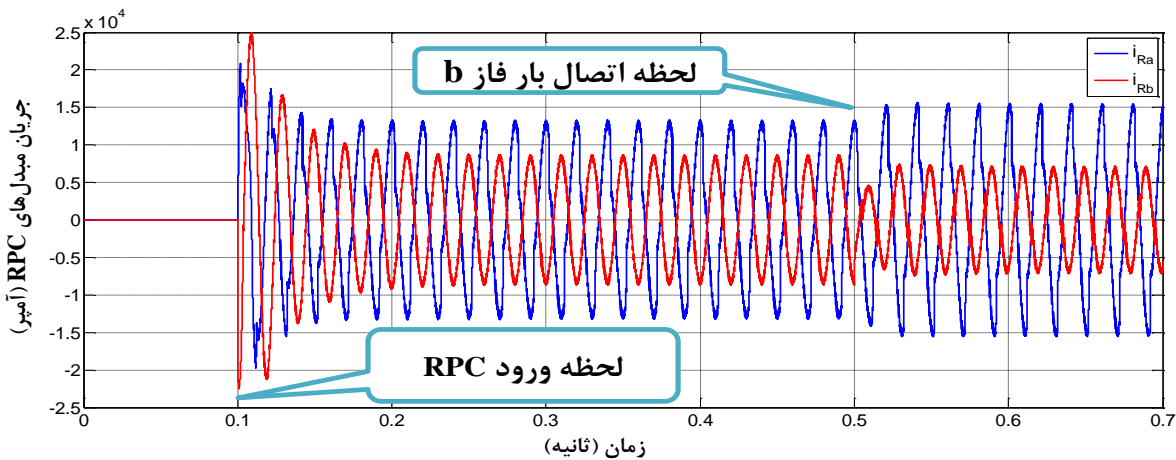
(الف) جریان‌های اولیه ترانسفورماتور تراکشن قبل و بعد از ورود RPC و اتصال بار فاز b

(ب) نمای نزدیک جریان‌های اولیه ترانسفورماتور وقتی RPC وارد مدار می‌شود

(ج) نمای نزدیک جریان‌های اولیه ترانسفورماتور وقتی در لحظه ۰.۵ ثانیه ضریب تعادل از صفر به ۰.۵ افزایش می‌یابد

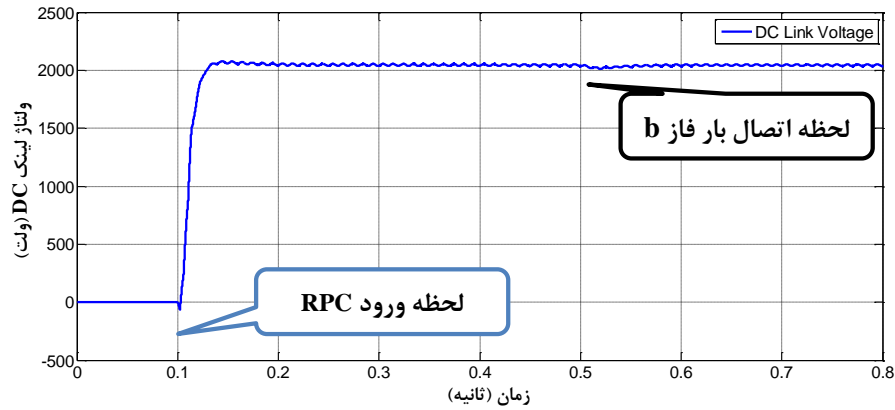
شکل (۵-۱۴) نشان دهنده جریان‌های جبران سازی تولید شده توسط مبدل‌های فاز a و فاز b جبران ساز RPC می‌باشد. همان طور که در شکل مشخص است مبدل فاز a دارای جریان بیشتری نسبت به مبدل فاز b می‌باشد. لازم به ذکر است که توان اکتیو عبوری از دو مبدل یکسان است و این اختلاف

جریان ناشی از توان راکتیو هر بخش می‌باشد. همان طور که در فصل گذشته با روابط ریاضی و دیاگرام فازوری نشان داده شد، توان راکتیو مصرفی بخش جنوبی پست پس فاز است و در نتیجه توان راکتیو تولیدی مبدل مربوط به آن پیش فاز می‌باشد (توجه شود این توان راکتیو ناشی از عدم تعادل فازها در دو بخش جنوبی و شمالی پست می‌باشد و منظور توان راکتیو مصرفی بار نیست) و از سوی دیگر توان راکتیو مصرفی بخش جنوبی پست، پیش فاز و در نتیجه توان راکتیو تولیدی مبدل مربوط به آن پس فاز است. اگرچه اندازه توان راکتیو مصرفی هر دو طرف پست یکسان است اما آنچه که در توان راکتیو تولید شده توسط مبدل‌ها تأثیرگذار است توان راکتیو مربوط به بارها می‌باشد. برای بخش شمالی پست توان راکتیو مصرفی بار، پس فاز و توان راکتیو مصرفی ناشی از عدم تعادل فازها نیز پس فاز بوده و اثر یکدیگر را تقویت می‌کنند. برای بخش جنوبی پست توان راکتیو مصرفی بار، پس فاز و توان راکتیو ناشی از عدم تعادل فازها، پیش فاز بوده و اثر یکدیگر را تقلیل می‌دهند. عامل دیگر در نا برابر بودن جریان‌های جبران سازی، وجود هارمونیک‌های غیر یکسان در دو طرف پست می‌باشد. اندازه مؤلفه‌های هارمونیک‌های جبران به اندازه مؤلفه اصلی جریان و منبع هارمونیک بار بستگی دارد.



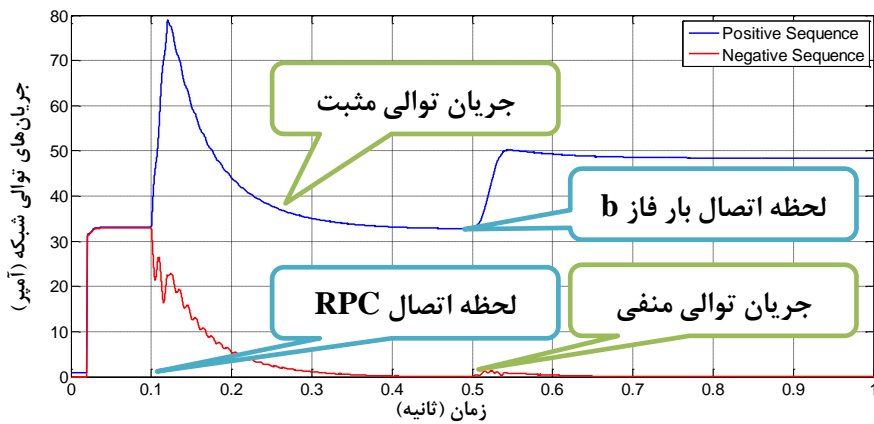
شکل (۵-۱۴) جریان‌های جبران سازی برای مبدل‌های فاز a و b

در شکل (۵-۱۵) ولتاژ لینک DC جبران ساز RPC نمایش داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود، لینک DC مقدار مرجع را به خوبی دنبال می‌کند و این نشان از عملکرد صحیح سیستم کنترل کننده ولتاژ لینک DC دارد.



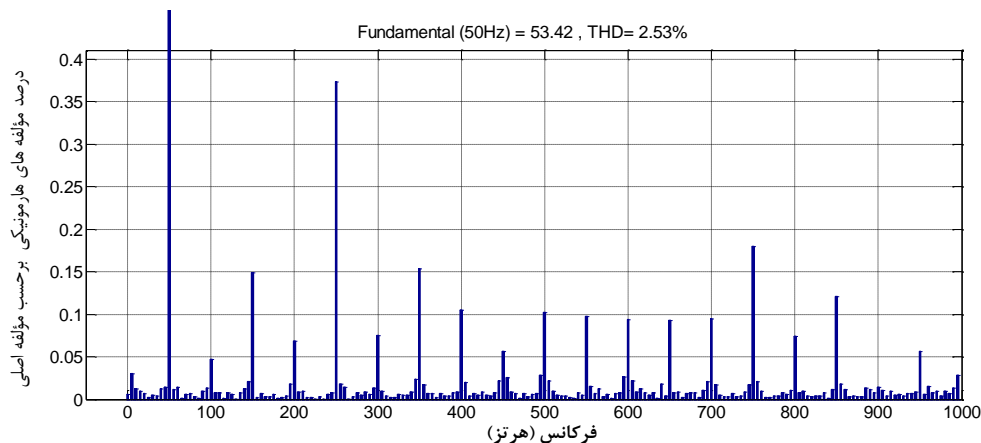
شکل (۵-۱۵) ولتاژ لینک DC جبران ساز RPC

شکل (۵-۱۶) جریان‌های توالی مثبت و منفی را در سمت شبکه سه فاز، قبل و بعد از اتصال RPC و ورود بار به بخش جنوبی پست نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود RPC عملکرد خوبی در کاهش جریان توالی منفی از خود نشان می‌دهد و مؤلفه منفی جریان را به مقدار صفر کاهش می‌دهد.



شکل (۵-۱۶) جریان‌های توالی مثبت و منفی سمت شبکه سه فاز قبل و بعد از جبران سازی

شکل (۵-۱۷) وضعیت هارمونیک‌ها در سمت اولیه ترانسفورماتور برای فاز A را پس از اتصال RPC به شبکه و در حضور هر دو بار نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است THD از مقدار ۱۴.۳٪ به مقدار ۲.۵۳٪ کاهش یافته و این نشان دهنده عملکرد خوب RPC در حذف هارمونیک‌ها می‌باشد.



شکل (۵-۱۷) هارمونیک‌های سمت اولیه ترانسفورماتور بعد از وصل RPC و در حضور هر دو بار

در این بخش شبیه سازی شبکه تراکشن در حضور جبران ساز RPC مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که جبران ساز RPC توانایی و عملکرد مناسبی در جهت بهبود شاخص‌های کیفیت توان شبکه قدرت از خود نشان می‌دهد. در بخش بعدی جبران ساز RPC را در حضور جبران کننده SVC، شبیه سازی خواهیم نمود.

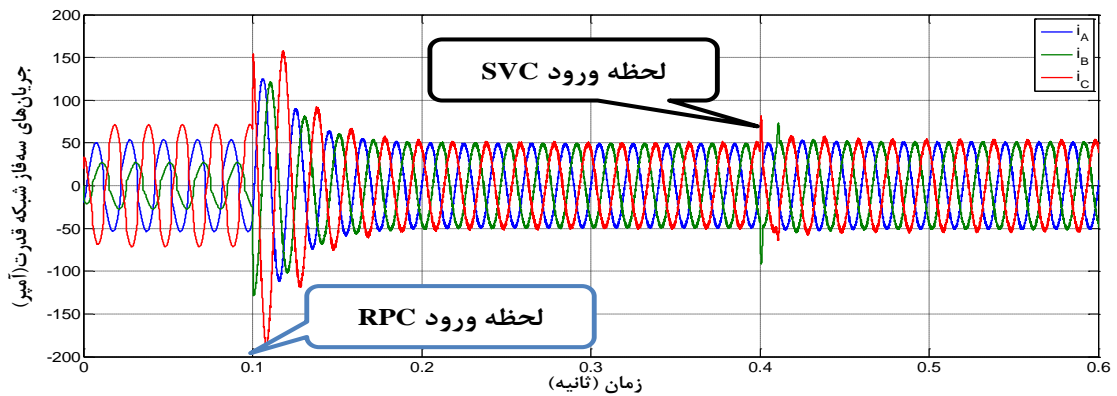
۳-۳-۵ شبیه‌سازی شبکه تراکشن با سیستم جبران ساز HTPQCS

در این بخش برای جبران سازی شبکه تراکشن از سیستم جبران ساز هیبریدی پیشنهادی HTPQCS برای بهبود شاخص‌های کیفیت توان و کاهش نرخ توان انتقالی از RPC استفاده گردیده است. در این بخش فرض می‌کنیم ضریب تعادل از ابتدای شبیه‌سازی برابر ۰.۵ می‌باشد یعنی بارها در دو طرف پست، از ابتدای شبیه‌سازی متصل هستند. در لحظه $t = ۰.۱$ ثانیه جبران ساز RPC وارد مدار می‌شود و بعد از گذشت ۰.۳ ثانیه، در لحظه $t = ۰.۴$ ثانیه جبران ساز SVC هم وارد مدار می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای بررسی وضعیت کیفیت توان در شبکه و همچنین کاهش نرخ انتقال توان در RPC در دو بخش زیر تحلیل خواهد شد.

۱-۳-۳-۵ تحلیل نتایج مربوط به شاخص‌های کیفیت توان

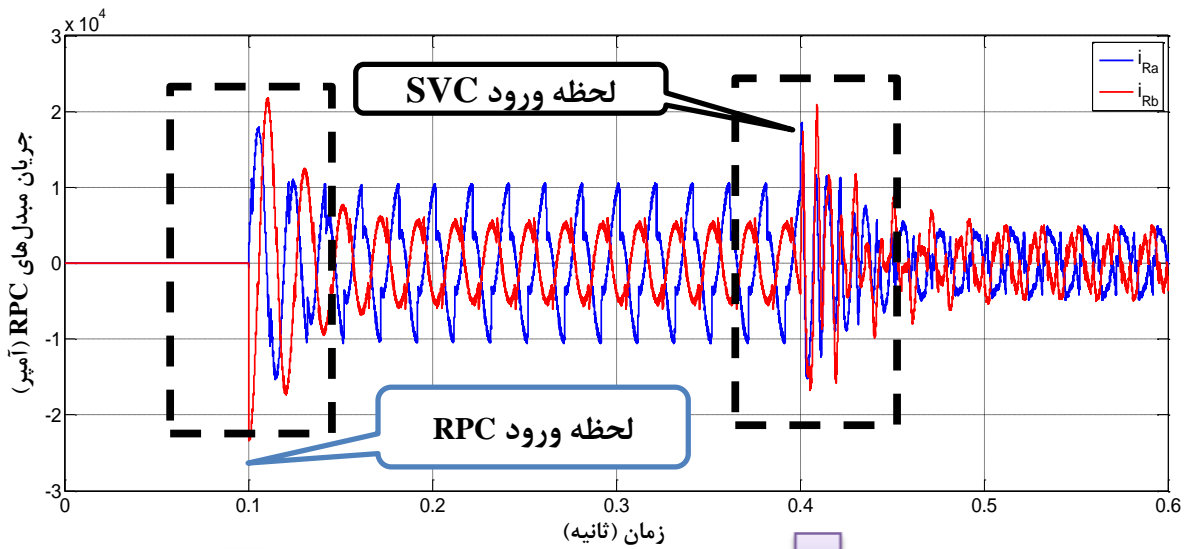
نتایج شبیه سازی در این بخش مربوط به بررسی مسائل کیفیت توان در شبکه تراکشن است. به عبارت دیگر می‌خواهیم عملکرد سیستم جبران ساز پیشنهادی HTPQCS را در بهبود شاخص‌های

کیفیت توان بررسی نماییم. جریان‌های سمت اولیه ترانسفورماتور در شکل (۵-۱۸) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که جریان‌ها متعادل بوده و نسبت به هم دارای اختلاف فاز ۱۲۰ درجه‌ای هستند. همچنین از لحاظ دینامیکی جبران ساز HTPQCS دارای وضعیت مطلوبی بوده و با ورود جبران ساز SVC جریان‌ها سریعاً متعادل شده و دامنه جریان‌ها برابر می‌شوند و شبکه متعادل می‌گردد.

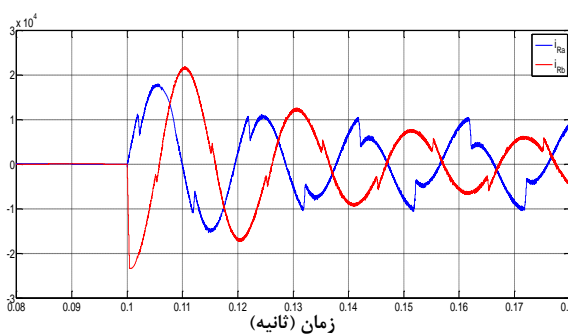


شکل (۵-۱۸) جریان‌های سمت اولیه ترانسفورماتور در حضور جبران ساز HTPQCS

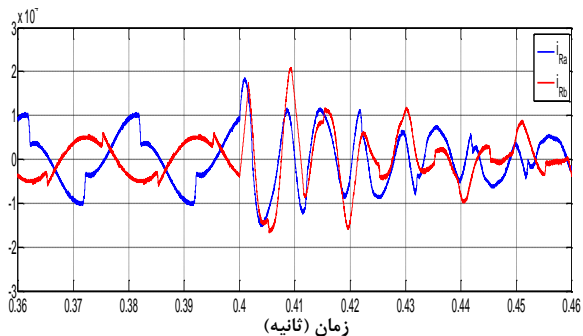
جریان‌های جبران سازی انتقالی از مبدل‌های فاز a و b مربوط به جبران ساز RPC در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

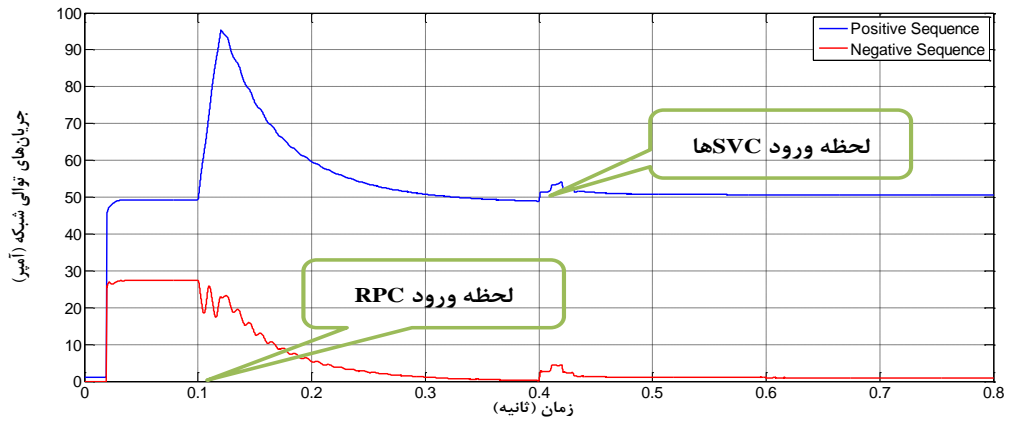
شکل (۵-۱۹) جریان مبدل‌های سیستم جریان ساز RPC

(الف) جریان مبدل‌های فاز a و b جریان ساز RPC قبل و بعد از ورود SVC

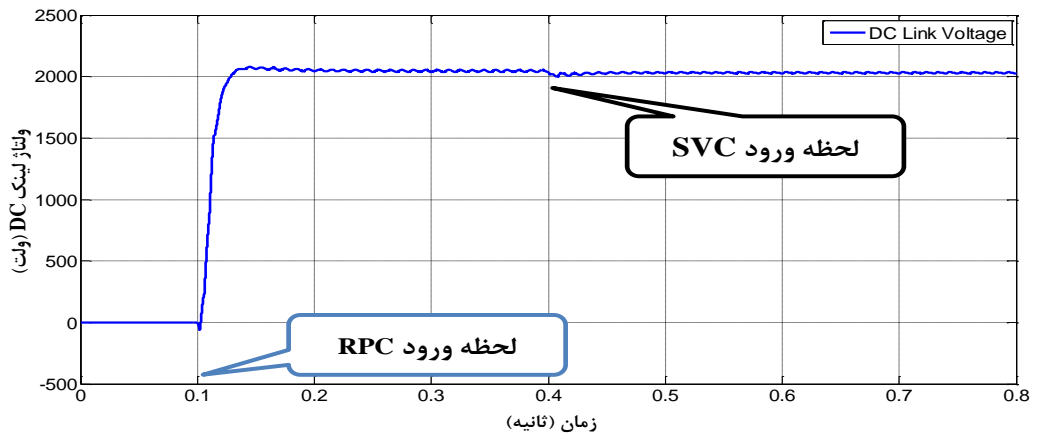
(ب) نمای نزدیک جریان مبدل‌های RPC در لحظه اتصال به شبکه

(ج) نمای نزدیک جریان مبدل‌های RPC در لحظه اتصال SVC

شکل (۵-۲۰) جریان‌های توالی منفی و مثبت در سمت شبکه سه فاز را قبل و بعد از ورود جبران سازهای RPC و SVC نمایش می‌دهد. شکل (۵-۲۱) ولتاژ لینک DC جبران ساز RPC را در سیستم HTPQCS قبل و بعد از اتصال جبران سازهای RPC و SVC به شبکه تراکشن نشان می‌دهد.

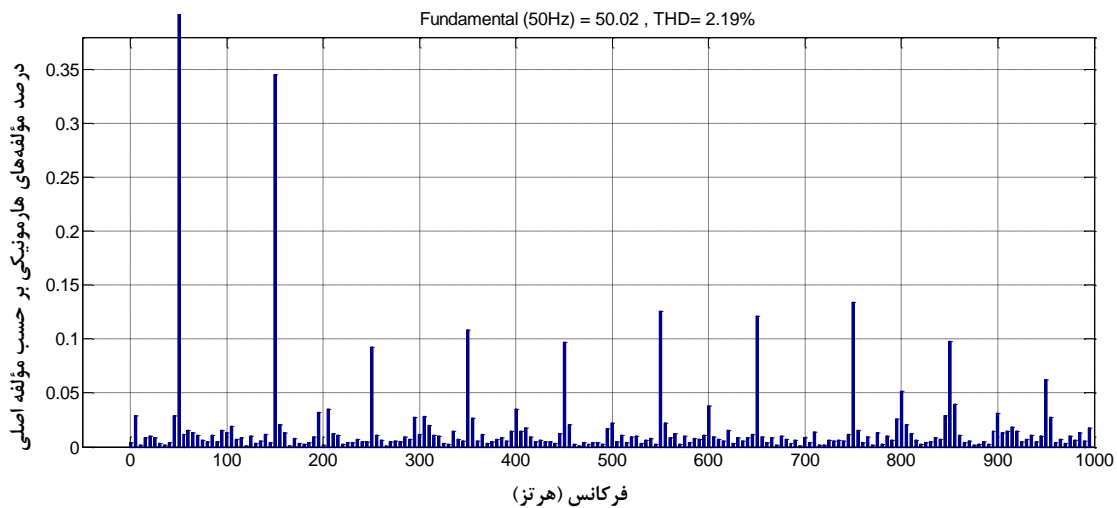


شکل (۲۰-۵) جریان‌های توالی منفی و مثبت قبل و بعد از ورود RPC و SVC



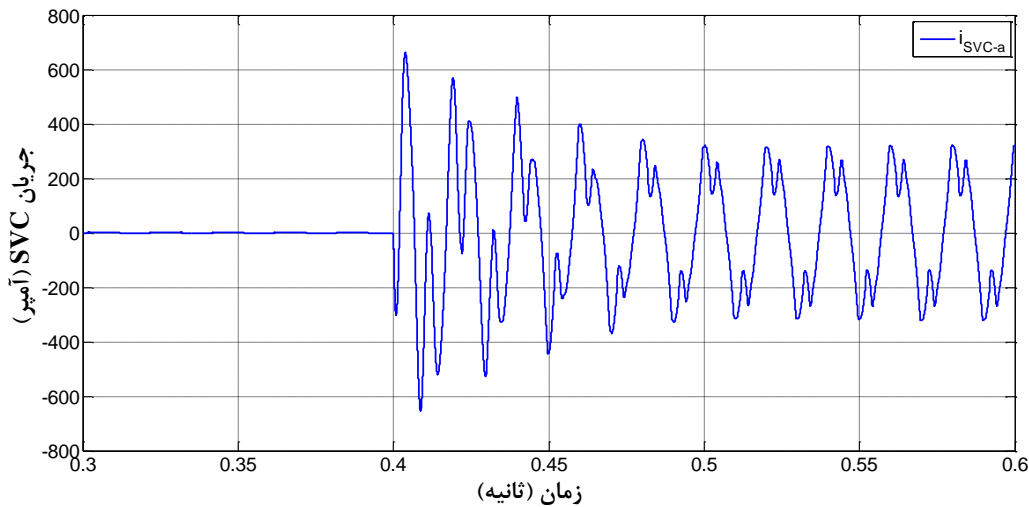
شکل (۲۱-۵) ولتاژ لینک DC جریان ساز RPC در سیستم HTPQCS

شکل (۲۲-۵) وضعیت هارمونیک‌های فاز A را در سمت اولیه ترانسفورماتور بعد از اتصال RPC و SVC نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود میزان THD هارمونیک‌ها نسبت به RPC اندکی بهبود یافته است.



شکل (۲۲-۵) وضعیت هارمونیک‌ها در سمت اولیه ترانسفورماتور برای فاز A

در شکل (۲۳-۵) جریان‌های جبران سازی تولید شده در SVC موجود در بخش شمالی پست را نمایش می‌دهد.

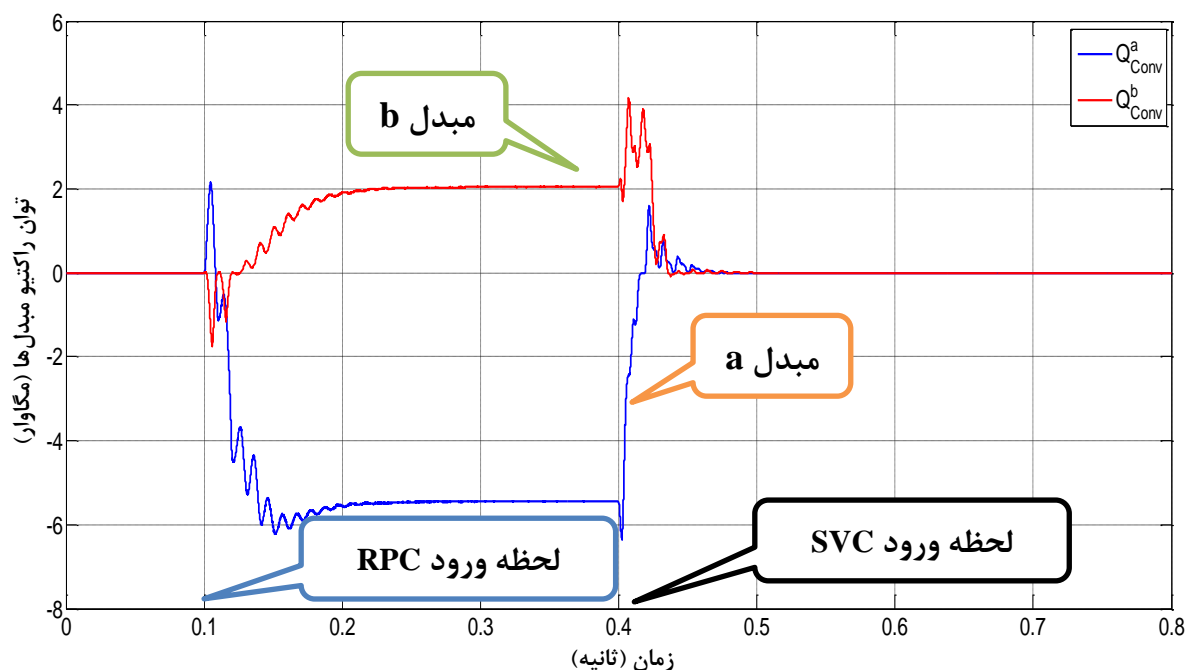


شکل (۲۳-۵) جریان جبران ساز SVC مربوط به بخش شمالی

۲-۳-۳-۵ تحلیل نتایج مربوط به کاهش نرخ توان RPC

شکل (۲۴-۵) و شکل (۲۵-۵) وضعیت توان‌های راکتیو و توان‌های ظاهری انتقالی از مبدل‌های a و b را نمایش می‌دهد. در شکل (۲۴-۵) قبل از ورود RPC هیچ توان راکتیوی از مبدل‌ها منتقل نمی‌شود. پس از اتصال RPC به مدار در لحظه $t = 0.1$ ثانیه مبدل بخش شمالی توان راکتیو تولید می‌کند که شامل توان راکتیو ناشی از عدم تعادل فازها و توان راکتیو مصرفی بار می‌باشد. هر دوی این توان‌ها

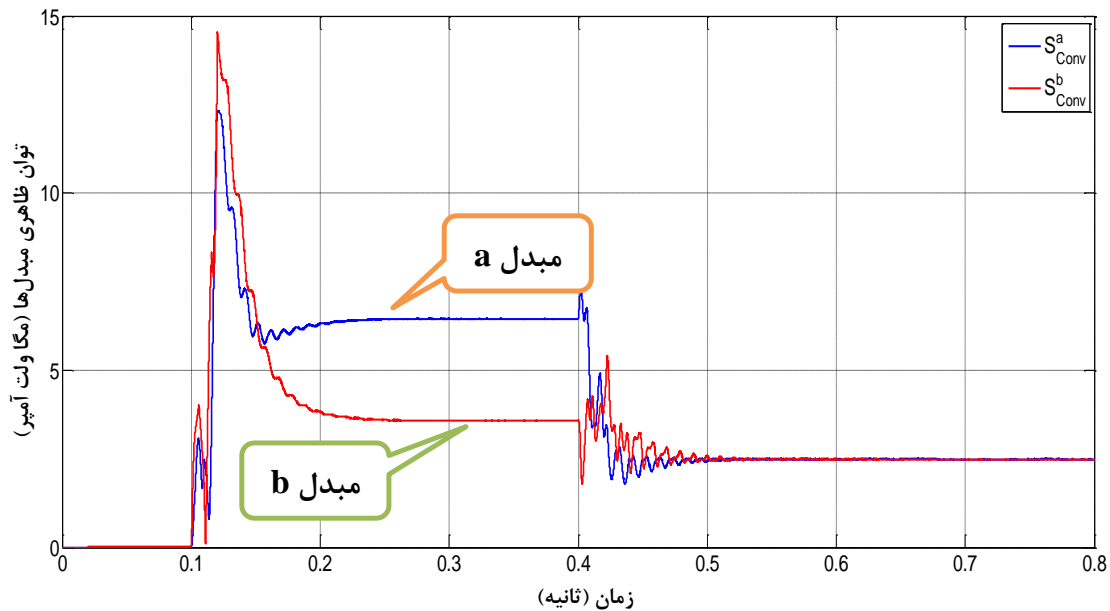
خازنی هستند. بخش جنوبی پست نیز دارای وضعیت مشابهی است و توان راکتیو تزریقی منجر به تعادل فاز جریان و جبران توان مورد نیاز بار می‌شود با این تفاوت که جریان تزریقی برای برقراری تعادل فاز، پس فاز (سلفی) است و جریان مورد نیاز برای جبران توان راکتیو بار پیش فاز (خازنی) است. لذا این دو جریان از هم کم می‌شوند ولی در کل توان راکتیو پس فاز تولیدی برای جبران عدم تعادل جریان دارای دامنه بیشتری نسبت به توان راکتیو پیش فاز تولیدی برای جبران توان راکتیو بار بوده و در مجموع جریان تولیدی مبدل فاز b پس فاز شده و نسبت به توان راکتیو تولیدی مبدل فاز a دارای دامنه کمتری خواهد بود.



شکل (۵-۲۴) توان راکتیو انتقالی از مبدل‌های RPC قبل و بعد از اتصال SVC

همان طور که در شکل (۵-۲۴) مشخص است، SVC به خوبی توانسته است تمام توان راکتیو سیستم را جبران نماید و این نشان از عملکرد صحیح سیستم کنترل کننده SVC در تولید جریان مرجع دارد. در شکل (۵-۲۵) توان ظاهری مبدل‌های RPC نشان داده شده است. با جبران توان راکتیو سیستم توسط TCR و حذف هارمونیک‌های سوم و پنجم توسط فیلترهای پسیو، ظرفیت مبدل‌های RPC کاهش یافته است. نکته‌ای که باید به آن توجه شود این است که در عمل با توجه به اینکه جبران سازه‌های RPC به صورت یکپارچه عرضه می‌شوند، بنابراین هر دو مبدل باید دارای ظرفیت یکسانی باشند که این مسئله منجر به تحمیل هزینه اضافی بر سیستم می‌شود و مبدل با نرخ توانی بیشتر تعیین کننده ظرفیت هر یک از مبدل‌ها خواهد بود. در این ساختار مبدل موجود در بخش شمالی

پست یعنی مبدل فاز a، دارای ظرفیت بیشتری می‌باشد و بنابراین تعیین کننده خواهد بود. با بکارگیری جبران سازهای SVC و جبران توان راکتیو سیستم توسط این جبران سازها، ظرفیت مبدل‌ها کاهش یافته و تقریباً با یکدیگر برابر می‌شوند.



شکل (۵-۲۵) توان ظاهری انتقالی از مبدل‌های RPC قبل و بعد از اتصال SVC

جدول (۵-۲) مقایسه‌ای بین وضعیت شاخص‌های کیفیت توان در شبکه قدرت در سه حالت؛ بدون جبران ساز، با جبران ساز RPC و با جبران ساز HTPQCS انجام گرفته است.

جدول (۵-۲) خلاصه عملکرد شبکه تراکشن بدون جبران ساز و در حضور جبران سازهای RPC و HTPQCS

جریان‌های سه فاز اولیه

$$K = 0.5$$

با سیستم HTPQCS			با جبران ساز RPC			بدون جبران سازی			
A	B	C	A	B	C	A	B	C	
۳۸.۱۱	۳۷.۶۱	۳۸.۱۱	۳۷.۲۶	۳۷.۶۱	۳۷.۶۱	۳۹.۹۵	۲۰.۹۴	۵۴.۸	مقدار مؤثر جریان، A
۲.۵	۲.۵	۳.۵	۲.۹	۲.۶	۴.۱	۱۳.۳	۹.۴	۱۳.۲	THD جریان، %
۱	۱	۱	۱	۱	۰.۹۹	۰.۷۸	۰.۹۵	۰.۹۹	ضریب توان
	۰			۰			۵۵.۷۵		نسبت عدم تعادل جریان (CUR)، %

۵-۴ جمع بندی

در این فصل ابتدا شبکه تراکشن بدون حضور جبران کننده‌ها شبیه سازی شد و مشکلات مربوط به کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن دیده شد و سپس عملکرد RPC در بهبود شاخص‌های کیفیت توان به کمک شبیه سازی مورد ارزیابی قرار گرفت. مشاهده شد که RPC به خوبی قادر است هر سه شاخص کیفیت توان شبکه قدرت یعنی مؤلفه توالی منفی جریان، مؤلفه‌های هارمونیکی و توان راکتیو شبکه قدرت را به خوبی جبران کند و مقدار آن‌ها را در محدوده استاندارد قرار دهد ولی مشکلی که وجود دارد این است که RPC دارای ظرفیت جبران سازی بالایی خواهد بود که منجر به افزایش هزینه شده و صرفه اقتصادی ندارد. بدین جهت جبران ساز هیبریدی HTPQCS پیشنهاد شد و مورد شبیه سازی قرار گرفت. مدل پیشنهادی منجر به کاهش ظرفیت RPC شده و همچنین شاخص‌های کیفیت توان در سمت اولیه ترانسفورماتور را نیز بهبود داد.

فصل ۶ :

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه به بررسی مسائل و مشکلات کیفیت توان و بهبود آن در شبکه‌های تغذیه پست‌های تراکشن پرداخته شد. با توجه به اینکه شبکه‌های تراکشن معمولاً به طور مستقیم به شبکه تغذیه سراسری متصل می‌شوند، در نتیجه سطح کیفیت توان در آن‌ها بسیار حائز اهمیت می‌باشد. لذا در ابتدا به بررسی مشکلات کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن پرداخته شد. مهم‌ترین این مشکلات عبارت بودند از: تزریق جریان توالی منفی ناشی از تک فاز بودن بار تراکشن، توان راکتیو به علت استفاده گسترده از موتورهای القایی در لکوموتیو و در نتیجه ضریب قدرت پایین شبکه و نهایتاً محتوای بالای هارمونیکی جریان شبکه به دلیل وجود ادوات غیرخطی در لکوموتیوها. در ادامه انواع راهکارها و روش‌های موجود در زمینه بهبود کیفیت توان در شبکه‌های تراکشن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و این راهکارها در دو دسته کلی شامل روش‌های استاتیکی و دینامیکی تقسیم بندی گردید. روش‌های استاتیک با توجه به اسم آن به روش‌هایی اطلاق می‌شود که قابلیت جبران سازی به صورت دینامیکی و یا لحظه به لحظه را ندارند و همچنین داری جبران سازی نسبی می‌باشند. به دنبال رفع مشکلات جبران سازه‌های استاتیکی، جبران سازه‌های دینامیکی شامل SVCها، فیلترهای اکتیو، یکسو سازه‌های PWM معرفی شدند که قادر به پاسخگویی لحظه‌ای تغییرات بار می‌باشند. مشکل این نوع جبران سازه‌ها عدم توانایی در جبران همزمان هر سه مشکل کیفیت توان می‌باشد. لذا به دنبال بررسی یک جبران ساز جامع و ایده‌آل، جبران سازه‌های جامع کیفیت توان ریلی معرفی شدند که اصلی‌ترین آن‌ها بهبود دهنده توان ریلی (RPC) بود. اما با توجه به اینکه این جبران سازه‌ها هر سه مشکل کیفیت توان را همزمان بهبود می‌دهند و از طرفی بارهای تراکشن، بارهای سنگینی برای شبکه تلقی می‌شوند؛ لذا این جبران سازه‌ها دارای ظرفیت بسیار بالایی هستند و در نتیجه نیاز به یک جبران ساز کمکی در کنار آن‌ها احساس می‌شود. در این پایان‌نامه، به منظور کاهش ظرفیت RPC، سیستم جبران کنندگی هیبریدی HTPQCS معرفی گردید. در سیستم HTPQCS با بکارگیری جبران کننده توان راکتیو استاتیکی (SVC) به عنوان جبران کننده کمکی و جبران سازی بخشی از توان مورد نیاز سیستم که در اینجا همان توان راکتیو است، به جبران کننده RPC در جبران سازی کمک نموده و ظرفیت این جبران کننده را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه SVC دارای قیمت کمتری نسبت به RPC به ازای هر مگا ولت‌آمپر است، بنابراین سیستم HTPQCS قادر است با کاهش ظرفیت RPC، قیمت آن را کاهش داده و در میزان سرمایه گذاری اولیه نصب سیستم تغذیه

الکتریکی راه‌آهن برقی پر سرعت صرفه جویی نماید. در نهایت به منظور بررسی عملکرد سیستم HTPQCS و صحت گذاری بر روابط ریاضی و سیستم کنترلی، شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه با کمک نرم افزار MATLAB/SIMULINK انجام گردید و مشاهده شد که این سیستم عملکرد مناسبی در بهبود شاخص‌های کیفیت توان در سمت شبکه سراسری و همچنین کاهش نرخ توان انتقالی از RPC دارد.

۶-۲ پیشنهادات

در این پایان‌نامه برای ادامه پژوهش در آینده موارد زیر پیشنهاد می‌شود.

- بهبود کیفیت توان شبکه تراکشن به وسیله RPC با در نظر گرفتن انرژی برگشتی قطار
- کاهش ظرفیت RPC با بکارگیری دیگر انواع جبران سازه‌های دینامیکی همچون فیلترهای اکتیو برای حذف هارمونیک‌ها و TSC برای جبران توان راکتیو
- جایابی بهینه RPC در شبکه تراکشن با رویکرد اقتصادی
- استفاده از مبدل‌های چند سطحی با هدف کاهش فرکانس کلید زنی
- بکارگیری مبدل‌های نیم‌پل و ارائه راهکارهایی برای رفع مشکلات موجود در این ساختار شامل کاهش استرس ولتاژ بر روی سوئیچ‌ها و کاهش هارمونیک‌های ناشی از کلید زنی با بکارگیری مبدل‌های منبع امپدانس

منابع و مراجع

- [¹] S. M. M. Gazafrudi, A. T. Langerudy, E. F. Fuchs, and K. Al-Haddad, "Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 3081-3090, 2015.
- [²] B. Bhargava, "Railway electrification systems and configurations," in *Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE*, 1999, pp. 445-450.
- [³] METROLINX, "Power Supply and Distribution Systems Technology Assessment For Metrolinx Go System Electrification," *Electrification Study, Systems Technology Assessment*, September 8, 2010.
- [⁴] E. Pilo De La Fuente, L. Rouco Rodríguez, and A. Fernández Cardador, "A reduced representation of 2*25 kV electrical systems for high-speed railways," 2003.
- [⁵] Y. Oura, Y. Mochinaga, and H. Nagasawa, "Railway electric power feeding systems," *Japan Railway & Transport Review*, vol. 16, pp. 48-58, 1998.
- [⁶] "Power Supply And Overhead Catenary System," ed. Kerala High Speed Rail between Thiruvananthapuram and Ernakulam - Pre Feasibility Report: Delhi Metro Rail Corporation LTD, Sept 2011.
- [⁷] Z. Shu, S. Xie, K. Lu, Y. Zhao, X. Nan, D. Qiu, *et al.*, "Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60 ,pp. 1831-1839, 2013.
- [⁸] S. Senini and P. J. Wolfs, "Hybrid active filter for harmonically unbalanced three phase three wire railway traction loads," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, pp. 702-710, 2000.
- [⁹] A. Ghassemi, S. S. Fazel, I. Maghsoud, and S. Farshad, "Comprehensive study on the power rating of a railway power conditioner using thyristor switched capacitor," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 4, pp. 97-106, 2014.
- [¹⁰] R. E. Morrison, "Power quality issues on AC traction systems," in *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, 2000, pp. 709-714 vol.2.
- [¹¹] C. Bin-Kwie and G. Bing-Song, "Three phase models of specially connected transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 323-330, 1996.
- [¹²] I. G. Sîrbu, P. M. Nicolae, and R. Bojoi, "Solution for the power quality improvement in a transportation system," in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC , 2010 , 2010*, pp. 32-37.
- [¹³] T. Pee-Chin, R. E. Morrison, and D. G. Holmes, "Voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kV electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, pp. 575-581, 2003.
- [¹⁴] M. Jianzong, W. Mingli, and Y. Shaobing, "The application of SVC for the power quality control of electric railways," in *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009, pp. 1-4.
- [¹⁵] T. Pee-Chin, L. Poh Chiang, and D. G. Holmes, "A robust multilevel hybrid compensation system for 25-kV electrified railway applications," *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1043-1052, 2004.
- [16] H. Morimoto, M. Ando, Y. Mochinaga, T. Kato, J. Yoshizawa, T. Gomi, *et al.*, "Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen," in *Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579)*, 2002, pp. 1108-1111.
- [17] A. Luo, C. Wu, J. Shen, Z. Shuai, and F. Ma, "Railway Static Power Conditioners for High-speed Train Traction Power Supply Systems Using Three-phase V/V Transformers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 2844-2856, 2011.
- [18] F. Ma, A. Luo, X. Xu, H. Xiao, C. Wu, and W. Wang, "A Simplified Power Conditioner Based on Half-Bridge Converter for High-Speed Railway System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 728-738, 2013.
- [19] S. Zhuo, J. Xinjian, Z. Dongqi, and Z. Guixin, "A novel active power quality compensator topology for electrified railway," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, pp. 1036-1042, 2004.
- [20] H. He, X. Shen, and J. A. Starzyk, "Power quality disturbances analysis based on EDMRA method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, pp. 258-268, 2009.
- [21] Z. Shu, S. Xie, and Q. Li, "Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 26, pp. 334-343, 2011.
- [22] S. Hu, B. Xie, Y. Li, X. Gao, Z. Zhang, L. Luo, *et al.*, "A Power Factor-Oriented Railway Power Flow Controller for Power Quality Improvement in Electrical Railway Power System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, pp. 1167-1177, 2017.
- [23] S.-L. Chen, R. J. Li, and P.-H. Hsi, "Traction system unbalance problem-analysis methodologies," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 19, pp. 1877-1883, 2004.
- [24] C. International Electrotechnical, "IEC 60909 Series: Short-circuit currents in three-phase ac systems," *IEC Central Office, Geneva, Switzerland*, 2001.
- [25] V. Sibal, *Traction power supply system for California High-Speed Train project: California High-Speed Train project*, September 2011.
- [26] B. Chen, G. Xue, W. Zeng, C. Zhang, J. Yuan, and C. Tian, "Electrical magnetic hybrid power quality compensation system for V/V traction power supply system," *IET Power Electronics*, vol. 9, pp. 62-70, 2016.
- [27] B. Chen, C. Zhang, C. Tian, J. Wang, and J. Yuan, "A Hybrid Electrical Magnetic Power Quality Compensation System With Minimum Active Compensation Capacity for V/V Cophase Railway Power Supply System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, pp. 4159-4170, 2016.
- [28] L. Yu-quan, W. Guo-pei, H. Huang-sheng, and W. Li, "Research for the effects of high-speed electrified railway traction load on power quality," in *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2011, pp. 569-573.

- [۲۹] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 37, pp. 1027-1140, 1918.
- [۳۰] P. Pillay and M. Manyage, "Definitions of voltage unbalance," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 21, pp. 50-51, 2001.
- [۳۱] M. o. Energy, "charactristics and properties of electrical energy," in *part seven: Quality of Power Delivery to different Consumers*, ed: Iranian Electrical Industry Standard, 2002.
- [۳۲] H. Lee, C. Lee, G. Jang, and S.-h. Kwon, "Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 979-986, 2006.
- [۳۳] P. C. Tan, P. C. Loh, and D .G. Holmes, "Optimal Impedance Termination of 25-kV Electrified Railway Systems for Improved Power Quality," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1703-1710, APRIL 2005.
- [۳۴] T. M. Blooming and D. J. Carnovale, "Application of IEEE Std 519-19 ۹۲ harmonic limits," in *Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*, 2006, pp. 1-9.
- [۳۵] F. Ciccarelli, M. Fantauzzi, D. Lauria, and R. Rizzo, "Special transformers arrangement for AC railway systems," 2012, pp. 1-6.
- [۳۶] H. J. Kaleybar, H. M. Kojabadi, M. Fallah, S. S. Fazel, and L. Chang, "Impacts of traction transformers on power rating of Railway Power Quality Compensator," 2016, pp. 2229-2236.
- [۳۷] M. Kalantari, M. J. Sadeghi, S. Farshad, and S. S. Fazel, "Modeling and comparison of traction transformers based on the utilization factor definitions," *International Review on Modelling and Simulations*, vol. 4, 2011.
- [۳۸] T.-H. Chen, "Comparison of Scott and Leblanc transformers for supplying unbalanced electric railway demands," *Electric power systems research*, vol. 28, pp. 235-240, 1994.
- [۳۹] H. Yu, Y. Yue, C. Zhe, C. Zhifei, and T. Ye, "Research on the selection of railway traction transformer," 2010.
- [۴۰] M. Kalantari, M. J. Sadeghi, S. S. Fazel, and S. Farshad, "Investigation of Power Factor Behavior in AC Railway System Based on Special Traction Transformers," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 2, p. 618, 2010.
- [۴۱] Z. Guiping, C. Jianye, and L. Xiaoyu, "Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC," 2008, pp. 1958-1963.
- [۴۲] J.-H. Chen, W.-J. Lee, and M.-S. Chen, "Using a static var compensator to balance a distribution system," 1996, pp. 2321-2326.
- [۴۳] D. Wang, C. Yang, X. Zhang, J. Wang, and G. Li, "Research on application of TCR+FC typed SVC in power quality integrated management for power traction system," presented at the Sustainable Power Generation and Supply (SUPERGEN 2012), International Conference on IET, 2012.
- [۴۴] L. Hu, R. E. Morrison, and D .J. Young, "Reduction of harmonic distortion and improvement of voltage form factor in compensated railway systems by means

- of a single arm filter," 1992, pp. 83-88.
- [٤٥] A. Ametani, "Generalised method of harmonic reduction in ac-dc convertors by harmonic current injection," *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 119, pp. 857-864, 1972.
- [٤٦] D. Gao, Q. Lu, and X. Sun, "Design and performance of an active power filter for unbalanced loads," 2002, pp. 2496-2500.
- [٤٧] M. El-Habrouk ,M. K. Darwish, and P. Mehta, "Active power filters: A review," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 147, pp. 403-413, 2000.
- [٤٨] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 46, pp. 960-971, 1999.
- [٤٩] E. Fuchs and M. A. S. Masoum, *Power quality in power systems and electrical machines*: Academic press, 2011.
- [٥٠] S. T. Senini and P. J. Wolfs, "Novel topology for correction of unbalanced load in single phase electric traction systems," presented at the 33th Annu. Power Electron. Spec. Conf., Jun. 2002.
- [٥١] Chuanping Wu, An Luo, John Shen, Fu Jun Ma, and S. Peng, "A Negative Sequence Compensation Method Based on a Two-Phase Three-Wire Converter for a High-Speed Railway Traction Power Supply System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, pp. 706-717, FEBRUARY 2012.
- [٥٢] X. He, Z. Shu, X. Peng, Q. Zhou, Y. Zhou, Q. Zhou, *et al.*, "Advanced Cophase Traction Power Supply System Based on Three-Phase to Single-Phase Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 5323-5333, OCTOBER 2014.
- [٥٣] K. W. Lao, M. C. Wong, N. Dai, C. K. Wong, and C. S. Lam, "A Systematic Approach to Hybrid Railway Power Conditioner Design With Harmonic Compensation for High-Speed Railway," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 930-942, FEBRUARY 2015.
- [٥٤] Q. Li, W. Liu, Z. Shu, S. Xie, and F. Zhou, "Co-phase power supply system for HSR," presented at the 2014 International Power Electronics Conference, 2014.
- [٥٥] N. Y. Dai, K. W. Lao, M. C. Wong, and C. K. Wong, "Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrified railway," *IET Power Electronics*, vol. 5, pp. 1084-1094, 2012.
- [٥٦] K. W. Lao, M. C. Wong, N. Y. Dai, C. K. Wong, and C. S. Lam, "Analysis of DC-link operation voltage of a hybrid railway power quality conditioner and its PQ compensation capability in high-speed cophase traction power supply," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. ٣١, pp. 1643-1656, 2016.
- [٥٧] K. W. Lao, M. C. Wong, N. Y. Dai, C. S. Lam, C. K. Wong, and L. Wang, "Analysis in the effect of Co-phase Traction Railway HPQC Coupled Impedance on its Compensation Capability and Impedance-Mapping Design Technique based on Required Compensation Capability for Reduction in Operation Voltage," *Accepted for Publication in IEEE Transactions on Power Electronics*.
- [٥٨] K. W. Lao, N. Dai, W. G. Liu, and M. C. Wong, "Hybrid power quality

- compensator with minimum DC operation voltage design for high-speed traction power systems," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 28, pp. 2024-2036, 2013.
- [59] N.-Y. Dai, M.-C. Wong, K.-W. Lao, and C.-K. Wong, "Modelling and control of a railway power conditioner in co-phase traction power system under partial compensation," *IET Power Electronics*, vol. 7, pp. 1044-1054, 2014.
- [60] S. Hu, Z. Zhang, Y. Chen, G. Zhou, Y. Li, L. Luo, *et al.*, "A new integrated hybrid power quality control system for electrical railway," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 6222-6232, 2015.
- [61] Z. Zhang, B. Wu, J. Kang, and L. Luo, "A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 711-718, 2009.
- [62] Sijia Hu, Yong Li, Bin Xie, Mingfei Chen, Zhiwen Zhang, Longfu Luo, *et al.*, "A Y-D Multi-function Balance Transformer Based Power Quality Control System for Single-phase Power Supply System," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 52, pp. 1270 - 1279, 2016.
- [63] S. Hu, Z. Zhang, Y. Li, L. Luo, Y. Cao, and C. Rehtanz, "A New Half-Bridge Winding Compensation-Based Power Conditioning System for Electric Railway with LQRI," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, pp. 5242-5256, 2014.
- [64] H. E. Mazin and W. Xu, "Harmonic cancellation characteristics of specially connected transformers," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1689-1697, 2009.
- [65] Y. Lang, D. Xu, S. R. Hadianamrei, and H. Ma, "A novel design method of LCL type utility interface for three-phase voltage source rectifier," 2005, pp. 313-317.
- [66] A. Luo, F. Ma, C. Wu, S. Q. Ding, Q.-C. Zhong, and Z. Shuai, "A dual-loop control strategy of railway static power regulator under V/V electric traction system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 2079-2091, 2011.
- [67] M. Oettmeier, C. Heising, V. Staudt, and A. Steimel, "Dead-beat control algorithm for single-phase 50-kw AC railway grid representation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, pp. 1184-1192, 2010.
- [68] M. Depenbrock and V. Staudt, "The FBD-method as tool for compensating total nonactive currents," 1998, pp. 320-324.
- [69] S. S. Fazel, "Investigation and comparison of multi-level converters for medium voltage applications," Technische Universität Berlin, 2007.
- [70] P. A. Dahono, "New hysteresis current controller for single-phase full-bridge inverters," *IET Power Electronics*, vol. 2, pp. 585-594, 2009.
- [71] G. Lin, X. Yonghai, X. Xiangnin, J. Peisi, and Z. Yunyan, "Simulation Model and Harmonic Analysis of SS6B Electric Locomotive Based on PSCAD/EMTDC," in *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, 2008.

Abstract:

AC electrified railway traction loads create a lot of problems related to power quality due to their non-linear nature and being single-phase, such as significant amount of Negative Sequence Current (NSC), low power factor, harmonic injection, reactive power consumption, etc. In order to solve above problems, a hybrid traction power quality compensation system based on a Railway Power Conditioner (RPC) and two Static VAR Compensators (SVCs) is proposed in this thesis. The proposed structure will significantly reduce the initial investment cost of compensation system and converters rating of the RPC. The RPC is only used to balance active powers of two adjacent feeder sections and suppress harmonic currents. The SVCs are employed to compensate reactive power and suppress the third and fifth harmonic currents. In this thesis firstly, the principle of complete compensation is analyzed step by step. Then, the control strategies for SVC and RPC are presented. Finally, a simulation carried out using Matlab/Simulink software to demonstrate the effectiveness and correctness of the proposed structure and compensation strategy.

Keywords—AC electrified railway traction systems; power quality compensation; railway power conditioner; static var compensator; power rating reduction of railway power conditioner.



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Electrical Power Systems Engineering

**Negative Sequence Current Compensation in Electrified
Railway Traction Systems**

By:

Mohammad Arabahmadi

Supervisor:

Dr. Mahdi Banejad

Advisor:

Dr. Ali Dastfan

February 2017