



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی

انتخاب مناسب سیستم های ذخیره ساز انرژی در شبکه قطار

شهری، طراحی و شبیه سازی

نگارنده:

آرمین ابراهیمیان

استاد راهنما:

دکتر علی دستفان

استاد مشاور:

مهندس سعید احمدی

بهمن ۱۳۹۵

تقدیم

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران
مهربانی‌تان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره‌آوردی گران سنگ‌تر از این ارزان ندا شتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم
نسیم گونه غبار خستگی‌تان را بزدايد.

بوسه بر دستان پرمهرتان

تقدیم به برادرم

به همسفر مهربان زندگی‌ام

که باهم آغاز کردیم، در کنار هم آموختیم و به امید هم به آینده چشم می‌دوزیم. قلبم لبریز از
عشق به توست و خوشبختی‌ات منتهای آرزویم.

تشکر و قدردانی

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین؛ حسب وظیفه و از باب «مَنْ لَمْ يَشْكُرِ الْمَخْلُوقَ لَمْ يَشْكُرِ الْخَالِقَ» از جناب آقای دکتر **علی دستفان** که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ از استاد صبور و باتقوا، جناب آقای مهندس **سعید احمدی**، که زحمت مشاوره این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛ و از اساتید فرزانه و دلسوز؛ جناب آقای دکتر **اصیلی** و دکتر **صدرنیا** که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم.

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تعهد نامه

- اینجانبآرمین ابراهیمیان..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشتهبرق / قدرت..... دانشکدهبرق و رباتیک..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه انتخاب مناسب سیستم های ذخیره ساز انرژی در شبکه قطار شهری، طراحی و شبیه سازی.... تحت راهنمایی...دکتر علی دستفان...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

گسترش روزافزون شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی در سراسر دنیا از یک سو و افزایش قیمت انرژی الکتریکی از سمت دیگر محققان را بر این داشت تا به تحقیق در مورد روش‌های کاهش مصرف انرژی در این سیستم‌ها بپردازند. در این راستا یکی از روش‌های کاهش مصرف انرژی در شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی استفاده از انرژی بازیافتی حاصل از ترمزها است. در فرآیند ترمزی قطار انرژی را به شبکه بازمی‌گرداند که در صورت دریافت این انرژی توسط سیستم‌های ذخیره‌ساز امکان استفاده مجدد از این انرژی فراهم می‌شود. انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌ساز را می‌توان در زمان دیگری مثل زمان شتابگیری استفاده نمود. استفاده از ذخیره‌ساز علاوه بر کاهش مصرف انرژی به دلیل استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی، تثبیت ولتاژ شبکه و کاهش پیک مصرف را نیز به ارمغان می‌آورد. در این پروژه برای یک سیستم محدود شامل سه ایستگاه، دو قطار و دو پست تغذیه سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب ابتدا طراحی و سپس با روش کنترل پیشنهادی کنترل شده است. ذخیره‌ساز استفاده شده از نوع ساکن و مبتنی بر ابر خازن‌های نوع لیتیوم یون می‌باشد و استراتژی کنترل مبتنی بر استفاده از مدل میانگین مبدل نیم پل دو جهته می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده کاهش مصرف انرژی و تثبیت ولتاژ شبکه می‌باشد. همچنین کاهش پیک توان پست‌های تغذیه (پیک سایی) نتیجه استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی و روش کنترلی ارائه شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی، انرژی

بازتولیدی ترمزی، ابر خازن، مدل میانگین، مبدل نیم پل دو جهته

فهرست

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ تعریف موضوع.....
۳	۲-۱ هدف پژوهش.....
۴	۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه.....
۵	فصل ۲: آشنایی با شبکه قطار شهری و مدلسازی آن
۷	۲-۱ اصول و مبانی شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی.....
۷	۱-۱-۱ انواع سیستم‌های تغذیه.....
۸	۲-۱-۲ انواع روش‌های تغذیه.....
۱۰	۲-۲ مدلسازی اجزاء شبکه قطار شهری.....
۱۱	۱-۲-۲ مدل مکانیکی حرکت قطار و نیروهای وارد بر آن.....
۱۵	۲-۲-۲ مدل الکتریکی اجزاء شبکه.....
۱۷	۳-۲ روش‌های کاهش مصرف انرژی در شبکه قطار شهری.....
۲۱	فصل ۳: روش‌ها و تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی و پیشینه کنترل آن‌ها
۲۳	۳-۱ روش‌ها و تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی.....
۲۳	۱-۱-۳ چرخ طیار.....
۲۵	۲-۱-۳ ذخیره‌ساز انرژی ابرسانا مغناطیسی (SMES).....
۲۵	۳-۱-۳ باتری‌های الکتروشیمیایی.....
۲۶	۴-۱-۳ ابر خازن‌ها.....
۲۸	۲-۳ طبقه‌بندی ابر خازن‌ها.....
۳۳	۳-۳ مدلسازی ابر خازن‌ها.....
۳۳	۱-۳-۳ مدل RC سری موازی.....
۳۴	۲-۳-۳ مدل شاخه موازی.....
۳۵	۳-۳-۳ مدل خط انتقال.....
۳۶	۴-۳-۳ مدل گستره فرکانسی کامل.....
۳۶	۵-۳-۳ مدل ارائه شده برای سیستم‌های حمل و نقل.....
۳۷	۴-۳ پیشینه کنترل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی.....
۴۳	فصل ۴: طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی و ارائه روش کنترلی
۴۴	۴-۱ انتخاب ذخیره‌ساز مناسب.....
۴۷	۲-۴ تعیین ظرفیت ذخیره‌ساز مورد استفاده.....
۴۸	۳-۴ طراحی مدل سیستم ذخیره‌ساز.....
۵۰	۴-۴ استراتژی کنترل پیشنهادی.....
۵۵	فصل ۵: نتایج شبیه‌سازی

۵۷.....	۱-۵ شیه سازی های اصلی
۵۷.....	۱-۱-۵ شیه سازی سیستم تک قطاره
۶۳.....	۲-۱-۵ شیه سازی سیستم دو قطاره
۶۹.....	۲-۵ شیه سازی های فرعی

۷۷	فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادها
۷۸.....	۱-۶ نتیجه گیری
۷۹.....	۲-۶ پیشنهادها.....

۸۱	مراجع
----	--------------

فهرست شکل ها

- شکل ۲ - ۲: مدل پست تغذیه ۱۵
- شکل ۲ - ۳: مدل الکتریکی قطار ۱۷
- شکل ۳ - ۱: منحنی راگون برای انواع ادوات ذخیره ساز ۲۳
- شکل ۳ - ۲: ساختار چرخ طیار ۲۴
- شکل ۳ - ۳: ساختار داخلی ابر خازن ۲۷
- شکل ۳ - ۴: طبقه بندی ابر خازن ها ۲۹
- شکل ۳ - ۵: منحنی راگون ۳۰
- شکل ۳ - ۶: مدل RC سری موازی ابر خازن ۳۳
- شکل ۳ - ۷: مدل اصلاح شده ابر خازن ۳۴
- شکل ۳ - ۸: مدل شاخه موازی ابر خازن ۳۵
- شکل ۳ - ۹: مدل خط انتقال ابر خازن ۳۵
- شکل ۳ - ۱۰: مدل گستره فرکانسی ابر خازن ۳۶
- شکل ۳ - ۱۱: مدل مناسب برای سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی ۳۷
- شکل ۳ - ۱۲: دیاگرام انرژی مصرف شده در شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی ۳۷
- شکل ۳ - ۱۳: محاسبه جریان مرجع سلف مبدل ۴۱
- شکل ۴ - ۱: مشخصه دشارژ خودی ابر خازن لیتیوم یون در مقایسه با ابر خازن دو لایه ۴۶
- شکل ۴ - ۲: نحوه اتصال ذخیره ساز به شبکه از طریق مبدل ۴۹
- شکل ۴ - ۳: دیاگرام استراتژی کنترل پیشنهادی ۵۱
- شکل ۴ - ۴: مبدل در مود کاری افزایشده ۵۲
- شکل ۴ - ۵: مبدل در مود کاری کاهشده ۵۳
- شکل ۵ - ۱: مدل شبکه تک قطاره ۵۷
- شکل ۵ - ۲: نمودار سرعت زمان حرکت قطار ۵۸
- شکل ۵ - ۳: مقایسه ولتاژ باس ذخیره ساز در سیستم تک قطاره در حالت وجود و عدم وجود ذخیره ساز ۵۹
- شکل ۵ - ۴: جریان قطار در حالت حضور و عدم حضور ذخیره ساز ۵۹
- شکل ۵ - ۵: ولتاژ ابر خازن ۶۰
- شکل ۵ - ۶: جریان پست تغذیه اول در حضور و عدم حضور ذخیره ساز ۶۱
- شکل ۵ - ۷: جریان پست تغذیه دوم در حضور و عدم حضور سیستم ذخیره ساز ۶۱
- شکل ۵ - ۸: مجموع توان کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره ساز ۶۲
- شکل ۵ - ۹: انرژی تحویلی پست ها به شبکه در حالت حضور و عدم حضور سیستم ذخیره ساز ۶۳
- شکل ۵ - ۱۰: شبکه سیستم دو قطاره ۶۴
- شکل ۵ - ۱۱: نمودار سرعت زمان حرکت دو قطار ۶۵
- شکل ۵ - ۱۲: ولتاژ باس ذخیره ساز قبل و بعد از نصب سیستم ذخیره ساز ۶۵

- شکل ۵ - ۱۳: ولتاژ ابر خازن ۶۶
- شکل ۵ - ۱۴: جریان تزریقی پست تغذیه اول ۶۷
- شکل ۵ - ۱۵: جریان تزریقی پست تغذیه دوم ۶۷
- شکل ۵ - ۱۶: مجموع توان کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز ۶۸
- شکل ۵ - ۱۷: انرژی کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز ۶۹
- شکل ۵ - ۱۸: مقایسه ولتاژ ایستگاه دوم در حالت اتصال و عدم اتصال خط رفت و برگشت ۷۰
- شکل ۵ - ۱۹: مقایسه انرژی مصرفی در حالت اتصال و عدم اتصال خط رفت و برگشت ۷۰
- شکل ۵ - ۲۰: جریان لینک متصل‌کننده خط رفت و برگشت ۷۱
- شکل ۵ - ۲۱: ولتاژ خط رفت در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز ۷۲
- شکل ۵ - ۲۲: ولتاژ خط برگشت در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز ۷۲
- شکل ۵ - ۲۳: ولتاژ ابر خازن‌های خط رفت و برگشت ۷۳
- شکل ۵ - ۲۴: انرژی مصرفی در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز ۷۳
- شکل ۵ - ۲۵: مقایسه انرژی مصرفی سیستم در حالت‌های مختلف ۷۴

فهرست جدول ها

جدول (۱-۲) مترو های مشهور جهان و خصوصیات آنها	۷
جدول (۲-۲) مشخصات متروهای در حال بهره‌برداری در ایران	۷
جدول (۳-۲) مقایسه روش‌های تغذیه سیستم مترو	۱۰
جدول (۱-۳) نماد انواع باتری‌ها	۲۶
جدول (۲-۳) انواع الکترولیت‌ها و الکترودهای سازنده ابر خازن‌ها	۲۹
جدول (۳-۳) سیستم‌های ذخیره‌ساز در حال بهره‌برداری در سراسر دنیا	۳۲
جدول (۱-۴) مشخصات مبدل	۵۰
جدول (۱-۵) پارامترهای شبکه	۵۶
جدول (۲-۵) پارامترهای حرکت قطار	۵۶

فصل ۱: مقدمه

۱-۱ تعریف موضوع

امروزه حمل و نقل یکی از منابع بزرگ آلودگی در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه است [۱]. برای مثال در اروپا سیستم‌های حمل و نقل منبع حدود ۳۱ درصد کل گازهای گلخانه‌ای می‌باشند [۲]. با توجه به مصرف زیاد انرژی در این بخش، مطالعه راهکارهای کاهش مصرف انرژی می‌تواند تأثیر به سزایی در کاهش آلودگی داشته باشد. در این میان سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی با فاکتورهایی مانند امنیت بالا، حجم جابجایی زیاد، قابلیت اطمینان و سازگاری با محیط زیست [۳] به عنوان یک راه حل مناسب در کلان شهرهای سراسر دنیا در حال سرویس‌دهی می‌باشد. در گذر زمان با توجه به افزایش ظرفیت سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی و همچنین افزایش بهای انرژی، این سیستم باید در جهت استفاده از فناوری‌های کاهش مصرف انرژی (بدون تغییر در کیفیت سرویس‌دهی) حرکت کند. در غیر این صورت علی‌رغم تمام مزایای عنوان شده برای سیستم ریلی الکتریکی و با توجه به پیشرفت روزافزون سایر سیستم‌های حمل و نقل [۴]، ممکن است در آینده‌ای نه‌چندان دور این سیستم جایگاه کنونی خود را از دست بدهد.

برای درک بهتر از صرفه‌جویی مصرف انرژی در شبکه حمل و نقل ریلی در ابتدا آگاهی از نحوه مصرف انرژی در این سیستم امری ضروری می‌باشد. در حال حاضر مترو به عنوان یکی از پرکاربردترین نوع حمل و نقل ریلی الکتریکی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در صورت چشم‌پوشی از نیاز به سرمایه‌گذاری بسیار بالا در ابتدای راه‌اندازی این سیستم، می‌توان به خصوصیات منحصربه‌فرد آن مثل فضای مورد نیاز بسیار کم جهت سرویس‌دهی، ظرفیت و تعداد سرویس‌دهی بالا، امکان اتوماسیون، افزایش سطح امنیت و دقت در زمان‌بندی اشاره کرد که باعث اقبال عمومی به سمت این سیستم شده است.

۲-۱ هدف پژوهش

با علم بر گسترش استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی و به خصوص مترو در شهرها، نحوه تأمین انرژی این سیستم و همچنین راهکارهای کاهش مصرف انرژی در این سیستم حائز اهمیت می‌باشد. به همین دلیل مصرف انرژی سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی و همچنین تأمین این انرژی یکی از مواردی است که امروزه مطالعات زیادی در رابطه با آن در حال انجام است. سیستم اصلی تغذیه، موتورهای به کار برده شده در قطارها، تهویه ایستگاه‌ها و قطارها و حتی سیستم‌های خدماتی در ایستگاه‌ها از جمله مواردی هستند که مطالعات بر روی آن‌ها در حال انجام می‌باشد. هدف تمامی تحقیقات در درجه اول ارائه کیفیت بهتر خدمات و سپس کاهش مصرف انرژی می‌باشد. در این میان استفاده از موتورهای القایی این امکان را به قطار می‌دهد تا در هنگام ترمز، در مود ژنراتوری کار کرده و انرژی حاصل از ترمز را به شبکه بازگردانی کند [۵]. این انرژی در حالت عادی در مقاومت‌های ترمزی که در سقف قطار تعبیه شده‌اند [۶] تلف می‌شود. حال آنکه در صورت وجود سیستم‌های ذخیره‌سازی می‌توان این انرژی را که در فاز ترمزی توسط قطار به شبکه تزریق می‌شود ذخیره، و در مواقع نیاز که قطار از شبکه انرژی می‌گیرد دوباره به شبکه تزریق کنیم. در کنار کاهش مصرف انرژی، استفاده از ذخیره‌ساز مزایایی چون تثبیت ولتاژ شبکه و پیک سای [۳] را به ارمغان می‌آورد.

بنابراین یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی استفاده از انرژی بازیافتی در هنگام ترمز می‌باشد. در همین راستا مطالعات فراوانی در زمینه تعیین ظرفیت [۸]، [۷]، مکان نصب [۹]، نوع ذخیره‌ساز مورد استفاده [۱۱]، [۱۰] و سایر ملاحظات این سیستم‌ها انجام شده است.

برای استفاده مجدد از انرژی ترمزی، ابتدا باید ذخیره‌ساز مناسب با توجه به نیازمندی‌ها و پارامترهای شبکه طراحی شود. طراحی، خود شامل قسمت‌هایی از جمله انتخاب نوع ذخیره‌ساز، مبدل واسط مورد استفاده و روش کنترلی می‌باشد؛ همچنین در انتها نیز برای اطمینان از صحت طراحی انجام شده،

^۱ Pick Power Shaving

شبیه سازی هایی روی سیستم طراحی شده انجام می پذیرد تا نقاط قوت و ضعف طراحی انجام شده مشخص شود. به همین دلیل در این پروژه ابتدا یک سیستم ذخیره ساز طراحی و سپس با شبیه سازی روی آن نتایج به دست آمده نشان داده می شود.

۳-۱ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه

در این پایان‌نامه سعی شده با استفاده از سیستم‌های ذخیره ساز انرژی و ذخیره سازی انرژی ترمزی در این سیستم‌ها، از تلف شدن این انرژی جلوگیری شود و همچنین از این انرژی در زمان نیاز (هنگام شتابگیری مجدد قطارها) دوباره استفاده شود. به همین منظور یک سیستم DC متشکل از دو پست الکتریکی یک طرفه و سه ایستگاه در نظر گرفته شده که دو قطار در آن حرکت می کنند. این سیستم در حالت بدون ذخیره ساز و همچنین حضور ذخیره ساز شبیه سازی شده است. مراحل طراحی سیستم ذخیره ساز به صورت کامل بیان شده و در انتها یک تحلیل اقتصادی نیز ارائه شده است.

در فصل دوم به مدلسازی شبکه الکتریکی و همچنین معرفی نیروهای مقاوم در برابر حرکت قطار پرداخته شده است. برای آشنایی به سیستم‌های ذخیره ساز انواع آن‌ها و پیشینه مطالعات در رابطه با کنترل آن‌ها در فصل سوم ارائه شده است. در فصل چهارم طراحی سیستم ذخیره ساز که شامل انتخاب ذخیره ساز مناسب، تعیین ظرفیت ذخیره ساز و طراحی مبدل می باشد انجام شده و استراتژی کنترل متناسب با ذخیره ساز پیشنهاد شده است. نهایتاً در فصل پنجم نتایج شبیه سازی و نمودارها موجود می باشد.

فصل ۲: آشنایی با شبکه قطار شهری و

مدلسازی آن

متروهای اولیه به شکل امروزی نبودند و کاربردهای امروزی را نداشتند. اولین خطوط حمل و نقل ریلی زیرزمینی در معادن به کار می‌رفتند. روی ریل‌های داخل این معادن واگن‌های رو بازی وجود داشت که در ابتدا توسط انسان و سپس با نیروی اسب به حرکت درمی‌آمدند. با ساخت قطارهای بخار، افکار به سرعت به سمت ساخت قطارهای مسافربری زیرزمینی سوق پیدا کرد. به دلیل دود ناشی از قطارهای بخار در زیرزمین، در ابتدا لوله‌های بزرگی را برای انجام عمل تهویه در این تونل‌ها قرار دادند. به این ترتیب در ۱۰ ژانویه ۱۸۶۳ اولین قطار زیرزمینی جهان در مسیری ۶ کیلومتری زیر شهر لندن به حرکت درآمد که با آن قطار مرکز تجاری شهر به نقطه‌ای در غرب شهر متصل شد. متروی لندن با گذشت سال‌ها توسعه یافته و اکنون بیش از ۴۰۸ کیلومتر وسعت دارد و هر روزه ۵/۲ میلیون نفر را جابجا می‌کند. این شهر دارای ۴۰۲ کیلومتر مترو با ۱۲ خط و ۲۷۰ ایستگاه است که طولانی‌ترین مترو جهان لقب گرفته است.

توکیو نیز که یکی از بزرگترین شهرها و پرجمعیت‌ترین شهر جهان است، دارای ۲۹۲ کیلومتر مترو در ۱۲ خط و ۲۷۴ ایستگاه است. همچنین اولین خط مترو در سال ۱۹۰۴ در نیویورک به بهره‌برداری رسید. شایان ذکر است که نیویورک با ۳۷۵ کیلومتر مترو در ۲۷ خط و ۴۲۲ ایستگاه به عنوان پر ایستگاه‌ترین مترو جهان شناخته شده است. در جدول (۱-۲) چند نمونه از متروهای مشهور جهان با مشخصات منحصربه‌فرد خود ارائه شده‌اند.

امروزه نیز در کلان‌شهرهای کشور عزیزمان ایران، استفاده از سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی به یکی از مهمترین راهکارها جهت کاهش آلودگی هوا و ترافیک تبدیل شده است. در جدول (۲-۲) توضیحات مختصری در مورد سیستم‌های ریلی الکتریکی در حال بهره‌برداری در کشور ارائه گردیده است. همچنین در شهرهایی مثل کرج، کرمانشاه، قم و اهواز مطالعات برای احداث خطوط ریلی الکتریکی در حال انجام می‌باشد.

جدول (۱-۲) متروهای مشهور جهان و خصوصیات آنها

کشور	شهر	سال شروع به کار	تعداد ایستگاه	طول (KM)	تعداد نفرات در سال (میلیون نفر)
انگلیس	لندن	۱۸۹۰	۲۷۰	۴۰۲	۱۳۰۵
آمریکا	نیویورک	۱۹۰۴	۴۲۲	۳۷۵	۱۷۶۳
چین	شانگهای	۱۹۹۳	۳۶۴	۵۸۸	۳۰۶۸
چین	پکن	۱۹۷۱	۳۱۸	۵۵۴	۳۲۵۰

جدول (۲-۲) مشخصات متروهای در حال بهره‌برداری در ایران

شهر	سال شروع به کار	تعداد ایستگاه	طول (KM)
تهران	۲۰۰۰	۸۵	۱۲۷
مشهد	۲۰۱۱	۲۴	۲۴
تبریز	۲۰۱۵	۶	۷
شیراز	۲۰۱۴	۸	۱۰/۵
اصفهان	۲۰۱۵	۱۰	۱۱/۲

۱-۲ اصول و مبانی شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی

شبکه‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی در عین وجود اصول ثابت دارای تفاوت‌هایی می‌باشند که آن‌ها را از یکدیگر متمایز می‌سازد. ازجمله این تفاوت‌ها می‌توان به استفاده از جریان متناوب در برخی شبکه‌ها اشاره کرد که در مقابل آن بعضی شبکه‌های دیگر از برق DC استفاده می‌کنند. همچنین نحوه تغذیه قطار در حال حرکت انواع مختلفی دارد که در این بخش به توضیح این تفاوت‌ها پرداخته شده است.

۱-۱-۲ انواع سیستم‌های تغذیه

به‌طور کلی تغذیه شبکه‌های ریلی الکتریکی با توجه به مشخصه‌های کاربردی آن‌ها AC یا DC می‌باشد. نظر به اینکه در سیستم‌های درون‌شهری فاصله بین ایستگاه‌ها کم است، هر واگن خود کشش

است. در نتیجه این امر هر واگن باید موتور جداگانه داشته باشد چراکه نیاز داریم تا قطار با شتاب بیشتری به حداکثر سرعت خود برسد و سپس دوباره سرعت خود را کم کند. از این رو استفاده از برق DC و نهایتاً موتورهای DC مرسوم بوده است. حال آنکه امروزه به دلیل پیشرفت فناوری اینورترها و موتورهای القایی، استفاده از این موتورهای مزایایی چون ترمز بازیافتی را به ارمغان می‌آورد. از این رو در سیستم قطار شهری مشهد از موتورهای القایی استفاده شده است و از اینورترها برای اتصال این موتورها به شبکه DC و همچنین کنترل این موتورهای استفاده می‌شود. در واقع برای کنترل سرعت موتور القایی راه‌های متعددی وجود دارد از جمله استفاده از نسبت ولتاژ به فرکانس ($\frac{V}{f}$) لذا با اینورترهای موجود می‌توان سرعت قطارها را کنترل کرد. در این حالت ولتاژ سیستم DC می‌تواند ۷۵۰، ۱۵۰۰ یا ۳۰۰۰ ولت DC باشد.

در حالت قطارهای برون‌شهری و بین‌شهری از برق AC استفاده می‌کنند چراکه در آنجا دیگر نیازی به شتاب اولیه بالا نیست و همچنین کل واگن‌ها توسط یک کشنده، کشیده می‌شوند. برای این حالت نیز ولتاژهای معمول ۱۵، ۲۵ و ۵۰ کیلوولت AC می‌باشند.

۲-۱-۲ انواع روش‌های تغذیه

یکی دیگر از تفاوت‌های بزرگ میان سیستم‌های ریلی الکتریکی نحوه تغذیه قطار می‌باشد. قطار به عنوان یک جسم که همواره در حال حرکت است، برای ادامه حرکت خود دائماً باید توسط نیروی برق تغذیه شود. لذا با توجه به معیارهایی نظیر سرعت و مشخصات الکتریکی قطار دو روش برای تغذیه قطار مرسوم می‌باشد.

شبکه بالاسری^۱

در این حالت کابل‌های برق با فاصله مشخصی در بالای مسیر حرکت قطار نصب شده‌اند، وسیله‌ای

^۱ - Over Head Line

به نام "پانتوگراف" اتصال بین قطار و این شبکه را برقرار می‌کند. از این نوع اتصال برای سیستم‌هایی استفاده می‌شود که سرعت آن‌ها بین ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت است.

ریل سوم^۲

این سیستم برای اولین بار در سال ۱۹۲۷ در ژاپن مورد بهره‌برداری قرار گرفت و به این صورت است که یک ریل دیگر موازی دو ریلی که قطار بر روی آن‌ها در حال حرکت است وجود دارد و قطار با برقراری اتصال با آن انرژی موردنیاز خود را دریافت می‌کند. از آنجایی که کیفیت دریافت جریان در سرعت‌های بالا در این حالت ضعیف است این قطار معمولاً برای سرعت‌های ۷۰ الی ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت مناسب می‌باشد. همچنین ولتاژهایی که با این سیستم متناسب هستند در بازه ۶۵۰ ولت الی ۷۰۰ ولت می‌باشند.

در حال حاضر متروی تهران از روش ریل سوم و خط یک مترو مشهد از روش شبکه بالاسری تغذیه می‌شوند. در جدول (۲-۳) مقایسه‌ای بین این دو سیستم تغذیه انجام گرفته است.

^۱ Pantograph

^۲ Third Rail

جدول (۲-۳) مقایسه روش‌های تغذیه سیستم مترو

مزایا	معایب	
در پست‌ها تنظیم‌کننده‌ها لازم نیست زیاد حساس باشند. ساییدگی پانتوگراف در مقایسه با جاروبک در ریل سوم کمتر است. صدا در شبکه بالاسری نسبت به ریل سوم کمتر است خطر جانی برای افرادی که از روی ریل حرکت می‌کنند کمتر است.	دشواری در تنظیمات اولیه شبکه دشواری در تعمیر شبکه بعد از سوانح خطرات رعدوبرق و شاخه درختان در محیط باز	روش بالاسری
نصب شدن در قطعات کوچک با بهترین فاصله جداکننده استفاده از برق متناوب محلی در شهر برای پست‌های حمل و نقل و یکسو ساز ساده بودن سیستم هزینه نگهداری کمتر نسبت به شبکه بالاسری جریان‌های زیادی می‌کشند	برای حفاظت بیشتر باید در مسیرهای مستقیم استفاده شود پیچیدگی در نصب کلیدها خطر برق‌گرفتگی برای پرسنلی که روی خط کار می‌کند و باید خط را با روکش عایق بپوشانند	روش ریل سوم

۲-۲ مدل‌سازی اجزاء شبکه قطار شهری

شبیه‌سازی الکترومکانیکی یک روند شناخته شده به این صورت است که معادلات حرکت قطار با توجه به مسیر نوشته می‌شوند و انرژی موردنیاز برای حرکت قطار به دست می‌آید سپس این انرژی در محاسبات الکتریکی قرار داده می‌شود تا توانی که باید توسط منبع تغذیه تأمین شود به دست آید. حال آنکه این توان از طریق ریل سوم و یا سیستم بالاسری و از طریق پانتوگراف به قطار تزریق شود؛ بنابراین محاسبات به دو زیرگروه مکانیکی و الکتریکی تبدیل می‌شوند [۱۲].

شبیه‌سازی‌های الکترومکانیکی معمولاً در هنگام طراحی پست‌های کشش برای تعیین ظرفیت پست‌ها، تعیین حداکثر سرعت مجاز و قابل دسترس برای قطارها با توجه به مشخصه‌های مکانیکی آن‌ها و بهینه‌سازی تأمین انرژی در پست‌ها استفاده می‌شوند. شایان ذکر است که دقت در شبیه‌سازی تأثیر به سزایی با میزان صرفه‌جویی اقتصادی برای تأمین انرژی دارد. هر چه دقت بیشتر باشد به دید بهتری

از شبکه‌ها دست پیدا کرده و در نتیجه برنامه‌ریزی بهتری خواهیم داشت.

جهت پیاده‌سازی سیستم در محیط نرم‌افزار و انجام تحلیل روی سیستم نیازمند مدلسازی شبکه و اجزای آن می‌باشیم. با توجه به اینکه در شبکه حمل و نقل ریلی قطارها به عنوان اجسام همواره در حرکت می‌باشند لذا علاوه بر مدل الکتریکی شبکه، مدل مکانیکی حرکت قطار و نیروهای وارد بر قطار در طول مسیر نیاز است. در ادامه به صورت جداگانه به مدلسازی مکانیکی و الکتریکی سیستم پرداخته شده است.

۲-۲-۱ مدل مکانیکی حرکت قطار و نیروهای وارد بر آن

در مورد قطار به عنوان یک جسم در حال حرکت می‌توان به قوانین موجود در فیزیک دبیرستان رجوع کرد. در این صورت با توجه به نوع حرکت قطار (حرکت شتابدار یا حرکت با سرعت ثابت) می‌توان معادلات حرکت آن را به دست آورد.

معادلات حرکت شتابدار با شتاب ثابت:

$$\begin{aligned}x &= \frac{1}{2} a \cdot t^2 + v_0 \cdot t + x_0 \\v &= a \cdot t + v_0 \\a &= cte\end{aligned}\tag{۲-۱}$$

معادلات حرکت با سرعت ثابت:

$$\begin{aligned}x &= v_0 \cdot t + x_0 \\v_0 &= cte\end{aligned}\tag{۲-۲}$$

با استفاده از معادلات فوق می‌توان سرعت و مکان قطار در هر لحظه را محاسبه نمود.

برای سیستم مکانیکی دو اصل نوشتن معادلات صحیح و داشتن پارامترهای صحیح سیستم (مشخصات مکانیکی سیستم) تأثیر به سزایی در دقت نتایج به دست آمده خواهند داشت. درواقع ما با یک سری نیروهای مقاوم در ارتباط هستیم که با توجه به مسیر حرکت و آئرودینامیک قطار معادلاتی

برای این نیروها نوشته می‌شود و انرژی موردنیاز برای به حرکت درآوردن قطار از این محاسبات حاصل می‌شود. می‌توان با یک نگاه ساده‌انگارانه و با درصد قابل قبولی از خطا کل این انرژی را به مؤلفه‌های اصلی ولتاژ و جریان پانتوگراف قطار نسب داد. در این قسمت برای مدل کردن بخش محاسبات مکانیکی از معادلات سوئیفت-آرمسترانگ استفاده می‌شود [۱۳].

یک سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی را می‌توان شامل تعدادی قطار دانست که مستقل از هم و با توجه به خصوصیات مکانیکی خود به حرکت درون سیستم می‌پردازند. به عبارت دیگر تمامی این قطارها از نظر الکتریکی در یک سیستم درهم‌تنیده و مرتبط باهم کار می‌کنند. قبل از در نظر گرفتن ترمزهای تجدید پذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی لازم است بدانیم که انرژی قطار صرف غلبه بر چه نیروهای مقاومی می‌شود. مدلسازی سیستم مکانیکی توان موردنیاز قطارها و همچنین مکان آن‌ها را در هر لحظه مشخص می‌کند.

معادلات دیویس و سوئیفت-آرمسترانگ [۱۳]

نیروی مقاوم قطار توسط یک معادله درجه دوم که به معادله دیویس مشهور است مشخص می‌شود:

$$R = A + Bv + Cv^2 \quad (2-3)$$

پارامترهای A و B نشان‌دهنده مقاومت مکانیکی هستند و به جرم قطار وابسته می‌باشند به طوری که در سرعت‌های زیر ۳۰ متر بر ثانیه یا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت این مقاومت فقط به جرم قطار وابسته است. در سرعت‌های بالاتر ترم Cv^2 که وابسته به آئرودینامیک قطار می‌باشد نیز دخیل می‌شود. پارامترهای رابطه (۲-۳) برای محیط‌های داخل تونل و در فضای باز مقادیر متفاوتی هستند. آرمسترانگ و سوئیفت یک سری روش‌های تجربی برای محاسبه مقادیر پارامترهای معادله دیویس انجام دادند. این پارامترها به عوامل مختلفی از جمله طول قطار، فاصله بین واگن‌ها، تعداد واگن‌ها، تعداد موتورها، وزن واگن‌ها و بستگی دارد.

علاوه بر نیروهای اصطکاک ناشی از جرم قطار و آئرویدینامیک که در بالا بحث شد، نیروهای دیگری به عنوان نیروهای مقاوم در حرکت قطارها دخیل هستند. مقاومت شتابی، مقاومت انحنای مسیر و مقاومت گرادیانی از جمله این نیروها هستند. شتاب به شدت وابسته به جرم قطار می باشد حال اینکه مقاومت انحنا وابسته به چرخها، مسیر و ریل دارد.

نیروی گرادیان وابسته به جرم است و می تواند به صورت تابع خطی از آن نشان داده شود:

$$R_{Stop} = mgi \quad (2-4)$$

که در رابطه (۲-۴) m جرم قطار، g عدد شتاب گرانش و i هم برحسب درصد بیان کننده شیب می باشد. برای i یک رابطه جداگانه وجود دارد که از آن محاسبه می شود:

$$i = 100 \tan(\alpha) = 100 \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2-5)$$

که در رابطه (۲-۵)، α زاویه شیب می باشد.

مقاومت انحنا عبارت است از مقاومت اضافه ای که قطار در هنگام پیچش در پیچهای افقی تحمل می کند. مقدار دقیق این مقاومت را نمی توان به راحتی محاسبه کرد. اثر این مقاومت برای قطارها در پیچهایی با شعاع انحنای بزرگتر از ۲۵۰ متر بسیار کم است. رابطه ای که برای محاسبه این مقاومت مورد استفاده قرار می گیرد عبارت است از:

$$r_c = 0.1 \left(\frac{k}{R_c} \right) \quad (2-6)$$

که در رابطه (۲-۶) r_c مقاومت انحنا، k یک پارامتر بدون یکا است که وابسته به طراحی قطار است و بین مقادیر ۵۰۰ تا ۱۲۰۰ متغیر است و نهایتاً R_c شعاع انحنای پیچ در صفحه افقی می باشد. در حالت کلی مقدار r_c را در محاسبات برابر ۰/۰۴ درصد در نظر می گیرند. و در سرعت های خیلی کم نزدیک به ۵ کیلومتر بر ساعت این مقدار به ۰/۰۵ درصد نزدیک تر می شود.

برای حل مسئله میزان مصرف انرژی یک قطار و همچنین به دست آوردن بهره یک سیستم ضروری است که بعد دینامیکی بار و یا همان قطار را نیز در نظر بگیریم. قطارها با تصمیم گیری مرکز

کنترل در بازه‌های زمانی مختلف با سرعت‌های متفاوت شروع به حرکت می‌کنند یا برای مدتی می‌ایستند. اگر هیچ‌گونه اغتشاشی را در نظر نگیریم و سیستم را ایده آل فرض کنیم، می‌توانیم نیروی نهایی سیستم را با استفاده از نیروی شتابی و نیروی مقاوم به دست آوریم:

$$F_t - R_t = M_{eq}a \quad (2-7)$$

که در رابطه (۲-۷)، F_t نیروی کشش برحسب نیوتن، R_t مقاومت کلی در مقابل حرکت برحسب نیوتن، M_{eq} جرم کل سیستم قطار برحسب کیلوگرم و a شتاب حرکت برحسب متر بر مجذور ثانیه می‌باشد. مقاومت کلی سیستم را می‌توان از مجموع مقاومت‌های بحث شده در روابط (۲-۲) تا (۲-۶) به دست آورد. برای شتاب حرکت باید با توجه به جدول زمان‌بندی قطارها شتاب را در لحظه و مکان موردنظر به دست آورد.

تاکنون موفق به محاسبه نیروهای مکانیکی تولیدی موتور قطار شده‌ایم. حال برای به دست آوردن توان لازم داریم:

$$P_{mech} = P_{motor} = F_{motor} \cdot v \quad (2-8)$$

می‌دانیم:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2-9)$$

در حالت شتابگیری به موتور نیروی الکتریکی داده و از آن نیروی مکانیکی دریافت می‌شود [۱۴].

لذا نیروی الکتریکی که در این حالت باید به موتور داده شود عبارت است از:

$$P_{elec} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{P_{motor}}{\eta} \quad (2-10)$$

$$\eta = \eta_{gearbox} \cdot \eta_{drive} \cdot \eta_{motor} \quad (2-11)$$

در رابطه (۲-۱۱)، $\eta_{gearbox}$ بازده جعبه‌دنده موتور قطار، η_{drive} بازده درایو موتور و η_{motor} بازده خود موتور می‌باشد.

در مقابل در حالت ترمزی انرژی الکتریکی به شبکه بازمی‌گردد و به عبارتی موتور نقش ژنراتور را بازی می‌کند:

$$P_{elec} = P_{mech} \cdot \eta \quad (2-12)$$

با محاسبه توان موردنیاز موتور برای حرکت قطار محاسبات مکانیکی به پایان می‌رسد و اکنون باید سراغ مدل کردن شبکه الکتریکی قطار رفت.

۲-۲-۲ مدل الکتریکی اجزاء شبکه

بدون در نظر گرفتن شبکه بالادستی می‌توان گفت شبکه مترو متشکل از تعدادی پست، هادی‌های انتقال و قطارها می‌باشد. در ادامه تمامی این عناصر را مدل شده است [۱۸]–[۱۵], [۳].

پست‌های تغذیه

برای تغذیه سیستم DC قطار شهری ابتدا برق ولتاژ متوسط از شبکه AC شهری گرفته شده و در پست‌های مخصوص با استفاده از ترانسفورماتورها ابتدا سطح ولتاژ به سطح موردنظر برای مصرف تبدیل می‌شود سپس توسط مبدل‌های یکسو ساز تبدیل به برق DC می‌شود. در این مسیر به دلیل امپدانس ترانسفورماتور و افت ولتاژ روی دیودهای یکسو ساز و همچنین امکان رخداد پدیده همپوشانی مقدار افت ولتاژ نسبت به حالت ایده آل رخ می‌دهد که این افت ولتاژها را مجموعاً با یک مقاومت مدل می‌کنند. شمای کلی پست الکتریکی موجود در شبکه کشش در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.

در شکل ۲-۱ همان ولتاژ تغذیه نامی DC و R_{sub} مدل کننده افت ولتاژها ناشی از ترانس و دیود و سلف نیز برای مدل کردن همپوشانی است و دیود نیز برای تأکید بر یک‌طرفه بودن پست‌ها به کار برده شده است.



شکل ۲ - ۱: مدل پست تغذیه [۱۸]

مدلسازی خطوط

همان‌طور که برای خطوط عادی انتقال قدرت توسط معادلات زیر محاسبه می‌شد داریم [۱۹]:

$$L_{line} = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r} \right) \times 10^{-7} H/m \quad (2-13)$$

$$C_{line} = \frac{2 \times \pi \epsilon_r}{\ln \frac{D}{r}} F/m \quad (2-14)$$

$$r_{line} = \frac{\rho_{cu}}{\pi r^2}$$

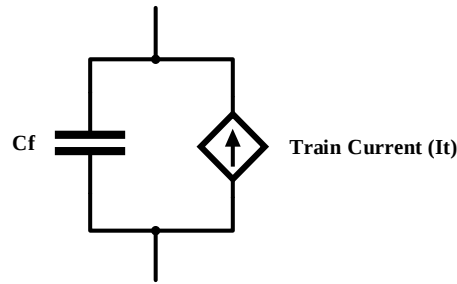
در روابط فوق D فاصله بین خطوط رفت و برگشت (خطوط بالاسری و ریل) و r شعاع هادی‌هاست. با توجه به اینکه در سیستم مترو نتایج در حالت دائمی برای ما مدنظر است می‌توان از سلف و خازن چشم‌پوشی کرد و خط را تنها با مقاومت مدل کرد.

مدل قطار

در قسمت مدلسازی مکانیکی نهایتاً توانی را که قطار برای غلبه بر نیروهای مقاوم و رسیدن به حداکثر سرعت خود نیاز دارد را محاسبه کردیم. حال می‌توان قطار را همانند سایر بارها به صورت یک منبع جریان کنترل شده در نظر گرفت. چراکه در طول حرکت قطار در خط به دلیل افت ولتاژ روی هادی‌ها ولتاژ دو سر قطار و نهایتاً جریان آن ثابت نخواهد بود:

$$I_{tr} = \frac{P_{motor}}{V_{tr}} \quad (2-15)$$

خازن موازی شده با قطار C_f به این دلیل است که در فرآیند ترمزی حالتی وجود دارد که پست‌ها معکوس هستند و همچنین مقاومت ترمزی به دلیل شرط ولتاژی گذاشته شده برای آن داخل مدار نیست لذا باید مسیری برای شارش جریان به وجود آید به همین دلیل از این خازن استفاده می‌کنیم. در رابطه فوق V_{tr} ولتاژ دو سر قطار و برحسب ولت و I_{tr} جریان قطار برحسب آمپر می باشد.



شکل ۲-۲: مدل الکتریکی قطار [۱۴]

در این فصل انواع سیستم‌های تغذیه قطارها مورد مطالعه قرار گرفت و نهایتاً مدل الکتریکی و مکانیکی حرکت قطار ارائه شد. اکنون تمام عناصر الکتریکی موجود در شبکه ریلی الکتریکی و همچنین حرکت مکانیکی قطار مدلسازی شده و امکان شبیه‌سازی و تحلیل بر روی این مدل‌ها فراهم شده است.

۲-۳ روش‌های کاهش مصرف انرژی در شبکه قطار شهری

از سال ۱۹۹۰ تحقیقات فراوانی پیرامون افزایش بازده انرژی در سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی انجام شد. به عنوان نتیجه و به صورت خلاصه می‌توان دو راهکار زیر را به عنوان روش‌های افزایش بازده در سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی معرفی کرد [۱].

۱. بهینه‌سازی در طراحی و تعیین ظرفیت سیستم‌های تغذیه (مکان پست‌های تغذیه، ساختار خطوط تغذیه و...)

۲. کنترل ترافیک و کارکرد واحد هر قطار (نحوه عملکرد قطار در طی حرکت در سرعت و شتابگیری) و کل قطارها (جداول زمانی، هماهنگی حرکت و توقف قطارها)

بنابراین می‌توان گفت با توجه به سیستم‌های تغذیه و زمان‌بندی حرکت قطارها سه راهکار برای استفاده از این انرژی وجود دارد:

۱. تغذیه سایر قطارهایی که در اطراف قطار در حال ترمز می‌باشند.
۲. ذخیره‌سازی در ذخیره‌سازهای قابل حمل و یا ساکن.
۳. بازگردانی به شبکه بالادستی (شبکه شهری) که نیازمند استفاده از پست‌های تغذیه دو جهته می‌باشد.

قسمتی از موارد بیان شده قابل‌دستیابی به‌وسیله مدیریت زمان حرکت قطارها یا همان جداول

زمان‌بندی می‌باشد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد توسط جداول زمان‌بندی بهینه که در آن‌ها فرآیند ترمزی و شتابگیری قطارها هماهنگ شده‌اند می‌توان حدود ۱۴٪ کاهش مصرف انرژی داشت [۲]. علاوه بر کاهش مصرف انرژی، کاهش اوج توان مصرفی نیز از جمله مزایای جداول زمان‌بندی بهینه می‌باشد. پیاده‌سازی این جداول نیازمند استفاده از سیستم کنترلی قوی جهت برنامه‌ریزی مجدد و سریع جداول در صورت رخداد حوادث پیش‌بینی‌نشده، و همچنین استفاده از رانندگان باتجربه جهت انتخاب زمان ترمز و شتابگیری مناسب می‌باشد. در مقایسه با استفاده از سایر روش‌های کاهش مصرف انرژی مثل ذخیره‌سازها و پست‌های دو جهته، این روش سرمایه‌گذاری به مراتب کمتری نیاز دارد. به همین دلیل همواره بهینه‌سازی جداول زمان‌بندی حرکت قطارها باید به عنوان گام اولیه در بهره‌برداری از انرژی ترمزهای بازیافتی تلقی شود.

حال با فرض عدم استفاده از پست‌های دوطرفه و سیستم‌های ذخیره‌ساز قابل حمل (با توجه به معضل فضای اشغال شده توسط آن‌ها و وزن آن‌ها) تنها راه بهره‌برداری از انرژی ترمزی استفاده آن توسط سایر قطارها می‌باشد. در این مورد نیز با علم بر اتفاقات پیش‌بینی‌نشده و احتمال زیاد تغییر جداول زمان‌بندی قطارها، درصد کمی از انرژی بازیافتی مصرف و بقیه این انرژی در مقاومت‌های ترمزی تلف خواهد شد. اتلاف این انرژی موجب افزایش دمای مقاومت‌ها و نهایتاً محیط تونل‌های مترو خواهد شد؛ بخصوص برای خط‌هایی با تعداد قطار و ایستگاه‌های زیاد تلفات انرژی در مقاومت‌های ترمزی موجب افزایش دمای محیط تونل‌ها خواهد شد. در ادامه برای تهویه هوا استفاده از سیستم‌های تهویه هوا با توان نسبتاً بالاتری نیازمند است (در مقایسه با حالتی که از سیستم‌های ترمز بازیافتی استفاده نمی‌شد). لذا عملاً هدف اصلی استفاده از ترمزهای بازیافتی تنها با استفاده از روش جداول زمان‌بندی محقق نشده و نیازمند گام‌های بعدی نیز هست.

به همین دلیل لزوم استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز ساکن در سیستم‌های مترو برای ذخیره‌سازی انرژی بازیافتی ترمزی در گام دوم مطرح می‌شود. با تجمع علم الکترونیک قدرت و پیشرفت‌های حاصل در ادوات ذخیره‌ساز انرژی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به عنوان یکی از روش‌های استفاده از انرژی

ترمزی بازیافتی مطرح می‌شود. باوجود پیشرفت‌های زیاد در زمینه سیستم‌های ذخیره‌ساز مثل افزایش چگالی انرژی و چگالی توان سیستم‌ها و همچنین افزایش طول عمر آن‌ها امروزه می‌توان با استفاده از این سیستم‌ها بازده انرژی در شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی را بهبود بخشید. به‌علاوه استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز ساکن از مزایای قابل‌توجهی برخوردارند، ازجمله:

۱. در صورت به وجود آمدن مشکل برای پست‌های تغذیه اصلی، قطار می‌تواند با تکیه بر انرژی ذخیره شده در آن‌ها تا نزدیک‌ترین ایستگاه حرکت کند. که باعث افزایش امنیت سیستم می‌شود.

۲. کاهش بیشینه توان (پیک سایی) با استفاده از انرژی ذخیره شده.

۳. بهبود پروفایل ولتاژ با کاهش تلفات و همچنین به همراه داشتن مزایای کیفیت توان برای رسیدن به صرفه‌جویی در مصرف انرژی واقعی و همچنین افزایش بازده سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی، به طراحی دقیق سیستم‌های ذخیره‌ساز بر مبنای شبیه‌سازی‌های انجام شده روی مدل‌ها و نمونه‌ها نیاز است.

در حالت دیگر که استفاده از پست‌های دو جهته و یا برگشت‌پذیر نام دارند، انرژی حاصل از ترمز بازیافتی می‌تواند به شبکه بالادستی برگشت کند. برخلاف پست‌های DC که دارای دیود هستند و جهت شارش توان یک‌طرفه است در پست‌های دو جهته با استفاده از اینورترها امکان ایجاد شارش توان از شبکه بالادستی به شبکه مترو و برعکس موجود می‌باشد. حال از این انرژی می‌توان هم در تجهیزات داخلی ایستگاه‌ها نظیر پله‌برقی، آسانسور، تهویه و روشنایی بهره برد و یا آن را به شبکه شهری فروخت. در مقایسه با سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در صورت استفاده از پست‌های دو جهته در مکان‌های بهینه تلفات تبدیل انرژی در این نوع پست‌ها پایین‌تر می‌باشد. همچنین به دلیل نبود محدودیت برای دریافت انرژی از طرف شبکه بالادستی (عدم وجود حد بالای ظرفیت) امکان استفاده از تمام انرژی ترمزی موجود می‌باشد. در مقابل در صورت استفاده از این پست‌ها حرکت قطار در صورت نبود تغذیه (کاری که توسط ذخیره‌سازها تا رساندن قطار به نزدیک‌ترین ایستگاه ممکن بود) و همچنین تثبیت ولتاژ و پیک سایی ممکن نمی‌باشد. به‌علاوه سرمایه‌گذاری برای استفاده از این فناوری نسبت به سایر روش‌ها

گران‌تر و در مقابل کاهش انرژی به نسبت کمتر است؛ انرژی صرفه‌جویی شده بین ۷ تا ۱۱ درصد انرژی کل مصرفی شبکه می‌باشد [۲].

فصل ۳: روش‌ها و تجهیزات ذخیره‌ساز

انرژی و پیشینه کنترل آن‌ها

تلاقی نیازهای مشترک صنعت، جامعه و اقتصاد رویکرد جدیدی در سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی پدید آورده است. محدودیت دسترسی به منابع انرژی، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و توجه روزافزون به محیط زیست کره زمین سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی را به عنوان راه‌حل مناسبی در کاربردهایی مانند شبکه برق، صنعت و حمل و نقل تبدیل کرده است. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به دلیل اهمیت انرژی الکتریکی در جامعه ما توجهات زیادی را به خود اختصاص داده‌اند [۲۱]، [۲۰]، [۹].

در دهه‌های اخیر به دلیل تغییرات عمده در صنایع جهانی و اقتصاد و همچنین نیازمندی‌های جدید به انرژی از یک‌سو، و تأثیرات زیست محیطی از سمت دیگر سیستم‌های الکتریکی ما نیز در معرض تغییراتی قرار گرفته‌اند. درواقع مفهوم سیستم الکتریکی به‌نوعی در حال تغییر است، به‌طوری‌که مفاهیم تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی در حال عوض شدن و بعضاً در مواردی مرزهای بین آن‌ها در حال از بین رفتن است. عمده تغییرات اصلی در راستای افزایش پویایی سیستم و پراکنده شدن تولید به‌ویژه از طریق انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشد [۲۳]، [۲۲].

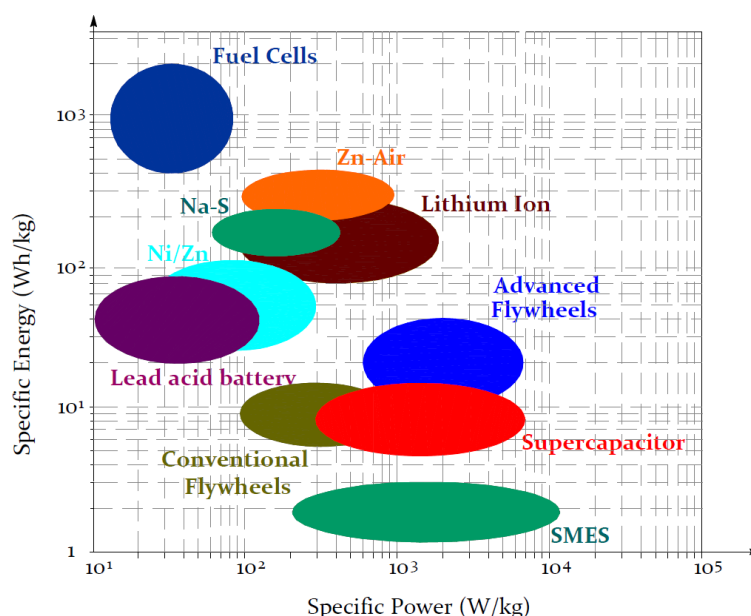
معرفی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی یکی از بهترین راه‌حل‌ها جهت رفع نیازمندی‌های موجود در سیستم‌های نوین الکتریکی را ارائه نموده است. در دسترس بودن سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی یک نیاز تاریخی برای جداسازی تولید از مصرف در سیستم‌های الکتریکی می‌باشد. با تغییرات جدی در حوزه تولید به‌واسطه حضور انرژی‌های تجدید پذیر، امکان کاهش هزینه ردیابی اوج تقاضای شبکه و سرمایه‌گذاری‌های کلان برای قابلیت اطمینان سیستم از یک‌سو، و پتانسیل بازار وسایل نقلیه الکتریکی از سوی دیگر توجهات زیادی را به سمت سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی سوق داده است.

۱-۳ روش‌ها و تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی

برای داشتن درک بهتر از فناوری ذخیره‌سازی انرژی در شکل ۳ - ۱: یک منحنی راگون^۱ [۲۴] ارائه شده است که اکثر سیستم‌های ذخیره‌ساز موردتوجه امروزی را در دو معیار چگالی توان و چگالی انرژی مقایسه کرده است. شایان ذکر است که این نمودار بهترین سیستم ذخیره‌ساز را نشان نمی‌دهد بلکه با استفاده از این نمودار و با توجه به کاربرد مدنظر می‌توان سیستم ذخیره‌ساز مناسب را انتخاب کرد. به‌علاوه کارکرد سیستم ذخیره‌ساز بایستی در رابطه با طول عمر مفید، بازده، دمای کاری، یکپارچگی سیستم و هزینه نصب موردبررسی قرار گیرد.

۱-۱-۳ چرخ طیار^۲

چرخ طیارها سیستم‌های الکترومکانیکی هستند که قابلیت ذخیره‌سازی انرژی جنبشی را به‌وسیله چرخش روتور خود دارا می‌باشند. جهت تبادل این انرژی با شبکه الکتریکی یک موتور/ ژنراتور توسط



شکل ۳ - ۱: منحنی راگون برای انواع ادوات ذخیره‌ساز [۲۴]

^۱ Ragone Plot

^۲ Flywheel

یک مبدل قدرت به چرخ طیار کوپل می‌شود تا بازه کاری ماشین را افزایش دهد. در طول مدت شارژ الکتریسیته تبدیل به انرژی جنبشی شده و سرعت روتور افزایش می‌یابد؛ در صورتی که در هنگام دشارژ عکس این اتفاق رخ می‌دهد.

یک نمونه از این سیستم در شکل ۳-۲ آورده شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود برای افزایش بازده کل سیستم و همچنین کاهش نویز از یاتاقان‌های مغناطیسی استفاده می‌شود [۲۵]. در طراحی سیستم چرخ طیار با توجه به کاربرد مدنظر دو نوع رویکرد وجود دارد؛ در حالت اول با بالا بردن قطر روتور که عموماً از جنس فولاد است اینرسی روتور را افزایش می‌دهند در این حالت سرعت چرخش روتور در حدود ۱۰ هزار دور در دقیقه می‌باشد. این نوع طراحی برای استفاده به عنوان^۱ UPS^۲ ها می‌باشد که از معایب آن حجم و وزن بالا می‌باشد. در نوع دوم از روتور های با قطر کوچک در سرعت‌های بالا تا حدود ۱۰۰ هزار دور در دقیقه استفاده می‌شود. در این حالت سیستم از نظر حجم کوچک شده و قابل استفاده برای کاربردهای مدولار از جمله در کاربردهای مخابراتی می‌باشد.



شکل ۳ - ۲: ساختار چرخ طیار [۲۵]

^۱ - Round per Minute (RPM)

^۲ - Uninterruptible Power Supply

با توجه به پاسخ سریع این سیستم در مقابل تغییرات که حدود ۴ میلی ثانیه می‌باشد و همچنین بازدهی حدود ۹۳ درصد و طول عمر تخمینی ۲۰ سال، چنین سیستم‌هایی کاربرد فراوانی در اهداف کیفیت توان، سرویس‌های تثبیت‌کننده و سیستم‌های بازیابی انرژی در شبکه حمل و نقل دارا می‌باشند.

۳-۱-۲ ذخیره‌ساز انرژی ابرسانا مغناطیسی (SMES)

در سال ۱۹۷۱ نخستین بار SMES های مورد استفاده امروزی اختراع شد. این سیستم شامل یک کوئل ابرسانا بود که توسط یک مبدل واسط شارژ و دشارژ می‌شد. انرژی به صورت انرژی مغناطیسی به وسیله ابرساناهای سرامیکی با مقاومت بسیار کم و در دمای بسیار پایین (در حدود چند کلوین تا حداکثر ۱۳۴ کلوین) ذخیره می‌شد. به این روش تلفات انرژی در مقاومت به شدت کاهش خواهد یافت، به جز میزان انرژی مورد استفاده در سیستم خنک‌کننده که برای تثبیت فاز ابرسانا استفاده می‌شود.

تجهیزات SMES در رنج توانی ۱ تا ۱۰ کیلووات بر کیلوگرم و انرژی ۱ تا ۲ وات ساعت بر کیلوگرم برای کاربردهای ساکن در شبکه به منظور بهبود کیفیت توان توسط کنترل ولتاژ یا فرکانس، پایداری شبکه، حفاظت افت ولتاژ^۲، ذخیره گردان و تسطیح بار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۵].

۳-۱-۳ باتری‌های الکتروشیمیایی

یکی از مزایای اصلی باتری‌های الکتروشیمیایی امکان شارژ مجدد و تبدیل انرژی الکتریکی به شیمیایی بدون هیچ گونه سیستم اضافه می‌باشد. امروزه تجهیزات فراوانی در صنایع و زندگی روزمره به باتری‌ها وابسته می‌باشد. فناوری‌های مطرح در باتری‌های صنعتی عبارتند از:

^۱ Superconducting Magnetic Energy Storage

^۲ Voltage Sag

جدول (۳-۱) نماد انواع باتری‌ها

نماد	نام فناوری
Pb-H ₂ SO ₄	باتری‌های سرب اسید ^۱
Nip-Cd	باتری‌های نیکل - کادمیم ^۲
Ni-MH	باتری‌های نیکل - هیدروکسید فلزات ^۳
Na-S	باتری‌های سدیم - سولفور ^۴
Na-NiCl ₂	باتری‌های Z.E.B.R.A
Li-ion	باتری‌های لیتیوم یون ^۵
VRB	باتری‌های ردوکس ^۶ و وانادیوم
Zn-Br	باتری‌های روی - بروم ^۸

علی‌رغم پیشرفت‌های حاصل‌شده تاکنون، هنوز مطالعه بر روی مواردی چون جنس آند و کاتد، شکل کلی باتری، اندازه‌گیری کمیت‌های آن و... ادامه دارد.

امروزه محققان تمرکز ویژه‌ای بر روی فناوری لیتیوم یون دارند؛ چراکه این نوع از باتری‌ها دارای چگالی انرژی بالا، دشارژ خودی کم، طول عمر نسبتاً زیاد و بازه دمای کاری گسترده می‌باشند [۲۵].

۳-۱-۴ ابر خازن‌ها

تفاوت فاحشی میان ابر خازن‌ها و خازن‌های الکترولیتی موجود می‌باشد. ابر خازن‌ها از دید

^۱ - Lead Acid Battery

^۲ - Nickel-Cadmium battery

^۳ - Nickel- Metal Hydride Battery

^۴ - Sodium- Sulfur Battery

^۵ - Lithium ion Battery

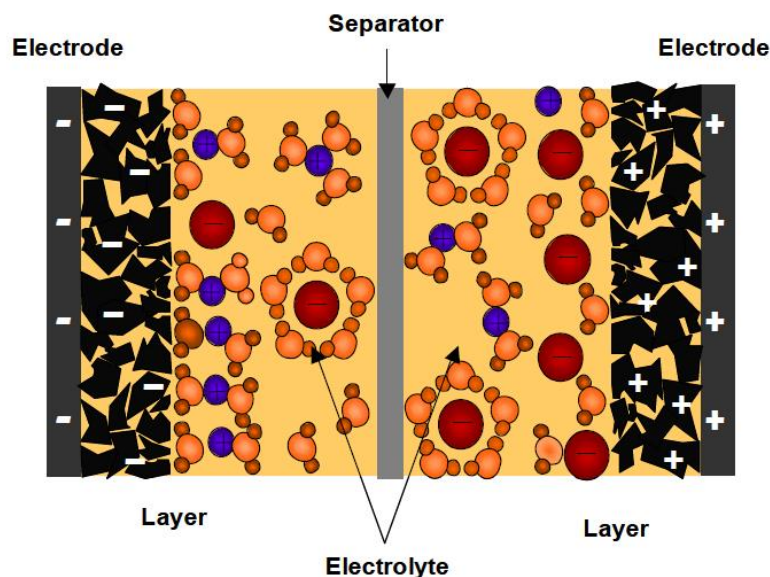
^۶ - واکنش اکسایش کاهش است که منجر به تغییر عدد اکسایش عناصر می‌شود.

^۷ - Vanadium Redox Battery

^۸ - Zinc- Bromine Battery

ساختمان، شبیه به باتری‌های الکتروشیمیایی هستند که در آن‌ها دو الکترود به صورت غوطه‌ور در الکترولیت هستند و توسط یک لایه مخصوص^۱ که تنها اجازه عبور یون‌ها (و نه الکترون‌ها) را می‌دهد از هم جدا شده‌اند. به طور خاص، الکترودها فویل‌های آلومینیومی هستند که روی آن‌ها از کربن اکتیو پوشیده شده است. این الکترودها درون محلول الکترولیتی غوطه‌ور هستند به طور مثال برای محلول می‌توان از استونیتریل استفاده کرد. آنیون‌ها و کاتیون‌های محلول به ترتیب به الکترودهای مثبت و منفی جذب می‌شوند. این جداکننده نقش بسیار مهمی در جلوگیری از اتصال مستقیم دو الکترود به هم دارد.

تفاوت اصلی ابر خازن‌ها با باتری‌های الکتروشیمیایی این است که در ابر خازن‌ها هیچ واکنش الکتروشیمیایی و تغییر فازی رخ نمی‌دهد و یا تعداد این دست واکنش‌ها به شدت کم می‌باشد. و تمام انرژی با استفاده از جذب سطحی یون‌های الکترولیت، در میدان الکترواستاتیکی ذخیره شده است. به همین دلیل فرآیند به شدت برگشت پذیر است و سیکل شارژ و دشارژ می‌تواند مرتباً و بدون محدودیت انجام شود. هر سطح الکترود و الکترولیت یک خازن تشکیل می‌دهد بنابراین کل سیستم نشان‌دهنده



شکل ۳-۳: ساختار داخلی ابر خازن [۱۹]

^۱ - Membrane

دو خازن سری می‌باشد.

۲-۳ طبقه‌بندی ابر خازن‌ها

رفتار دینامیکی این خازن‌ها تا حد زیادی وابسته به حرکت یون‌ها در الکترولیت و تخلخل سطح الکتروود آن‌ها می‌باشد. از آنجایی که فرآیند تجمع بارها یک فرآیند سطحی است، جنس و سطح الکتروود تأثیر به سزایی در عملکرد ابر خازن‌ها دارد.

همانند الکتروود، الکترولیت نیز نقش به سزایی در ماهیت ابر خازن دارد چراکه ماکزیمم ولتاژ مجاز ابر خازن همان ولتاژ تجزیه دی‌الکتریک می‌باشد. بنابراین چگالی انرژی نیز وابسته به الکترولیت می‌باشد. همچنین چگالی توان وابسته به مقاومت سری با خازن در مدل آن می‌باشد که آن هم به هدایت الکتریکی الکترولیت وابسته است. از دیگر رو چون فرآیند ذخیره‌سازی در ابر خازن‌ها یک فرآیند در سطح الکتروودها می‌باشد، باید اندازه یون‌های الکترولیت با اندازه خلل و فرج موجود در سطح الکتروود همخوانی داشته باشد تا فرآیند به صورت بهینه رخ دهد.

جداکننده موجود در بین دو الکتروود برای جلوگیری از اتصال مستقیم الکتروودها می‌باشد و ضخامت آن ممکن است به چند صدم میلی‌متر نیز برسد. درون آن باید منافذی و جود داشته باشد تا یون‌ها بتواند از داخل آن‌ها عبور کنند در غیر این صورت مقاومت سری با خازن افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که این جداکننده باید از نظر شیمیایی نسبت به محلول الکترولیت بی‌اثر باشد.

در جدول ۲-۳ انواع الکتروودها و الکترولیت‌ها آورده شده است:

جدول (۳-۲) انواع الکترولیت‌ها و الکترودهای سازنده ابر خازن‌ها

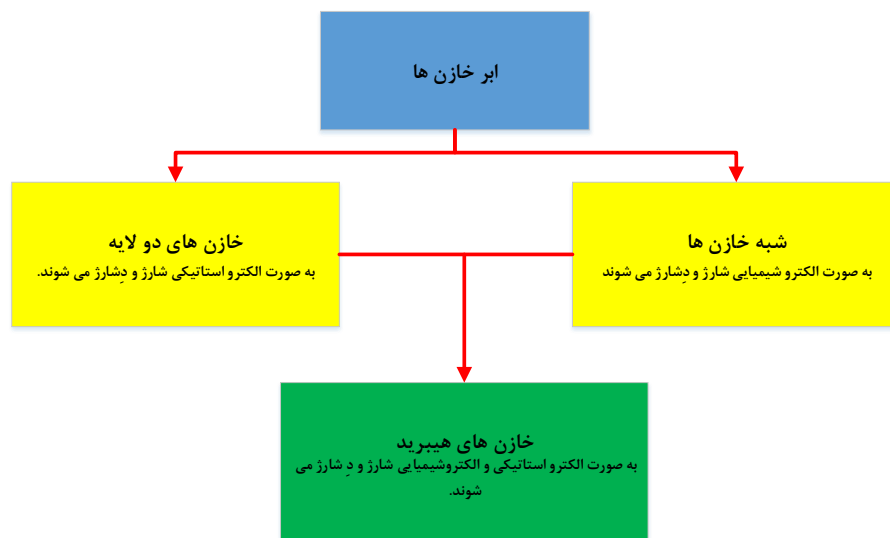
جنس الکترود	جنس الکترولیت
کربن اکتیو: بیشترین استفاده را به عنوان الکترود دارد. ارزان با سطح بسیار بالا نوع اول متشکل از پودر و پارچه مانند نوع دوم با ساختار نانو و گرافن مانند	الکترولیت‌های ارگانیک: پرکاربردترین نوع در مصارف تجاری، ولتاژ کاری بالا حدود ۲/۵ تا ۳ ولت (با خالص سازی امکان رسیدن به ولتاژهای بالای ۳/۵ ولت نیز فراهم است) امروزه در کاربرد وسیع از استونیتریل CH_3CN و تترااتیل آمونیوم-تترا فلور بورات $TEATFB$ استفاده می‌شود اما به دلیل سمی بودن این ترکیبات در آینده حرکت به سمت محلول‌های جایگزین مثل پروپیلن کربنات $C_4H_8O_3$ می‌باشد.
اکسید فلزات: به دلیل وجود برخی ریدوکس ها زیاد مناسب نیستند. معمول ترین آن‌ها اکسید رتنیوم RuO_2 و اکسید ایریدیوم IrO_2 و سایر فلزات می‌باشند. این الکترودها دارای هدایت الکتریکی بسیار بالا و سطح مناسب هستند.	الکترولیت‌های آب پوشیده: امکان رسیدن به ظرفیت‌های بالا و مقاومت سری کوچکتر، در مقابل کاهش ولتاژ مجاز سلول به ۱ ولت. بیشترین محلول‌های مورد استفاده سولفوریک اسید H_2SO_4 و پتاسیوم هیدروکسید KOH می‌باشند.
الکترودهای پلیمری: دارای قیمت ارزانی هستند. در مقایسه با اکسید فلزات دارای ظرفیت بالاتری هستند.	الکترولیت‌های جامد: ترکیب پلیمرها با نمک‌های مناسب هدایت بالایی را نشان می‌دهد. استفاده از پلیمرها باعث کاهش خوردگی و کاهش حجم کلی می‌شود. تنها مشکل استفاده از این نوع الکترولیت قیمت بالای آن می‌باشد.

ابر خازن‌ها بر اساس موارد مطرح شده در بالا و همچنین مکانیزم‌های الکتروشیمیایی طبقه‌بندی

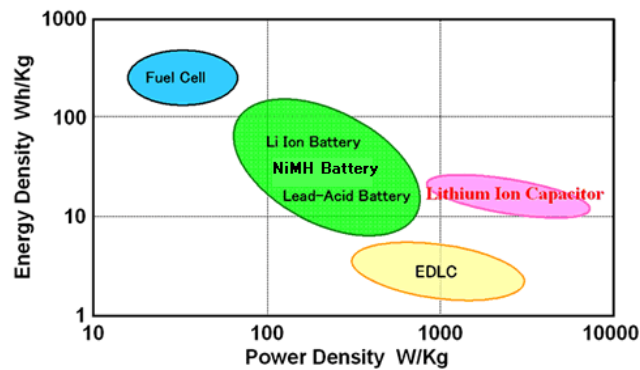
می‌شوند. جدیدترین نوع ابر خازن‌ها که ابر خازن‌های لیتیوم یونی می‌باشند در دسته هیبرید قرار می‌گیرند.

حال که اکثر ذخیره‌سازهای معمول را شناخته‌ایم، می‌توان با توجه به نیازهای سیستم به انتخاب

ذخیره‌ساز مناسب از میان فناوری‌های یاد شده پرداخت. باوجود تعدد این فناوری‌ها نیازمند ابزاری برای



شکل ۳ - ۴: طبقه‌بندی ابر خازن‌ها



شکل ۳ - ۵: منحنی راگون [۲۴]

تشخیص فناوری متناسب با نیاز سیستم می‌باشیم و همان‌طور که در بخش قبل عنوان شد منحنی راگون به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین ابزارها در دسترس می‌باشد. تاکنون سیستم‌های ذخیره‌ساز مرسوم و مورد استفاده در شبکه ریلی الکتریکی از نوع باتری، چرخ طیار و یا ابر خازن بوده‌اند. در این پایان‌نامه با توجه به ماهیت الکتریکی تحقیق انتخاب‌ها از بین سیستم‌هایی چون باتری و ابر خازن خواهد بود. به همین دلیل نوع دیگری از منحنی راگون را در شکل ۳-۵ مشاهده می‌کنید که به مقایسه فناوری‌های مورد نظر پرداخته است.

یکی از فاکتورهای اصلی شبکه حمل و نقل ریلی، نیاز به پاسخ سریع سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد. به این معنا که به دلیل مدت زمان کوتاه فرآیند ترمزی و میزان زیاد انرژی تخلیه شده در این بازه، برای داشتن بازده حداکثری نیازمند سیستمی با چگالی توان بالا می‌باشیم. چگالی توان پایین یکی از نقاط ضعف باتری‌ها می‌باشد به‌طوری‌که در بهترین حالت شارژ آن‌ها در افق دقیقه انجام می‌پذیرد حال آنکه کل فرآیند ترمزی قطار عموماً زیر ۱ دقیقه است. بنابراین رویکرد بهره‌برداران از شبکه‌های ریلی الکتریکی به‌واسطه داشتن چگالی انرژی و همچنین چگالی توان بالا به سمت ابر خازن‌ها و بخصوص ابر خازن‌های لیتیوم یونی می‌باشد.

در بین سیستم‌های ذخیره‌ساز عنوان شده تاکنون ابر خازن‌ها یا خازن‌های دولایه الکتریکی (EDLC) به نسبت سایر ذخیره‌سازها به دلیل داشتن چگالی توان بالا مناسب برای پاسخ‌های سریع

^۱ - Electrical Double Layer Capacitor

در مواقع اختلاف بین بار تقاضا و موجودی شبکه می‌باشند. با این حال ابرخازن‌های دو لایه مشکلاتی چون ولتاژ کاری پایین (۲,۵ تا ۲,۸ ولت) و همچنین دشارژ خودی بالا (که مانع نگهداری انرژی به مدت طولانی می‌شود) دارند [۲۶]. این معایب و همچنین اقبال جهانی در استفاده از ابر خازن‌ها باعث گسترش تحقیقات و در نتیجه دستیابی به نوع جدید از ابر خازن‌ها شده است. این ابر خازن‌ها که در مقایسه با ابرخازن‌های دو لایه دارای ولتاژ کاری بالاتر و همچنین مقاومت دشارژ خودی کمتر می‌باشند، ابر خازن‌های لیتیوم یون نام دارند. ابر خازن‌های لیتیوم یونی نوعی پیشرفته از ابر خازن‌های هیبرید می‌باشند که مکانیزم لایه‌لایه^۱ شدن باتری‌های لیتیوم یون را با یک کاند ابرخازن دو لایه ترکیب می‌کنند. توضیحات شیمیایی تخصصی مربوط به این ابر خازن‌ها در مرجع مربوطه آورده شده که در اینجا به دلیل عدم ارتباط از بیان آن صرف نظر شده است. به عنوان نتیجه این ابر خازن‌ها به نوعی چگالی انرژی بالای باتری‌های لیتیوم یون و چگالی توان بالای ابر خازن‌های دو لایه را توأمأً به همراه دارند.

در جدول ۳-۳ تعدادی از سیستم‌های ذخیره‌ساز که امروزه در نقاط مختلف جهان در حال سرویس دهی می‌باشند ارائه شده است [۲۰].

^۱ Intercalation

جدول (۳-۳) سیستم‌های ذخیره‌ساز در حال بهره‌برداری در سراسر دنیا [۲۰]

نام برند	شرکت سازنده	سیستم ذخیره‌ساز مورد استفاده	توضیحات
Sitras SES	Siemens	EDLC	مترو مادرید اسپانیا (از سال ۲۰۰۳ در حال سرویس‌دهی) شبکه حمل و نقل عمومی کلن آلمان (از سال ۲۰۰۳ در حال سرویس‌دهی) مترو پکن (از سال ۲۰۰۷ در حال سرویس‌دهی) سرویس ریلی تورنتو (از سال ۲۰۱۱ در حال سرویس‌دهی)
EnerGstor	Bombardier	EDLC	-
NeoGreen Power	Adeno (Adetel Group)	EDLC	تراموا در شهر لیون فرانسه (پروژه آزمایشی)
	Woojin Industrial System	EDLC	سیستم ریلی جینگ سان (پروژه آزمایشی در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹)
Envistore	Envitech Energy (ABB Group)	EDLC	در حال طراحی برای مترو شهر ورشو لهستان حمل و نقل شهر فیلادلفیا (پروژه آزمایشی در سال ۲۰۱۲)
Capapost	Meiden	EDLC	مترو هنگ کنگ
Powerbridge	Piller Power System	Flywheel	هانوفر آلمان (پروژه آزمایشی ۲۰۰۴)
GTR System	Kinetic Traction System	Flywheel	مترو لندن (پروژه آزمایشی سال ۲۰۰۰) سیستم حمل و نقل شهر نیویورک (پروژه آزمایشی سال ۲۰۰۰) مترو لندن (پروژه آزمایشی سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۴)
Regen System	Vycon	Flywheel	مترو لس آنجلس
Gigacell BPS	Kawasaki	NiMH	سیستم حمل و نقل نیویورک (پروژه آزمایشی سال ۲۰۱۰)
B CHOP	Hitachi	Li-ion	سیستم مترو ماکائو
Intensium Max	Saft	Li-ion	سیستم حمل و نقل فیلادلفیا (پروژه آزمایشی ۲۰۱۲)

همان‌طور که در جدول مشهود است و در توضیحات اشاره شد سیستم‌های ابر خازنی امروزه اکثر

بازار ذخیره‌سازها را در دست دارند.

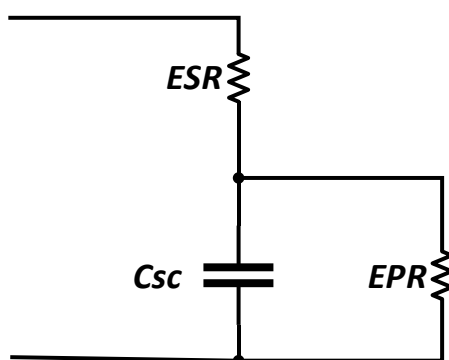
۳-۳ مدل‌سازی ابر خازن‌ها

تاکنون ابر خازن‌های ساخته شده سه ویژگی اساسی دارند که ناشی از خواص ذاتی آن‌ها می‌باشد. این ویژگی‌ها عبارتند از ولتاژ کاری پایین، پارامترهای غیریکنواخت و مشخصه‌های غیرخطی. همچنین کارکرد آن‌ها به عوامل زیادی از جمله دما^۱، SOC، نرخ شارژ و دشارژ، فرکانس و کمیت‌های دیگر وابسته است. با توجه به موارد ذکر شده مدل‌های گوناگونی تاکنون برای ابر خازن‌ها پیشنهاد شده است که برخی به دلیل در بر گرفتن تمامی جزئیات و داشتن دقت بالا بسیار پیچیده و برخی با چشم‌پوشی از دقت و پایین آوردن سطح دقت ساده می‌باشند.

۳-۳-۱ مدل RC سری موازی

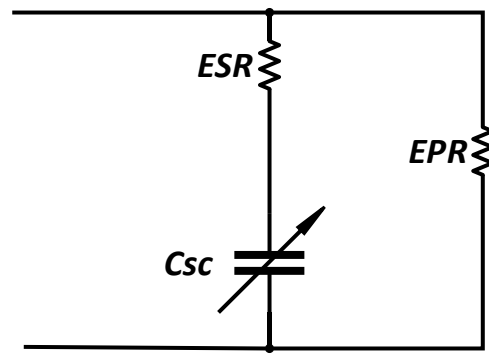
همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود دو مقاومت موجود می‌باشند که مقاومت سری ESR مستقل از ولتاژ ترمینال و حتی نرخ شارژ و دشارژ می‌باشد و نشان دهنده مقاومت داخلی مازول است که با دما رابطه دارد [۱۹].

در شکل زیر EPR نیز مدل کننده جریان نشتی و دشارژ خودی سیستم ذخیره‌ساز در مدت‌های طولانی ذخیره‌سازی می‌باشد. در اتصالات سری EPR به دلیل تقسیم مقاومتی ولتاژ سلول را تحت تأثیر قرار



شکل ۳ - ۶: مدل RC سری موازی ابر خازن [۱۹]

^۱ - State of Charge



شکل ۳ - ۷: مدل اصلاح شده ابر خازن [۱۹]

می‌دهد. این مدل یکی از ساده‌ترین مدل‌های ابر خازن می‌باشد که برای مطالعات دینامیکی مناسب نیست. مقدار EPR نیز طبق رابطه ذیل مشخص می‌شود [۱۹]:

$$I_{tr} = \frac{-t}{\ln(V_f/V.)C_{sc}} \quad (3-1)$$

که در آن $V.$ ولتاژ اولیه، V_f ولتاژ نهایی و C_{sc} ظرفیت نامی می‌باشد.

نوع اصلاح شده این مدل در شکل ۳-۷ آورده شده تا رفتار غیرخطی و وابسته به ولتاژ خازن را با یک خازن غیرخطی مدل کند.

درواقع باید سری با این عنصر یک سلف بسیار کوچک در اندازه‌های چند ده‌م نانو هانری قرار دهیم.

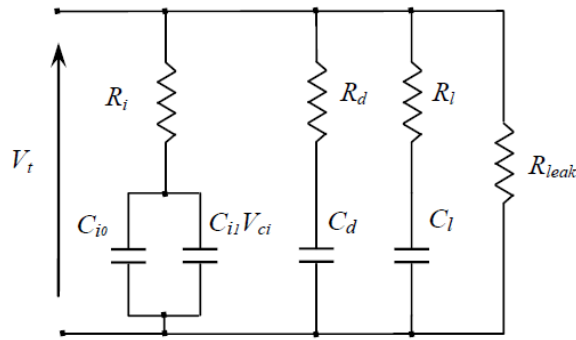
۳-۲-۳ مدل شاخه موازی

در [۱۹] مدلی با سه شاخه موازی که در یکی از آن‌ها یک خازن وابسته به ولتاژ موجود می‌باشد ارائه نمودند. هر شاخه ثابت زمانی متفاوتی دارد. از جمله ویژگی‌های این مدل عبارتند از:

ساختار مدل ساده است تا بتوان آن را در کاربردهای مهندسی به راحتی پیاده‌سازی کرد.

این مدل عملکرد خازن را در گستره فرکانس‌های کم مثل چند ده‌م میلی هرتز تا چند صد میلی هرتز به خوبی مدل می‌کند.

با استفاده از کمیت‌های ترمینال می‌توان به راحتی عناصر مدار را محاسبه کرد.

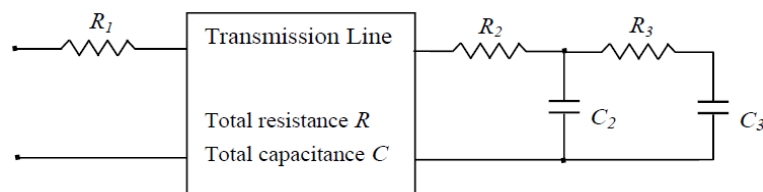


شکل ۳-۸: مدل شاخه موازی ابر خازن [۱۹]

شاخه اول که با یک مقاومت و دو خازن نشان داده شده است نمایانگر رفتار گذرای سریع خازن می‌باشد که در افق چند ثانیه است. در شاخه بعدی رفتار تأخیری نشان داده شده است که در مدت زمان دقیقه رخ می‌دهد و شاخه سوم نشان دهنده رفتار طولانی مدت خازن می‌باشد که در افق ۱۰ دقیقه می‌باشد. در نهایت نیز شاخه مقاومت $R_{leakage}$ مدل کننده جریان نشتی یا همان دشارژ خودی می‌باشد.

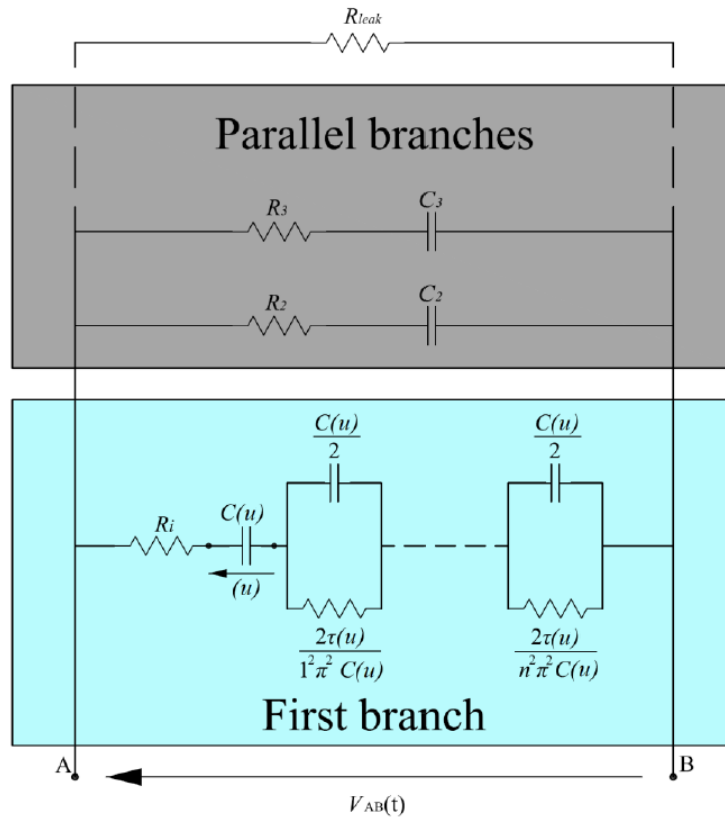
۳-۳-۳ مدل خط انتقال

این مدل با بهره‌گیری از مفاهیم فیزیکی از جمله خواص آند و کاتد به مدل کردن رفتار غیرخطی خازن می‌پردازد. در این مدل شبکه‌ای پیچیده از RC ها وجود دارد که خازن‌ها به صورت غیرخطی می‌باشند. مقاومت‌ها به موارد مختلفی از جمله هدایت الکترودها و الکترولیت وابسته هستند. همان‌طور که در شکل ۳-۹ مشاهده می‌شود مدل دارای پیچیدگی فراوانی می‌باشد. سایر مدل‌ها نیز موجود می‌باشند که به دلیل پیچیدگی در اینجا فقط به بیان شکل و ظاهر آنها می‌پردازیم و از ورود به آنها خودداری می‌کنیم.



شکل ۳-۹: مدل خط انتقال ابر خازن [۱۹]

۴-۳-۳ مدل گستره فرکانسی کامل

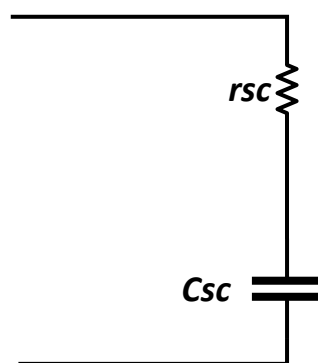


شکل ۳ - ۱۰: مدل گستره فرکانسی ابر خازن [۱۹]

مدل‌های ارائه شده تاکنون برای ابر خازن‌ها ارائه شد. هدف این پایان نامه مطالعه بر روی خطوط حمل و نقل ریلی و شبکه آن‌ها می‌باشد لذا باید دید کدام‌یک از مدل‌های عنوان شده برای رسیدن به این هدف مناسب‌تر می‌باشند.

۵-۳-۳ مدل ارائه شده برای سیستم‌های حمل و نقل

برای استفاده از ابر خازن‌ها به عنوان ذخیره‌ساز انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی تنها عملکرد کوتاه مدت را در نظر می‌گیریم که منجر به استفاده از شاخه اول می‌شود [۱۹]. شاخه اول مدل ترکیب سری یک خازن با مقاومت و یک مدار مرتبه اول است:



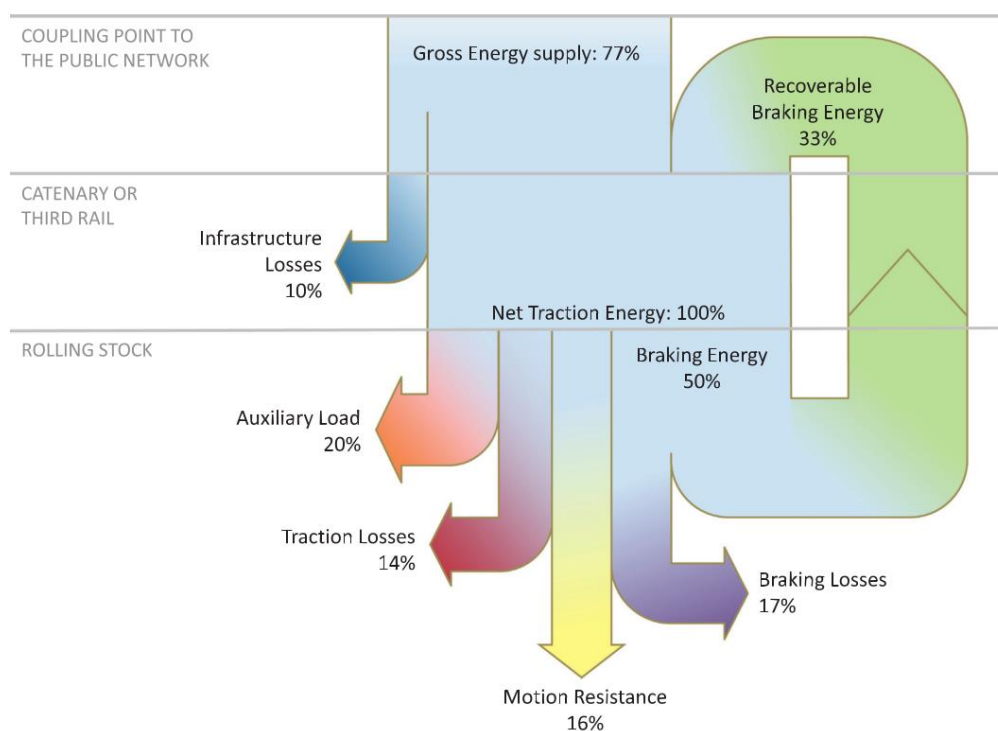
شکل ۳- ۱۱: مدل مناسب برای سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی

مقاومت r_{sc} موجود در این مدل به صورت مستقل از فرکانس و ثابت می‌باشد.

۴-۳ پیشینه کنترل سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

در شکل ۳-۱۴ نمونه‌ای از مصرف انرژی در شبکه ریلی الکتریکی نشان داده شده است. تمام اعداد

و درصدها برگرفته از تحقیقات انجام شده بر روی سیستم‌های مترو اروپا می‌باشد [۲].



شکل ۳- ۱۲: دیاگرام انرژی مصرف شده در شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی [۲]

در شکل ۳-۱۲ مقصود از تلفات زیرساخت‌ها همان تلفات موجود در پست‌ها و طول خط و محل اتصال قطار به شبکه می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۳-۱۲ مشاهده می‌شود، سیستم‌های کمکی^۲ می‌توانند انرژی قابل توجهی مصرف کنند. از جمله سیستم‌های کمکی می‌توان به سیستم‌های تهویه اشاره کرد که مقدار قابل توجهی انرژی به خود اختصاص می‌دهند. مورد دیگری که سهم انرژی زیادی به خود اختصاص داده نیروهای مخالف حرکت می‌باشند که شامل بحث‌های آئودینامیکی و همچنین اصطکاک بین چرخ‌های قطار و ریل‌ها می‌باشد. تلفات موجود در سیستم کشش^۳ خود شامل تلفات مبدل، موتور الکتریکی و سیستم انتقال می‌باشد؛ بنابراین بازده این تجهیزات تأثیر به سزایی در میزان انرژی مصرفی دارد. لذا در آخرین مطالعات بازده مبدل‌ها حدود ۹۸٫۵ تا ۹۹٫۵ و بازده موتورهای القایی مورد استفاده حدود ۹۳ تا ۹۵ درصد می‌باشد.

اما با توجه به شکل ۳-۱۲ می‌توان دریافت که قسمت اعظمی از انرژی در فرآیند ترمزی تلف می‌شود. مقدار انرژی تلف شده در قسمت ترمزی به شدت وابسته به نوع سیستم حمل و نقل می‌باشد اما در حالت کلی می‌توان گفت که این مقدار تقریباً نصف انرژی ورودی به قطار است [۲]. در صورت استفاده از موتور القایی در فرآیند ترمزی می‌توان انرژی را به شبکه برگشت داد و از این انرژی مجدداً استفاده کرد [۲۸]، [۲۷]، [۲۰]، [۶].

درواقع برای کاهش مصرف انرژی در سیستم ریلی الکتریکی روش‌های گوناگونی وجود دارد. با تغییر جدول زمان‌بندی حرکت قطارها بر اساس زمان ترمز و شتابگیری آن‌ها می‌توان به ۱۴ درصد کاهش مصرف انرژی دست یافت. همچنین استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی جهت استفاده مجدد از انرژی ترمزی علاوه بر کاهش بین ۱۵ الی ۳۰ درصدی انرژی مصرفی باعث تثبیت ولتاژ شبکه می‌شود. یکی دیگر از روش‌های بازیابی انرژی از طریق پست‌های دوطرفه می‌باشد. در این روش انرژی برگشتی به شبکه در فرآیند ترمزی از طریق پست‌های دوطرفه به شبکه شهری منتقل خواهد شد. با این روش

۱- Infrastructure loss

۲- Auxiliary Systems

۳- Motion Resistance

۴- Traction

بین ۷ تا ۱۱ درصد کاهش انرژی مصرفی قابل دستیابی می‌باشد [۲].

پس از آشنایی با مدل الکتریکی شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی و همچنین انواع سیستم‌های ذخیره‌ساز مهمترین نکته در استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز کنترل این تجهیزات می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، ذخیره‌سازی انرژی آزاد شده در فرآیند ترمزی و استفاده از این انرژی در لحظات دیگر همچون فرآیند شتابگیری قطار، هدف اصلی استفاده سیستم‌های ذخیره‌ساز است. اما در کنار این هدف تثبیت ولتاژ شبکه یک دستاورد بسیار ارزشمند می‌باشد. در صورت ورود انرژی بازیافتی ترمزی به شبکه، ولتاژ شبکه شروع به افزایش می‌کند، در مقابل نیز در هنگام شتابگیری قطار، انرژی بسیار زیادی از شبکه کشیده می‌شود که این امر باعث افت ولتاژ شدید در ابتدای حرکت می‌باشد. در حالت عادی حرکت قطار نیز به دلیل مقاومت‌های خط و همچنین پانتوگراف، افت ولتاژ کمی وجود دارد. بنابراین همواره ولتاژ شبکه از مقدار نامی خود فاصله داشته و در مواقع ترمزی یا شتابی این فاصله می‌تواند بسیار زیاد باشد که منجر به عمل کردن رله‌های حفاظتی می‌شود. در نتیجه می‌توان از ولتاژ شبکه به‌عنوان نشان‌دهنده وضعیت انرژی در شبکه استفاده نمود. به این معنی که در صورت ازدیاد قابل توجه ولتاژ ذخیره‌ساز وارد سیستم شده و انرژی ترمزی را ذخیره کرده و در هنگام افت شدید ولتاژ ذخیره‌ساز انرژی خود را به شبکه تزریق کرده و این افت ولتاژ را جبران می‌کند.

از افرادی که در زمینه کنترل سیستم‌های ذخیره‌ساز در حمل و نقل ریلی تحقیقات زیادی انجام داده‌اند می‌توان به سیکارلی^۱ و ایونازی^۲ اشاره کرد. در [۱۵] با استفاده از روش کنترل ارائه شده، یک سیستم ذخیره‌ساز قابل حمل را طراحی و شبیه‌سازی نموده‌اند. در این روش کنترلی ابتدا مؤلفه‌های مکانیکی از جمله گشتاور موتور و سرعت قطار جهت کنترل درایو موتور استفاده شده‌اند و پس از آن با استفاده از خروجی‌های درایو موتور و سرعت قطار به کنترل سیستم ذخیره‌ساز پرداخته شده است. دلیل استفاده توأم این دو کنترل قابل حمل بودن سیستم ذخیره‌ساز است که در این حالت، وضعیت گشتاور

^۱ F. Ciccirelli

^۲ D. Iannuzzi

موتور و سرعت حرکت برای سیستم ذخیره‌ساز حائز اهمیت می‌باشد. برای مثال در هنگامی که سرعت در ماکزیمم مقدار خود قرار دارد، ذخیره‌ساز باید خالی باشد تا آمادگی دریافت انرژی ترمزی را در هر لحظه داشته باشد و در مقابل هنگامی که قطار ساکن است، ذخیره‌ساز باید ۱۰۰ درصد شارژ باشد تا انرژی شتابگیری را تأمین نماید [۲۹]. همچنین در [۲۶] با استفاده از ابر خازن‌های لیتیوم یونی و روش کنترل مبتنی بر سرعت زاویه‌ای محور موتور، سیستم ذخیره‌ساز طراحی و کنترل نموده است. در نهایت برای سیستم‌های ذخیره‌ساز ساکن و با استفاده از ابر خازن‌های لیتیوم یونی در [۳۰] یک روش کنترل مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژ خط ارائه نموده است. در این روش ولتاژ خط دائماً اندازه‌گیری شده و همچنین SOC ابر خازن نیز همواره از طریق اندازه‌گیری ولتاژ پایانه آن اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این دو مقدار یعنی ولتاژ خط و ابر خازن در مورد نحوه عملکرد سیستم ذخیره‌ساز تصمیم‌گیری می‌شود. در این مقاله هیچ‌گونه مطلبی در مورد مبدل به میان نیامده و تنها به بیان یک فرمول در مورد سلف مبدل بسنده شده است. در صورتی که برای کنترل بهتر مبدل باید مود های کاری مختلف آن مورد بررسی قرار گیرند.

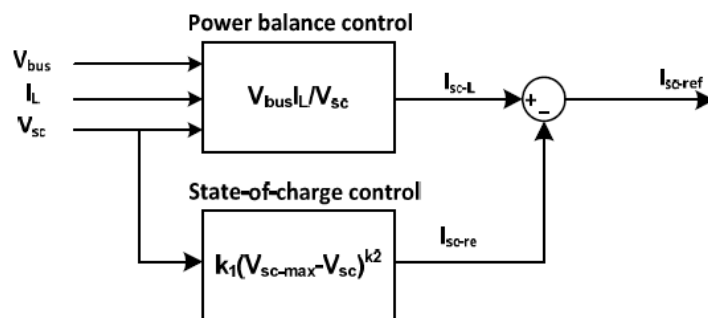
یکی دیگر از افرادی که در زمینه سیستم‌های حمل و نقل ریلی الکتریکی تحقیقات فراوانی انجام داده است باررو^۱ می‌باشد. باررو و همکارانش مطالعات فراوانی در مورد مدلسازی شبکه الکترومکانیکی سیستم مترو [۲۳] و همچنین تعیین ظرفیت و محل قرارگیری سیستم‌های ذخیره‌ساز انجام داده‌اند. همچنین مقایسه‌هایی بین سیستم‌های ذخیره‌ساز ساکن و قابل حمل انجام داده‌اند [۱۴]. باررو برای کنترل سیستم پیشنهادی از ولتاژ شبکه استفاده کرده است. در واقع شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز مبتنی بر ولتاژ شبکه می‌باشد. باررو هم اشاره دقیقی به نحوه عملکرد و کنترل مبدل نکرده است و تنها به بیان یک بلوک دیاگرام بسنده کرده است.

در ادامه تیمورفر و همکاران با مطالعه بر روی خط ۳ مترو تهران به طراحی سیستم ذخیره‌ساز پرداخته و همچنین یک تحلیل اقتصادی ارائه نموده‌اند [۳۱]. در [۳۲] با استفاده از مدل میانگین به

^۱ R. Barrero

مدلسازی مبدل و نهایتاً ارائه روش کنترلی بر مبنای این مدل پرداخته شده است. در روش کنترلی برای به دست آوردن جریان مرجع مبدل، از تلفات آن صرف نظر شده است و از برابر قرار دادن توان در طرفین مبدل جریان سمت ابر خازن محاسبه شده است. همچنین برای کنترل SOC ابر خازن، از یک فرمول استفاده شده است که جریان شارژ و دشارژ را محدود می‌کند. در شکل ۳-۱۳ نحوه محاسبه جریان مرجع سلف مبدل نشان داده شده است.

نکته قابل تأمل در مورد روش محاسبه جریان مرجع سلف مبدل (I_{sc-ref}) این است که جریان I_L (جریان قطار) در فرآیند ترمزی مقداری منفی خواهد بود (با توجه به تزریق جریان توسط قطار به شبکه)، لذا با توجه به مثبت بودن مقدار ولتاژ باس V_{bus} و ولتاژ ابر خازن V_{sc} ترم I_{sc-L} منفی می‌شود. در ادامه ترم I_{sc-re} در صورت زوج بودن K_2 و مثبت بودن K_1 مقداری مثبت است؛ بنابراین در مرحله ترمزی مقدار I_{sc-ref} همواره در حال افزایش است. حال آنکه در واقعیت این مقدار باید بسته به میزان SOC ابر خازن تغییر کند. برای مثال در آغاز فرآیند ترمزی که ابر خازن SOC پایینی دارد باید مقدار I_{sc-ref} عدد بزرگی باشد و به مرور زمان و پر شدن ابر خازن این مقدار باید کاهش یافته و نهایتاً به صفر برسد. همچنین در مدل میانگین ارائه شده، دو سوئیچ مبدل به صورت مکمل یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند که در واقعیت چنین نیست. برای مثال در مود کاری افزایشی یکی از دو سوئیچ در حال سوئیچینگ می‌باشد و سوئیچ دیگر کاملاً خاموش است. برای حل این مشکل، مدل میانگین هر مبدل باید به صورت جداگانه به دست آورده شود [۳۳].



شکل ۳-۱۳: محاسبه جریان مرجع سلف مبدل [۳۲]

بنابراین مطالعات بر روی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در مترو شامل زیرگروه‌های مختلفی از جمله مطالعات طراحی (شامل سائز و نوع ذخیره‌ساز و ساکن یا قابل حمل و بودن سیستم)، مطالعات کنترلی مربوط به مبدل، مطالعات مکان‌یابی برای پیدا کردن نقطه بهینه نصب ذخیره‌ساز ساکن و مطالعات اقتصادی می‌شود.

در مورد کنترل این سیستم‌ها می‌توان گفت در سایر کاربردها نظیر اتومبیل‌های هیبرید نیز از همین ساختار کنترل استفاده می‌شود. برای مثال مطالعات فراوانی جهت کنترل سیستم ذخیره‌ساز ابر خازن در حوزه اتومبیل‌های هیبرید انجام گرفته است که با مقایسه روش‌های کنترلی متوجه ریشه مشترک این روش‌ها با سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی خواهید شد [۳۶]–[۳۴].

فصل ۴: طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

و ارائه روش کنترلی

تاکنون در مورد شبکه حمل و نقل ریلی الکتریکی و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی اطلاعاتی ارائه گردید. در این بخش نحوه استفاده از سیستم ذخیره‌ساز برای بهبود مصرف انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی به تفصیل توضیح داده خواهد شد. همچنین طراحی این سیستم و نحوه کنترل آن نیز به‌عنوان نوآوری این پروژه ارائه می‌شود. در انتها نیز تحلیل اقتصادی برای استفاده از یک سیستم ذخیره‌ساز در شبکه و نتایج اقتصادی آن برای مجری شبکه ارائه خواهد شد.

۴-۱ انتخاب ذخیره‌ساز مناسب

همان‌طور که در فصل سوم اشاره گردید فناوری‌های متعددی در سراسر جهان برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی مورداستفاده قرار می‌گیرند. در انتخاب سیستم ذخیره‌ساز عوامل متعددی دخیل می‌باشند مانند: فضای در دسترس، چگالی توان موردنیاز، چگالی انرژی موردنیاز، هزینه سرمایه‌گذاری و...

با توجه به این معیارها در کاربردهای متفاوت سیستم‌های ذخیره‌ساز موردنیاز انتخاب و به‌کاربرده می‌شوند. همان‌طور که گفته شد چگالی انرژی و چگالی توان دو فاکتور برای انتخاب سیستم ذخیره‌ساز می‌باشند و به نوعی دو فاکتور بسیار مهم می‌باشند. به‌منظور مقایسه این دو فاکتور در بین سیستم‌های ذخیره‌ساز از منحنی راگون [۲۴] استفاده می‌شود. این منحنی شامل دو محور چگالی توان و چگالی انرژی می‌باشد.

با دقت در شکل موجود در فصل ۳ می‌توان دریافت پیل‌های سوختی علی‌رغم چگالی انرژی بالا چگالی توان بسیار پایینی دارند و در مقابل چگالی انرژی ابر خازن‌های دولایه (EDLC) بسیار پایین می‌باشد. در این بین نوعی ابر خازن نوظهور به نام ابر خازن‌های لیتیوم یونی موجود می‌باشند که به‌عنوان سیستم‌های ذخیره‌ساز هیبرید در دنیا شناخته می‌شوند. چگالی انرژی این ابر خازن‌ها تقریباً $W.h/Kg$ ۲۰ می‌باشد که حدوداً ۴ برابر بیشتر از نوع ابرخازن‌های دو لایه و ۵ برابر کمتر از باتری‌های لیتیوم یون است.

باتری‌ها، ابرخازن‌های دو لایه و ابر خازن‌های لیتیوم یونی هر کدام خصوصیات مخصوص به خود را دارند که آن‌ها را برای کاربردهای مخصوصی مناسب می‌کند. همان‌طور که عنوان شد ابر خازن‌های لیتیوم یون نسبت به باتری‌های لیتیوم یون دارای چگالی توان بالاتری هستند همچنین نسبت به باتری‌های لیتیوم یون دارای ضریب امنیت بالاتری هستند چراکه برخلاف باتری‌ها در آن‌ها امکان افزایش شدید دما که به فرار حرارتی^۱ معروف است وجود ندارد. همچنین از نظر طول عمر و سیکل کاری در مقایسه با باتری‌های لیتیوم یون دارای طول عمر بیشتری می‌باشد.

یکی از معایب بزرگ ابرخازن‌های دو لایه نرخ دشارژ خودی آن‌ها می‌باشد که در طول زمان خازن شارژ خود را از دست می‌دهد. این مشکل در معرض حرارت‌های بالا نیز تشدید می‌شود. از این‌رو با ظهور ابر خازن‌های لیتیوم یونی که نسبت به ابرخازن‌های دو لایه دارای دشارژ خودی کمتری می‌باشند و همچنین حساسیت دمایی کمتری دارند، تغییرات شگرفی در بازار ذخیره‌سازهای انرژی پدید آمد.

در زیر به برخی از برتری‌های ابر خازن‌های لیتیوم یون نسبت به ابرخازن‌های دو لایه اشاره خواهد شد و نهایتاً به دلیل همین برتری‌ها در این پروژه از ابر خازن‌های لیتیوم یون استفاده شده است.

مشخصه دشارژ خودی

یکی از بزرگترین خصوصیت‌های ابر خازن‌های لیتیوم یونی قابلیت دشارژ خودی خوب آن‌ها می‌باشد که توسط یک پیش دوپینگ بین لیتیوم و الکتروود منفی برای تثبیت پتانسیل الکتروود منفی انجام گرفته است. در شکل ۴-۱ منحنی دشارژ خودی یک ابر خازن لیتیوم یونی با ظرفیت ۴۰ فاراد در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ولتاژ ۳٫۸ ولت طی ۲۴ ساعت با یک ابر خازن دو لایه مشابه مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابرخازن دولایه دارای دشارژ خودی بسیار زیادی می‌باشد. در طول یک ماه در دمای ۲۵ درجه، ولتاژ آن کمتر از ۸۰٪ ولتاژ اولیه شده است. برخلاف ابرخازن دولایه، ابر خازن لیتیوم یون مشخصه دشارژ خودی خوبی از خود نشان می‌دهد و امکان بهره بردن از ولتاژ ۳٫۷

^۱ Thermal Runaway



شکل ۴ - ۱: مشخصه دشارژ خودی ابر خازن لیتیوم یون در مقایسه با ابرخازن دو لایه [۳۷]

حتی تا ۱۰۰ روز بعد در دمای ۲۵ درجه را دارد.

مشخصه شارژ و دشارژ

برخلاف باتری‌های لیتیوم یون، ابر خازن‌های لیتیوم یونی محصولات شیمیایی پایداری هستند که از واکنش‌های جذب و دفع سطحی^۱ یون‌ها به گونه‌ای استفاده می‌کنند که در حین فرآیند شارژ و دشارژ تغییرات کریستالی در الکتروود مثبت رخ ندهد. این عمل باعث افزایش عمر خازن به بالاتر از ۱۰۰ هزار بار سیکل شارژ و دشارژ می‌شود.

مشخصه دمایی

یک دشارژ پایدار حتی در دماهای بالا و عملکرد ۶۰٪ در دمای ۲۰- قابل دستیابی می‌باشد. همچنین عملکرد بسیار مناسب در دماهای بسیار پایین حتی در صورت افت ولتاژ ناشی از کاهش تحرک یون‌ها در الکترولیت عملکرد ۵۰٪ را دارا می‌باشد. با این اوصاف ابر خازن‌های لیتیوم یونی دارای مشخصه دمایی بسیار مناسبی می‌باشند.

چگالی انرژی بالا

با توجه به اینکه ولتاژ کاری خازن‌های لیتیوم یونی نسبت به ابرخازن‌های دولایه مقدار بالاتری

^۱ Adsorption-Desorption

است و همچنین ظرفیت‌های بالاتری نسبت به ابرخازن‌های دولایه دارند و با علم بر اینکه انرژی ذخیره شده در خازن‌ها رابطه مستقیم با ظرفیت و ولتاژ دارد می‌توان گفت چگالی انرژی ابر خازن‌های لیتیوم یونی بیشتر از نوع ابرخازن‌های دولایه می‌باشد. در مقایسه منحنی راگون نیز برای ابرخازن‌های دولایه مشابه و ابر خازن‌های لیتیومی چگالی انرژی ابر خازن‌های لیتیوم یونی تا حدود ۶,۵ برابر ابرخازن‌های دولایه می‌باشد.

کاهش فضا

با علم بر چگالی انرژی بالا ابر خازن‌های لیتیوم یونی می‌توان به ازای هرچند عدد ابرخازن دولایه یکی از خازن‌های لیتیوم یونی را مورد استفاده قرارداد که این مسئله باعث کاهش فضای اشغالی می‌شود. در مدارات مجتمع و سرورها که فضا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است استفاده از ابر خازن‌های لیتیوم یونی کمک شایانی خواهد کرد. همچنین تعداد خود خازن‌ها به عنوان ادوات تولیدکننده گرما نیز کاهش پیدا می‌کند.

امنیت

برخلاف باتری‌های لیتیوم یونی ابر خازن‌های این نوع به لطف مواد متفاوت به کاربرده شده در کاند (الکتروود مثبت) در هنگام اتصال کوتاه داخلی باعث بروز آتش‌سوزی و یا انفجار نخواهند شد. بنابراین امنیت این نوع ابر خازن‌ها نیز نسبت به باتری‌های لیتیوم یون تضمین شده می‌باشد.

۴-۲ تعیین ظرفیت ذخیره‌ساز مورد استفاده

برای تعیین ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز باید به این نکته توجه شود که قطار در حال حرکت دارای انرژی جنبشی متناسب با مجذور سرعت خود می‌باشد. بنابراین از ابتدای فرآیند ترمزی این انرژی جنبشی باید وارد سیستم ذخیره‌ساز شود تا هنگامی که سرعت به صفر برسد و قطار متوقف شود. از طرف دیگر از آنجاکه ابر خازن دارای محدوده ولتاژ کاری می‌باشد، و ولتاژ آن نمی‌تواند از مقدار مشخصی کمتر شود، لذا ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز با استفاده از رابطه ۴-۱ محاسبه می‌شود.

$$\frac{1}{2} C.V_{\max}^2 - \frac{1}{2} C.V_{\min}^2 = \frac{1}{2} M_{eq}.v^2 \quad (4-1)$$

که در رابطه ۴-۱، C ظرفیت ابر خازن، $V_{\min}$ حداقل ولتاژ مجاز ابر خازن و $V_{\max}$ حداکثر ولتاژ مجاز ابر خازن می‌باشند. نهایتاً داریم:

$$C = \frac{M_{eq}.v^2}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} \quad (4-2)$$

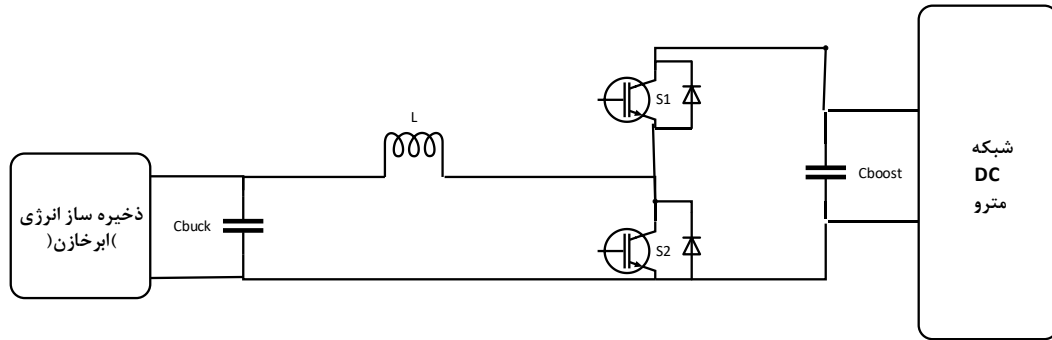
۳-۴ طراحی مبدل سیستم ذخیره‌ساز

یک سیستم ذخیره‌ساز شامل یکی از ادوات ذخیره‌سازی یاد شده برای نگهداری انرژی و یک واسطه جهت کنترل فرآیند ذخیره‌سازی می‌باشد. این سیستم واسطه، به گونه‌ای طراحی و کنترل می‌شود که در هنگام نیاز شبکه به انرژی ذخیره‌شده در ذخیره‌ساز، این انرژی به شبکه تزریق شود و در مقابل، در لحظاتی که شبکه دارای انرژی مازاد (انرژی ترمزی رهاشده از قطار) می‌باشد این انرژی را به ذخیره‌ساز انتقال دهد. البته در این بین ظرفیت ذخیره‌ساز به صورت دائم کنترل می‌شود تا از محدوده مجاز خارج نشود.

با توجه به اینکه شبکه موردنظر در این پروژه یک شبکه جریان مستقیم DC و همچنین نیازمند شارش انرژی در هر دو جهت (از ذخیره‌ساز به شبکه و بالعکس) می‌باشد لذا استفاده از یک مبدل نیم پل دو جهته مرسوم می‌باشد. چنین مبدل با توجه به جهت شارش توان دارای دو مود کاری است. در حالت انتقال انرژی از شبکه به ذخیره‌ساز مبدل در مود کاهنده کار می‌کند تا به عنوان یک مبدل کاهنده ولتاژ را کاهش دهد چراکه ولتاژ کاری ذخیره‌ساز از ولتاژ کاری شبکه پایین تر است. در مورد انتقال انرژی از ذخیره‌ساز به شبکه، مبدل نقش مبدل افزایشده^۲ را ایفا می‌کند. لذا با توجه به دو مود کاری و مشخصات شبکه و ذخیره‌ساز انتخابی مبدل موردنظر طراحی می‌شود.

^۱ Buck

^۲ Boost



شکل ۴ - ۲: نحوه اتصال ذخیره ساز به شبکه از طریق مبدل

در این پایان نامه سیستم در نظر گرفته شده شامل دو پست تغذیه، سه ایستگاه و دو قطار می باشد که پست ها در ایستگاه اول و سوم (ابتدا و انتهای خط) و سیستم ذخیره ساز در ایستگاه دوم قرار گرفته اند. همان طور که در شکل ۴-۲ نشان داده شده است مبدل بین شبکه و ذخیره ساز واقع شده است. برای طراحی مبدل هر دو مود کاری آن را به صورت جداگانه در نظر می گیریم.

برای محاسبات طرف افزایشی داریم:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \quad (4-3)$$

$$L = \frac{V_s \cdot D}{\Delta i_L \cdot f} \quad (4-4)$$

$$C = \frac{D}{R(\Delta V_o / V_o) \cdot f} \quad (4-5)$$

همچنین برای طرف کاهنده نیز داریم:

$$\frac{V_o}{V_s} = D \quad (4-6)$$

$$L = \frac{V_o \cdot (1-D)}{\Delta i_L \cdot f} \quad (4-7)$$

$$C = \frac{1-D}{\Delta V_o / V_o \cdot f} \quad (4-8)$$

برای طراحی با تکیه بر فرمول های بالا نیازمند در نظر گرفتن نکاتی می باشیم:

۱. ولتاژ شبکه را ۸۵۰ و ولتاژ ذخیره ساز را ۷۰۰ در نظر می گیریم.

۲. Δi_L مجاز برای سیستم ۱۰۰ آمپر در نظر گرفته شده است.
 ۳. ΔV_o مجاز برای سیستم مقدار ۵٪ در نظر گرفته شده است.
 ۴. فرکانس سوئیچینگ برای مبدل ۵ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است.
- حال برای دو مود کاری داریم:

جدول (۴-۱) مشخصات مبدل

Buck	Boost
$D = 0.82$	$D = 0.18$
$L = 252 \mu H$	$L = 252 \mu H$
$C = 71.4 \mu F$	$C = 0.2 mF$

تاکنون نوع ذخیره‌ساز انرژی انتخاب شده و همچنین مبدل موردنیاز برای سیستم ذخیره‌ساز انرژی طراحی شده است. پس از تعیین نوع ذخیره‌ساز و طراحی مبدل موردنظر، نوبت به تعیین استراتژی کنترل می‌رسد.

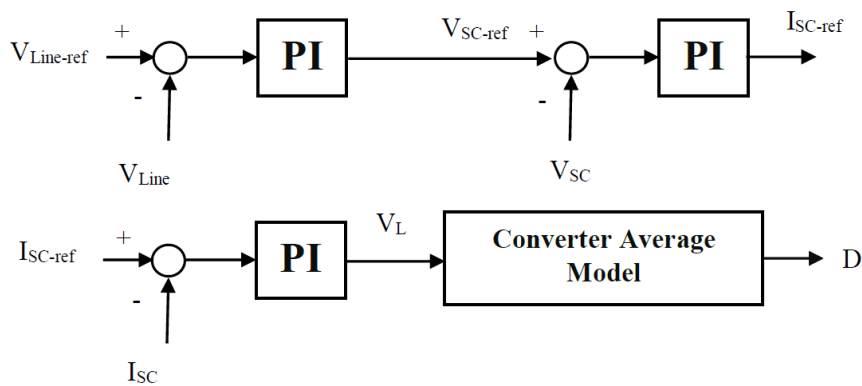
۴-۴ استراتژی کنترل پیشنهادی

هدف استفاده از ذخیره‌ساز در درجه اول کاهش مصرف انرژی به وسیله بازیافت انرژی ترمزی قطار و در درجه دوم تثبیت ولتاژ شبکه می‌باشد. لذا طراحی فرآیند کنترل باید بر اساس این دو هدف صورت گیرد. به منظور تثبیت ولتاژ خط همواره باید مقدار آن اندازه‌گیری شده و با مقدار معیاری مقایسه شود. انحراف از این مقدار مرجع به سیستم ذخیره‌ساز دستور می‌دهد تا در جهت شارژ یا دشارژ عمل کند. برای مثال در صورت افزایش ولتاژ شبکه به دلیل ترمز قطار (تزریق انرژی به شبکه) سیستم ذخیره‌ساز باید سریعاً شارژ شده و انرژی مازاد را از شبکه جمع‌آوری کند تا ولتاژ در مقدار نامی تثبیت شود. همچنین در هنگام شتابگیری که به صورت مقطعی انرژی زیادی برای شروع حرکت قطار از شبکه کشیده می‌شود، افت ولتاژ رخ می‌دهد که در این هنگام ذخیره‌ساز باید با تزریق انرژی به شبکه این افت ولتاژ را جبران نماید. مورد دیگری که باید به آن توجه شود ظرفیت خود ذخیره‌ساز می‌باشد. به این معنی که ذخیره‌ساز، دارای یک ظرفیت محدود است که نباید بیشتر از آن شارژ شود و همچنین در مورد ابر

خازن نباید بیشتر از ۲۵ درصد ظرفیت نامی دشارژ شود. از آنجاکه SOC ابر خازن به راحتی از روی ولتاژ آن قابل اندازه گیری است، بنابراین علاوه بر ولتاژ شبکه ولتاژ ابر خازن نیز باید همواره اندازه گیری شود تا از شارژ و دشارژ بیش از حد جلوی گیری شود. چه بسا در مواقعی ابر خازن ۱۰۰٪ شارژ شده اما هنوز در فاز ترمزی قرار داریم؛ در این صورت با وجود افزایش ولتاژ شبکه از مقدار مرجع نباید ذخیره ساز شارژ شود.

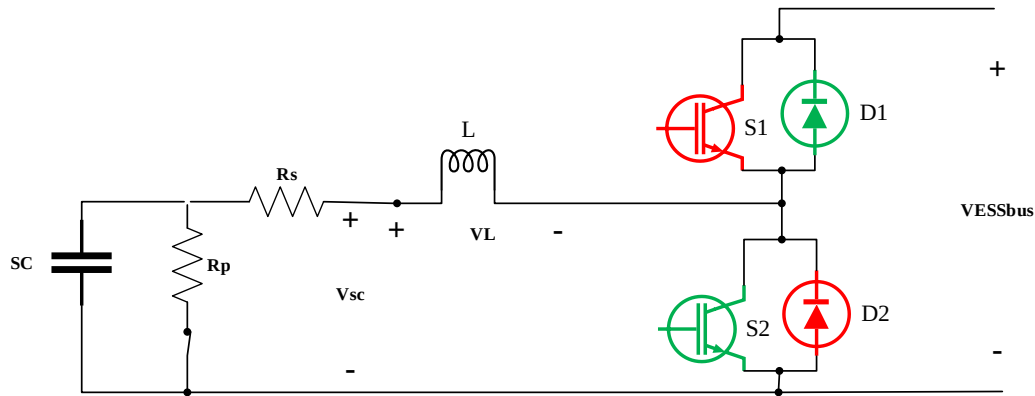
همان طور که اشاره گردید سیستم ذخیره ساز شامل یک مبدل و ذخیره ساز می باشد که در این پایان نامه از ابر خازن های نوع لیتیوم یون به عنوان ذخیره ساز استفاده شده است. کنترل شارژ و دشارژ سیستم ذخیره ساز توسط مبدل بین ذخیره ساز و شبکه صورت می پذیرد. در واقع کلید کنترل سیستم ذخیره ساز، کنترل مبدل بین ابر خازن و شبکه می باشد. برای کنترل مبدل از جریان سلف استفاده می کنیم. در شکل ۳-۴ فرآیند کنترل به صورت بلوک دیاگرام نمایش داده شده است.

با توجه به توضیحات ارائه شده و دیاگرام، پس از مقایسه ولتاژ خط با مقدار مرجع و عبور این اختلاف از PI مرجع برای ولتاژ ابر خازن ساخته می شود. در ادامه نیز به روش مشابه مرجع برای جریان سلف مبدل ساخته می شود. نکته قابل توجه در دیاگرام فوق استفاده از مدل میانگین مبدل برای مشخص کردن سیکل وظیفه^۱ می باشد. می دانیم مبدل دارای دو مود کاری کاهنده و افزایشنده می باشد که به فراخور جهت جریان سیستم ذخیره ساز در یکی از این دو مود کار می کند. برای به دست آوردن مقدار



شکل ۴ - ۳: دیاگرام استراتژی کنترل پیشنهادی

^۱ Duty Cycle



شکل ۴ - ۴: مبدل در مود کاری افزایشده

سیکل وظیفه نیازمند استفاده از مدل میانگین در هر کدام از این دو حالت می‌باشیم.

در ابتدا برای حالت افزایشده مدل میانگین ولتاژ سلف را به دست می‌آوریم. شکل ۴-۴ نشان‌دهنده

مبدل واسط در مود کاری افزایشده می‌باشد.

با نوشتن معادلات افزایشده در حالت سوئیچ S2 روشن داریم:

$$V_L = V_{SC} \quad (4-9)$$

همچنین در حالت سوئیچ S2 خاموش داریم:

$$V_L = V_{SC} - V_{ESSbus} \quad (4-10)$$

با استفاده از روش مدل میانگین داریم:

$$V_L = V_{SC} \cdot D + (V_{SC} - V_{ESSbus})(1 - D) = V_{SC} - V_{ESSbus}(1 - D) \quad (4-11)$$

بنابراین سیکل وظیفه در حالت افزایشده برابر است با:

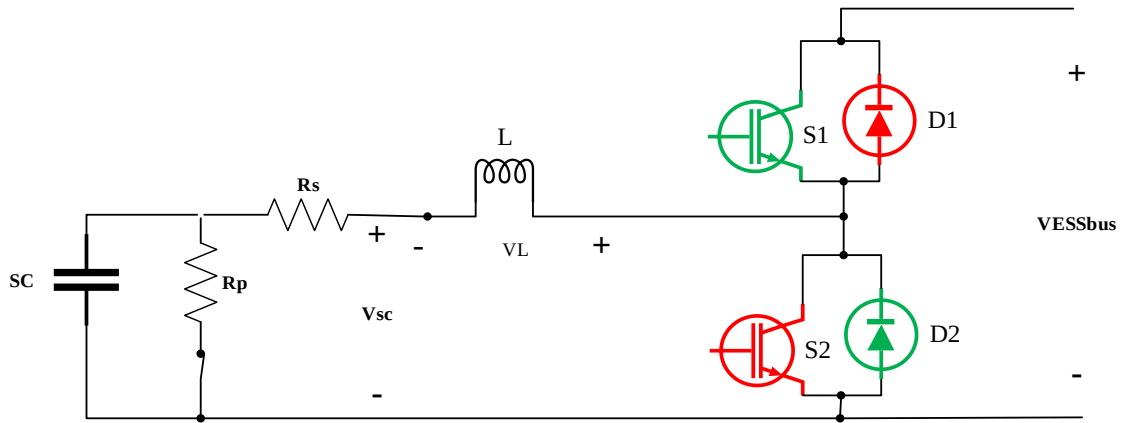
$$D = 1 + \frac{V_L - V_{SC}}{V_{ESSbus}} \quad (4-12)$$

که در معادلات فوق V_L ولتاژ سلف مبدل، V_{SC} ولتاژ دو سر ذخیره‌ساز، V_{ESSbus} ولتاژ باسی است

که ذخیره‌ساز در آن‌ها قرار دارد که در سیستم یاد شده در ایستگاه دوم می‌باشد و D نیز سیکل وظیفه

می‌باشد. همین کار برای مود کاهشده نیز انجام می‌شود. در شکل ۴-۵ مبدل در مود کاری کاهشده

نمایش داده شده است.



شکل ۴ - ۵: مبدل در مود کاری کاهنده

در حالت S1 روشن داریم:

$$V_L = V_{ESSbus} - V_{SC} \quad (۴-۱۳)$$

و در حالت S1 خاموش:

$$V_L = -V_{SC} \quad (۴-۱۴)$$

در نهایت با استفاده از مدل میانگین:

$$V_L = (V_{ESSbus} - V_{SC}).D + (-V_{SC})(1 - D) = D.V_{ESSbus} - V_{SC} \quad (۴-۱۵)$$

در حالت کاهنده نیز سیکل وظیفه محاسبه می شود:

$$D = \frac{V_L + V_{SC}}{V_{ESSbus}} \quad (۴-۱۶)$$

حال با استفاده از جهت جریان سیستم ذخیره ساز می توان مود کاری و سپس سیکل وظیفه را

مشخص نمود و آن را به PWM داد.

فصل ۵: نتایج شبیه‌سازی

در این پروژه از نرم‌افزار MATLAB و افزونه Simulink آن برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین تمام داده‌های شبیه‌سازی واقعی و از خط یک قطار شهری مشهود گرفته شده است که در جداول ۱-۵ و ۲-۵ آورده شده اند. برای شبیه‌سازی شبکه موردنظر ابتدا برنامه حرکت قطارها به صورت کدی نوشته شده که موقعیت و سرعت کنونی و همچنین ولتاژ دو سر قطار را گرفته و در خروجی مقاومت‌های خطوط بالاسری و همچنین جریان قطار را برمی‌گرداند. شبکه موردنظر شامل سه ایستگاه می‌باشد که دو پست تغذیه در ایستگاه‌های ابتدایی و انتهایی خط قرار دارند (ایستگاه ۱ و ۳). ذخیره‌ساز نیز در ایستگاه وسط (ایستگاه ۲) نصب خواهد شد. پارامترهای سیستم و حرکت قطار عبارتند از:

جدول (۱-۵) پارامترهای شبکه

پارامتر	مقدار
$R_{sub1} \text{ \& } R_{sub2}$	$0,01 \Omega$
$V_{sub1} \text{ \& } V_{sub2}$	850 V
Overhead Line Resistance	$0,044 \Omega/m$
Rail Resistance	$0,0224 \Omega/m$

جدول (۲-۵) پارامترهای حرکت قطار

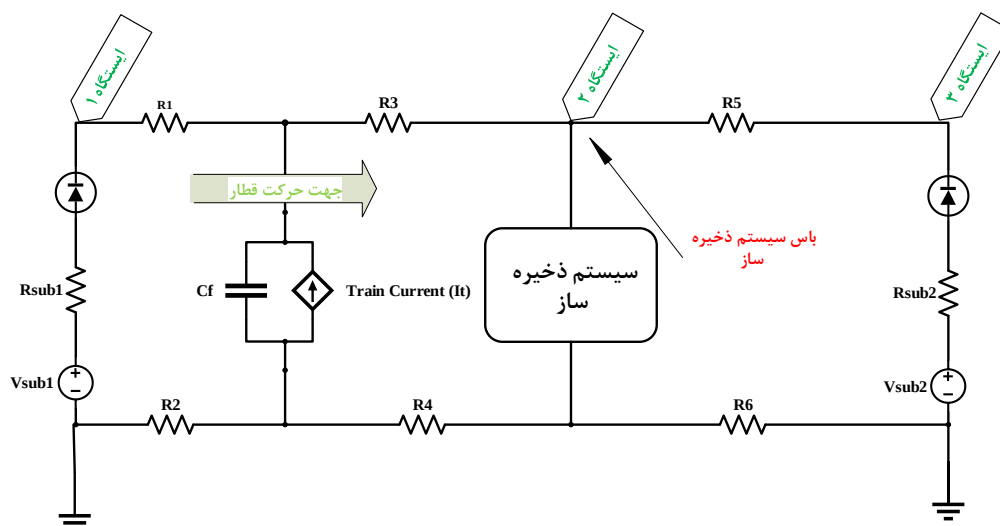
پارامتر	مقدار
شتاب ماکزیمم	$1,3 \text{ m/s}^2$
شتاب مینیمم	$1,2 \text{ m/s}^2$
سرعت ماکزیمم	75 Km/h
سرعت مینیمم	$46,8 \text{ Km/h}$
ثوابت معادله دیویس	$A=2,4$
	$B=0,018368$
	$C=0,000459375$
جرم در نظر گرفته شده	$132,2 \text{ Ton}$
حداکثر نیروی کشش مجاز	$176,5 \text{ KN}$
توان روشنایی و تهویه قطار	75 KW

شبیه سازی ها شامل دو قسمت شبیه سازی های اصلی و فرعی می باشند که در شبیه سازی اصلی به بیان نتیجه استفاده از سیستم ذخیره ساز در شبکه تک قطاره و دو قطاره پرداخته می شود و در بخش فرعی به نتایج جالبی که در خلال نتایج اصلی به دست آمده پرداخته می شود.

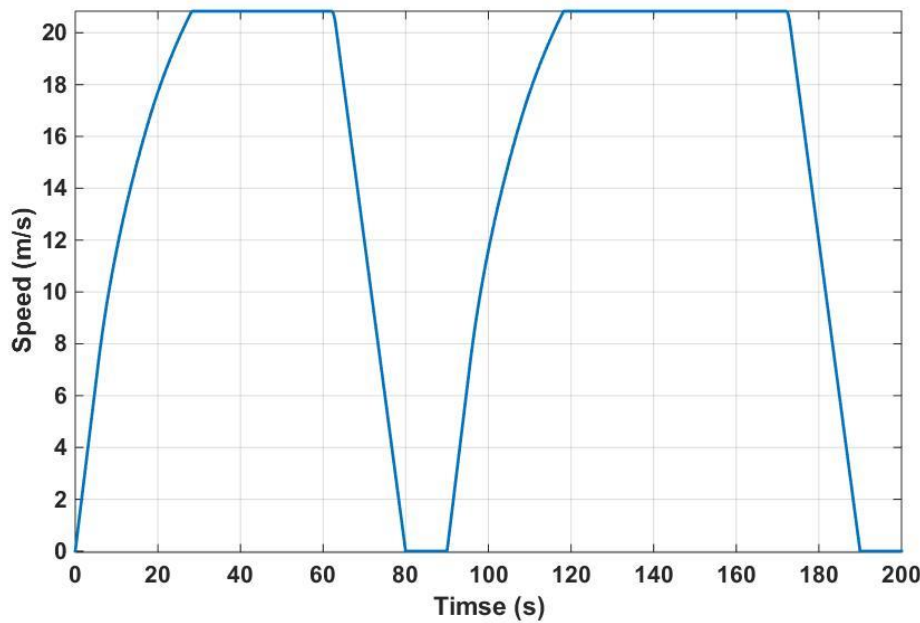
۱-۵ شبیه سازی های اصلی

۱-۱-۵ شبیه سازی سیستم تک قطاره

در این حالت یک قطار در شبکه در حال حرکت از ایستگاه ۱ به سمت ایستگاه ۳ می باشد و در ایستگاه دوم به مدت ۱۰ ثانیه توقف دارد. شماتیک شبکه در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۵ - ۱: مدل شبکه تک قطاره



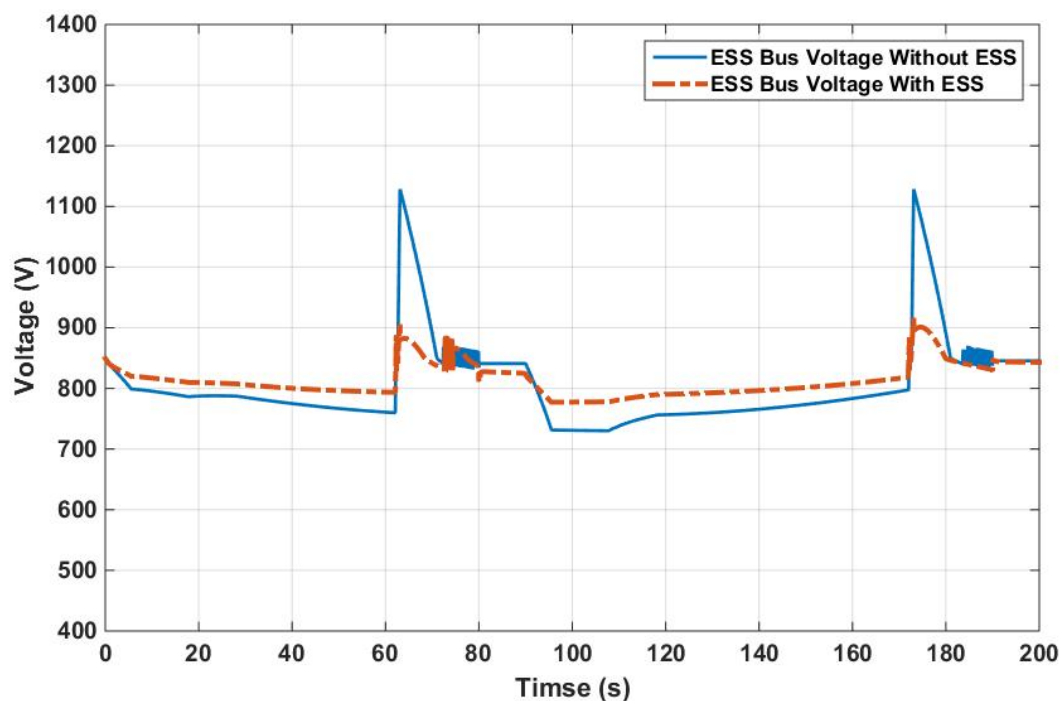
شکل ۵ - ۲: نمودار سرعت زمان حرکت قطار

در ابتدا قطار با شتاب ماکزیمم شروع به حرکت نموده و پس از مدتی به سرعت ماکزیمم می‌رسد. لازم به ذکر است به دلیل محدودیت‌های موجود در اطلاعات موتور قطار تا رسیدن به سرعت ماکزیمم حرکت با شتاب ثابت نیست و شتاب متغیر است. سپس با سرعت ماکزیمم به حرکت خود ادامه می‌دهد و نهایتاً برای توقف در ایستگاه اقدام به ترمز زدن می‌کند. پس از توقف به مدت مشخص مجدداً همین سیکل کاری طی می‌شود تا قطار به ایستگاه سوم برسد. نمودار سرعت- زمان قطار نشان‌دهنده چگونگی حرکت آن می‌باشد.

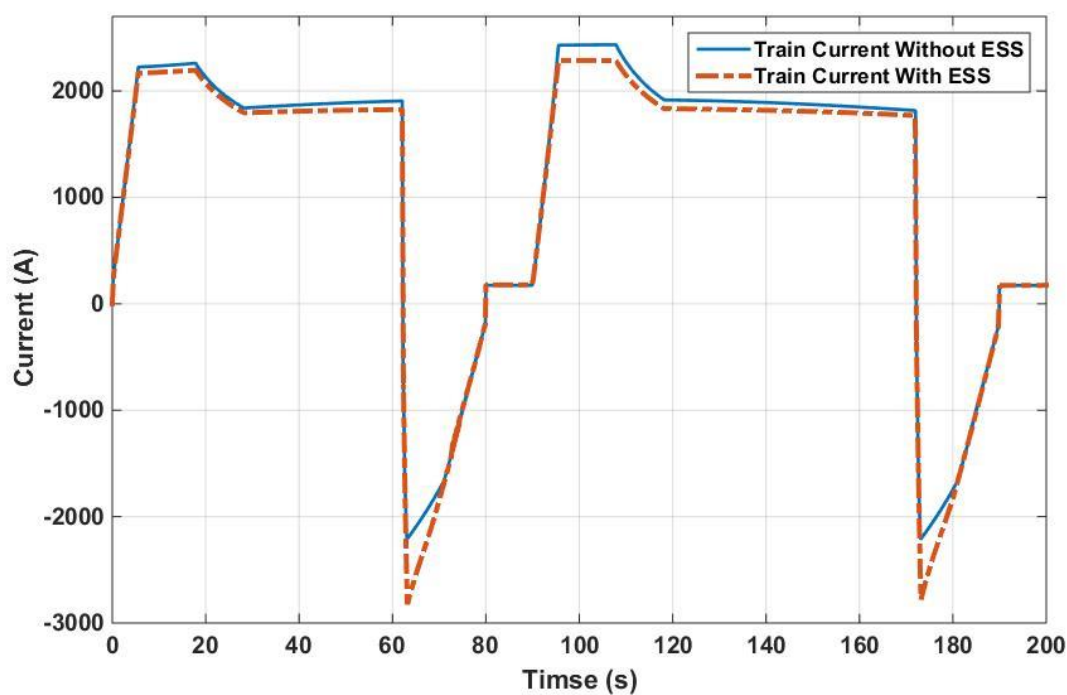
برای مشاهده اثر استفاده از سیستم ذخیره‌ساز ولتاژ باس ذخیره‌ساز در دو حالت قبل و بعد از نصب ذخیره‌ساز در شکل ۵-۳ مشاهده شده است.

از دقت در شکل ۵-۳ مشاهده می‌شود در صورت نبود ذخیره‌ساز در حرکت عادی قطار افت ولتاژ شدیدی رخ می‌دهد و همچنین در بازه ترمزی ولتاژ به شدت افزایش می‌یابد. در مقابل پس از نصب سیستم ذخیره‌ساز، افت ولتاژ در فاصله بین ایستگاه‌ها کاهش یافته و همچنین بیشینه ولتاژ در بازه ترمزی به شدت تعدیل شده به طوری که مقدار ۵ درصد در میانگین و همچنین ۱۸ درصد در مقدار اوج

بهبود رگولاسیون ولتاژ به دست آمده است. در همین راستا جریان قطار در هر دو حالت نیز ارائه شده است.



شکل ۵ - ۳: مقایسه ولتاژ باس ذخیره ساز در سیستم تک قطاره در حالت وجود و عدم وجود ذخیره ساز

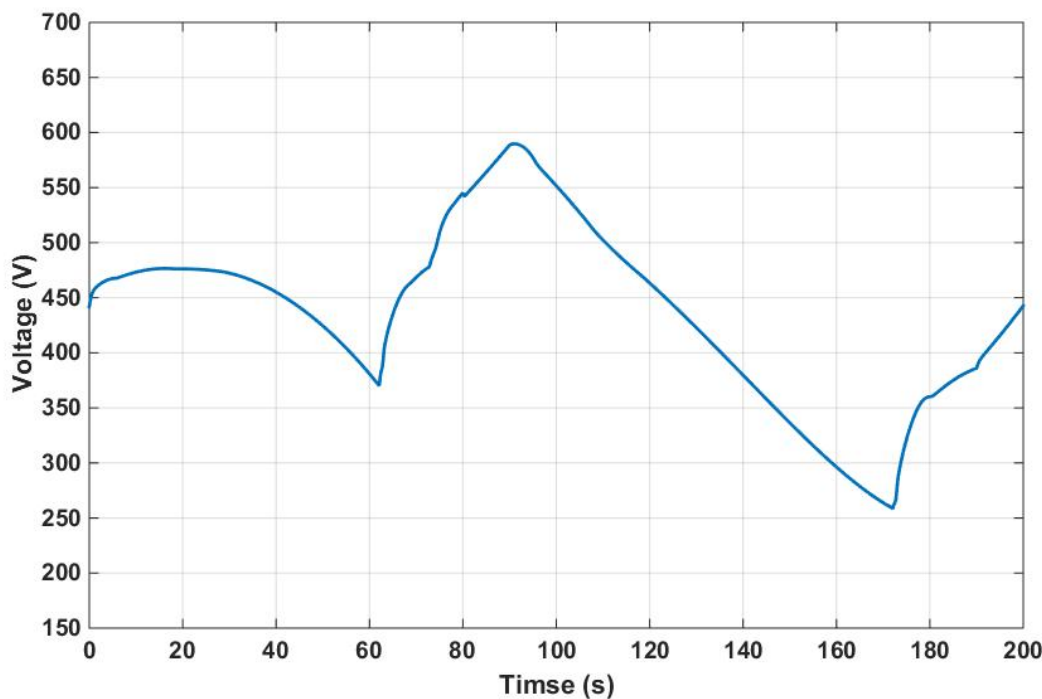


شکل ۵ - ۴: جریان قطار در حالت حضور و عدم حضور ذخیره ساز

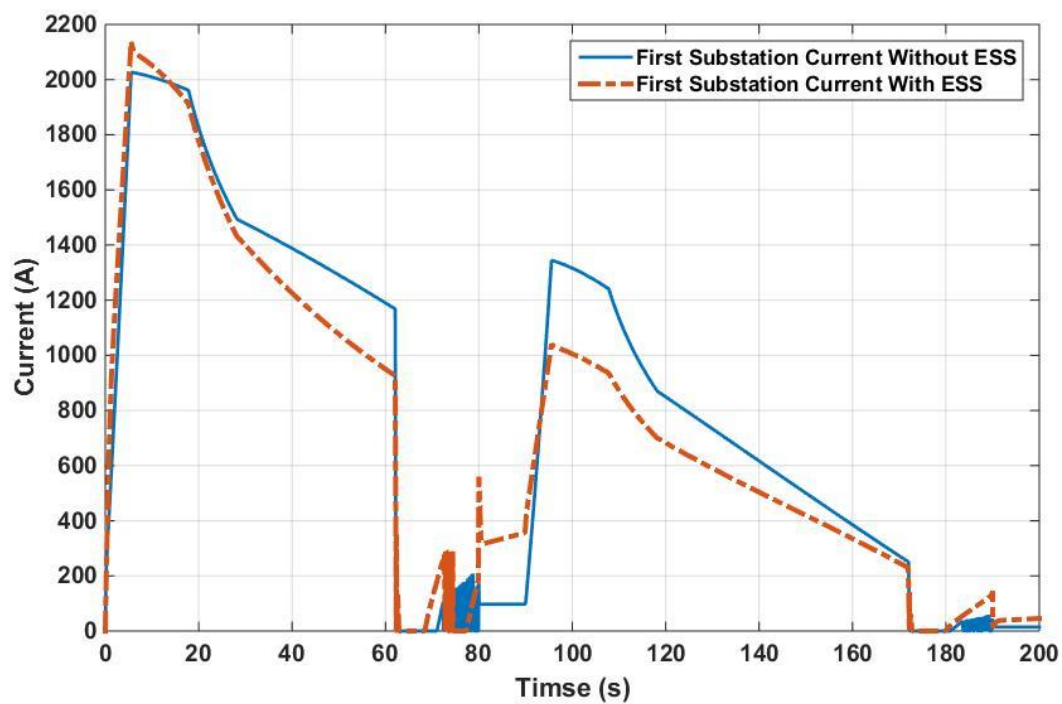
همان‌طور که در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ مشاهده می‌شود، در ابتدای حرکت به دلیل فرآیند شتابگیری قطار به شدت از شبکه انرژی کشیده است. پس از گذشت تقریباً ۲۷ ثانیه قطار به سرعت ماکزیمم خود می‌رسد و از آن پس با سرعت یکنواخت حرکت می‌کند. در فرآیندهای ترمزی نیز جهت جریان منفی شده چراکه ترمز بازیافتی است و قطار انرژی به شبکه تحویل می‌دهد. همچنین در حالت توقف مشاهده می‌شود که قطار کماکان آر شبکه جریان می‌کشد. این جریان برای سیستم‌های کمکی قطار نظیر تهویه و روشنایی می‌باشد. با توجه به اینکه پس از نصب سیستم ذخیره‌ساز ولتاژ شبکه به مقدار نامی (۸۵۰ ولت) نزدیک‌تر شده است، طبیعی است که در فاصله بین ایستگاه‌ها جریان کشیده شده کاهش و در فرآیند ترمزی جریان تزریقی افزایش داشته باشد.

با توجه به سیکل کاری قطار و فرایندهای ترمزی و شتابی ولتاژ ابر خازن نیز تغییر می‌کند. در حالتی که در فاز ترمزی می‌باشد ولتاژ آن به دلیل شارژ افزایش و در شتابگیری و حرکت عادی ولتاژ کاهش می‌یابد.

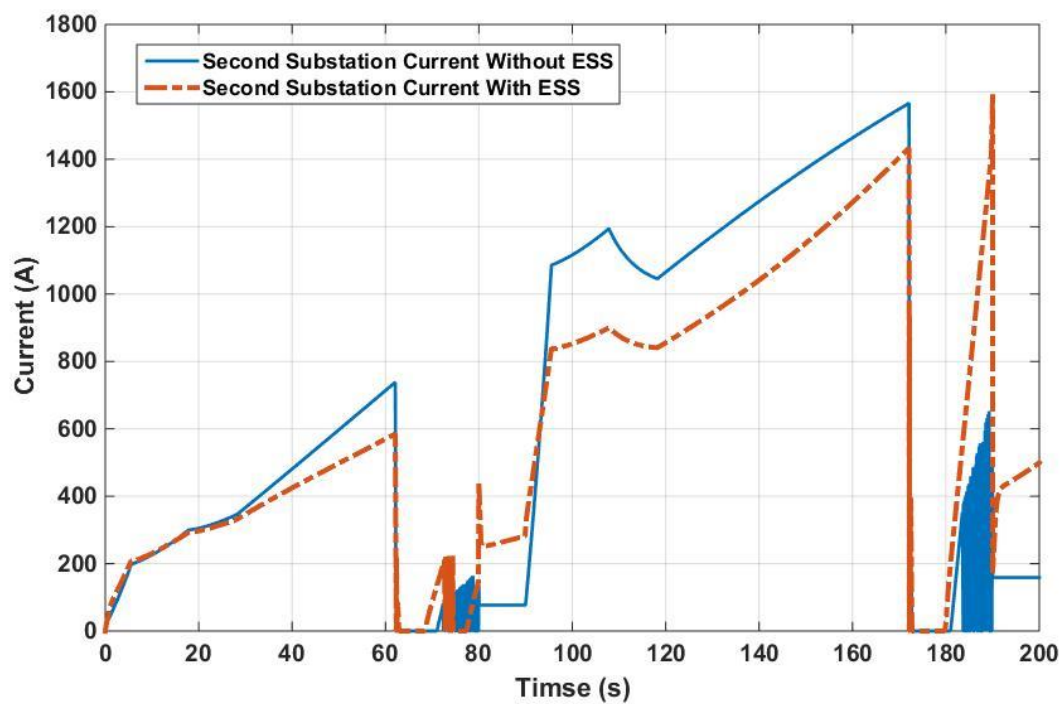
همچنین در اشکال ۵-۶ تا ۵-۸ نیز جریان و توان کشیده شده پست‌ها نمایش داده شده است.



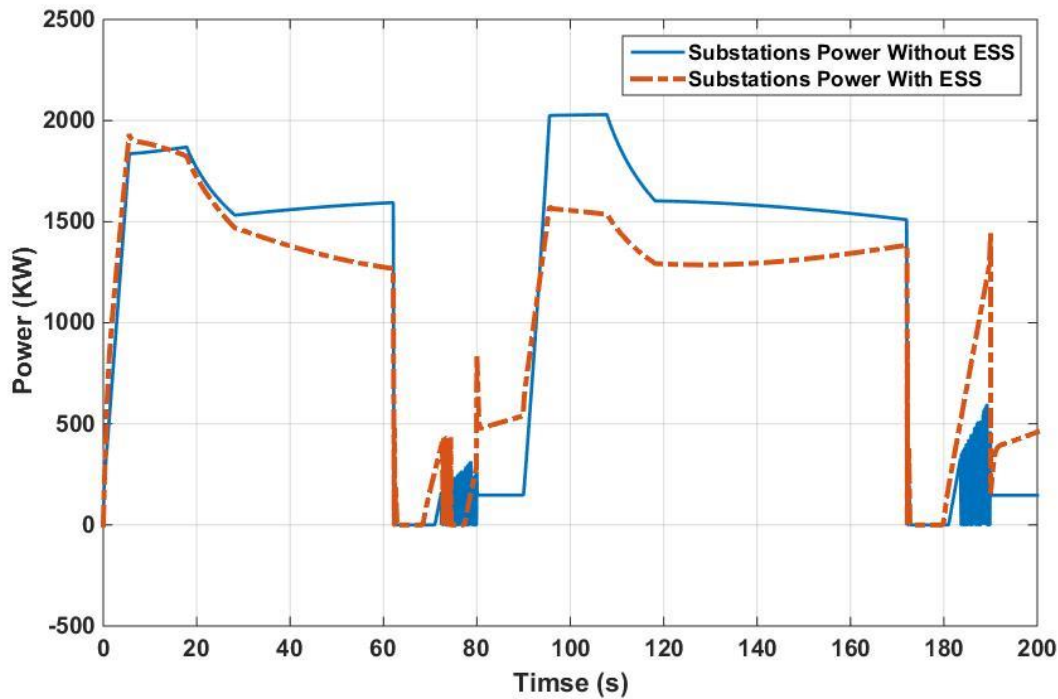
شکل ۵ - ۵: ولتاژ ابر خازن



شکل ۵ - ۶: جریان پست تغذیه اول در حضور و عدم حضور ذخیره ساز

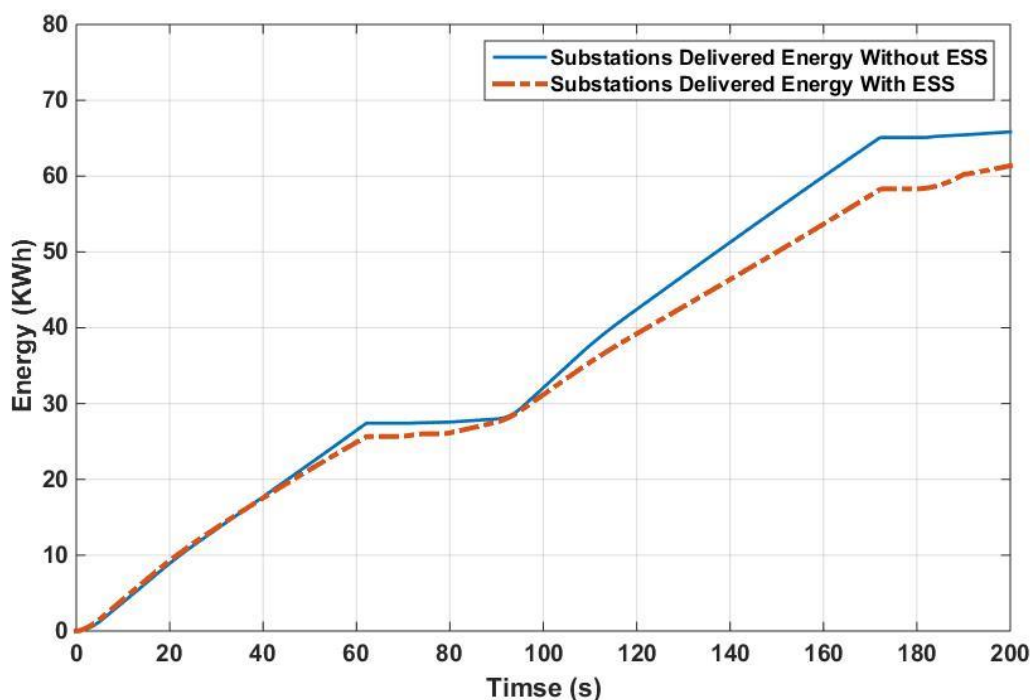


شکل ۵ - ۷: جریان پست تغذیه دوم در حضور و عدم حضور سیستم ذخیره ساز



شکل ۵ - ۸: مجموع توان کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز

از دو شکل ۵-۶ و ۵-۷ می‌توان دریافت که قطار بیشتر انرژی خود را از نزدیک‌ترین پست تغذیه دریافت می‌کند. چراکه با دور شدن از پست اول و نزدیک شدن به پست تغذیه دوم جریان کشیده شده از پست تغذیه اول کاهش و جریان کشیده شده از پست تغذیه دوم افزایش می‌یابد. با دقت در اشکال ۵-۶ تا ۵-۸ می‌توان دریافت که پس از استفاده از سیستم ذخیره‌ساز، توان کشیده شده از پست‌های تغذیه به میزان قابل‌توجهی کاهش‌یافته و همچنین جریان پست‌ها نیز نسبت به حالت عدم حضور ذخیره‌ساز پیک کمتری زده‌اند که نشان از دستیابی به پیک سایی می‌باشد. در سایر مقالات تنها به صورت تئوری در مورد پیک سایی بحث شده اما در این پایان نامه نتیجه به صورت نمودار ارائه شده و می‌توان پیک سایی را به عینه دید. نمودار انرژی پست‌ها نیز کاهش مصرف انرژی، که هدف اصلی استفاده از سیستم ذخیره‌ساز بود را تأیید می‌کند.



شکل ۵ - ۹: انرژی تحویلی پست‌ها به شبکه در حالت حضور و عدم حضور سیستم ذخیره‌ساز

نهایتاً استفاده از ذخیره‌ساز موجب بهبود رگولاسیون ولتاژ، کاهش مصرف انرژی و پیک سایی شد

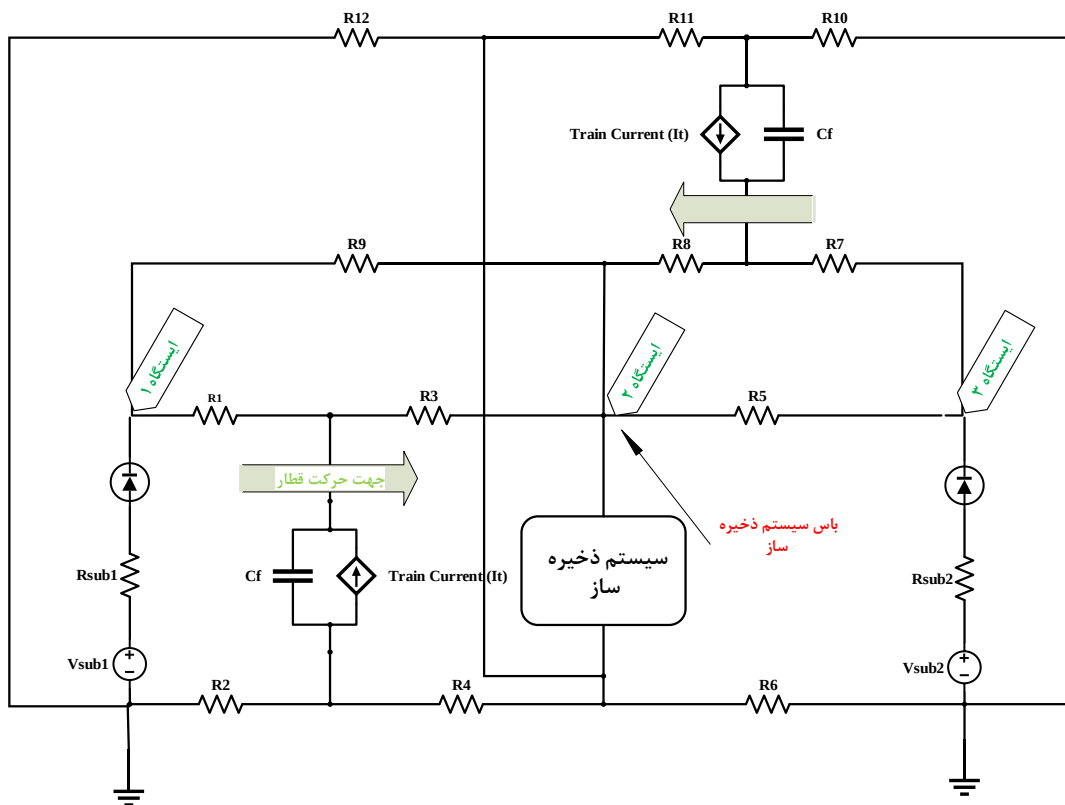
که به معنی دستیابی به اهداف تعیین شده می‌باشد.

۵-۱-۲ شبیه‌سازی سیستم دو قطاره

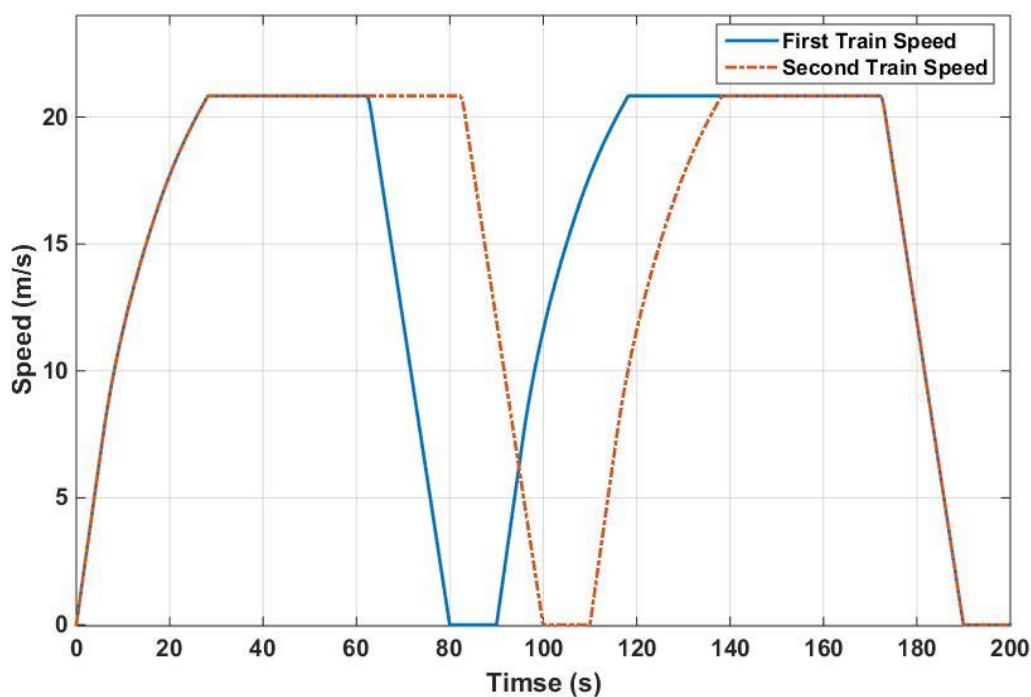
در این بخش همان سیستم قبلی شبیه‌سازی می‌شود با این تفاوت که در مسیر برگشت نیز یک قطار از ایستگاه ۳ به سمت ایستگاه ۱ در حال حرکت است و در ایستگاه دوم ۱۰ ثانیه توقف دارد. نکته قابل توجه در این شبیه‌سازی سعی در جمع‌بندی استراتژی با همدیگر است؛ به این صورت که در ایستگاه دوم هنگامی که قطار مسیر رفت (از ایستگاه ۱ به ۳) در حال ترمز گرفتن است قطار دیگر در حال حرکت با سرعت ثابت می‌باشد. در مقابل هنگامی که قطار برگشت (از ایستگاه ۳ به ۱) در حال ترمز گرفته است قطار مسیر رفت در حال شتابگیری و آغاز حرکت می‌باشد که به دلیل اتصال دو خط در ایستگاه دوم به همدیگر بخشی از انرژی ترمزی قطار دوم به قطار اول می‌رسد. در انتها نیز دو قطار به‌طور هم‌زمان اقدام به ترمز زدن می‌کنند که انرژی قابل‌توجهی به شبکه تزریق می‌شود و همان‌طور

که دیده می‌شود در مقایسه با حالت تک قطاره افزایش ولتاژ به شدت زیاد شده است. در شکل ۵-۱۰ شماتیک شبکه نشان داده شده است.

در شکل ۵-۱۰ خط رفت و برگشت در نقاط اتصال به پست‌های تغذیه اول و سوم و همچنین در ایستگاه دوم به یکدیگر متصل شده‌اند. مقاومت‌های R_1, R_3, R_5, R_7, R_8 و R_9 مربوط به خطوط بالاسری و مقاومت‌های $R_2, R_4, R_6, R_{10}, R_{11}$ و R_{12} مربوط به ریل‌ها می‌باشد. با توجه به نمودار سرعت زمان حرکت دو قطار می‌توان سناریوهای عنوان شده را مشاهده کرد.

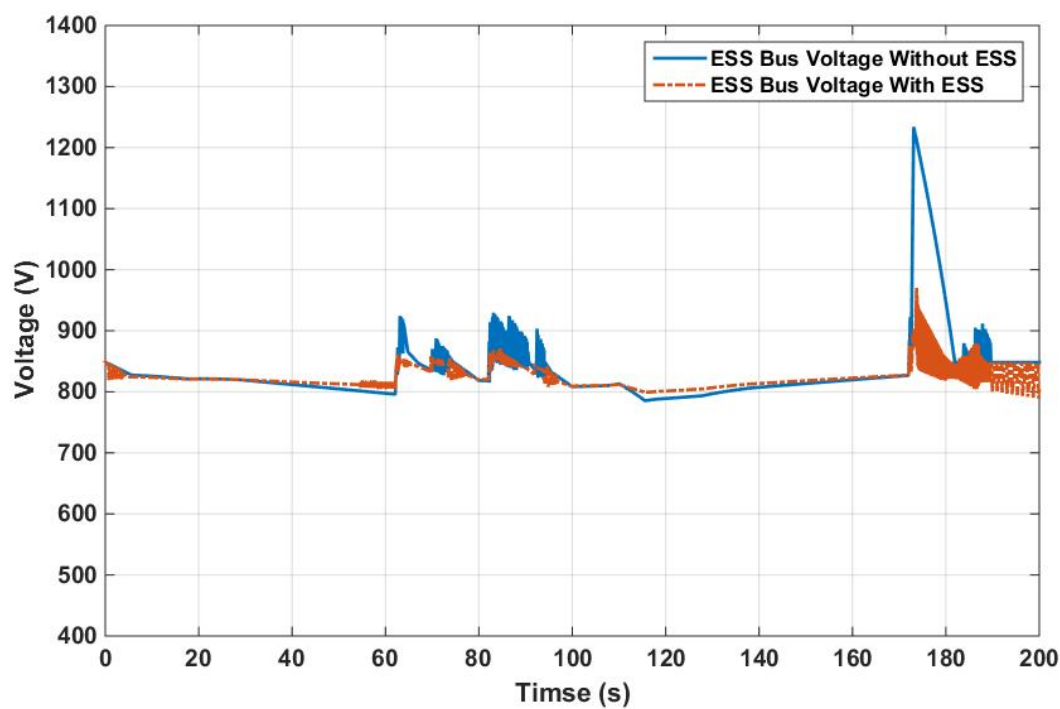


شکل ۵ - ۱۰: شبکه سیستم دو قطاره



شکل ۵ - ۱۱: نمودار سرعت زمان حرکت دو قطار

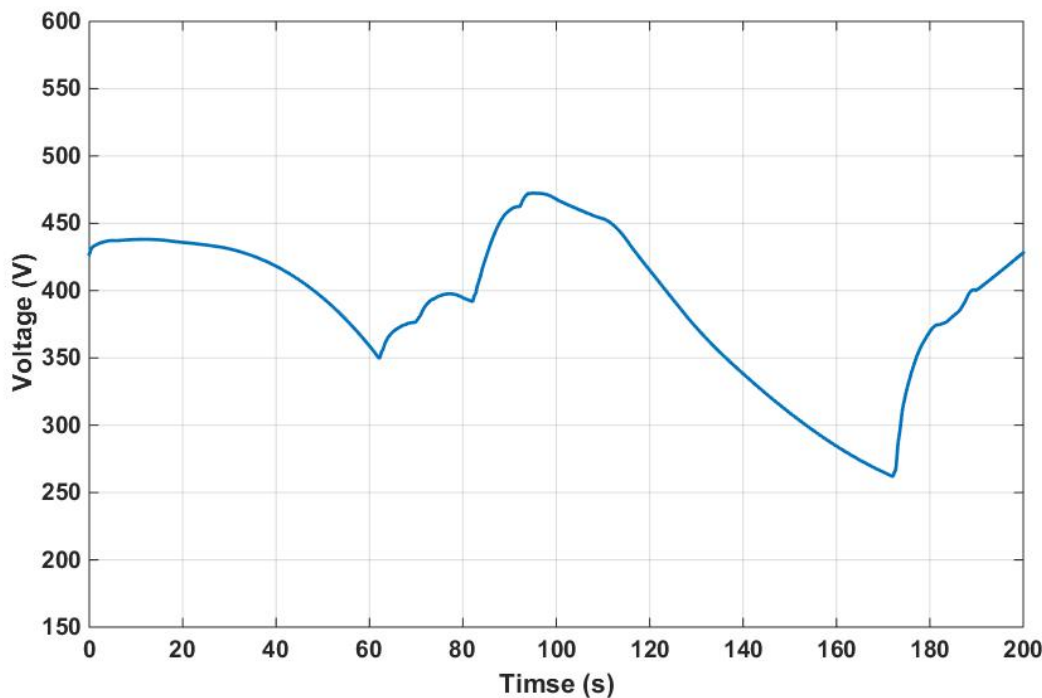
در این حالت ولتاژ باس ذخیره ساز قبل و بعد از نصب سیستم ذخیره ساز در شکل ۵-۱۲ نمایش داده شده است.



شکل ۵ - ۱۲: ولتاژ باس ذخیره ساز قبل و بعد از نصب سیستم ذخیره ساز

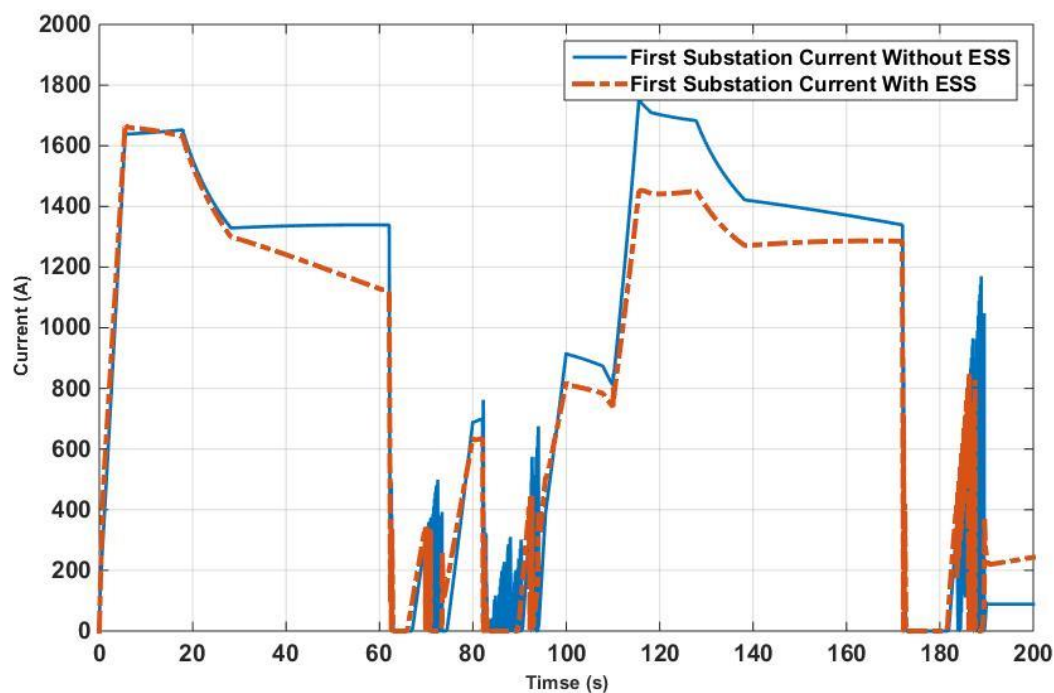
ولتاژ در فرآیندهای ترمزی به‌خصوص در انتهای سیکل که دو قطار باهم ترمز می‌کنند به‌شدت تعدیل شده است و همچنین افت ولتاژ در طول حرکت عادی کاهش داشته به‌طوری‌که ولتاژ هیچ‌گاه زیر ۸۰۰ ولت نیست. در پیک انتهای سیکل حدود ۱۹ درصد بهبود ولتاژ رگولاسیون داشتیم و در میانگین ولتاژ نیز مقدار ۴ درصد بهبود رگولاسیون داشتیم.

ولتاژ ابر خازن در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است که شارژ و دشارژ در آن مشخص است. ابر خازن در دو مرحله در زمان‌های ۶۲ ثانیه و ۸۲ ثانیه شروع به شارژ شدن کرده است. چراکه در این زمان‌ها هرکدام از قطارها در فرآیند ترمزی هستند. همچنین در انتهای سیکل به دلیل ترمز دو قطار باهم ولتاژ به‌شدت افزایش یافته که به معنی شارژ ابر خازن است و کار فرآیند کنترلی را تأیید می‌کند.

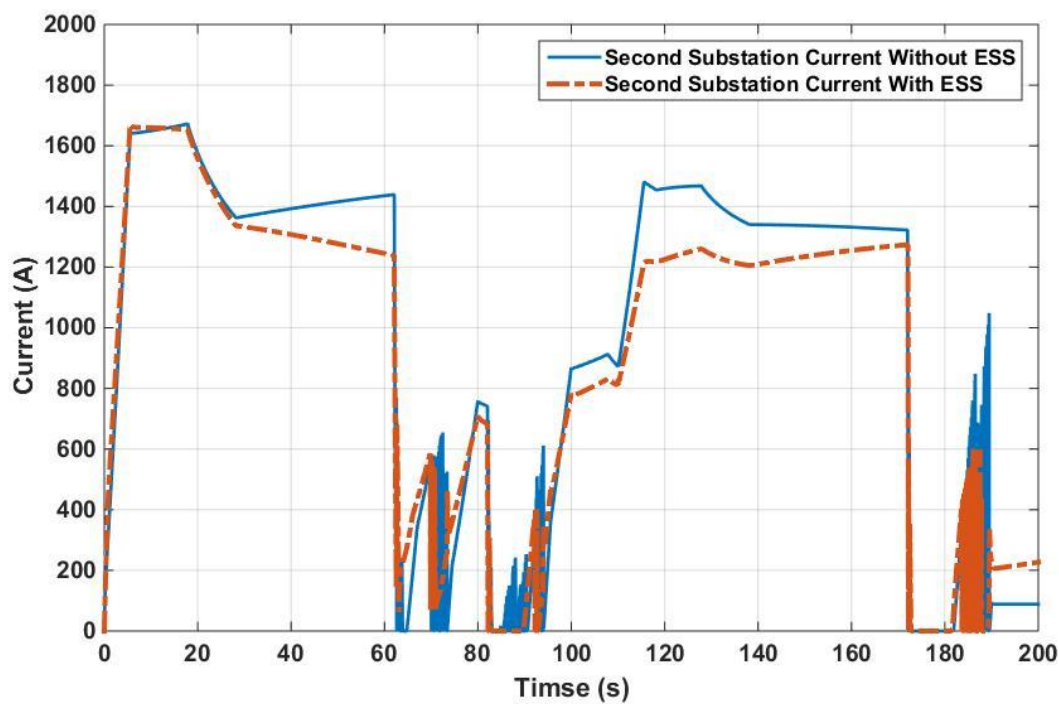


شکل ۵ - ۱۳: ولتاژ ابر خازن

برای جریان تزریقی از طریق دو پست به شبکه داریم:



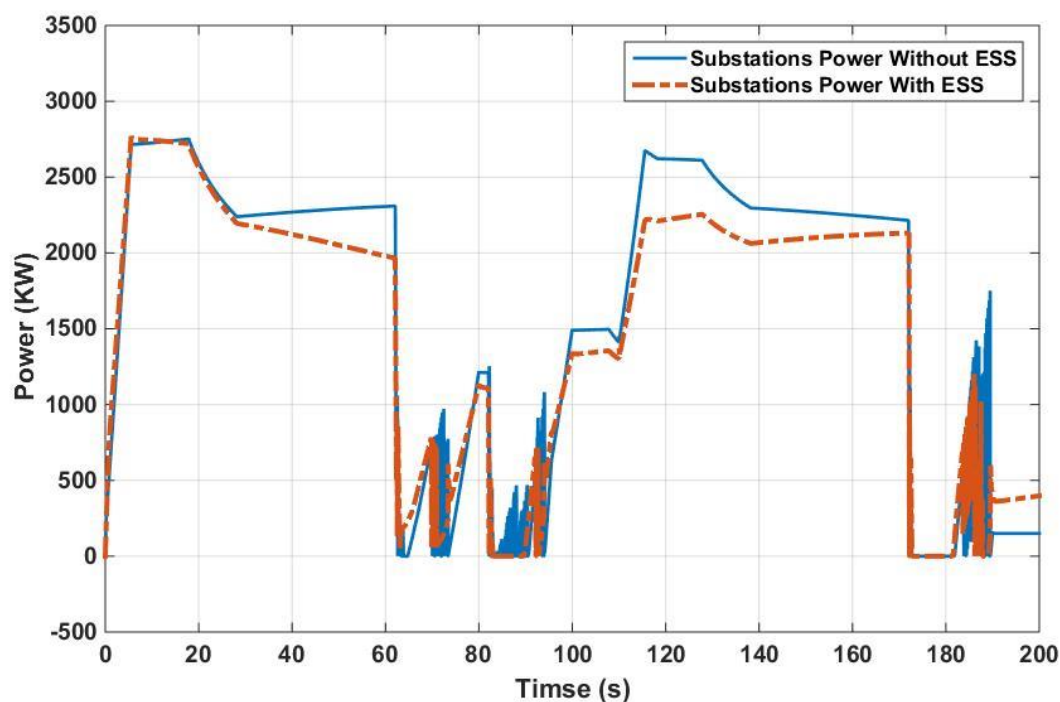
شکل ۵ - ۱۴: جریان تزریقی پست تغذیه اول



شکل ۵ - ۱۵: جریان تزریقی پست تغذیه دوم

همان طور که انتظار می رود نسبت به حالت تک قطاره جریان بیشتری از دو پست کشیده می شود و در نتیجه در منحنی توان کشیده شده از دو پست نیز مشخص است که در مجموع توان بیشتری نیز

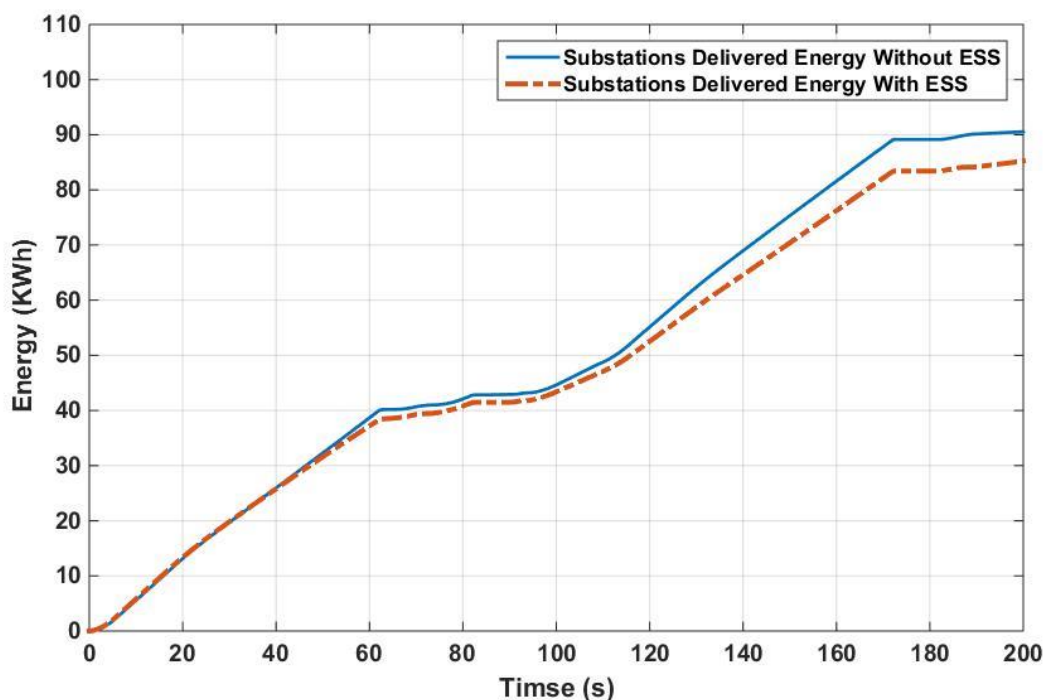
برای تغذیه لازم است.



شکل ۵ - ۱۶: مجموع توان کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز

درنهایت نیز نمودار انرژی مصرفی کل سیستم را داریم که در آن نیز نشان داده شده است که مصرف انرژی کاهش پیدا کرده است.

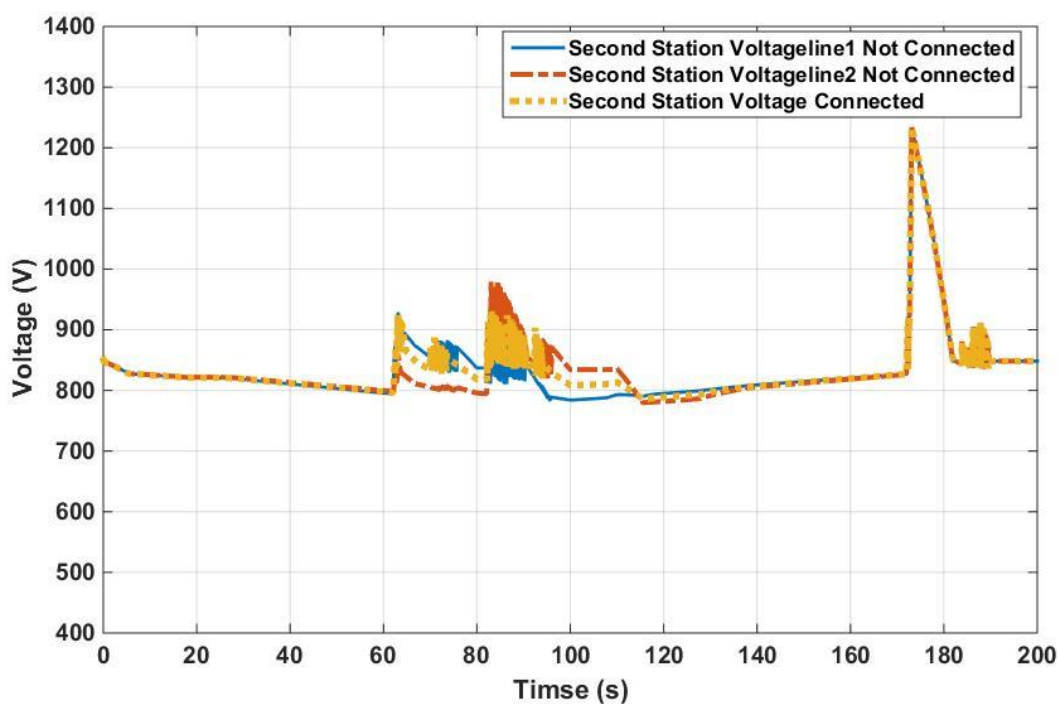
بنابراین در این قسمت نیز کاهش مصرف انرژی و بهبود ولتاژ رگولاسیون که اهداف اصلی بودند، انجام شد.



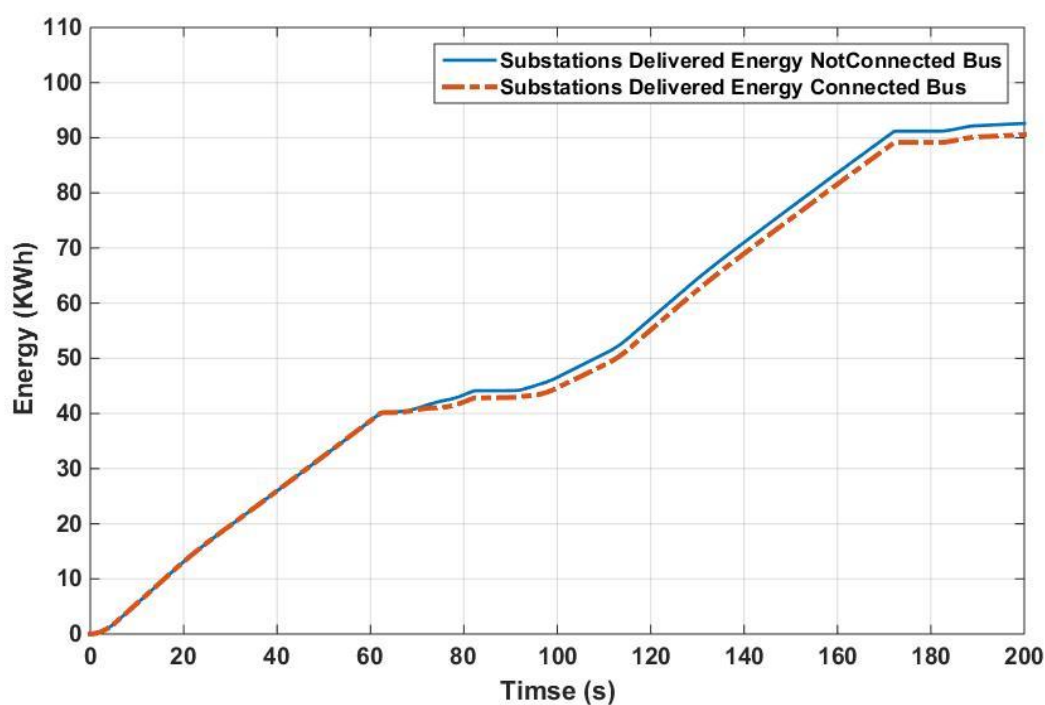
شکل ۵ - ۱۷: انرژی کشیده شده از دو پست تغذیه در حضور و عدم حضور ذخیره ساز

۵-۲ شبیه سازی های فرعی

در خلال شبیه سازی های اصلی به چند مورد جالب توجه برخورد شد. از جمله این موارد می توان بحث اتصال ایستگاه وسط در خط رفت و برگشت را مطرح کرد. برای مثال در حالت عدم حضور سیستم ذخیره ساز در دو حالت شبیه سازی انجام شده است. در حالت اول ایستگاه وسط در خط رفت کاملاً از خط برگشت جدا بوده و اتصالی برقرار نیست. در حالت دوم این ایستگاه به هم متصل شده است. در تصویر ۵-۱۸ مشاهده می شود ولتاژ در حالت اتصال دو خط، مقداری بینابین ولتاژ در حالت عدم اتصال می باشد. جالب تر اینکه همین اتصال دو خط به همدیگر یک کاهش مصرف انرژی به دنبال دارد که ناشی از تبادل انرژی ترمزی بین دو خط می باشد.



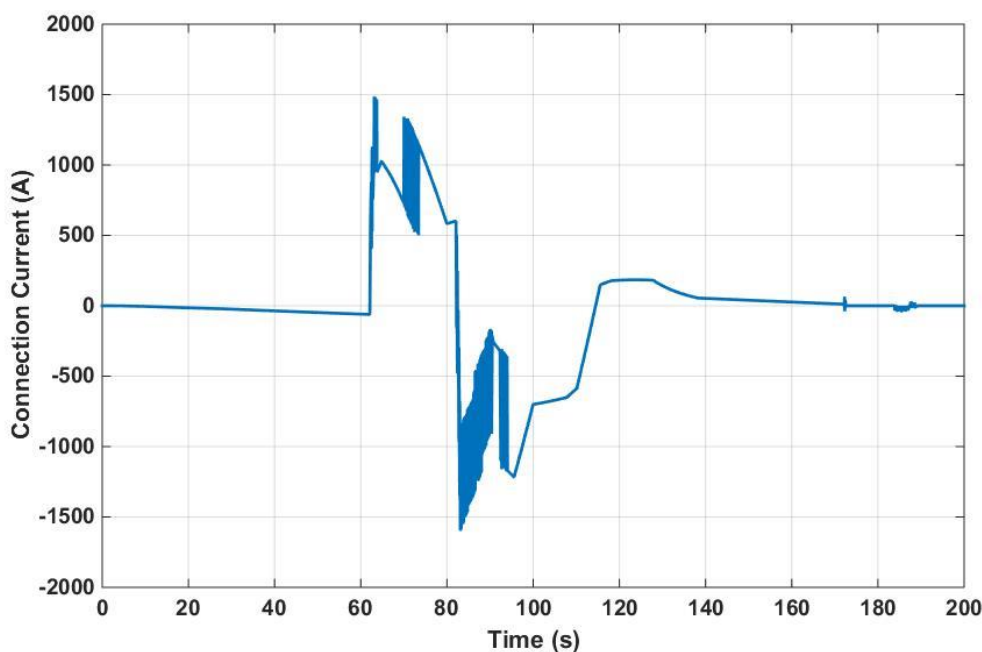
شکل ۵ - ۱۸: مقایسه ولتاژ ایستگاه دوم در حالت اتصال و عدم اتصال خط رفت و برگشت



شکل ۵ - ۱۹: مقایسه انرژی مصرفی در حالت اتصال و عدم اتصال خط رفت و برگشت

جریان لینک بین خط رفت و برگشت نیز در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده است. در این شکل

مشخص است که انرژی حاصل از ترمز بین خط رفت و برگشت در حال تبادل است و به همین دلیل



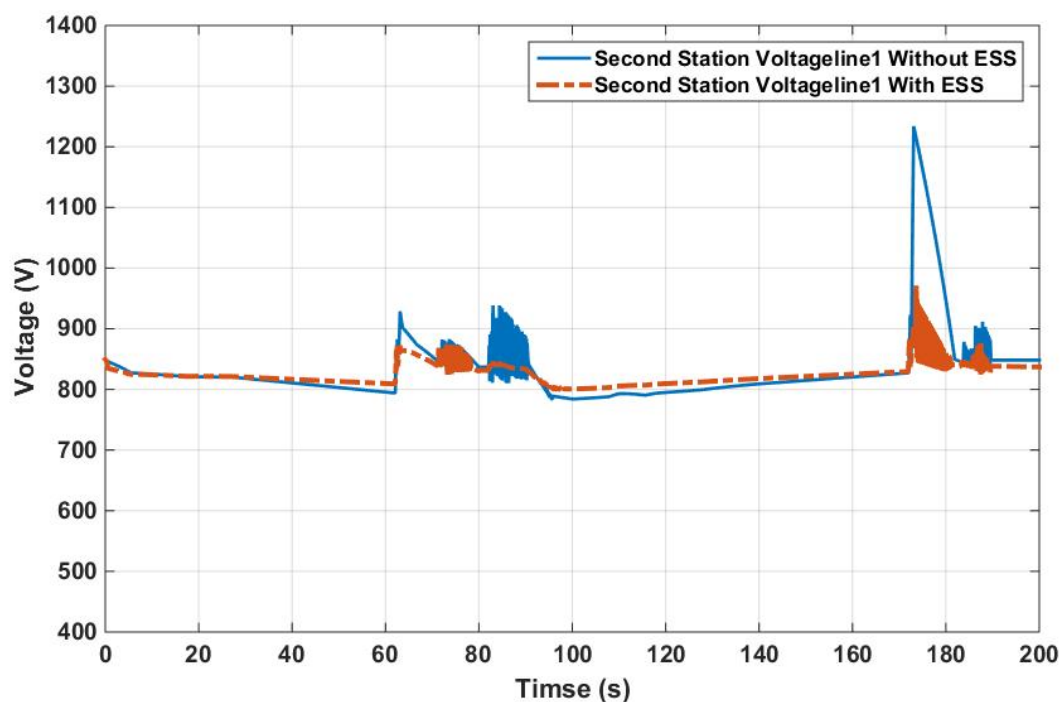
شکل ۵ - ۲۰: جریان لینک متصل کننده خط رفت و برگشت

انرژی کشیده شده از پست ها کاهش یافته و از انرژی بازیافتی ترمزی برای تغذیه قطارها استفاده می شود. در ابتدا قطار در مسیر رفت ترمز زده درحالی که قطار خط برگشت هنوز در حال حرکت عادی می باشد. در این حالت انرژی ترمزی از خط رفت به خط برگشت منتقل می شود و بخشی از انرژی مورد نیاز برای تغذیه قطار را تأمین می کند. در ادامه، قطار خط برگشت شروع به ترمز گرفتن می کند و قطار رفت در حال شتابگیری می باشد. لذا برای تأمین انرژی جهت شتابگیری قطار خط رفت، انرژی از خط برگشت به خط رفت منتقل می شود.

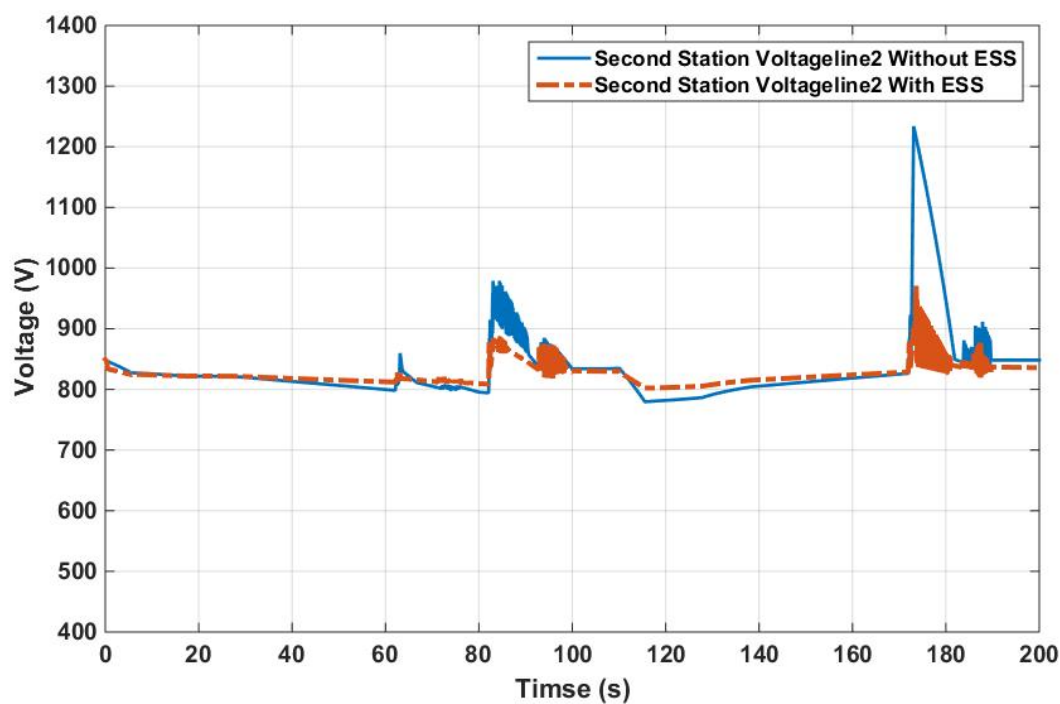
همین اتصال و عدم اتصال نیز برای سیستم ذخیره ساز صادق می باشد. به این معنی که در صورت عدم اتصال خطوط در ایستگاه وسط، از دو سیستم ذخیره ساز مجزا استفاده می شود که یک سیستم خط رفت و یک سیستم دی خط برگشت نصب شده است. اما در حالت اتصال تنها از یک سیستم ذخیره ساز در نقطه اتصال استفاده می شود. در ادامه نتایج استفاده از دو سیستم ذخیره ساز ارائه شده است.

در این حالت نیز ذخیره سازها به خوبی وظایف خود را انجام داده و ولتاژ را در رنج مجاز نگه داشته اند.

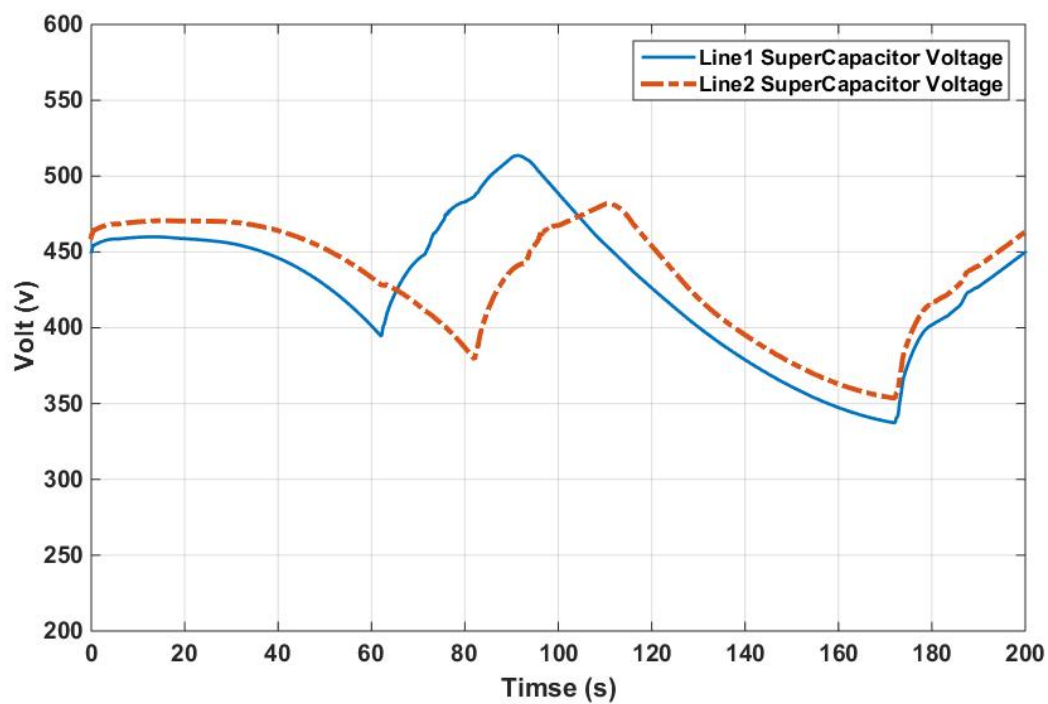
ولتاژ ابر خازن‌ها نیز در شکل ۵-۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۵ - ۲۱: ولتاژ خط رفت در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز

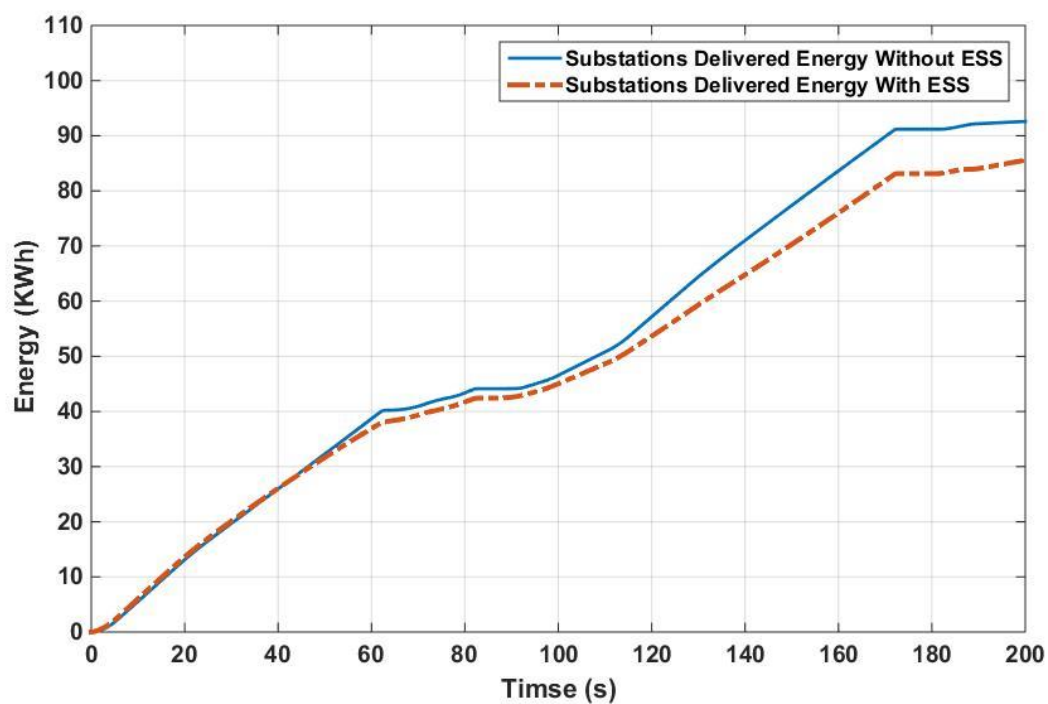


شکل ۵ - ۲۲: ولتاژ خط برگشت در حضور و عدم حضور ذخیره‌ساز

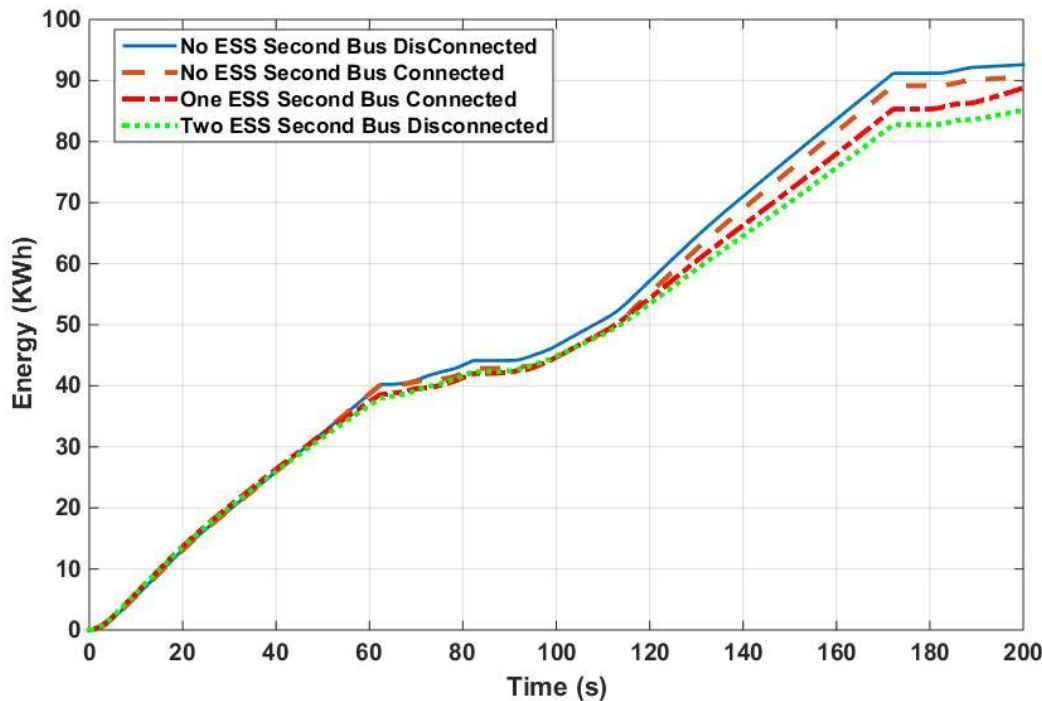


شکل ۵ - ۲۳: ولتاژ ابر خازن های خط رفت و برگشت

همچنین انرژی مصرفی در سیستم نیز کاهش داشته است.



شکل ۵ - ۲۴: انرژی مصرفی در حضور و عدم حضور ذخیره ساز



شکل ۵ - ۲۵: مقایسه انرژی مصرفی سیستم در حالت‌های مختلف

در شکل ۵-۲۵ مقایسه‌ای بین انرژی مصرفی شبکه در حالت بدون ذخیره‌ساز، یک ذخیره‌ساز در محل اتصال خط رفت و برگشت در ایستگاه دوم و دو سیستم ذخیره‌ساز جداگانه در ایستگاه دوم (عدم اتصال خط رفت و برگشت) انجام شده است.

همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین مصرف انرژی مربوط به حالتی است که نه از سیستم ذخیره‌ساز استفاده شده است و نه خطوط رفت و برگشت در ایستگاه دوم به هم متصل شده‌اند. پس از آن با اتصال خطوط در ایستگاه دوم مصرف انرژی تا حدودی کاهش یافته است و در ادامه در محل اتصال یک سیستم ذخیره‌ساز به کاربرده شده است که مجدداً انرژی کاهش یافته است. و در نهایت با استفاده از دو سیستم ذخیره‌ساز و در حالتی که خط رفت و برگشت هیچ‌گونه اتصالی ندارند کمترین مصرف انرژی را شاهد هستیم.

در مورد استفاده از دو سیستم ذخیره‌ساز به صورت مجزا، علی‌رغم اینکه مصرف انرژی را بهینه‌تر می‌کند باید به این نکته توجه داشت که سرمایه‌گذاری برای ایجاد چنین سیستمی نیز بیشتر خواهد بود. لذا یک مصالحه بین سطح سرمایه‌گذاری اولیه و سطح کاهش مصرف انرژی می‌باشد. از طرف دیگر

در صورت اتصال خطوط به همدیگر نیز قابلیت اطمینان سیستم بالا خواهد رفت.

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه سعی شد تا با مطالعه بر روی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، یک سیستم ذخیره‌ساز برای ذخیره‌سازی انرژی حاصل از ترمزهای بازیافتی در شبکه مترو طراحی و برای یک شبکه نمونه کوچک شبیه‌سازی شود. در ابتدا تمام عناصر الکتریکی و حرکت مکانی قطار مدل شد و سپس روش‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی مورد بحث قرار گرفت. در ادامه مروری بر انواع ادوات ذخیره‌ساز شد و همچنین روش‌های کنترل استفاده شده تاکنون بررسی شد. پس از آن طراحی که شامل انتخاب ذخیره‌ساز مناسب، محاسبه ظرفیت موردنیاز برای ذخیره‌ساز و کنترل سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد انجام شد و در فصل ۴ به تفصیل در مورد آن توضیح داده شد. با استفاده از منحنی راگون ذخیره‌ساز مناسب انتخاب و سپس با توجه به انرژی جنبشی قطار در حین حرکت ظرفیت ذخیره‌ساز موردنظر تعیین شد. در روش کنترل پیشنهادی نیز با اندازه‌گیری ولتاژ شبکه و SOC ذخیره‌ساز و همچنین استفاده از روش مدل میانگین برای مبدل سیستم کنترل را طراحی و نهایتاً پیاده‌سازی شد. در روش کنترل پیشنهادی از مدل میانگین مبدل استفاده شده است که نتیجه آن کاهش زمان شبیه‌سازی و محاسبات است. برای واقعی بودن نتایج شبیه‌سازی از داده‌های خط ۱ قطار شهری مشهد استفاده شد همچنین داده‌های ابر خازن مورد استفاده از محصولات شرکت ماکسول می‌باشد.

نتایج به دست آمده حاکی از این است که با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز و استراتژی کنترل پیشنهادی، ۱۶٪ کاهش ولتاژ پیک در سیستم تک قطاره و ۱۸٪ در سیستم دو قطاره به دست آمد و همچنین در حالت تک قطاره ۶٪ و در دو قطاره ۸٪ کاهش مصرف انرژی به دست آمد.

در پایان فصل پنجم نیز، مقایسه‌ای بین تمام حالت‌های شبیه‌سازی شده انجام گرفت. در این مقایسه مشخص شد که تعداد سیستم ذخیره‌ساز مورد استفاده و همچنین ساختار شبکه به صورت مستقیم بر روی میزان صرفه‌جویی انرژی تأثیر دارد؛ چراکه تنها با اتصال خط رفت و برگشت در ایستگاه

دوم مصرف انرژی کاهش یافت. همچنین در صورت استفاده از دو سیستم ذخیره‌ساز میزان صرفه‌جویی انرژی بیشتر از حالت استفاده از یک سیستم ذخیره‌ساز می‌باشد. اما نکته مهم بحث اقتصادی است که باید به عنوان یکی از فاکتورهای مهم انتخاب سیستم‌های ذخیره‌ساز در خطوط حمل و نقل ریلی الکتریکی به آن‌ها پرداخته شود.

به دلیل استفاده از سیستم ذخیره‌ساز ساکن، در ایستگاه دوم این گونه به نظر می‌رسد که یک پست تغذیه در ایستگاه دوم داریم. به همین دلیل از مزایای استفاده از این نوع ذخیره‌سازها کمک به گسترش سیستم بدون اضافه کردن ظرفیت پست‌های تغذیه اصلی می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادها

۱. برای دقیق‌تر شدن نتایج شبیه‌سازی می‌توان استراتژی کنترل را گسترش داد و برای یک سیستم کامل (برای مثال خط ۱ قطار شهری مشهد با تعداد ایستگاه‌ها و تعداد قطارهای بالا) استفاده کرد.
۲. با توجه به مهم بودن وجه اقتصادی استفاده از چنین سیستم‌هایی توصیه می‌شود پس از انجام شبیه‌سازی‌ها روی سیستم اصلی حتماً از روش اقتصادی پیشنهادی استفاده شود تا نتایج حاصل دید بهتری بدهد.
۳. یکی دیگر از مسائلی که در حوزه ذخیره‌سازها می‌توان روی آن مطالعه کرد بحث تعداد ذخیره‌سازهای نصب شده در طول خط است. از آنجایی که ذخیره‌سازهای ساکن در ایستگاه‌ها نصب می‌شوند باید دید با نصب چه تعداد از آن‌ها و در کدام ایستگاه‌ها می‌توان بهترین نتیجه را به دست آورد.
۴. به ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نیز می‌تواند یکی از موضوعات جذاب در حوزه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی باشد.

مراجع

- [1] M. C. Falvo, R. Lamedica, R. Bartoni, and G. Maranzano, "Energy management in metro-transit systems: An innovative proposal toward an integrated and sustainable urban mobility system including plug-in electric vehicles," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 12, pp. 2127–2138, 2011.
- [2] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. P. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 509–524, 2014.
- [3] Z. Gao, J. Fang, Y. Zhang, L. Jiang, D. Sun, and W. Guo, "Control of urban rail transit equipped with ground-based supercapacitor for energy saving and reduction of power peak demand," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 439–447, 2015.
- [4] T. Ratniyomchai, S. Hillmanssen, and P. Tricoli, "Optimal capacity and positioning of stationary supercapacitors for light rail vehicle systems," *2014 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2014*, pp. 807–812, 2014.
- [5] V. Musolino, A. Pievatolo, and E. Tironi, "A statistical approach to electrical storage sizing with application to the recovery of braking energy," *Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 6697–6704, 2011.
- [6] T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, and M. Tsutakawa, "Fixed energy storage technology applied for DC Electrified railway," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 270–277, 2010.
- [7] A. Kuperman, M. Mellincovsky, C. Lerman, I. Aharon, N. Reichbach, G. Geula, and R. Nakash, "Supercapacitor sizing based on desired power and energy performance," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 10, pp. 5399–5405, 2014.
- [8] R. Barrero and T. Xavier, "Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, 2008.
- [9] V. Calderaro, V. Galdi, G. Graber, and A. Piccolo, "Optimal siting and sizing of stationary supercapacitors in a metro network using PSO," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, vol. 2015–June, no. June, pp. 2680–2685, 2015.
- [10] Y. Kim and N. Chang, *Design and Management of Energy-Efficient Hybrid Electrical Energy Storage Systems*. Springer.
- [11] D. Iannuzzi, E. Pagano, and P. Tricoli, "The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines,"

- Energies*, vol. 6, no. 4, pp. 1802–1820, 2013.
- [12] M. Z. Chymera, A. C. Renfrew, M. Barnes, and J. Holden, “Modeling electrified transit systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 6, pp. 2748–2756, 2010.
 - [13] G. Boschetti and A. Mariscotti, “Integrated electromechanical simulation of traction systems: Relevant factors for the analysis and estimation of energy efficiency,” *Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propulsion, ESARS*, 2012.
 - [14] R. . Barrero, X. . Tackoen, and J. . Van Mierlo, “Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 224, no. 3, pp. 207–225, 2010.
 - [15] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and P. Tricoli, “Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand,” *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 24, pp. 36–49, 2012.
 - [16] H.-J. Kim, C. Y. Chun, K.-J. Lee, P. Jang, and B.-H. Cho, “Control Strategy of Multiple Energy Storages System for DC Microgrid,” *9th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*, pp. 1750–1755, 2015.
 - [17] Z. Gao, J. Fang, Y. Zhang, and D. Sun, “Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 2, pp. 181–190, 2014.
 - [18] C. L. Pires, S. I. Nabeta, and J. R. Cardoso, “DC traction load flow including AC distribution network,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 3, no. November 2008, p. 289, 2009.
 - [19] F. Ciccarelli, “Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems,” University of Naples “Federico II,” 2014.
 - [20] A. Gonzalez-Gil, R. Palacin, and P. Batty, “Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy,” *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 374–388, 2013.
 - [21] H. Lee, H. Lee, C. Lee, G. Jang, and G. Kim, “Energy storage application strategy on DC electric railroad system using a novel railroad analysis algorithm,” *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 228–238, 2010.
 - [22] N. Omar, M. Daowd, O. Hegazy, P. Van Den Bossche, T. Coosemans, and J. Van Mierlo, “Electrical Double-Layer Capacitors in Hybrid Topologies—Assessment and Evaluation of Their Performance,” *Energies*, pp. 4533–4568, 2012.

- [23] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Quasi-static simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles BT - 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, September 3, 2008 - September 5, 2008," *IEEE Veh. Power Propuls. Conf.*, 2008.
- [24] T. Christen and M. W. Carlen, "Theory of Ragone plots," *J. Power Sources*, pp. 210–216, 2000.
- [25] E. V. Musolino, "Supercapacitor Storage Systems: Modeling, Control Strategies, Applications and Sizing Criteria," Politecnico di Milano Engineering, 2011.
- [26] F. Ciccarelli, A. Del Pizzo, and D. Iannuzzi, "Improvement of Energy Efficiency in Light Railway Vehicles based on Power Management Control of Wayside Lithium - ion Capacitor Storage," *Ieee Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. c, pp. 275–286, 2013.
- [27] T. Ratniyomchai, S. Hillmanssen, and P. Tricoli, "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways," *IET Electr. Syst. Transp.*, no. August 2013, pp. 9–20, 2014.
- [28] M.-E. Choi, J.-S. Lee, and S.-W. Seo, "Real-time Optimization for Power Management Systems of a Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 8, pp. 3600–3611, 2014.
- [29] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-Based State-of-Charge Tracking Control for Metro Trains With Onboard Supercapacitors," *Ieee Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 2129–2140, 2012.
- [30] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, K. Kondo, and L. Fratelli, "Line-Voltage Control Based on Wayside Energy Storage Systems for Tramway Networks," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 884–899, 2016.
- [31] R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, and R. Nejati Fard, "Stationary supercapacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line," *Energy Convers. Manag.*, vol. 56, pp. 206–214, 2012.
- [32] R. Todd, D. Wu, J. A. S. Girio, M. Poucand, A. J. Forsyth, and R. Utc, "Supercapacitor-Based Energy Management for Future Aircraft Systems," *2010 Twenty-Fifth Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, pp. 1306–1312, 2010.
- [33] A. Hassanzadeh, M. Monfared, S. Golestan, R. Dowlatabadi, and A. B. Chopper, "Small Signal Averaged Model of DC Choppers for Control Studies," *Int. Conf.*

- Electr. Eng. Informatics*, no. July, pp. 17–20, 2011.
- [34] M. Zandi, A. Payman, J. Martin, S. Pierfederici, B. Davat, and F. Meibody-tabar, “Energy Management of a Fuel Cell / Supercapacitor / Battery Power Source for Electric Vehicular Applications,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 2, pp. 433–443, 2011.
- [35] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon, and B. Dakyo, “DC / DC Converter Design for Supercapacitor and Battery Power Management in Hybrid Vehicle Applications — Polynomial Control Strategy,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 2, pp. 587–597, 2010.
- [36] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Díez, and H. Biechl, “Ultracapacitor Assisted Regenerative Braking in Metropolitan Railway Systems,” *IEEE Colomb. Intell. Transp. Syst. Symp.*, 2012.
- [37] S. Barcellona, F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and L. Piegari, “Modeling and parameter identification of lithium-ion capacitor modules,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 785–794, 2014.

Abstract:

Improvement of electrical railway transportation systems from one point of view and increasing price of energy from another, make energy management of these systems an interesting subject for researchers. One of the most common ways of reducing energy consumption in electrical railway transportation systems is using the regenerative braking energy. The energy that has been fed back to grid in braking periods can be used in other time like acceleration period. By using regenerative braking energy in addition to reducing energy consumption benefits such as line voltage regulation and peak power shaving can be obtained. In this project a simple network with three stations, two DC substations and two vehicles are modeled. Energy storage system is designed for this network and a new control strategy based on average modeling of the converter is proposed. The energy storage system is stationary and the energy storage device is lithium ion supercapacitor. As a result of proposed control strategy, reduction of energy consumption, voltage regulation improvement and peak power shaving are obtained.

Keywords: Energy Storage Systems, Electrical Railway Transportation System, Regenerative Braking Energy, Supercapacitor, Average Model, Bidirectional DC-DC Converter



Faculty of Electrical Engineering and Robotic

M.Sc. Thesis in Power Electronic and Machine Engineering

Appropriate Selection of Energy Storage Systems in Urban Railways, Design and Simulation

By:

Armin Ebrahimian

Supervisor:

Prof. Ali Dastfan

Advisor:

Saeed Ahmadi

February 2017