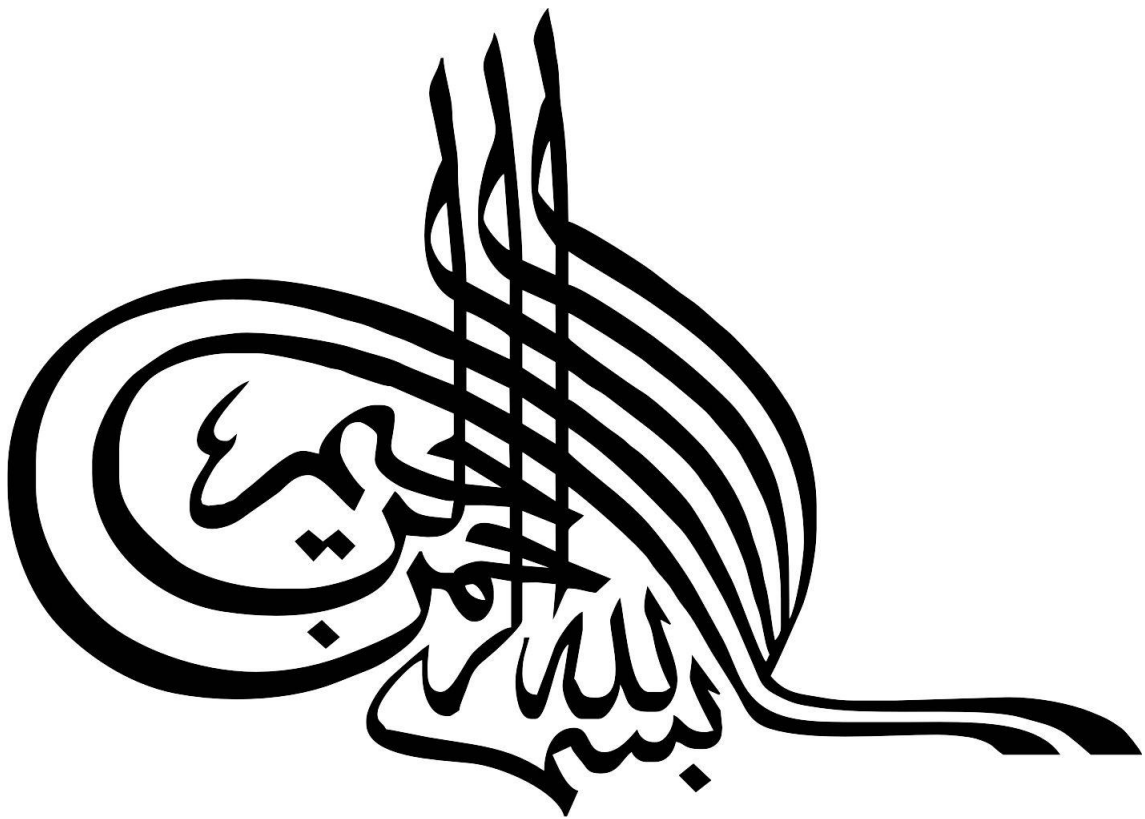






دانشکده مهندسی برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

طراحی و شبیه سازی مبدل چند ورودی/خروجی و سیستم کنترل کننده ذخیره ساز ابرخازن در قطار شهری

الهام رحیمی نامقی

استاد راهنما:

دکتر علی دستفان

بهمن ۱۳۹۴

تقدیم به پدر و مادرم

که همه وجودم

حال و آینده ام

از آن آنهاست

و هیچ جمله ای آتقدیر زیبا نیست که زیبایی احاسم را نسبت به آنها بیان کند.

تقدیم به برادران عزیزتر از جانم شهرام و بهنام

که همواره تکیه گاهم بودند.

تقدیر و تشکر

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه‌ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بگوییم یا بنگاریم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین کرده و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، تضمین می‌کند؛ بر حسب وظیفه و به مصداق "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق"، شایسته است:

از استاد گرامی، جناب آقای دکتر دستفان، که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه برای من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند؛ کمال تشکر و قدردانی را دارم. باشد که این خردترین، بخشی از زحمات ایشان را سپاس گوید.

الهام رحیمی نامقی

بهمن ۱۳۹۴

تعهد نامه

اینجانب الهام رحیمی نامقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی و شبیه سازی مبدل چند ورودی/خروجی و سیستم کنترل کننده ذخیره ساز ابرخازن در قطار شهری 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 پژوهشهای 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 های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه 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

امروزه شبکه‌های حمل و نقل ریلی برقی، به علت مزایایی از قبیل امنیت، حمل و نقل سریع، عدم آلودگی‌های زیست محیطی و ظرفیت حمل مسافر بالا مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به میزان زیاد اتلاف انرژی در خطوط راه‌آهن شهری، روش‌های صرفه‌جویی انرژی در این سیستم‌ها حائز اهمیت است. انرژی ترمزی به دلیل استفاده از یکسوکننده‌های دیودی، قابل بازگشت به شبکه نمی‌باشد و معمولاً به صورت انرژی حرارتی تلف می‌شود. استفاده از تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش تلفات، تنظیم ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه داشته باشد.

در این پایان‌نامه سیستم مترو، شامل سه ایستگاه و دو پست کششی، در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود. در مطالعات گذشته، با توجه به اینکه در محل پست‌های کششی ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود دارد، از یک مبدل DC-DC نیم‌پل برای ذخیره‌سازی انرژی ترمز استفاده شده است. اما در این پایان‌نامه، هدف طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب و بررسی عملکرد آن می‌باشد، زمانی که ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود ندارد. لازم به ذکر است با توجه به پارامترهایی نظیر سرعت شارژ و دشارژ، بازده و طول عمر، ابرخازن به عنوان تجهیز مناسب برای ذخیره‌سازی انتخاب گردیده است. مزیت مبدل پیشنهادی برای ذخیره‌سازی انرژی بازتولیدی، علاوه بر روش کنترلی ساده‌تر، استفاده از یک ابرخازن برای هر دو مسیر رفت و برگشت می‌باشد. پست‌های کششی که تأمین کننده انرژی مورد نیاز قطار می‌باشند در ایستگاه‌های یک و سه قرار دارند و مبدل پیشنهادی، در ایستگاه دو نصب شده است. سه سناریو مختلف شامل حرکت قطار از ایستگاه یک به سه، ورود هم‌زمان قطارها به ایستگاه دو و خروج هم‌زمان آن‌ها از ایستگاه دو بررسی می‌شود. در این سناریوها حرکت قطار با سه وضعیت شتاب‌گیری، حرکت با سرعت ثابت و ترمزگیری همراه است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مبدل DC-DC پیشنهادی علاوه بر کاهش جریان کشیده شده از پست‌ها و تنظیم ولتاژ باس DC باعث کاهش تلفات در مقاومت ترمزی می‌شود.

کلمات کلیدی:

ابرخازن، سیستم‌های ذخیره ساز انرژی، مبدل DC-DC نیم‌پل، شبکه‌ی حمل و نقل ریلی الکتریکی، صرفه‌جویی انرژی

فهرست مقالات مستخرج:

۱- الهام رحیمی نامقی، علی دستفان، "طراحی و کنترل سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس ابرخازن به منظور ذخیره انرژی بازتولیدی در شبکه مترو"، کنفرانس شبکه‌های هوشمند، ایران، تهران، ۱۳۹۴

2 – E. Rahimi, A. Dastfan and S. Ahmadi, "Control of super-capacitor SOC in a railway transit network “7th Power Electronics,” in *Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC 2016)*.

فهرست عناوین:

فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱- تعریف و طبقه‌بندی سیستم‌های حمل و نقل ریلی برقی	۲
۲-۱- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن	۳
۳-۱- ساختار پایان‌نامه	۳
فصل دوم : روش‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی	۵
۱-۲- سیستم تغذیه الکتریکی قطار	۶
۱-۱-۲- پست‌های تغذیه‌کننده	۶
۲-۱-۲- انواع خطوط الکتریکی تغذیه‌ی قطار الکتریکی	۷
۳-۱-۲- ولتاژ تغذیه سیستم‌های ریلی برقی	۸
۲-۲- انرژی مصرفی در سیستم مترو	۱۰
۳-۲- روش‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های کششی	۱۱
۱-۳-۲- کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش	۱۲
۲-۳-۲- کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های آسایشی	۱۲
۳-۳-۲- استفاده از انرژی بازتولید ترمزی	۱۲
۴-۲- انواع تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی	۲۰
فصل سوم : ابرخازن و روش‌های کنترل شارژ و دشارژ آن	۲۹
۱-۳- مقدمه	۳۰

۲-۳- مروری بر مبدل مورد استفاده در سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازن و روش‌های کنترلی آن	۳۳
فصل چهارم : طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی.....	۴۱
۱-۴- مدل شبکه‌ی مترو	۴۲
۱-۱-۴- مدل‌سازی پست‌های یک‌طرفه و خطوط ارتباطی.....	۴۲
۲-۱-۴- مدل‌سازی قطار	۴۳
۳-۱-۴- سیستم ذخیره‌ساز انرژی	۴۴
۲-۴- طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی	۴۴
۱-۲-۴- طراحی مبدل	۴۴
۲-۲-۴- کنترل‌کننده سیستم ذخیره‌ساز	۴۸
۳-۲-۴- طراحی ابرخازن	۵۰
فصل پنجم : نتایج شبیه‌سازی	۵۵
۱-۵- حرکت قطار از ایستگاه یک به دو	۵۷
۱-۱-۵- شبیه‌سازی مدار با استفاده از مقاومت ترمزی کنترل‌شده و بدون سیستم ذخیره- ساز.....	۵۹
۲-۱-۵- شبیه‌سازی مدار با استفاده از مقاومت ترمزی کنترل‌شده و سیستم ذخیره‌ساز کنترل- شده	۶۳
۲-۵- حرکت قطار از ایستگاه یک به سه	۶۵
۳-۵- ورود هم‌زمان قطارها به ایستگاه دو و خروج هم‌زمان آنها از ایستگاه دو	۷۱

۵-۴- آغاز شتابگیری قطار اول از ایستگاه دو هم‌زمان با ترمزگیری قطار دوم در ایستگاه دو... ۷۸

فصل ششم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات..... ۸۱

۶-۱- نتیجه‌گیری..... ۸۲

۶-۲- پیشنهادات..... ۸۳

مراجع ۸۳

فهرست شکل‌ها:

- شکل ۲-۱: سیستم تغذیه‌ی الکتریکی قطار ۶
- شکل ۲-۲: روش‌های حداکثر کردن انرژی بازتولیدی در سیستم‌های ریلی الکتریکی ۱۴
- شکل ۲-۳: استفاده از انرژی ترمزی یک قطار برای شتاب‌گیری قطار بعدی ۱۵
- شکل ۲-۴: استفاده از پست‌های معکوس به منظور بازگشت انرژی به شبکه ۱۶
- شکل ۲-۵: سیستم ذخیره‌ساز متحرک ۱۷
- شکل ۲-۶: سیستم ذخیره‌ساز ثابت ۱۹
- شکل ۲-۷: چگالی توان چند تجهیز ذخیره‌کننده انرژی در مقایسه با چگالی انرژی آن‌ها ... ۲۱
- شکل ۲-۸: نمونه‌های از یک سلول ابرخازن ۲۶
- شکل ۳-۱: سلول ابرخازن ۳۰
- شکل ۳-۲: انواع ابرخازن بر اساس مواد و ساختار الکترودها ۳۲
- شکل ۳-۳: ساختار مبدل DC-DC نیم‌پل دوسویه ۳۴
- شکل ۳-۴: بلوک دیاگرام خلاصه شده روش کنترل ردیاب ولتاژ خط ۳۶
- شکل ۳-۵: بلوک دیاگرام خلاصه شده روش کنترل ردیاب جریان خط ۳۷
- شکل ۳-۶: دیاگرام الگوریتم کنترلی سیستم ذخیره‌ساز ابرخازن ۳۹
- شکل ۴-۱: کنترل‌کننده جریان ابرخازن ۴۶
- شکل ۴-۲: مبدل DC-DC مورد استفاده در این پروژه همراه با ذخیره‌ساز ۴۷
- شکل ۴-۳: دو جزء جریان مرجع ابرخازن ۴۹
- شکل ۴-۴: مدل مداری ابرخازن ۵۰
- شکل ۵-۱: نمودار سرعت قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو ۵۸
- شکل ۵-۲: نمودار جریان قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو ۵۸

- شکل ۵-۳: ولتاژ باس بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در حرکت قطار از ایستگاه یک به دو ۵۹
- شکل ۵-۴: مقاومت الکتریکی قسمتی از خط، واقع شده بین قطار و ایستگاه یک ۶۰
- شکل ۵-۵: مقاومت الکتریکی قسمتی از خط، واقع شده بین قطار و ایستگاه دو ۶۰
- شکل ۵-۶: مقاومت الکتریکی ریل با ایستگاه قبل قطار ۶۱
- شکل ۵-۷: مقاومت الکتریکی ریل با ایستگاه بعد قطار ۶۱
- شکل ۵-۸: جریان کشیده شده از پست یک بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۲
- شکل ۵-۹: جریان کشیده شده از پست دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۲
- شکل ۵-۱۰: انرژی مورد نیاز قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو بر حسب ژول ۶۳
- شکل ۵-۱۱: ولتاژ ابرخازن ۶۴
- شکل ۵-۱۲: ولتاژ باس با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۴
- شکل ۵-۱۳: جریان کشیده شده از پست یک با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۵
- شکل ۵-۱۴: جریان کشیده شده از پست دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۵
- شکل ۵-۱۵: نمودار جریان قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه ۶۶
- شکل ۵-۱۶: نمودار سرعت قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه ۶۶
- شکل ۵-۱۷: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه یک (قرارگیری قطار بین ایستگاه یک و دو) ۶۷
- شکل ۵-۱۸: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه دو (قرارگیری قطار بین ایستگاه یک و دو) ۶۷
- شکل ۵-۱۹: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت با ایستگاه دو (قرارگیری قطار بین ایستگاه دو و سه) ۶۷
- شکل ۵-۲۰: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه سه (قرارگیری قطار بین ایستگاه دو و سه) ۶۸

- شکل ۵- ۲۱: جریان مقاومت ترمزی بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۸
- شکل ۵- ۲۲: ولتاژ باس با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۶۹
- شکل ۵- ۲۳: ولتاژ دو سر ابرخازن ۶۹
- شکل ۵- ۲۴: جریان کشیده شده از پست یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۰
- شکل ۵- ۲۵: جریان کشیده شده از پست دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۰
- شکل ۵- ۲۶: کل انرژی مورد نیاز قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه ۷۱
- شکل ۵- ۲۷: ولتاژ باس یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۲
- شکل ۵- ۲۸: ولتاژ باس دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۲
- شکل ۵- ۲۹: ولتاژ دو سر ابرخازن ۷۳
- شکل ۵- ۳۰: جریان کشیده شده از پست یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۴
- شکل ۵- ۳۱: جریان کشیده شده از پست دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۴
- شکل ۵- ۳۲: نمودار جریان قطار اول در حرکت از ایستگاه یک به سه ۷۵
- شکل ۵- ۳۳: نمودار سرعت قطار اول در حرکت از ایستگاه یک به سه ۷۵
- شکل ۵- ۳۴: نمودار جریان قطار دوم در حرکت از ایستگاه یک به سه ۷۶
- شکل ۵- ۳۵: نمودار سرعت قطار دوم در حرکت از ایستگاه یک به سه ۷۶
- شکل ۵- ۳۶: ولتاژ ابرخازن در حرکت قطار از ایستگاه یک به سه ۷۷
- شکل ۵- ۳۷: ولتاژ باس یک بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۷
- شکل ۵- ۳۸: ولتاژ باس دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۸
- شکل ۵- ۳۹: ولتاژ باس یک با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۸
- شکل ۵- ۴۰: ولتاژ باس دو با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز ۷۸
- شکل ۵- ۴۱: جریان کشیده شده از پست یک در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره-
ساز ۷۹

شکل ۵-۴۲: جریان کشیده شده از پست دو در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

۸۰

فهرست جدول‌ها:

- جدول ۲-۱: ولتاژهای تغذیه‌ی خطوط ریلی در جهان ۱۰
- جدول ۲-۲: مقایسه‌ی مشخصات فنی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاربردهای
قطارشهری ۲۷
- جدول ۲-۳: مقایسه‌ی مشخصات فنی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاربردهای
قطارشهری ۲۸
- جدول ۵-۱: پارامترهای مربوط به شبکه ۵۶
- جدول ۵-۲: پارامترهای مربوط به قطار ۵۷
- جدول ۵-۳: راندمان اجزاء ۵۷
- جدول ۵-۴: مشخصات ابرخازن ۵۷
- جدول ۵-۵: پارامترهای مربوط به مبدل ۵۷

فصل اول : مقدمه

۱-۱- تعریف و طبقه‌بندی سیستم‌های حمل و نقل ریلی برقی

امروزه با افزایش روزافزون قیمت سوخت‌های فسیلی، محدودیت‌های زیست محیطی و همچنین با گسترش شهرها و به موازات آن افزایش حجم سفرهای بین‌شهری، ترافیک در جاده‌ها و فرودگاه‌ها افزایش چشم‌گیری یافته است. سیستم‌های حمل و نقل ریلی به علت مزایایی همچون امنیت، حمل و نقل سریع، عدم آلودگی‌های زیست محیطی و ظرفیت حمل مسافر بالا موردتوجه محققان قرار گرفته است. این سیستم‌ها به گروه‌های مختلفی از جمله مترو^۱ سیستم حمل و نقل ریلی سبک شهری^۲ و تراموا^۳ تقسیم می‌شوند.

سیستم LRT نوعی از سیستم حمل و نقل ریلی درون‌شهری می‌باشد که نسبت به مترو از ظرفیت و سرعت کمتری برخوردار است. ولی ظرفیت و سرعت آن از تراموا بیشتر است. در این نوع از سیستم‌های حمل و نقل، از یک واگن یا قطار کوچک در یک مسیر کاملاً مجزا به‌صورت هم‌سطح با زمین و یا هوایی استفاده شده است. برای تأمین انرژی مصرفی در این سیستم‌ها از شبکه بالاسری^۴ استفاده شده است [۱].

تراموا قطار خیابانی است که ریل‌گذاری آن روی سطح خیابان‌های شهر انجام شده است و معمولاً در محدوده‌ی داخل شهرها، کار جابه‌جایی مسافران را انجام می‌دهد. پیدایش و تکمیل تراموا به سال ۱۸۳۲ میلادی برمی‌گردد که اولین بار در نیویورک، واگن‌های اسبی به کار افتاد، اتفاق این واگن‌ها به کمک چرخ و با نیروی اسبی روی ریل حرکت می‌کرد. از مزایای تراموا می‌توان به ظرفیت بالای حمل مسافر، هزینه عملیاتی پایین با توجه به مصرف کم انرژی، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری کمتر از مترو و امکان حرکت، هم در خیابان عمومی و هم در راه جداگانه اشاره کرد. معایب آن نیز، از یک جهت مربوط به قیمت گران واگن‌ها و از سوی دیگر مربوط به تأسیسات و دکل‌های برقی می‌باشد که بالای

¹ Metro

² Light Rail Transit (LRT)

³ Tramway

⁴ Overhead contact lines

ریل نصب می‌شوند و در بعضی نقاط جلوی دید ساختمان‌ها را گرفته و در واقع موجب آلودگی بصری می‌شوند [۱].

۲-۱- اهداف پایان‌نامه و ضرورت انجام آن

هدف اصلی این پایان‌نامه طراحی و شبیه‌سازی مبدل چند ورودی/خروجی و سیستم کنترل‌کننده ذخیره‌ساز ابرخازن در قطار شهری می‌باشد. قطار شهری مشهد شامل ۲۲ ایستگاه، ۱۱ پست کششی، یک مسیر رفت و یک مسیر برگشت می‌باشد. پست‌های کششی (پست‌های تأمین‌کننده برق مترو از شبکه سراسری) به‌صورت یک در میان در ایستگاه‌ها قرار گرفته‌اند و فقط در محل این پست‌ها مسیر رفت و مسیر برگشت به هم متصل شده است. شتاب و یا ترمز وسیله نقلیه در هر یک از این مسیرها موجب افزایش یا کاهش ولتاژ خط DC از مقدار مجاز خود می‌شود. از سوی دیگر اختلاف ولتاژ به وجود آمده بین دو مسیر، سبب جاری شدن جریان زیادی در محل اتصال مسیرهای رفت و برگشت خواهد شد که این جریان زیاد به تجهیزات آسیب می‌رساند. در ایستگاه‌هایی که پست‌های کششی قرار دارند با استفاده از یک مبدل DC-DC نیم پل دوسویه مناسب می‌توان این نوسانات ولتاژ را کاهش داد. در شرایطی که ولتاژ خط DC از مقدار مجاز، بیشتر باشد بدین معنی است که قطار در حال تغذیه‌ی خط (ترمزگیری) بوده و در نتیجه ذخیره‌ساز باید شارژ شود و در هنگام کاهش ولتاژ خط DC از مقدار مجاز خود، قطار در حال مصرف انرژی (شتاب‌گیری) بوده و باید ذخیره‌ساز دشارژ شود. در ایستگاه‌هایی که اتصال مستقیم بین مسیر رفت و برگشت وجود ندارد می‌توان با استفاده از مبدل DC-DC دوسویه برای هر یک از خطوط، انرژی حاصل از ترمز را در یک ابرخازن ذخیره کرد.

۳-۱- ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم، ابتدا به بررسی مختصر سیستم‌های تغذیه‌ی الکتریکی قطار پرداخته می‌شود و در ادامه روش‌های صرفه‌جویی انرژی در سیستم حمل و نقل ریلی الکتریکی به طور مختصر شرح داده

می‌شود. از میان روش‌های صرفه‌جویی انرژی، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی^۱ برای بهره‌مندی بیشتر از انرژی بازتولیدی پیشنهاد می‌گردد. در انتهای فصل خصوصیات تجهیزات مورد استفاده برای ذخیره‌سازی انرژی مطرح و دسته‌بندی شده و کاربرد این تجهیزات، مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به مزایا و معایب آن‌ها، ابرخازن‌ها به عنوان تجهیز ذخیره‌کننده انرژی انتخاب می‌شود. در فصل سوم مشخصات ذخیره‌ساز انرژی ابرخازن و روش‌های کنترل شارژ و دشارژ آن به تفصیل بیان می‌گردد. در فصل چهارم ابتدا، روابط لازم جهت مدل‌سازی سیستم مترو با توجه به روابط فیزیکی حاکم بر تجهیزات، استخراج شده و مدل مداری سیستم شبکه‌ی مترو به همراه سیستم ذخیره‌ساز پیشنهادی در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی می‌شود. در فصل پنجم نتایج حاصل از شبیه‌سازی به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در فصل آخر به جمع‌بندی مطالب و ارائه پیشنهاداتی جهت توسعه‌ی تحقیق حاضر پرداخته می‌شود.

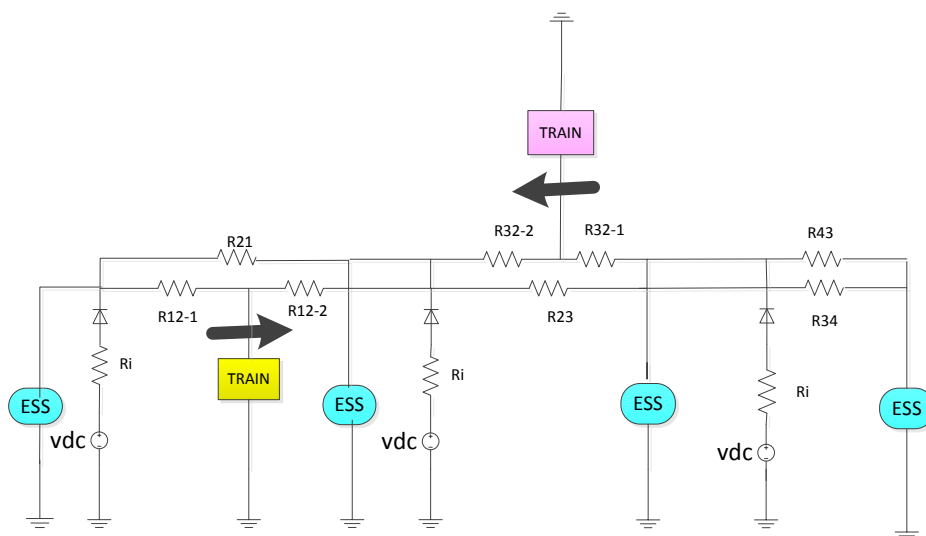
¹ Energy Storage System (ESS)

فصل دوم : روش‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم

حمل و نقل ریلی الکتریکی

۲-۱- سیستم تغذیه الکتریکی قطار

توان مورد نیاز قطارها توسط سیستم الکتریکی خطوط ریلی برقی تأمین می‌شود. به‌طور کلی بخش‌های اصلی سیستم تغذیه الکتریکی قطارها شامل پست یا منبع تغذیه، خط انتقال توان از پست به قطار، مسیر برگشت جریان از قطار به پست، یکسوسازها، موتورهای کششی و سیستم بازیابی توان ترمزی می‌باشد. یک سیستم تغذیه الکتریکی نمونه در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است.



شکل ۲-۱: سیستم تغذیه الکتریکی قطار [۲]

۲-۱-۱- پست‌های تغذیه‌کننده

این پست‌ها نقش تأمین ولتاژ لازم جهت تغذیه قطارها از شبکه انتقال و توزیع را بر عهده دارند. پست‌های تغذیه با توجه به نوع ولتاژ مورد نیاز سیستم ریلی، شامل تجهیزاتی مثل ترانسفورماتورهای قدرت، یکسوسازها، تابلوهای برق و غیره می‌باشد. ظرفیت الکتریکی پست‌های تغذیه به تعداد و توان مصرفی قطارها، مصارف عمومی سیستم و فاصله بین پست‌های مجاور بستگی دارد. توان مصرفی هر قطار نیز به وزن آن، سرعت حرکت و مشخصات سیستم ریلی وابسته است.

در خطوط ریلی با برق DC، اغلب از پست‌های DC برای تغذیه‌ی قطارها استفاده می‌شود. در این پست‌ها ابتدا ولتاژ AC فشارقوی توسط ترانسفورماتورها به مقدار معینی کاهش می‌یابد و سپس به وسیله‌ی مدارات یکسوساز به ولتاژ DC تبدیل می‌شود [۳].

۲-۱-۲- انواع خطوط الکتریکی جهت تغذیه‌ی قطار الکتریکی

انتقال توان الکتریکی از پست‌ها به قطارهای در حال حرکت از طریق ریل هادی (ریل سوم)^۱ و یا شبکه‌ی بالاسری صورت می‌گیرد [۴] که در ادامه به بررسی هر یک خواهیم پرداخت.

۱. ریل سوم

از نوع استیل با درصد کربن کم و یا ترکیبی از آلیاژ آلومینیوم است که هدایت جریان برق را از طریق کفشک یا رسیپتور^۲ بر عهده دارد. این ریل هادی در مجاورت و به موازات خطوط ریلی و با ارتفاع معینی از سطح ریل‌ها در کنار دو ریل دیگر نصب می‌شود. ریل سوم توسط کفشک‌هایی که به هر واگن متصل است و در فواصل مشخص تعبیه شده، انرژی قطار را تأمین می‌کند. این شیوه‌ی برق‌رسانی به قطار بیشتر در سیستم‌های مترو با حجم ترافیک سنگین و یا مکان‌هایی که با محدودیت فضایی جهت احداث خطوط بالاسری همراه است، کاربرد دارد [۵]. ولتاژ این نوع سیستم‌ها اغلب ۷۵۰ ولت می‌باشد. در عمل ریل‌های سوم، اغلب از ولتاژ DC استفاده می‌کنند، زیرا تحت ولتاژ با مقدار مؤثر یکسان، برق DC حدود ۴۱٪ بیشتر از برق AC توان مبادله می‌کند [۳].

۲. شبکه‌ی بالاسری

در این روش، یک شبکه‌ی توزیع هوایی در امتداد مسیر خطوط ریلی احداث می‌شود و قطار توان مصرفی مورد نیاز خود را از طریق پانتوگراف^۳ نصب شده بر روی سقف هر قطار دریافت می‌کند.

¹ third rail

² receptor

³ Pantograph

تجهیزات اصلی شبکه بالاسری شامل سیم هادی، پایه‌ها و تجهیزات نگهدارنده می‌باشد. ولتاژ شبکه بالاسری غالباً ۷۵۰ VDC یا ۱۵۰۰ VDC می‌باشد [۵]. بدلیل امکان افتادگی سیم‌های شبکه بالاسری در اثر انبساط و انقباض، پانتوگراف‌ها به صورت ارتجاعی ساخته می‌شوند تا ارتفاع سیم با قطار در یک تلورانس مشخص نگه داشته شود.

حرکت پانتوگراف در زیر شبکه بالاسری وابسته به ساختمان و نوع پانتوگراف است. تماس بین شبکه‌ی بالاسری و پانتوگراف نباید قطع شود و این ارتباط باید به صورت مداوم برقرار باشد. چرا که فاصله‌ی هوایی به وجود آمده در اثر قطع تماس باعث ایجاد قوس الکتریکی بین شبکه‌ی بالاسری و پانتوگراف می‌شود و در اثر مداومت قوس الکتریکی بین هادی تماس^۱ و پانتوگراف هر دو گرم می‌شوند و این عمل موجب تغییر شکل هادی می‌شود که در نتیجه‌ی آن ممکن است برق قطار قطع شود.

۲-۱-۳- ولتاژ تغذیه سیستم‌های ریلی برقی

سیستم‌های خطوط ریلی برقی با ماهیت بار غیرخطی و متغیر (از لحاظ زمان و مکان) خود، جزء مصرف‌کننده‌های خاص شبکه‌های الکتریکی می‌باشند که باعث کاهش کیفیت توان شبکه می‌شوند. جهت تغذیه این بارها به خطوط، پست‌ها و تجهیزات با ظرفیت بالا نیاز است. سیستم‌های ریلی برقی این قابلیت را دارند که با ولتاژ DC، AC و یا ترکیبی از هر دو تغذیه شوند. تعیین نوع ولتاژ تغذیه سیستم حمل و نقل ریلی برقی به عواملی از جمله نوع سیستم (مترو، قطار شهری سبک و غیره)، توان مصرفی سیستم ریلی، نوع و نحوه‌ی بهره‌برداری، مشخصات فیزیکی مسیر و غیره بستگی دارد [۶، ۷].

در گذشته خطوط تغذیه‌ی قطارهای برقی به دلیل ارزانی، راحت بودن کنترل سرعت و گشتاور موتورهای DC در مقایسه با موتورهای AC، از نوع DC بوده است، اما امروزه بدلیل اینکه هم موتورهای AC و هم موتورهای DC این قابلیت را دارند که با استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت با

² Catenary

هر دو نوع برق AC و DC دارای عملکرد مطلوب باشند، نوع موتور کششی AC و یا DC در انتخاب نوع خطوط تغذیه‌ی شبکه‌ی ریلی نقش چندان مهمی ندارد. به‌طور کلی از برق AC برای خطوط ریلی طولانی، اصلی (توان بالا) و برون‌شهری و از برق DC برای خطوط کوتاه درون‌شهری مثل خطوط تغذیه تراموا، اتوبوس برقی، منوریل و مترو استفاده می‌شود.

در حال حاضر استفاده از خط تغذیه‌ی DC به‌خصوص برای شبکه‌ی ریلی برقی درون‌شهری رایج‌تر از خط تغذیه‌ی AC می‌باشد. رایج‌ترین سطح ولتاژها برای تغذیه‌ی تراموای برقی و متروی شهری به ترتیب ۶۰۰ و ۷۵۰ ولت DC می‌باشد. از ولتاژهای ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ ولت DC برای راه‌آهن برقی برون‌شهری و یا خطوط اصلی با ظرفیت بالا استفاده می‌شود. خطوط ریلی برقی با ولتاژهای کمتر از ۱۰۰۰ ولت اغلب به‌وسیله‌ی ریل سوم تغذیه می‌شوند. ولی خطوط ریلی با ولتاژهای بالاتر از ۱۰۰۰ ولت به دلیل مسائل ایمنی از شبکه‌ی بالاسری تغذیه می‌کنند [۶، ۷].

به‌طور کلی خطوط DC محدود به ولتاژهای سطح پایین بوده و در نتیجه سرعت، توان و اندازه قطارهای این خطوط دارای محدودیت می‌باشد. لذا برای قطارهای خطوط سنگین مترو و راه‌آهن شهری از ولتاژ AC با سطح ولتاژ بالاتر (۲۵KV) استفاده می‌شود. با افزایش ولتاژ علاوه بر انتقال توان بیشتر به شبکه‌ی ریلی، افت ولتاژ سیستم نیز کاهش می‌یابد [۶، ۷]. سطوح مجاز ولتاژهای قابل استفاده برای سیستم‌های ریلی برقی در استانداردهای BS50163 و IEC60580 با توجه به تعداد قطارها، نوع خطوط و فاصله‌ی پست‌های تغذیه‌کننده سیستم ریلی تعیین شده است. در جدول ۱-۲ سطوح ولتاژهای رایج برای تغذیه‌ی خطوط ریلی برقی کشورهای مختلف آورده شده است.

جدول ۲-۱: ولتاژهای تغذیه‌ی خطوط ریلی در جهان [۳]

نوع ولتاژ سیستم تغذیه‌ی قطار		بعضی از کشورهای مورد استفاده
۶۰۰V	DC	آلمان، انگلیس، سوئیس، آمریکا
۷۵۰V		ایران، ژاپن، استرالیا، فرانسه، آمریکا
۱۵۰۰V		فرانسه، اسپانیا، استرالیا، هلند، ژاپن
۳۰۰۰V		روسیه، هلند، ایتالیا، اسپانیا، لهستان
<۲۰ KV	AC تک فاز	فرانسه، آمریکا
۲۵ KV		ایران، روسیه، فرانسه، چین، انگلیس
۵۰ KV		آمریکا، کانادا، آفریقای جنوبی
(۱۱-۱۳) KV		آمریکا، استرالیا، نروژ
۱۱ KV		سوئیس
۱۵ KV		آلمان، سوئد، سوئیس
سه فاز AC		فرانسه، سوئیس

۲-۲- انرژی مصرفی در سیستم مترو

امروزه بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های حمل و نقل ریلی به دلیل اثر گذاری بر میزان هزینه‌ها و اثرات زیست محیطی، از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به اینکه سیستم‌های حمل و نقل ریلی پتانسیل زیادی برای ذخیره‌سازی انرژی هم به صورت کوتاه‌مدت و هم به صورت بلندمدت دارند، با شناخت زمینه‌های مصرف انرژی در این سیستم‌ها می‌توان از روش‌های مناسبی، برای کاهش میزان مصرف و یا جلوگیری از اتلاف انرژی استفاده کرد. انرژی مصرف شده توسط یک قطار به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شود:

۱- انرژی سیستم کششی که شامل انرژی مستقیم مصرفی برای حرکت قطار و مصارف داخلی آن است.

۲- انرژی غیر کششی که مصارفی از قبیل روشنایی و تهویه ایستگاه‌ها، تونل‌ها و غیره را شامل می‌شود.

از آنجاکه قسمت عمده انرژی مصرفی (حدود ۸۰٪) در سیستم کششی مصرف می‌شود، این بخش از اهمیت بالایی برخوردار است [۵، ۸].

از طرفی انرژی کششی خود به عوامل متعددی از قبیل شیب و انحنای مسیر، تعداد و محل ایستگاه‌ها، محدودیت و مشخصه‌های قطار (سیستم کنترل، وزن، شتاب، موتور) تعداد و محل پست‌ها، نوع تجهیزات، مشخصات هادی‌ها و سطح ولتاژ، فاصله زمانی بین حرکت قطارها، ساختار قطار و زمان توقف بستگی دارد [۹].

۲-۳- روش‌های کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های کششی

سیستم‌های مترو از جمله مصرف‌کننده‌های بزرگ انرژی الکتریکی هستند و موضوع صرفه‌جویی انرژی و کاهش هزینه‌های مربوط به آن‌ها همواره یکی از اصلی‌ترین موضوعات مطرح در این سیستم‌ها بوده است. وسایل حمل و نقل ریلی برای شتاب‌گیری، غلبه بر اصطکاک بین ریل و چرخ و اصطکاک هوا به مصرف انرژی نیاز دارند. بخش زیادی از انرژی صرف شده جهت شتاب‌گیری قطار، به صورت انرژی جنبشی در جرم آن ذخیره می‌شود که در عمل امکان بازیافت قسمتی از آن وجود دارد. استفاده از ترمز الکترودینامیکی امکان احیا کردن این انرژی جنبشی و استفاده بهینه از آن را میسر می‌کند.

با توجه به توضیحات بالا می‌توان روش‌های صرفه‌جویی انرژی در وسایل حمل و نقل ریلی را به سه دسته کلی تقسیم‌بندی کرد؛ که در ادامه به بررسی هر یک خواهیم پرداخت.

(۱) کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش

(۲) کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های آسایشی [۵]

(۳) استفاده از انرژی بازتولید ترمزی

۲-۳-۱- کاهش تلفات در سیستم تغذیه و کشش

کاهش تلفات را می‌توان با تغییر در پارامترهایی نظیر ولتاژ نامی سیستم، (افزایش ولتاژ، کاهش جرم و تلفات را به دنبال دارد) کاهش وزن و طول قطار، استفاده از تجهیزات با بازده بالاتر از قبیل اینورتر-های جدید و ماشین‌های سنکرون با آهنربای دائم حاصل کرد [۵].

۲-۳-۲- کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های آسایشی

قسمتی از انرژی مصرفی قطارها صرف مسائل مربوط به رفاه حال مسافران می‌شود. از آن جا که تهویه مطبوع هوا (گرم‌زائی در زمستان و خنک‌کننده‌ها در تابستان) قسمت بیشتری از انرژی مصرف شده برای راحتی مسافران است. میزان کل مصرف انرژی مربوط به تجهیزات کمکی بستگی زیادی به منطقه و فصل سال دارد.

استفاده از سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی مانند کنترل خودکار سیستم تهویه قطار، روشنایی هوشمند، لامپ‌های کم‌مصرف و نظایر این‌ها نیز می‌توانند از عوامل تأثیرگذار در بهینه‌سازی مصرف انرژی باشند. ولی به دلیل اینکه این بخش سهم نسبتاً کوچکی در کل انرژی مصرفی دارد، تأثیر آن نیز در افزایش بازده کل سیستم خیلی زیاد نیست [۹].

۲-۳-۳- استفاده از انرژی بازتولید ترمزی

با توجه به پیشرفت فن‌آوری‌های فعلی، یکی از روش‌های اصلی جهت کاهش مصرف انرژی و کاهش تلفات، استفاده از انرژی جنبشی قطار در زمان ترمزگیری است. در این صورت موتور الکتریکی

محرک قطار توسط سیستم کنترلی به حالت ژنراتوری تبدیل می‌شود و انرژی را به سیستم، بازپس می‌دهد که این تبدیل انرژی جنبشی به الکتریکی تحت عنوان ترمز الکترودینامیکی شناخته می‌شود. توان الکتریکی تولید شده در زمان ترمزگیری می‌تواند در مقاومت‌های تلف‌کننده‌ی توان مصرف شود و یا به وسیله‌ی سیستم بازتولید به شبکه‌ی الکتریکی منتقل شود؛ بنابراین ترمز الکترودینامیکی به دو دسته مقاومتی (برای قطارهای سرعت پایین) و بازتولید توان (برای قطارهای سرعت بالا) تقسیم می‌شود. در روش ترمز الکترودینامیکی مقاومتی، توان تولید شده در حالت ترمزی به وسیله‌ی مقاومت‌های تلف‌کننده مصرف می‌شود. این مقاومت‌ها در هنگام راه‌اندازی موتور به عنوان مقاومت‌های راه‌انداز استفاده می‌شوند.

استفاده از ترمز بازتولید توان، باعث افزایش راندمان الکتریکی سیستم می‌شود که به کمک این سیستم بازتولید توان، می‌توان ۱۰٪ تا ۴۰٪ مصرف کل توان قطار را کاهش داد [۱۱، ۱۰].

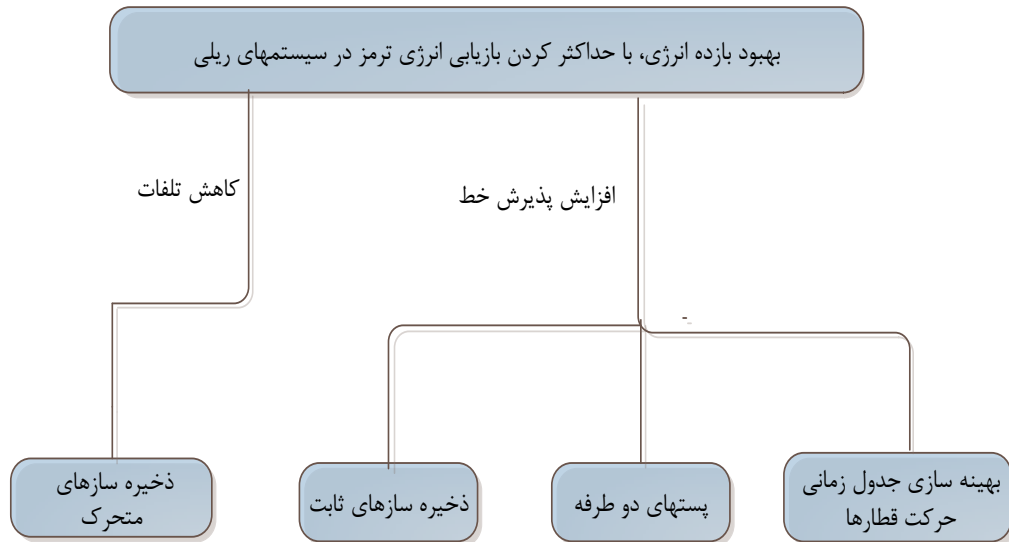
تزریق توان بازتولید شده به شبکه‌ی DC ممکن است باعث افزایش ولتاژ خط DC از مقدار مجاز آن شود. لذا باید یک یا چند مصرف‌کننده‌ی توان (قطارهای دیگر در حالت موتوری یا مصارف عمومی) نیز در شبکه باشد تا توان تولید شده را دریافت کنند و مانع افزایش بیش‌ازحد ولتاژ خط شوند. در بسیاری از اوقات مخصوصاً در ساعات کم ترافیک و یا مسیرهای خلوت قطار شتاب‌گیرنده‌ای در هنگام ترمز وجود ندارد و این امر می‌تواند مانع از امکان استفاده از انرژی احیائی ترمزی توسط قطارهای در حال شتاب‌گیری شود. با این حال زمانی که ولتاژ خط DC به مقدار بحرانی برسد آنگاه ترمز الکترودینامیکی نیز جهت اتلاف توان در مقاومت‌های تلف‌کننده فعال می‌شود [۱۰].

راهکارهای زیر به‌منظور حداکثر کردن استفاده از انرژی بازتولیدی و در نتیجه حداقل کردن استفاده از مقاومت ترمزی پیشنهاد شده‌اند که به صورت خلاصه در شکل ۲-۲ نیز بیان شده است.

۱. بهینه‌سازی جدول زمانی حرکت قطارها (فاصله زمانی بین حرکت دو قطار متوالی) [۱۲]،

۲. استفاده از پست‌های دوطرفه و بازگرداندن انرژی اضافه به شبکه [۱۴]

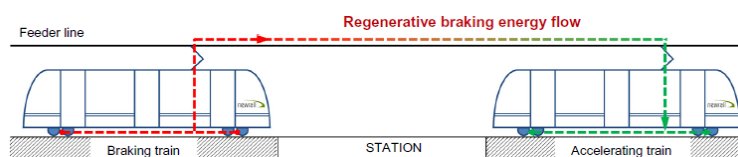
۳. استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی [۱۵]



شکل ۲-۲: روش‌های حداکثر کردن انرژی بازتولیدی در سیستم‌های ریلی الکتریکی

بهینه‌سازی جدول زمانی حرکت قطارها (فاصله زمانی بین حرکت دو قطار متوالی)

این شیوه بر اساس کنترل شرایط ترافیک است. به این صورت که در هنگام ترمزگیری یک قطار در ایستگاه، باید قطار یا قطارهای دیگر در نزدیکی آن در حال شتاب‌گیری باشند تا بتوانند این انرژی را جذب کنند. در این حالت همان‌طور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است انرژی بازتولیدی می‌تواند به‌صورت مستقیم از طریق خط تغذیه، بین دو قطار منتقل شود. طراحی دقیق جدول زمانی عملکرد قطارها، علاوه بر صرفه‌جویی قابل توجه انرژی در کل سیستم، با محدود کردن شتاب‌گیری‌های هم‌زمان قطارها، سبب کاهش حداکثر توان کششی (پیک توان مصرفی) و در نتیجه کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی می‌شود [۱۰].



شکل ۲-۳: استفاده از انرژی ترمزی یک قطار برای شتابگیری قطار بعدی [۱۰]

ژانگ^۱ و همکارانش [۱۶]، از الگوریتم ژنتیک برای تعیین زمان توقف قطارها به منظور به دست آوردن جدول زمان‌بندی بهینه استفاده کرده‌اند. ناصری و همکارانش [۱۳]، یک روش بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک با هدف حداکثر کردن تبادل انرژی بین قطارها پیشنهاد داده‌اند و همچنین در این مقاله اثر دو فاکتور زمانی (زمان رزرو و زمان هدوی) بررسی شده است. منظور از زمان رزرو مدت-زمانی است که اگر قطار به هر دلیلی تا این مدت زمان را تأخیر داشته باشد، مشکلی در برنامه‌ی حرکت سایر قطارها به وجود نمی‌آید و زمان هدوی فاصله‌ی زمانی بین خروج یک قطار از ایستگاه تا ورود قطار بعدی به ایستگاه است. نویسندگان این مقاله ادعا کرده‌اند که به‌کارگیری این روش می‌تواند بیش از ۱۴٪ صرفه‌جویی انرژی را به همراه داشته باشد. با این وجود در نظر گرفتن زمان هدوی حتی اگر اثر قابل توجهی در بازیابی انرژی ترمز داشته باشد پارامتری با انعطاف‌پذیری کم است که با توجه به شرایط ترافیکی و محدودیت‌های عملیاتی محدود شده است.

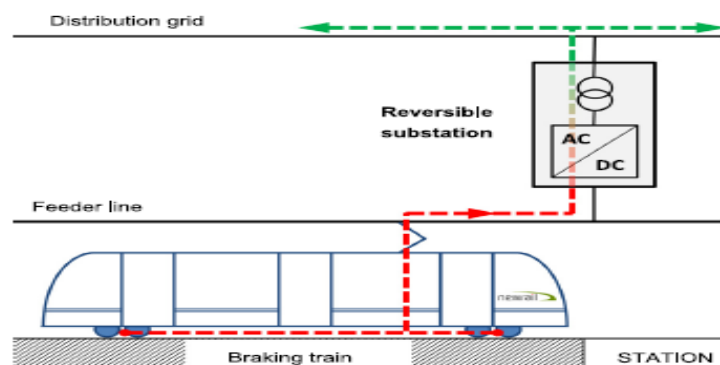
در مرجع [۱۷] یک روش متفاوت، برای بهبود انتقال انرژی بین قطارها ارائه شده است. در این مرجع، یک مدل جدول زمان‌بندی بر اساس مسئله بهینه‌سازی مخلوط - اعداد صحیح^۲ استفاده شده است که فرایندهای شتاب و ترمز وسایل نقلیه در همان بخش الکتریکی را هم‌زمان می‌کند. این مرجع اساساً روی افزایش تبادل انرژی بازتولیدی، در ساعات غیر پیک متمرکز شده است، یعنی زمانی که احتمال داشتن شتاب و ترمزگیری‌های هم‌زمان بسیار کم است. جدول زمان‌بندی پیشنهادی برای خط سه مترو مادرید پیاده‌سازی شده و بعد از یک هفته میزان ۳٪ صرفه‌جویی اندازه‌گیری شده است.

¹ Zhang

² Mixed – integer

استفاده از پست‌های دوطرفه و بازگرداندن انرژی اضافه به شبکه

در این روش همان‌طور که در شکل ۲-۴ نیز نشان داده شده به‌جای استفاده از یکسوکننده‌های دیودی در پست‌های کششی، از مبدل‌های دوطرفه استفاده می‌کنند که توان DC از طریق این مبدل‌های دوطرفه به AC تبدیل می‌شود و مجدداً توسط ترانسفورماتور به شبکه اصلی باز می‌گردد. عیب اصلی این روش هزینه زیاد اینورتر است و علاوه بر این، با این روش تثبیت ولتاژ و کاهش پیک توان تحقق نمی‌یابد. همچنین با توجه به فاصله قطار از پست، بخشی از انرژی در خط تلف خواهد شد [۵].



شکل ۲-۴: استفاده از پست‌های معکوس به‌منظور بازگشت انرژی به شبکه [۱۰]

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی

استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز دارای مزایایی از جمله صرفه‌جویی انرژی (معمولاً بین ۱۵ تا ۳۰ درصد) [۵]، بهبود کیفیت توان، تنظیم ولتاژ DC [۱۸] و حفاظت منبع تغذیه [۱۹] می‌باشد.

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به دو صورت کاربرد دارند:

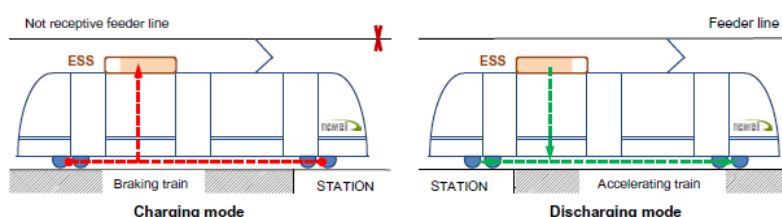
۱. سیستم‌های ذخیره‌ساز متحرک

۲. سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت

در ادامه به بررسی مزایا و معایب هر یک از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی می‌پردازیم.

سیستم‌های ذخیره‌ساز متحرک

همان‌طور که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است معمولاً بر روی سقف قطار نصب می‌شوند. در این حالت انرژی بازتولیدی به‌صورت مستقیم به سیستم ذخیره‌ساز نصب شده روی وسیله نقلیه منتقل می‌شود.



شکل ۲-۵: سیستم ذخیره‌ساز متحرک [۱۰]

مزایای سیستم‌های ذخیره‌ساز متحرک

- با توجه به قرار گرفتن تجهیزات ذخیره‌سازی بر روی قطار فاصله بین مصرف و تولید در کمترین حد خود قرار دارد، لذا تلفات خط به‌صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.
- در صورت بروز خطا در خط تغذیه، امکان حرکت قطار بدون استفاده از خط تغذیه فراهم می‌شود که قابلیت اطمینان قطار را افزایش خواهد داد [۱۰].
- حداکثر توان مورد نیاز در شبکه کاهش یافته، بنابراین تعداد پست‌های تغذیه مورد نیاز کاهش خواهد یافت [۴].
- در این روش مدیریت انرژی بازتولیدی ساده‌تر است چون کنترل آن مستقل از شرایط ترافیکی است [۱۰].

معایب سیستم‌های ذخیره‌ساز متحرک

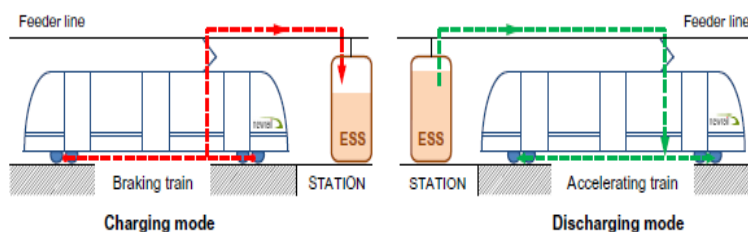
- به دلیل نصب شدن تجهیز ذخیره‌ساز بر روی قطار محدودیت حجمی و فضایی برای آن‌ها وجود دارد [۱۵].
- از آنجاکه بر روی هر قطار سیستم ذخیره‌ساز باید نصب کنیم، هزینه سرمایه‌گذاری نسبتاً بالایی دارند.
- برای نصب، تعمیر و نگهداری تجهیز ذخیره‌ساز باید قطار از چرخه حمل و نقل خارج شود [۱۰].
- سیستم ذخیره‌ساز نصب‌شده بر روی قطار باعث افزایش وزن قطار شده (حدود ۲٪ افزایش وزن) [۲۰] و در نتیجه میزان انرژی مصرفی را در حالت کشش حدود ۱ تا ۲ درصد افزایش خواهد داد [۲۱، ۲۲].

شرایط ترافیکی اثر قابل توجهی روی صرفه‌جویی انرژی در خطوط مترو دارند بنابراین تحلیل روش‌ها به منظور حداقل کردن آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مرجع [۲۳] خطوط مجهز به قطارهای خودکار را مورد بررسی قرار داده است و سیستم تنظیم ترافیک، پروفایل سرعت قطارهای خودکار را از میان پروفایل‌های سرعت بهینه از پیش برنامه‌ریزی شده انتخاب کرده است. هدف اصلی این مرجع طراحی بهینه‌ی پروفایل سرعت قطارهای مترو، با در نظر گرفتن انرژی بازتولیدی حاصل از ترمز به منظور حداقل کردن انرژی دریافتی از پست‌ها است. در این مرجع از ذخیره‌سازهای متحرک برای ذخیره‌ی انرژی بازتولیدی استفاده شده است. میزان صرفه‌جویی حاصل از این روش برابر با ۶ تا ۱۱٪ است.

مراجع [۲۴، ۲۵] یک کنترل کننده شارش توان که عملکرد آن تابعی از جریان خط است را برای قطارهای مجهز به ذخیره‌سازهای متحرک پیشنهاد می‌دهند. هدف اصلی این روش کنترلی صرفه‌جویی انرژی، کاهش پیک توان و در نتیجه تثبیت ولتاژ خط است.

سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت

این سیستم‌های ذخیره‌ساز در پست‌ها یا در مکان‌هایی که تغییرات ولتاژ خط قابل توجه‌تر است، مانند ایستگاه‌ها و یا در امتداد خطوط قرار می‌گیرند. این دسته از سیستم‌های ذخیره‌ساز نه تنها، برای کاهش تقاضای انرژی در کل سیستم بلکه به منظور پایداری ولتاژ شبکه در نقاط ضعیف مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۶]. سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت نیاز به پست‌های تغذیه اضافی، برای جبران افت ولتاژ انتهای خطوط را برطرف می‌کنند. شکل ۲-۶ نمایانگر یک سیستم ذخیره‌ساز ثابت است.



شکل ۲-۶: سیستم ذخیره‌ساز ثابت [۱۰]

مزایای سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت

- توسط تمام قطارهای موجود در خط قابل استفاده می‌باشند بنابراین هزینه آن‌ها نسبت به حالت متحرک کمتر خواهد بود؛ علاوه بر این، این سیستم‌ها می‌توانند در صورت بروز خطا در سیستم تغذیه، انرژی مورد نیاز قطار را تا رسیدن به نزدیک‌ترین ایستگاه تأمین نمایند [۱۰].
- حداکثر توان مورد نیاز در شبکه کاهش یافته است، بنابراین تعداد پست‌های تغذیه مورد نیاز کاهش خواهد یافت.
- به دلیل نصب بر روی سطح زمین هیچ محدودیت حجمی و فضایی ندارند [۱۵].
- با توجه به اینکه از قطار کاملاً جدا هستند تعمیر و نگهداری آن‌ها هیچ وقفه‌ای را در سیستم ایجاد نمی‌کند.

معایب سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت

راندمان سیستم ذخیره‌ساز ثابت به دلیل تلفات خط و فاصله‌ای که بین تولید و مصرف وجود دارد کمتر از سیستم متحرک است [۱۵].

مزایای هر یک از این سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در [۲۷] بحث شده است اما اندازه تجهیزات، موقعیت و الگوریتم کنترلی بررسی نشده است.

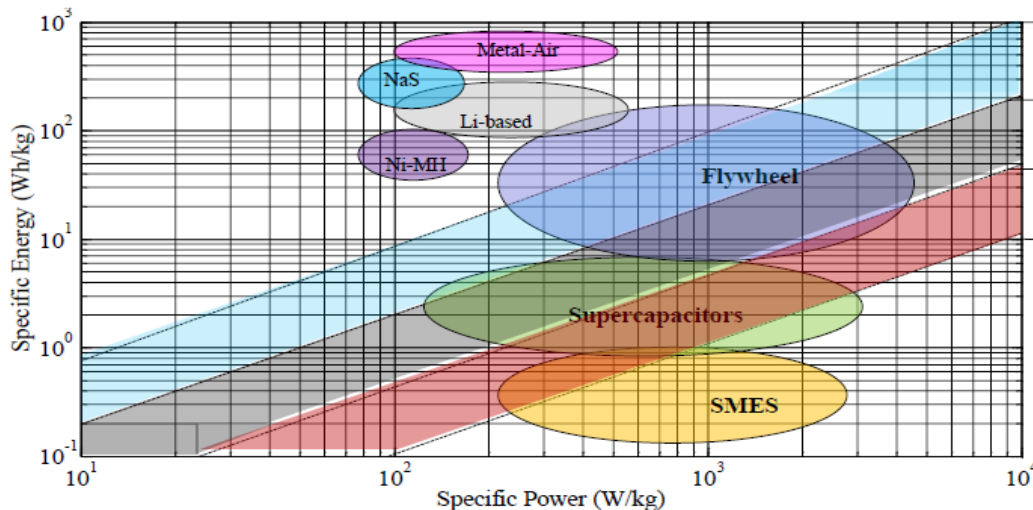
مرجع [۸] سیستم ذخیره‌ساز ثابت بر پایه‌ی ابرخازن را طراحی و شبیه‌سازی می‌کند و اثر تغییر فاصله بین ابرخازن و پست‌های کششی و همچنین وابستگی مشخصات فنی ابرخازن روی رفتار شارژ و دشارژ را نشان می‌دهد و میزان صرفه‌جویی انرژی، برای شرایط ترافیکی سنگین و سبک به ترتیب برابر با ۵٪ و ۱۹٪ حاصل می‌شود.

۴-۲- انواع تجهیزات ذخیره‌ساز انرژی

همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد در بسیاری از موارد نمی‌توان تمامی انرژی ترمز را با توجه به عواملی مانند تلفات در خطوط، محدودیت‌های ولتاژی و جریانی خطوط به شبکه بازگرداند و یا در همان لحظه استفاده کرد، باقیمانده‌ی انرژی بازتولیدی را که نمی‌توان به شبکه بازگرداند (تا در صورت لزوم و نیاز مورد استفاده قرار گیرد) می‌توان ذخیره کرد و این انرژی ذخیره شده می‌تواند به عنوان منبع کمکی هنگامی که قطار نیاز به انرژی دارد مورد استفاده قرار گیرد.

میزان انرژی که وسیله‌ی ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند در خود ذخیره کند (چگالی انرژی) و سرعتی که انرژی می‌تواند از طریق تجهیز ذخیره‌کننده انرژی انتقال یابد (چگالی توان) دو مشخصه‌ی اساسی یک تجهیز ذخیره‌کننده انرژی است.

شکل ۲-۷ چگالی توان چند تجهیز ذخیره‌کننده انرژی را در مقایسه با چگالی انرژی آن‌ها نشان می‌دهد. در ادامه‌ی فصل چند نمونه از تجهیزات ذخیره‌کننده معرفی و ویژگی‌های آن‌ها بررسی خواهد شد.



شکل ۲-۷: چگالی توان چند تجهیز ذخیره‌کننده انرژی در مقایسه با چگالی انرژی آن‌ها [۱]

باتری‌ها

باتری‌ها وسایلی هستند که می‌توانند انرژی را توسط واکنش‌های برگشت‌پذیر شیمیایی در خود ذخیره کنند و از نظر اندازه، نوع، ساختار و کاربرد دسته‌بندی می‌شوند. باتری‌ها دارای معایبی نظیر طول عمر کمتر نسبت به سایر ذخیره‌سازهای انرژی و دینامیک کند (عدم توانایی شارژ و دشارژ سریع که به دلیل پایین بودن چگالی توان است) می‌باشند. بنابراین عمدتاً برای کاربردهای پشتیبانی، خدمات کمکی از قبیل تهویه هوا، روشنایی [۲۸] راه اندازی، سیستم‌های جرقه‌زنی خودرو، برق اضطراری، اسباب‌بازی‌ها، دوربین‌ها، چراغ‌قوه و استفاده در خودروهای الکتریکی هیبریدی مناسب می‌باشند [۲۹]. عواملی همچون درجه‌حرارت شدید، شارژ و دشارژ بیش از اندازه تأثیر قابل توجهی روی طول عمر باتری‌ها دارند. در ادامه انواع مختلف باتری‌ها معرفی می‌شود.

باتری‌های سرب اسید^۱

باتری‌های LA در سال ۱۸۵۹ برای اولین بار توسط یک فیزیک‌دان فرانسوی به نام Caston Plante به عنوان اولین باتری‌ها با قابلیت شارژ مجدد به صورت تجاری به بازار عرضه شدند. الکترولیت این باتری‌ها محلول سولفوریک اسید (H_2SO_4) است و الکتروود مثبت یا آند هر سلول، از دی اکسید سرب (PbO_2) و کاتد یا الکتروود منفی، از اسفنج سرب تشکیل شده است [۳۰].

این نوع باتری‌ها قابلیت اطمینان و راندمان بالا، طول عمر پایین، چگالی انرژی و نرخ خوددشارژی کم و چگالی توان بالا نسبت به سایر باتری‌ها دارند. بارزترین ایراد این باتری‌ها این است که به صورت کامل دشارژ نمی‌شوند و بدلیل پردازش سرب تأثیر منفی روی محیط دارند. تحقیقات اخیر روی افزایش چگالی انرژی و چگالی توان باتری‌های سرب اسید با جایگزینی سرب با مواد سبکتر مثل کربن متمرکز شده است [۱۰].

نیکل کادمیوم^۲

این دسته از باتری‌ها در سال ۱۸۹۹ توسط یک مخترع سوئدی به نام Waldemar Jungner ابداع گردید. هیدرات نیکل ($Ni(OH)_2$) بخش عمده‌ی قطب مثبت را تشکیل می‌دهد در حالی که کادمیوم اسفنجی (Cd) عنصر غالب در مواد تشکیل‌دهنده‌ی قطب منفی است. محلول هیدروکسید پتاسیم (KOH) در آب نقش الکترولیت باتری را دارد. $NiCd$ در مقایسه با باتری‌های LA دارای قابلیت اطمینان بالا، چگالی انرژی، چگالی توان و طول عمر بالاتری است و با توجه به هزینه‌ی بالاتر، راندمان کمتر و نرخ خوددشارژی بیشتری دارد [۳۱] و همچنین در کاربردهای ریلی بیشتر نقش پشتیبان را دارند [۱۰].

^۱ lead acid (LA)

^۲ Nickel Cadmium ($NiCd$)

لیتیوم یون^۱

این نوع باتری‌ها دارای مزایایی از قبیل چگالی انرژی و توان نسبتاً بالا، راندمان بالا، نرخ خوددشارژی پایین و نیاز به تعمیر و نگهداری کم هستند؛ و معایبی همچون هزینه‌ی بالا، نیازمندی به مدارات محافظ هوشمند جهت قرارگیری ولتاژ و دمای کاری در یک محدوده مجاز می‌باشند. این نوع از باتری‌ها به صورت گسترده در تجهیزات قابل حمل نظیر لپ‌تاپ یا تلفن همراه استفاده می‌شوند [۱۰].

سولفور سدیم^۲

آند این نوع از باتری‌ها از سدیم (Na) و کاتد آن‌ها از گوگرد (S) ساخته شده است. آنچه که فن-آوری باتری‌های NAS را متمایز می‌سازد، چگالی انرژی بالای آن‌ها است. به نحوی که چگالی انرژی باتری‌های NAS سه برابر باتری‌های سرب اسید معمولی است. مهمترین ویژگی این باتری‌ها عملکرد آن‌ها در دماهای بالا حدود ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتیگراد است. بازده این نوع از باتری‌ها بین ۷۵ تا ۹۰ درصد است [۱۰]. این باتری‌ها بیشتر به منظور پیک‌سایه و بهبود کیفیت توان در شبکه‌های الکتریکی استفاده می‌شوند [۳۲].

چرخ‌طیارها^۳

چرخ‌طیارها وسایل ذخیره‌سازی انرژی کوتاه‌مدت هستند که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند و آن را به فرم انرژی جنبشی در جرمی به نام روتور ذخیره می‌کنند. به منظور کاهش اصطکاک در سرعت‌های بالا روتور بر روی دو یاتاقان مغناطیسی می‌چرخد. اجزای اصلی سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار موتور/ژنراتور، یاتاقان‌ها، محفظه‌ی خلاء و سیستم کنترل است [۳۲].

¹ Lithium ion (Li-ion)

² Sodium sulfur (NaS)

³ Flywheel

روتور چرخ‌طیار به یک ماشین الکتریکی متصل می‌شود و می‌تواند به هر دو صورت موتور و ژنراتور عمل کند. انرژی ذخیره شده در چرخ‌طیار متناسب با ابعاد آن و مربع سرعت چرخشی روتور است [۱۰]. به صورت کلی، چرخ‌طیارها به دو دسته با سرعت دوران بالا و سرعت دوران پایین تقسیم‌بندی می‌شوند. روتور چرخ‌طیارها با سرعت دوران بالا از مواد کامپوزیت مثل فیبر کربن یا گرافیت ساخته شده است ولی روتور چرخ‌طیارها با سرعت دوران پایین از فولاد ساخته شده است [۳۰].

از مزایای اصلی چرخ‌طیار می‌توان به شارژ و دشارژ سریع آن‌ها، راندمان بالا، چگالی توان و انرژی بالای آن‌ها و محدوده دمایی عملکرد بالا اشاره کرد. وزن نسبتاً زیاد، نرخ خوددشارژی بالای آن‌ها به دلایلی مثل اصطکاک داخلی یا تغییرات جهت‌گیری به وسیله‌ی حرکت وسایل نقلیه و همچنین تنش زیاد وارد شده بر روتور در سرعت‌های بالا و احتمال از هم پشیدن آن‌ها از معایب چرخ‌طیارها به شمار می‌رود [۱۰، ۲۹].

ابرسانا^۱

سیستم ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابرسانا که جزء ذخیره‌سازهای کوتاه‌مدت است از سه بخش اساسی سیم‌پیچ رسانا، سیستم اصلاح و بهبود توان و سیستم خنک‌کننده تشکیل می‌شود. این سیستم، انرژی را در میدان مغناطیسی حاصل از شارش جریان مستقیم (DC) در یک سیم‌پیچ ابرسانا ذخیره می‌کند [۲۸]. این جریان DC به علت مقاومت نزدیک به صفر کابل ابرسانا که معمولاً از $NbTi$ ^۲ ساخته می‌شود تا بینهایت گردش می‌کند [۳۰].

از اصلی‌ترین مزایای SME بازده بالای ۹۵٪ [۳۰] تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ زیاد، چگالی توان بالا، پاسخ سریع و دشارژ شدن به صورت کامل می‌باشد [۳۳].

^۱ Superconducting magnetic storage (SMES)

^۲ Niobium-Titanium

اساسی‌ترین ایراد SMES، بالا بودن هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی است که عمدتاً به‌خاطر سیستم خنک‌سازی می‌باشد. برای حفظ حالت ابررسانایی SMES، باید سیم پیچ را به وسیله یک سیستم خنک‌کننده در دماهای بسیار پایین نگه داشت تا خاصیت ابررسانایی خود را حفظ نماید [۱۰]. برای این منظور می‌توان از هلیوم مایع و یا نیتروژن استفاده کرد [۳۰].

براساس رابطه‌ی (۱-۲) انرژی ذخیره شده، به جریان عبوری از سیم پیچ ابررسانا و همچنین اندوکتانس سلف مورد نظر بستگی دارد. از آنجا که اندوکتانس سلف تابع مشخصات ساختمانی آن است، برای ذخیره‌ی انرژی زیاد، ابعاد سلف مورد استفاده افزایش چشمگیری خواهد داشت و هزینه آن نیز متقابلاً بسیار زیاد خواهد شد. این سیستم‌ها بیشتر برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت انرژی، بهبود کیفیت توان [۳۰] و پایداری شبکه [۱۰] مورد استفاده قرار می‌گیرند.

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (1-2)$$

ابرخازن‌ها^۱

ابرخازن‌ها یا خازن‌های الکتریکی دولایه دسته‌ای از خانواده‌ی خازن‌ها هستند که جزء ذخیره-سازهای انرژی کوتاه‌مدت محسوب می‌شوند [۳۴]. شکل ۲-۸ نمونه‌ای از یک سلول ابرخازن را نشان می‌دهد.

ابرخازن‌ها قادر به انجام تعداد زیادی (چند صد هزار) سیکل شارژ و دشارژ می‌باشند و قابلیت دشارژ شدن به صورت کامل را نیز دارا می‌باشند. علاوه بر این، بدلیل داشتن مقاومت داخلی خیلی کم، تلفاتی ناچیز و در نتیجه راندمان بالایی دارند [۱۹، ۳۵]. مدت زمان دشارژ آن‌ها از ده ثانیه تا چند دقیقه است و رنج گسترده‌ای از شرایط محیطی را پوشش می‌دهند. به دلیل ذخیره‌سازی الکتروستاتیکی طول عمر بالا (حدود ۱۰^۶ سیکل شارژ و دشارژ)، تلفات گرمایی کم و ولتاژ خروجی پایینی (حدود ۲/۷ ولت) دارند. لازم به ذکر است که برای دست یافتن به سطح ولتاژ مورد نیاز، اتصال

¹ Supercapacitor

سری یا موازی ابرخازن‌ها مورد نیاز است [۱۰]. توضیحات بیشتر در مورد ابرخازن‌ها در فصل سوم ارائه خواهد شد.



شکل ۲-۸: نمونه‌ای از یک سلول ابرخازن [۱]

مقایسه انواع تکنولوژی‌های ذخیره‌سازی

مطابق با جدول ۲-۲ باتری‌های الکتروشیمیایی در مقایسه با چرخ‌طیار، ابرخازن و ابرسانا بیشترین چگالی انرژی را دارند؛ و در میان باتری‌های الکتروشیمیایی باتری‌های لیتیوم یون و باتری‌های سولفور سدیم به ترتیب گسترده‌ترین رنج چگالی انرژی را دارند. از طرف دیگر، چگالی توان باتری‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای کمتر از چرخ‌طیار، ابرخازن و ابرسانا است. در مورد زمان دشارژ، باتری‌های الکتروشیمیایی به‌وضوح در مقایسه با چرخ‌طیار، ابرخازن و ابرسانا رفتار دینامیکی کندتری دارند. همین زمان دشارژ، پارامتر تأثیرگذاری روی اصلاح توان و تثبیت ولتاژ است. از طرف دیگر نرخ خوددشارژی باتری‌ها نسبت به سایر ذخیره‌سازهای انرژی کمتر است ولی چون در کاربردهای قطارشهری ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت مورد نیاز است نرخ خوددشارژی مسأله مهمی نیست [۱۰].

در کاربردهای قطارشهری با توجه به شتاب و ترمزگیری‌های مکرر در یک روز چگالی توان و تعداد سیکل شارژ و دشارژ بالا مورد نیاز است. از طرف دیگر، دوام سیستم ذخیره‌ساز یک پارامتر مهم است که باید در نظر گرفته شود چرا که به صورت مستقیم روی هزینه‌ی نهایی سیستم تأثیرگذار است.

مطابق با جدول ۲-۳ باتری‌ها طول عمر کمتری (حدود چند صد هزار سیکل) نسبت به ابرخازن، چرخ‌طیار و ابررسانا دارند. با این وجود، شایان ذکر است که باتری‌های لیتیوم یون مدرن ممکن است بیشتر از 10^4 سیکل را ارائه دهند [۴].

از میان انواع فن‌آوری‌های ذخیره‌سازی، چرخ‌طیارها و ابرخازن‌ها به دلیل چگالی توان بالای 5 kW/kg و تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ بیشتر از 10^6 سیکل برای استفاده در این حوزه مناسب می‌باشند [۴ و ۲۴].

جدول ۲-۲: مقایسه‌ی مشخصات فنی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاربردهای قطار شهری [۱۰، ۳۶، ۳۷]

ذخیره کننده‌های انرژی	چگالی توان (kW/kg)	چگالی انرژی (Wh/kg)	بازده (%)
باتری‌های سرب اسید	۰/۰۲۵-۰/۳	۲۰-۵۰	۷۰-۹۰
نیکل کادمیوم	۰/۰۵-۰/۳	۳۰-۷۵	۶۰-۸۰
لیتیوم یون	۰/۱-۰/۳۵	۷۵-۲۰۰	۹۰-۹۵
باتری‌های سولفور سدیم	۰/۱۲-۰/۲۳	۱۲۰-۲۴۰	۷۰-۹۰
چرخ‌طیارها	۱-۵	۵-۱۰۰	۹۰-۹۵
ابررسانا	۰/۵-۲	۰/۵-۵	۹۵-۹۸
ابرخازن	۰/۵-۵	۱-۶	۹۵-۹۰

جدول ۲-۳: مقایسه‌ی مشخصات فنی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی برای کاربردهای قطار شهری [۱۰، ۳۶، ۳۷]

طول عمر (تعداد سیکل)	مدت زمان دشارژ (s)	نرخ خوددشارژی به صورت روزانه (%)	ذخیره کننده‌های انرژی
۲۰۰-۲۰۰۰	۱-۳۶۰۰	۰/۰۵-۰/۳	باتری‌های سرب اسید
۱۵۰۰-۳۰۰۰	۱-۳۶۰۰	۰/۲-۰/۶	نیکل کادمیوم
۱۰ ^۳ -۱۰ ^۵	۱-۳۶۰۰	۰/۱-۰/۳	لیتیوم یون
۲۰۰۰-۳۰۰۰	۱-۳۶۰۰	۲۰	باتری‌های سولفور سدیم
<۱۰ ^۷	۰/۱-۶۰	۱۰۰	چرخ‌طیارها
>۱۰ ^۵	۰/۱-۱	۱۰-۱۵	ابرسانا
<۱۰ ^۶	۰/۱-۶۰	۲۰-۴۰	ابرخازن

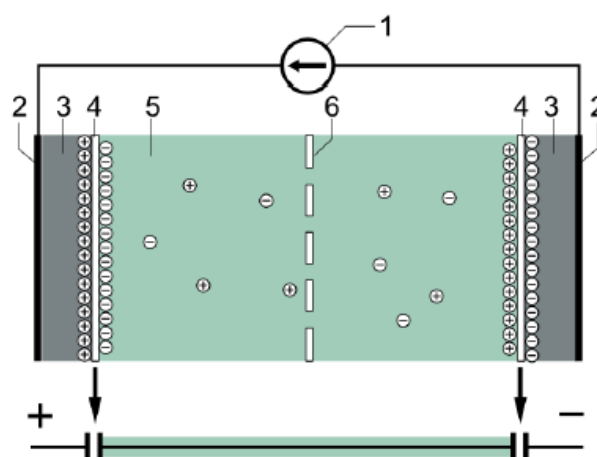
فصل سوم : ابرخازن و روش‌های کنترل

شارژ و دشارژ آن

۳-۱- مقدمه

اساس کار ابرخازن نخستین بار توسط هلم هلتز^۱ مشاهده شد. به صورت مختصر می‌توان گفت اگر یک الکتروود در یک الکترولیت غوطه‌ور شود، در مجاورت سطح ما بین الکتروود و الکترولیت، یک جدایی بار اتفاق می‌افتد. در واقع همان‌طور که در شکل ۳-۱ مشخص است الکتروود منفی (مثبت) باعث می‌شود که کاتیون‌های (آنیون‌های) موجود در الکترولیت در سطح الکتروود جذب شوند. فاصله سطح الکتروود تا مرکز یون‌ها به اندازه‌ی لایه‌ی دی‌الکتریک یک خازن الکترواستاتیکی است لذا در هر طرف یک خازن تشکیل می‌شود که معادل با اتصال سری دو خازن است. به همین دلیل به این نوع خازن‌ها، خازن‌های دولایه نیز گفته می‌شود. کار جداکننده موجود در الکترولیت نیز جلوگیری از تماس مستقیم الکتروودها می‌باشد.

مطابق با شکل ۳-۱ ابرخازن از یک شارژ کننده (شماره ۱)، کنترل‌کننده‌های جریان (شماره ۲)، الکتروودها (شماره ۳)، محلول الکترولیت (شماره ۵) و یک لایه جدا کننده (شماره ۶) تشکیل شده است. تفاوت عمده این خازن‌ها با باتری‌های الکتروشیمیایی عدم وجود فعالیت‌های شیمیایی در فرآیند آن‌ها است [۱].



شکل ۳-۱: سلول ابرخازن [۱]

¹ H.Holmholtz

مواد الکترودی مورد استفاده برای ابرخازن‌ها شامل مواد کربنی، اکسیدهای فلزی، پلیمرهای هادی و سیستم‌های هیبریدی شامل کربن-اکسید فلزات، کربن-پلیمر هادی، پلیمرهای هادی-اکسید فلزات و یا هر سه فاز کربن-اکسید فلز-پلیمر هادی است. الکترودهای پلیمر در مقایسه با الکترودهای اکسیدهای فلزی هزینه‌ی تولید پایین‌تر و ظرفیت بالاتری دارند. مواد الکترولیتی مورد استفاده برای ابرخازن‌ها شامل سه گروه الکترولیت‌های ارگانیک، الکترولیت‌های آبی و الکترولیت‌های جامد هستند.

الکترولیت‌های ارگانیک: پرکاربردترین نوع در مصارف تجاری می‌باشند، ولتاژ کاری حدود ۲/۵

تا ۳ ولت را دارا می‌باشند (با خالص‌سازی امکان دست یافتن به ولتاژهای بالاتر از ۳/۵ ولت را نیز دارند). الکترولیت‌های ارگانیک از استونیتریل^۱ و تترااتیل آمونیوم-تترا فلور بورات^۲ استفاده می‌کنند اما به دلیل سمی بودن این ترکیبات در آینده حرکت به سمت محلول‌های جایگزین مثل پروپیلن کربنات^۳ می‌باشد [۳۲].

الکترولیت‌های آبی: این نوع الکترولیت‌ها امکان رسیدن به ظرفیت بالاتر و مقاومت سری معادل

کوچک‌تر را فراهم می‌کنند و ولتاژی تا حدود ۱ ولت را دارند. الکترولیت‌های آبی بیشتر از سولفوریک اسید H_2SO_4 و پتاسیم هیدروکسید KOH که رسانایی نسبتاً بالایی دارند استفاده می‌کنند.

الکترولیت‌های جامد: ترکیب پلیمرها با نمک‌های مناسب هدایت یونی بالایی را ایجاد می‌کند.

استفاده از پلیمرها باعث کاهش خوردگی، کاهش حجم کلی و آزادسازی مواد سمی کمتری می‌شود. تنها مشکل استفاده از این نوع الکترولیت قیمت بالای آن می‌باشد [۳۲].

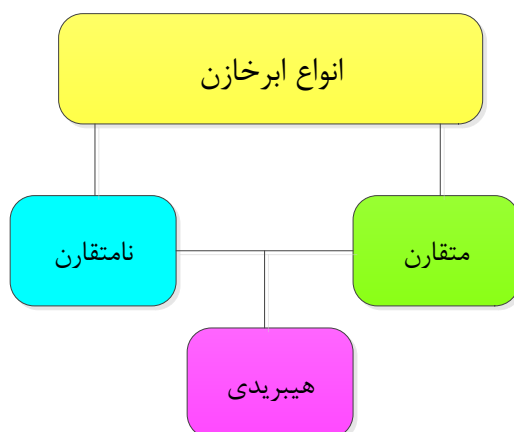
همان‌طور که در شکل ۳-۲ نیز نشان داده شده است ابرخازن‌ها بر اساس مواد و ساختار الکترودها به سه دسته متقارن، نامتقارن و خازن‌های هیبریدی تقسیم می‌شوند. در ابرخازن‌های متقارن یا

¹ acetonitrile (CH_3CN)

² tetraethylammonium tetrafluoroborate (TEATFB)

³ propylene carbonate ($C_4H_6O_3$)

"خازن‌های دو لایه" الکترودها از جنس کربن فعال هستند. ولی در نوع نامتقارن یک الکتروود مشابه باتری و از جنس اکسید فلز و الکتروود دیگر مشابه ابرخازن و از جنس کربن است. خازن‌های هیبریدی که به صورت خاص خازن لیتیوم یون نامیده می‌شوند مشابه با خازن‌های نامتقارن، دو الکتروود متفاوت دارند که یکی از جنس هیدروکسید نیکل یا دی‌اکسید سرب و دیگری از جنس کربن فعال است [۳۲].



شکل ۳-۲: انواع ابرخازن بر اساس مواد و ساختار الکترودها

مقدار انرژی ذخیره شده در ابرخازن‌ها تابعی از سطح الکترودها، اندازه یون‌ها و سطح ولتاژ الکترولیت است [۳۰]. ابرخازن‌ها دارای قابلیت ذخیره‌سازی انرژی تا هزار برابر یک خازن معمولی هستند. در نتیجه چگالی انرژی بیشتری در مقایسه با خازن‌های معمولی دارند. از طرفی به دلیل نزدیک بودن فاصله‌ی بین الکترودها و بزرگ بودن ضریب دی‌الکتریک ظرفیت بیشتری نسبت به خازن معمولی دارند [۳۳]. اما چگالی توان آن‌ها مشابه با خازن‌های معمولی است. ابرخازن‌ها مشخصات هر دوی باتری‌ها و خازن‌های معمولی را دارا هستند. اما توان بیشتر و نرخ خوددشارژی بالاتری نسبت به باتری‌ها دارند و می‌توانند بسیار سریع شارژ شوند در حالی که بسیاری از باتری‌ها با شارژ سریع آسیب می‌بینند [۱۰، ۳۳].

یکی از پارامترهای مهمی که روی طول عمر ابرخازن‌ها تأثیرگذار است وضعیت شارژ^۱ آن‌ها می‌باشد. SOC اجازه نمی‌دهد ابرخازن بیش از حد مجاز شارژ و یا دشارژ شود. لازم به ذکر است که SOC عددی بین ۰/۲۵ تا ۱ می‌باشد.

نمونه‌ای از کاربردهای ابرخازن

- استفاده در وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی
- استفاده در توربین‌های بادی
- سیستم‌های برق اضطراری^۲
- سیستم‌های ریلی برقی

۳-۲- مروری بر مبدل‌های مورد استفاده، در سیستم ذخیره‌ساز انرژی

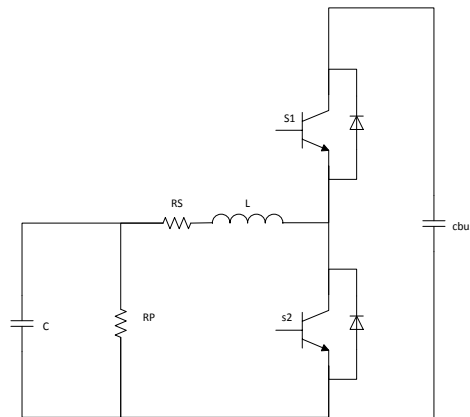
ابرخازن و روش‌های کنترلی آن

به منظور ارتباط ابرخازن با لینک DC از مبدل نیم‌پل دوسویه^۳ DC-DC استفاده می‌شود. مبدل نیم‌پل دوسویه یکی از دسته مبدل‌هایی است که ولتاژ خروجی آن می‌تواند به صورت دلخواه بزرگتر یا کوچکتر از ولتاژ ورودی باشد. این مبدل در واقع از یک سمت مشابه مبدل باک و از سمت دیگر مشابه مبدل بوست عمل می‌کند. ساختار این مبدل در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

¹ state of charge

² Uninterruptible Power Supply (UPS)

³ Half-bridge Bidirectional Converter



شکل ۳-۳: ساختار مبدل DC-DC نیم پل دوسویه

روش‌های کنترل شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز بر پایه‌ی ابرخازن، به طور کلی به دو دسته‌ی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که برای هر دو نوع سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت و متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

(۱) راهبرد کنترل ردیاب ولتاژ خط^۱

(۲) راهبرد کنترل ردیاب جریان خط^۲ [۱]

در حالت کلی می‌توان گفت برای ذخیره‌سازهای متحرک، کنترل تا حدی وابسته به حرکت قطار است. برای مثال هنگامی که قطار در حال حرکت با حداکثر سرعت است ذخیره‌ساز باید کاملاً خالی و آماده شارژ شدن توسط انرژی ترمزی باشد و در مقابل هنگامی که قطار در ایستگاه متوقف است باید کاملاً شارژ و آماده دشارژ شدن در زمان شتاب‌گیری قطار باشد.

در مورد سیستم‌های ذخیره‌ساز ساکن رویکرد کنترلی با توجه به ولتاژ خط مشخص می‌شود. در واقع در این حالت، معیار ولتاژ خط است به طوری که اگر افت ولتاژی در خط مشاهده شود ذخیره‌ساز باید دشارژ شود و بر عکس، اگر افزایش ولتاژی در خط صورت گیرد، ذخیره‌ساز باید آماده پذیرش توان باشد.

¹ Line Voltage Tracker Control strategy

² Line Current Tracker Control strategy

راهبرد کنترل ردیاب ولتاژ خط

هدف این روش تثبیت ولتاژ تغذیه در حین عملکرد موتور یا ترمزی قطارها با استفاده از SOC ابرخازن می‌باشد. با توجه به تغییرات ولتاژ خط بالاسری، جریان‌های شارژ و دشارژ مشخص می‌شوند. همچنین با استفاده از ردیاب ولتاژ، ولتاژ ترمینال ابرخازن در شارژ و دشارژ طوری تعیین می‌شود که ولتاژ خط کمترین تغییرات و نوسانات را داشته باشد.

زمانی که ولتاژ خط تغذیه از یک مقدار مرجع بیشتر می‌شود ابرخازن شروع به شارژ شدن می‌کند و بر عکس زمانی که ولتاژ خط کمتر از یک محدوده‌ی از پیش تعیین شده است ابرخازن دشارژ می‌شود. بلوک دیاگرام مربوط روش کنترل ردیاب ولتاژ خط را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشخص است تفاوت ولتاژ خط اندازه‌گیری شده و مقدار مرجع آن وارد کنترل‌کننده PI می‌شود و ولتاژ مرجع ابرخازن را ایجاد می‌کند.

$$v_{sc-ref} = K_{P,L}(V_{line} - V_{line-ref}) + K_{I,L} \int_0^t (V_{line} - V_{line-ref}) dt \quad (۱-۳)$$

ولتاژ مرجع ابرخازن با مقدار واقعی آن مقایسه شده است و سیگنال خطا وارد یک کنترل‌کننده PI می‌شود که خروجی آن جریان مرجع ابرخازن است.

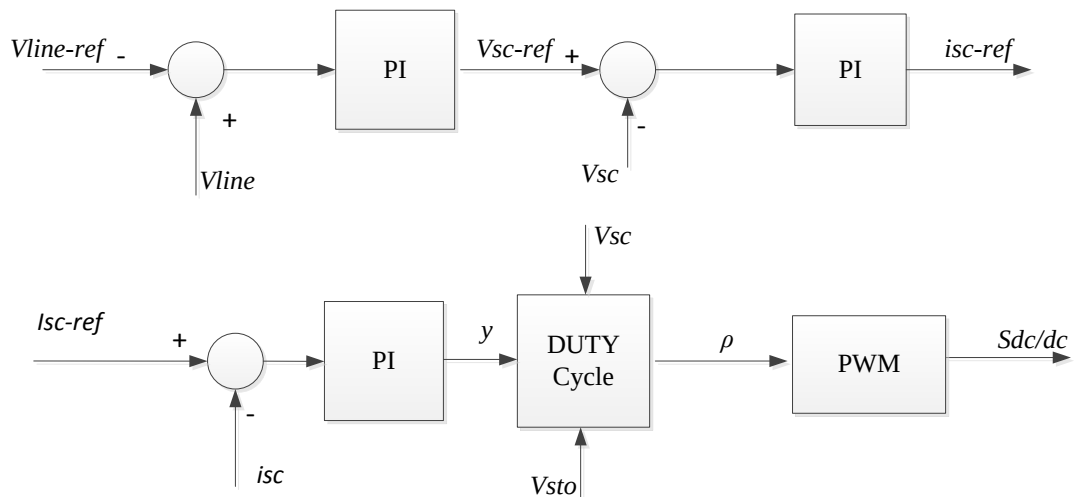
$$i_{sc-ref} = K_{P,\mu}(v_{sc-ref} - v_{sc}) + K_{I,\mu} \int_0^t (v_{sc-ref} - v_{sc}) dt \quad (۲-۳)$$

سپس سیگنال فرمان مبدل DC-DC توسط رابطه‌ی (۳-۴) محاسبه و فرمان شارژ و دشارژ ابرخازن توسط مبدل صادر می‌شود [۱].

$$y = K_{P,i}(i_{sc-ref} - i_{sc}) + K_{I,i} \int_0^t (i_{sc-ref} - i_{sc}) dt \quad (۳-۳)$$

$$\rho = 2 \frac{V_{sc} - y}{V_{sto}} - 1 \quad (4-3)$$

در رابطه‌ی (۴-۳) ولتاژ باس DC است.



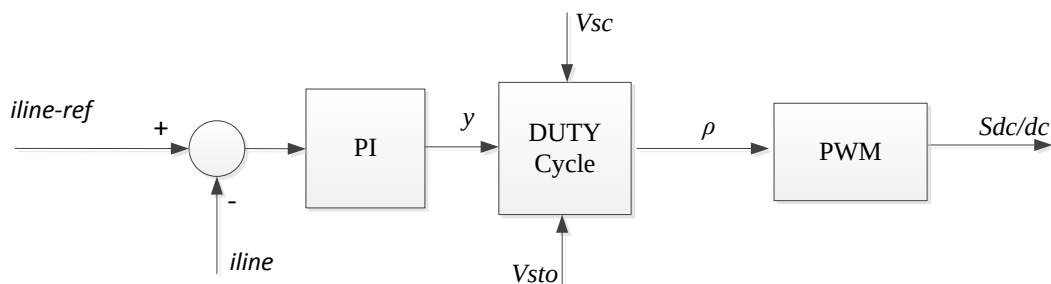
شکل ۴-۳: بلوک دیاگرام خلاصه شده روش کنترل ردیاب ولتاژ خط [۱]

راهبرد کنترل ردیاب جریان خط

هدف این روش، کاهش پیک توان پست‌ها و در نتیجه تثبیت ولتاژ خط می‌باشد. شارژ و دشارژ ابرخازن‌ها در طی فرایند ترمز و شتاب توسط جریان مرجع خط کنترل می‌شود این در حالی است که مرزهای ولتاژ خط نیز ولتاژ ابرخازن را محدود نگه می‌دارد.

سختی این روش، تعیین لحظه‌ای نقطه‌ی تنظیم جریان خط (مقدار مرجع) است. چون اگر مقدار کمی در نظر گرفته شود باعث تخلیه‌ی ابرخازن قبل از خاتمه شتاب‌گیری خواهد شد که نتیجه‌ی آن افزایش جریان خط و تلفات است و انتخاب بسیار زیاد آن باعث می‌شود تا نتوان از تمامی ظرفیت ذخیره‌ساز ابرخازن استفاده کرد. مقدار بهینه این نقطه کار باید بر اساس SOC ابرخازن و میزان انرژی بازتولیدی در فرایند ترمز انتخاب شود. البته با توجه به وابستگی انرژی ترمزی به پروفایل سرعت قطار، تخمین انرژی ترمزی برای ذخیره‌سازی امری بسیار دشوار است. در این روش رویکرد

کنترلی به این صورت است که اگر جریان خط بیشتر از مقدار مرجع باشد ابرخازن دشارژ می‌شود و چنانچه جریان خط کمتر از مقدار مرجع باشد ابرخازن شارژ می‌شود. شکل ۳-۵ بلوک دیاگرام مربوط به روش کنترل ردیاب جریان خط را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۵: بلوک دیاگرام خلاصه شده روش کنترل ردیاب جریان خط [۱]

مرجع [۱۵] یک کنترل کننده شارش توان که عملکرد آن تابعی از ولتاژ شبکه و SOC ابرخازن است را پیشنهاد داده است و تأثیر اندازه و موقعیت ذخیره‌ساز در امتداد خط را با شبیه‌سازی خط مترو Brussel ارزیابی می‌کند و صرفه‌جویی بین ۱۱٪ (در ساعات پیک) و ۲۶٪ (در شب و آخر هفته) حاصل می‌شود.

در مرجع [۳۸] از سیستم ذخیره‌ساز ثابت استفاده شده است. طراحی مبدل DC-DC نیم‌پل به صورت مختصر بیان شده است اما در مورد تعیین ظرفیت ابرخازن و روش کنترل شارژ و دشارژ آن بحثی نشده است.

مراجع [۲۴، ۲۵] از ابرخازن به عنوان تجهیز ذخیره‌کننده انرژی استفاده کرده‌اند. مبدل مورد استفاده در این مراجع، مبدل DC-DC نیم‌پل دوسویه است. به منظور کنترل شارژ و دشارژ ابرخازن از روش کنترل ردیاب جریان خط استفاده شده است. در این روش کنترلی در هر لحظه جریان خط با یک مقدار ثابت (نقطه‌ی تنظیم جریان)^۱ مقایسه می‌شود که این مقدار ثابت بر اساس SOC ابرخازن و مقدار انرژی بازتولیدی در فرایند ترمز تعیین می‌شود. اگر جریان خط بیشتر از این مقدار باشد

^۱Current set-point

ابرخازن دشارژ می‌شود و توان مورد نیاز قطار را عرضه می‌کند و چنانچه جریان خط کمتر از این مقدار باشد ابرخازن شارژ می‌شود. با این روش کنترلی پیک توان ۵۰٪ کاهش می‌یابد و بازیابی انرژی ۳۰٪ حاصل می‌شود.

تیمورفر و همکارانش [۳۹]، از ابرخازن به عنوان تجهیز برای ذخیره‌سازی انرژی بازتولیدی در شبکه‌ی مترو استفاده کرده‌اند و به منظور تخمین سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب، خط ۳ شبکه متروی تهران را در شرایط پیک و غیرپیک بر اساس داده‌های واقعی مدلسازی کرده‌اند و به منظور ارتباط ابرخازن با لینک DC از یک مبدل DC – DC نیم‌پل دوسویه استفاده نموده‌اند. این مرجع روشی را به منظور پیش‌بینی حداکثر انرژی بازتولیدی، که به صورت لحظه‌ای وارد هر ایستگاه می‌شود پیشنهاد داده است و بر اساس آن ذخیره‌ساز مناسب را برای هر ایستگاه طراحی کرده است. در این روش طبق رابطه‌ی (۲-۱) حداکثر مقدار جریان بازتولیدی هر ایستگاه محاسبه شده است.

$$I_r = I_t - \frac{(Vs_i - Vs_{i-1})}{R_{i-1}} - \frac{(Vs_i - Vs_{i+1})}{R_{i+1}} \quad (۲-۱)$$

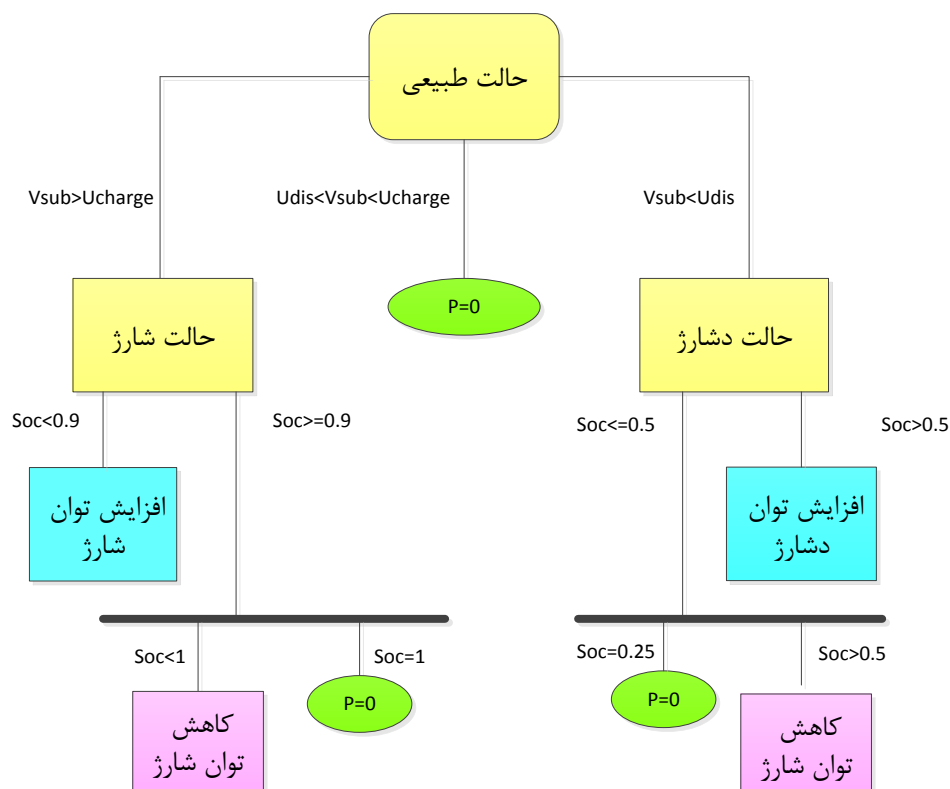
که در آن R_{i-1} و R_{i+1} به ترتیب مقامت خط بین ایستگاه‌های $(i-1, i)$ و $(i, i+1)$ است. Vs_i ولتاژ ایستگاه i و Vs_{i+1} ولتاژ ایستگاه $i+1$ و Vs_{i-1} ولتاژ ایستگاه $i-1$ می‌باشد. مقدار انرژی ذخیره شده در هر ایستگاه نیز توسط رابطه‌ی (۲-۲) محاسبه شده است و متناسب با این مقدار انرژی، ظرفیت خازن مورد نیاز تعیین شده است.

$$E_r = \int (Vs \times I_r) dt \quad (۲-۲)$$

در این روش میزان صرفه‌جویی برابر با ۲۵٪ است.

در مرجع [۴۰] نیز جریان بازیافتی هر ایستگاه محاسبه شده است و متناسب با آن، پیکربندی سیستم ذخیره‌ساز مناسب طراحی شده است. اما در مقایسه با مرجع [۳۹] روش کنترلی جدید، مدل دینامیکی و زمان واقعی است و سرعت اجرای بالاتر و خطای کوچکتری دارد مدل شبیه‌سازی نیز

پیچیده‌تر و جزئی‌تر است. به منظور کنترل شارژ و دشارژ ابرخازن از روش کنترل ردیاب ولتاژ خط استفاده شده است. در این حالت برای ولتاژ باس یک محدوده در نظر گرفته شده است. اگر ولتاژ باس بیشتر از محدوده مجاز باشد ابرخازن شارژ می‌شود تا از اضافه ولتاژ باس DC جلوگیری کند و در صورتی که ولتاژ باس کمتر از حد مجاز باشد ابرخازن دشارژ می‌شود تا این افت ولتاژ را جبران کند. فلوچارت الگوریتم کنترلی ابرخازن در شکل ۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: دیاگرام الگوریتم کنترلی سیستم ذخیره‌ساز ابرخازن

Barrero و همکاران [۴۱]، فواید و محدودیت‌های سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت و متحرک را با هدف کاهش کل انرژی مصرفی مقایسه کرده‌اند. در این مرجع نیز از الگوریتم ردیاب ولتاژ خط به منظور کنترل شارژ و دشارژ ابرخازن استفاده شده است. این مرجع سناریوهای ترافیکی مختلف (سنگین، متوسط، سبک) را در نظر گرفته است. میزان صرفه‌جویی انرژی، با در نظر گرفتن سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت، تابع شرایط ترافیکی، اندازه و توزیع ذخیره‌ساز در خط است که در شرایط ترافیکی سنگین، متوسط و سبک به ترتیب برابر با ۱۸/۷٪، ۲۵/۱٪ و ۳۶/۴٪ است و در مقابل میزان

حداکثر صرفه‌جویی انرژی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز متحرک در شرایط ترافیکی سنگین و سبک، بین ۲۷/۳٪ و ۳۶/۳٪ متغیر است. نتایج نشان داده است، اگرچه میزان صرفه‌جویی انرژی بالاتری با ذخیره ساز متحرک بدست آمده است اما تعداد سلول‌های ابرخازن کمتری در حالت ذخیره-سازی ثابت مورد نیاز است. با این حال، منافع هم‌چون اصلاح پیک توان، کاهش افت ولتاژ و کاهش تلفات خط توسط ذخیره‌سازهای متحرک، بهبود بیشتری یافته است.

مرجع [۴۲] طراحی و عملکرد کلی یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی را با هدف کاهش نوسانات ولتاژ خط در حین شتاب و ترمز برای شبکه‌ی ریلی مورد بررسی قرار داده است. در این مرجع از الگوریتم ردیاب ولتاژ خط به منظور کنترل شارژ و دشارژ ابرخازن استفاده شده است که با این روش ۲۳٪ صرفه‌جویی حاصل شده است.

مرجع [۴۳] از یک تابع غیر خطی، به منظور کنترل شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر اساس ابرخازن استفاده کرده است. هدف اصلی این مرجع، برای ذخیره‌سازی انرژی در هواپیما، حفاظت منبع تغذیه از تغییرات ناگهانی بار می‌باشد. این تغییرات ناگهانی استرس شدیدی را به سیستم تغذیه اعمال می‌کنند و در نتیجه سبب تلفات بالا، طول عمر محدود و یا حتی نقص در عملکرد سیستم می‌شوند.

فصل چهارم : طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

۱-۴- مدل شبکه‌ی مترو

همان‌طور که در شکل ۲- ۱ نشان داده شده است، شبکه‌ی مترو شامل پست‌های یک‌طرفه، خطوط ارتباطی، وسایل نقلیه و سیستم ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. در ادامه جهت مدل‌سازی کل شبکه، روابط حاکم بر هر یک از اجزاء شبکه‌ی مترو به تفصیل بیان می‌شود.

۱-۴-۱- مدل‌سازی پست‌های یک‌طرفه و خطوط ارتباطی

پست‌ها توسط یک منبع ولتاژ DC ایده‌آل با یک مقاومت داخلی سری مدل‌سازی می‌شوند. برای نمایش یک طرفه بودن آن‌ها نیز از دیود استفاده شده است. با در نظر گرفتن امپدانس پریونیت (Z_{pu}) برابر با ۱۰٪ و ظرفیت ترانس برابر با ۱ MVA مطابق با رابطه‌ی (۴-۲) مقدار امپدانس شبکه محاسبه شده است.

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (۴-۱)$$

$$Z_{real} = r_{dc} = Z_b \times Z_{pu} \quad (۴-۲)$$

که در آن V_b ولتاژ مبنا، r_{dc} مقاومت سری با منبع ولتاژ و S_b ظرفیت مبنا است.

جهت مدل‌سازی خطوط ارتباطی از مقاومت‌های الکتریکی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه قطارها بین دو ایستگاه حرکت می‌کنند مقاومت بین قطار با ایستگاه قبل و ایستگاه بعد متغیر با زمان است. روابط (۴-۳) و (۴-۴) مقدار این مقاومت‌ها را نشان می‌دهند [۴۰].

$$R' = kx(t) \quad (۴-۳)$$

$$R'' = k(D - x(t)) \quad (۴-۴)$$

R' مقاومت الکتریکی خط، بین قطار با ایستگاه قبل، R'' مقاومت الکتریکی خط، بین قطار با

ایستگاه بعد، D فاصله‌ی بین دو ایستگاه، K ضریب مقاومتی و $x(t)$ فاصله بین قطار با ایستگاه قبل

می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت قطار در هر لحظه مطابق با رابطه‌ی (۴-۵) محاسبه می‌شود، مقدار $x(t)$ طبق رابطه‌ی (۴-۶) بدست می‌آید.

$$V(t) = a\Delta t + V_0 \quad (۴-۵)$$

$$x(t) = V\Delta t + x_0 \quad (۴-۶)$$

۴-۱-۲- مدل‌سازی قطار

برای مدل‌سازی قطار از یک منبع جریان کنترل شده استفاده می‌شود. این منبع، توان اکتیو را در زمان شتاب‌گیری مصرف می‌کند و آن را در زمان ترمزگیری تحویل می‌دهد. توان کششی و توان ترمزی به ترتیب با استفاده از روابط (۴-۸) و (۴-۱۰) محاسبه می‌شوند که در آن F_r نیروهای مقاومتی بوده و توسط رابطه‌ی (۴-۷) بدست می‌آید [۳۹].

$$F_r = (0.0064 \times M_t + 1.056) + (0.00014 \times M_t \times V + 0.00046 \times V^2) \quad (۴-۷)$$

$$P_{traction} = \frac{(M_t \times a + F_r) \times V}{\eta_g \times \eta_m \times \eta_i} + P_a \quad (۴-۸)$$

$$I_{train} = \frac{P_{traction}}{V_t} \quad (۴-۹)$$

$$P_{braking} = (M_t \times a + F_r) \times V (\eta_g \times \eta_m \times \eta_i) - P_a \quad (۴-۱۰)$$

$$I_{braking} = \frac{P_{braking}}{V_t} \quad (۴-۱۱)$$

در روابط (۴-۷) تا (۴-۹)، F_r نیروهای مقاومتی، M_t جرم کل قطار به همراه مسافران، V سرعت قطار، $P_{traction}$ توان کششی، a شتاب، P_a توان مربوط به روشنایی و تهویه، η_g, η_m, η_i به ترتیب بازده اینورتر، موتور و جعبه دنده، $P_{braking}$ توان ترمزی، V_t ولتاژ دو سر قطار می‌باشد. روابط (۴-۹) و (۴-۱۱) توصیف‌کننده رفتار قطار هستند.

۴-۱-۳- سیستم ذخیره‌ساز انرژی

سیستم‌های ذخیره‌ساز در فصل دوم به تفصیل بیان شد. همان‌طور که می‌دانیم در زمان ترمز، ولتاژ لینک DC بیشتر از حد تعیین شده می‌باشد، بنابراین سیستم ذخیره‌ساز، انرژی الکتریکی را جذب و ذخیره می‌کند و در زمان شتاب‌گیری که ولتاژ لینک DC کمتر از حد تعیین شده می‌باشد سیستم ذخیره‌ساز، انرژی ذخیره شده را به شبکه تزریق می‌کند. استفاده از تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش تلفات، تنظیم ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه داشته باشد.

۴-۲- طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

این سیستم‌ها شامل سه جزء اصلی ابرخازن، مبدل DC-DC و سیستم کنترل کننده شارژ و دشارژ می‌باشند. مبدل DC-DC به عنوان هسته‌ی اصلی سیستم ذخیره‌ساز محسوب می‌شود که ارتباط بین تجهیز ذخیره‌ساز و باس DC را فراهم می‌کند. بنابراین برای طراحی سیستم ذخیره‌ساز باید هر یک از اجزاء آن را به طور جداگانه مدل‌سازی کرد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

۴-۲-۱- طراحی مبدل

در الکترونیک قدرت برای مدل‌سازی مبدل‌ها از روشی تحت عنوان مدل میانگین مبدل، استفاده می‌شود. که در آن معادلات مداری مربوط به مبدل برای بازه‌های زمانی که کلیدها خاموش یا روشن هستند نوشته می‌شود. کلیدهای s_1 و s_2 به صورت مکمل عمل می‌کنند. با فرض روشن بودن کلید s_1 ولتاژ سلف (V_L) برابر با اختلاف ولتاژ بین ابرخازن (V_{sc}) و ولتاژ باس (V_{bus}) است و با فرض روشن بودن کلید s_2 ، ولتاژ سلف برابر با ولتاژ ابرخازن خواهد بود. با در نظر گرفتن زمان وظیفه^۱ d برای کلید

¹ Duty Cycle

پایین و ۱-d برای کلید بالا مقدار میانگین ولتاژ سلف مطابق با رابطه‌ی (۴-۱۲) محاسبه می‌شود [۴۴].

$$V_L = L \frac{dI_{sc}}{dt} = V_{sc} - V_{bus} \times (1-d) \quad (۴-۱۲)$$

با توجه به اینکه رابطه‌ی (۴-۱۲) غیرخطی است با استفاده از روش خطی‌سازی پس‌خورده^۱ و اعمال قانون کنترلی (۴-۱۳) که معکوس رابطه‌ی (۴-۱۲) است قسمت غیرخطی حذف می‌شود و برای سیستم خطی شده‌ی حاصل، تابع تبدیل PI طراحی می‌شود [۴۳]. لازم به ذکر است که d مقداری بین ۰/۰۵ و ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

$$d = f^{-1}(V_l^*) = (V_{bus} - V_{sc} + V_l) \div V_{bus} \quad (۴-۱۳)$$

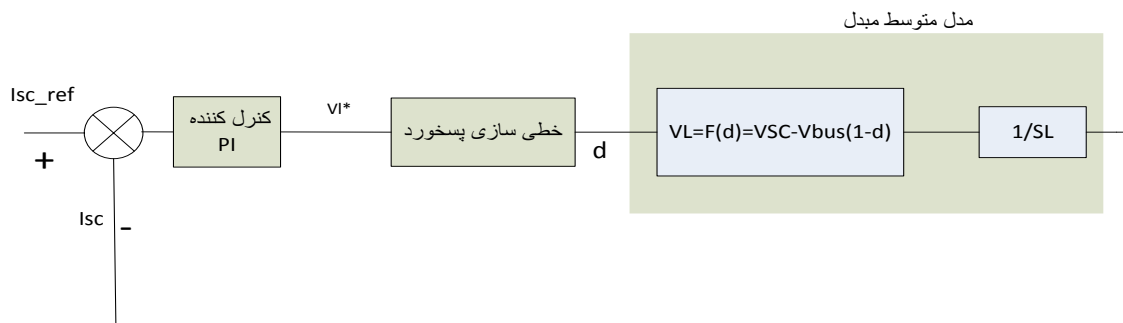
که در آن V_l^* سیگنال خروجی تابع تبدیل PI است. تابع تبدیل سیستم خطی شده $P(S)$ مطابق با شکل ۴-۲ و رابطه‌ی (۴-۱۶) محاسبه می‌شود.

$$I_{sc} = \frac{1}{sl} V_l \quad (۴-۱۴)$$

$$I_{sc} = \frac{1}{sl} f(d) \quad (۴-۱۵)$$

$$P(S) = \frac{I_{sc}}{V_l^*} = \frac{f(f^{-1}(V_l^*)) \times \frac{1}{sl}}{V_l^*} = \frac{1}{sl} \quad (۴-۱۶)$$

¹ Feedback Linearization



شکل ۴-۱: کنترل کننده جریان ابرخازن

تابع تبدیل حلقه باز و حلقه بسته سیستم به ترتیب در (۴-۱۸) و (۴-۱۹) بیان شده است. با مقایسه معادله مشخصه (مخرج تابع تبدیل حلقه بسته) با معادله دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم و درازی یک ضریب میرایی (ζ) و فرکانس قطع (FC) مشخص، ضرایب کنترل کننده خطی، K_p و K_i طبق روابط (۴-۲۱) و (۴-۲۲) قابل محاسبه هستند.

$$C(S) = K_p + \frac{K_i}{S} \quad (۴-۱۷)$$

$$L(S) = C(S) \cdot P(S) \quad (۴-۱۸)$$

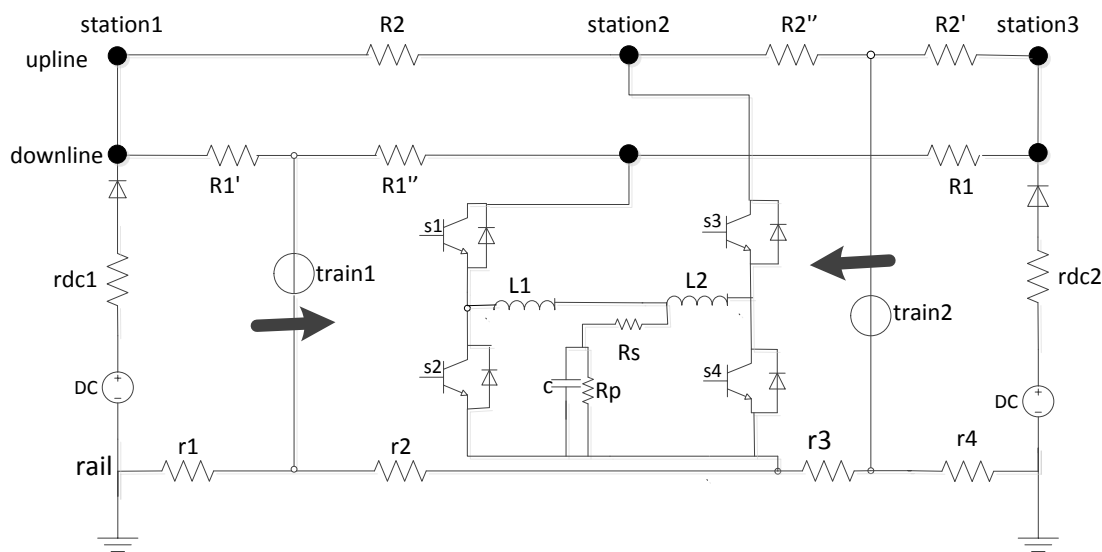
$$T(S) = \frac{I_{sc}}{I_{sc-ref}} = \frac{K_p (s + K_i/K_p)}{L(S^2 + \frac{K_p}{L}S + \frac{K_i}{L})} \quad (۴-۱۹)$$

$$\omega_c = \frac{K_p}{L} \quad (۴-۲۰)$$

$$k_p = 2\zeta\omega_n L \quad (۴-۲۱)$$

$$k_i = \omega_n^2 L \quad (۴-۲۲)$$

همان طور که در فصل سوم بخش ۳-۲ بیان شد، جهت ذخیره‌سازی از مبدل DC-DC نیم‌پل دوسویه استفاده شده است که هر یک در حالت شارژ مثل مبدل باک و در حالت دشارژ مثل مبدل بوست عمل می‌کنند. شکل ۴-۲ مبدل نیم‌پل DC-DC مورد استفاده در این پروژه به همراه ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. در فصل پنجم به بررسی دقیق‌تر اجزای اضافه شده به مبدل می‌پردازیم.



شکل ۴-۲: مبدل DC-DC مورد استفاده در این پروژه همراه با ذخیره ساز

- طراحی سلف و خازن مبدل در حالت باک

در زمان ترمزگیری، مبدل به صورت باک عمل می کند و با شارژ ابرخازن از اضافه ولتاژ باس DC می کاهد. با در نظر گرفتن فرکانس کلیدزنی (f_s) برابر با ۱۰ kHz و مقدار DC جریان سلف برابر با حداکثر جریان در بانک ابرخازن [۷]، مقدار سلف توسط رابطه ی (۴-۲۴) محاسبه می شود [۴۵].

$$d_{buck} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{sc}}{V_{bus}} \quad (۴-۲۳)$$

$$L_{min} = \frac{V_o \times (1 - d_{buck})}{f_s \Delta i_l} \quad (۴-۲۴)$$

که در آن V_o ولتاژ خروجی برابر با ولتاژ دو سر ابرخازن، V_{in} ولتاژ ورودی برابر با ولتاژ باس، d_{buck} زمان وظیفه حالت باک، Δi_l مقدار ریزل جریان DC سلف است. با در نظر گرفتن V_o برابر با ۴۵۰ ولت، V_{in} برابر با ۸۵۰ ولت و ریزل جریان برابر با ۱۰٪ کل جریان سلف، مقدار سلف برابر با ۱۰۰ μH محاسبه شده است.

همچنین با در نظر گرفتن ۱۰٪ ریزل ولتاژ، مقدار خازن مطابق با رابطه ی (۴-۲۵) برابر با ۵۹ μF است.

$$C = \frac{(1 - d_{buck})}{(8Lf_s^2 \frac{\Delta v_o}{v_o})} \quad (۲۵-۴)$$

- طراحی سلف و خازن مبدل در حالت بوست

در زمان شتاب‌گیری، مبدل به صورت بوست عمل می‌کند و با دشارژ ابرخازن از افت ولتاژ در باس DC می‌کاهد. روابط (۲۷-۴) و (۲۸-۴) مقدار سلف و خازن مبدل، در حالت بوست را نشان می‌دهند [۴۵].

$$\frac{1}{(1 - d_{boost})} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{bus}}{V_{sc}} \quad (۲۶-۴)$$

$$L_{min} = \frac{V_o \times d_{boost} (1 - d_{boost})}{f_s \Delta i_l} \quad (۲۷-۴)$$

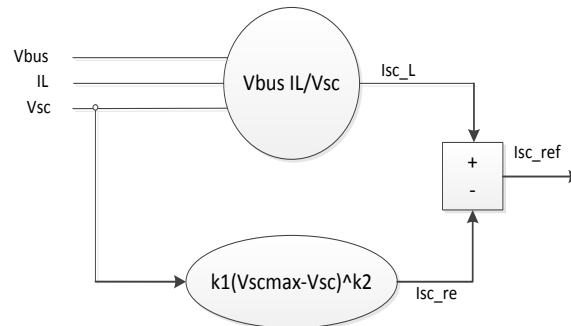
$$C = \frac{(1 - d_{boost})}{(8Lf_s^2 \frac{\Delta v_o}{v_o})} \quad (۲۸-۴)$$

با در نظر گرفتن V_o برابر با ۶۷۵ ولت، V_{in} برابر با ۴۵۰ ولت و ۱۰٪ ریزش جریان سلف، مقدار سلف برابر با $59 \mu H$ محاسبه شده است. با توجه به اینکه برای حالت باک ($L=100$) و برای حالت بوست ($L=59$) محاسبه شده است مقدار سلف در نهایت، برابر با $100 \mu H$ در نظر گرفته شده است. مقدار C نیز در نهایت $150 \mu F$ در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۲- کنترل کننده سیستم ذخیره‌ساز

کنترل مبدل بر اساس یک حلقه فیدبک جریان است که تنظیم جریان ابرخازن را بر عهده دارد. شکل ۴-۱ این وضعیت را نمایش می‌دهد. جریان مرجع ابرخازن همان‌طور که در شکل ۴-۳ و رابطه-ی (۲۹-۴) مشخص است شامل دو جزء I_{sc-l} (کنترل کننده تعادل توان) و I_{sc-re} (کنترل کننده

حالت شارژ) می‌باشد. با فرض بدون تلفات بودن مبدل و بر اساس محاسبات تعادل توان مطابق رابطه‌ی (۴-۳۰) محاسبه می‌شود [۴۳].



شکل ۴-۳: دو جزء جریان مرجع ابرخازن

$$I_{sc-ref} = I_{sc-l} - I_{sc-re} \quad (۴-۲۹)$$

$$I_{sc-l} = \frac{V_{bus} \times I_L}{V_{sc}} \quad (۴-۳۰)$$

که در آن I_L جریان بار است.

I_{sc-re} حالت شارژ ابرخازن را کنترل می‌کند و اجازه نمی‌دهد ابرخازن بیش از حد مجاز، شارژ یا دشارژ شود. مقدار I_{sc-re} مطابق با رابطه‌ی (۴-۳۱) محاسبه می‌شود که در آن V_{sc} ولتاژ واقعی و V_{scmax} حداکثر ولتاژ ابرخازن است.

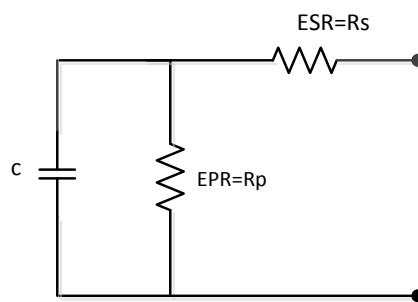
$$I_{sc-re} = K_1 (V_{scmax} - V_{sc})^{K_2} \quad (۴-۳۱)$$

k_1 و k_2 دو پارامتر کنترلی مثبت هستند که روی حالت شارژ ابرخازن اثر دارند و باید به گونه‌ای انتخاب شوند که ولتاژ ابرخازن از محدوده مجاز تجاوز نکند. با در نظر گرفتن k_2 برابر با ۲، مقدار k_1 طبق رابطه‌ی (۴-۳۲) محاسبه می‌شود. که در آن V_{scmin} حداقل ولتاژ ابرخازن و P_L حداکثر توان بار است.

$$P_L = k_1 \times V_{sc \min} \times (V_{sc \max} - V_{sc \min})^2 \quad (4-32)$$

۴-۲-۳- طراحی ابرخازن

ابرخازن استفاده شده در این شبیه‌سازی از یک خازن، یک مقاومت موازی (EPR) که بیان کننده تلفات خوددشارژی است و یک مقاومت سری (ESR) که بیانگر تلفات اهمی است تشکیل شده است [۴۶]. شکل ۴-۴ مدل مداری ابرخازن مورد استفاده در این پروژه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: مدل مداری ابرخازن

روابط (۴-۳۳) و (۴-۳۴) معادلات فضای حالت مربوط به ابرخازن را نشان می‌دهند.

$$\dot{V}_c = \frac{-1}{R_p \cdot C_{sc}} V_c - \frac{1}{C_{sc}} I_{sc} \quad (4-33)$$

$$V_{sc} = V_c - R_s \cdot I_{sc} \quad (4-34)$$

مقدار ظرفیت ابرخازن مورد نیاز مطابق با رابطه‌ی (۴-۳۵) محاسبه می‌شود [۱۹].

$$\frac{1}{2} C_{sc} V_{max}^2 (1-\alpha)^2 \geq E_{absorbed} \quad (4-35)$$

به عبارت دیگر:

$$C_{sc} \geq \frac{2E_{absorbed}}{V_{max}^2 (1-\alpha)^2} \quad (4-36)$$

که در آن C_{sc} مقدار ظرفیت ابرخازن و V_{max} حداکثر ولتاژ کاری ابرخازن می‌باشد. α ضریب

دشارژ است و توسط رابطه‌ی (۴-۳۷) تعریف می‌شود:

$$\alpha = \frac{V_{min}}{V_{max}} \quad (۳۷-۴)$$

V_{min} حداقل ولتاژ کاری ابرخازن، برابر با نصف حداکثر ولتاژ ابرخازن می‌باشد. $E_{absorbed}$ مقدار

انرژی جذب شده توسط سیستم ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد، که برابر است با:

$$E_{absorbed} = E_{RB} \times (1 - k_{in}) \quad (۳۸-۴)$$

k_{in} مقدار انرژی جذب شده توسط سایر قطارها می‌باشد که عددی بین ۰ و ۱ است. با توجه به

اینکه ظرفیت ابرخازن باید مطابق با بدترین شرایط (عدم جذب انرژی توسط سایر قطارها) انتخاب

شود بنابراین مقدار k_{in} را برابر با صفر در نظر می‌گیریم. E_{RB} انرژی حاصل از ترمز است که مطابق با

رابطه‌ی (۳۹-۴) تعریف می‌شود.

$$E_{RB} = (\Delta E_K - \int_0^{Tb} (F_r \times v) dt) \times \eta_{Gear} \times \eta_{motor} \times \eta_{inverter} - \int_0^{Tb} P_a dt \quad (۳۹-۴)$$

ΔE_K تغییرات انرژی جنبشی است که از رابطه‌ی (۴۰-۴) بدست می‌آید.

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} \times M_t \times (V_1^2 - V_2^2) \quad (۴۰-۴)$$

$$M_t = M_1 \times (1 + \delta) + M_2 \quad (۴۱-۴)$$

که در آن M_t جرم کل وسیله‌ی نقلیه با در نظر گرفتن جرم مسافران، M_1 جرم وسیله‌ی نقلیه،

M_2 جرم مسافران، δ ضریب جرم گردان، V_1 سرعت در لحظه‌ی شروع ترمز، V_2 سرعت نهایی برابر

با صفر و T_b مدت زمان ترمز می‌باشد که مطابق با رابطه‌ی (۴۲-۴) محاسبه می‌شود.

$$Tb = \frac{V_1 - V_2}{a} \quad (۴۲-۴)$$

که در آن a شتاب ترمزی می‌باشد.

بدین ترتیب ظرفیت خازن مورد نیاز محاسبه می‌شود. برای ایجاد این ظرفیت، اتصالات سری و

موازی از ابرخازن‌ها استفاده شده است که ظرفیت هر سلول ۳۰۰۰ F و ولتاژ مربوط به آن ۲/۷ V

است اما در عمل ولتاژ کاری هر سلول به $2/5V$ ولت محدود می‌شود. سلول پیشنهادی متعلق به شرکت maxwell می‌باشد [۴۷].

برای کنترل حالت باک مبدل، حداکثر ولتاژ ابرخازن باید از حداقل ولتاژ باس dc کمتر باشد. لازم است اختلاف بین این دو مقدار کم باشد تا استرس (تنش) روی کلیدهای قدرت کاهش یابد. با در نظر گرفتن ۱۰٪ تغییرات، ولتاژ باس بین ۶۷۵ تا ۸۲۵ ولت تغییر می‌کند. بنابراین حداکثر ولتاژ ابرخازن برابر با ۶۰۰ ولت در نظر گرفته می‌شود [۳۹].

تعداد ابرخازن‌های سری حداکثر ولتاژ و تعداد ابرخازن‌های موازی ظرفیت کل را تعیین می‌کنند [۱۹].

تعداد ابرخازن‌های سری در هر ردیف مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۳) محاسبه می‌شود:

$$N_{ser} = \frac{U_{max}}{U_{cell}} \quad (4-43)$$

مقدار مقاومت سری معادل در هر ردیف مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۴) محاسبه می‌شود:

$$R_{ser} = N_{ser} \times ESR \quad (4-44)$$

مقدار مقاومت موازی خازن (EPR) مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۵) محاسبه می‌شود:

$$EPR = \frac{2.7}{5.2 \times 10^{-3}} \quad (4-45)$$

مقدار مقاومت موازی معادل در هر ردیف مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۶) محاسبه می‌شود:

$$R_{par} = N_{ser} \times EPR \quad (4-46)$$

ظرفیت معادل ابرخازن‌های سری مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۷) محاسبه می‌شود:

$$C_N = \frac{C_{cell}}{N_{ser}} \quad (4-47)$$

ظرفیت کل مطابق با رابطه‌ی (۴-۴۸) محاسبه می‌شود:

$$C_{eq} = N_{par} \times C_N \quad (۴-۴۸)$$

مقدار ظرفیت ابرخازن مطابق رابطه‌ی (۴-۳۶) برابر با ۱۳۷ فاراد است. که برای ساختن چنین ظرفیتی ۲۴۰ خازن ۳۰۰۰ فارادی به صورت سری در ۱۱ ردیف قرار گرفته است.

فصل پنجم : نتایج شبیه‌سازی

در این پایان نامه به منظور بررسی صحت عملکرد الگوریتم های کنترلی مطرح شده، بر روی یک سیستم واقعی، مبدل DC-DC پیشنهادی طراحی شده است. همان طور که در شکل ۴-۲ نیز نشان داده شده است شبکه ی مترو با سه ایستگاه، دو پست و مسیرهای رفت و برگشت در نظر گرفته شده است. پست ها در محل ایستگاه های یک و سه واقع شده اند. train1 قطار در مسیر رفت و train2 قطار در مسیر برگشت را نمایش می دهد. مقاومت های r_1, r_2, r_3 و r_4 مقاومت های مربوط به ریل، مقاومت های R_1, R_1', R_2 و R_2' مقاومت های مربوط به مسیر رفت و مقاومت های R_2, R_2' و R_2'' مقاومت های مربوط به مسیر برگشت هستند. از آن جا که بلوکی برای پیاده سازی مقاومت متغیر در محیط نرم افزار متلب تعریف نشده است لذا جهت مدل سازی مقاومت متغیر با زمان، از یک منبع ولتاژ کنترل شده استفاده شده است. به این صورت که مقدار مقاومت در هر لحظه محاسبه می شود و در جریان خط ضرب می شود و به عنوان سیگنال فرمان منبع ولتاژ کنترل شده به آن اعمال می شود. فرض شده سیستم ذخیره ساز انرژی در ایستگاه دو که ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود ندارد قرار گرفته است. سه سناریو مختلف در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink و بر اساس داده های واقعی قطار شهری مشهد شبیه سازی شده است. نتایج شبیه سازی، کارآمدی روش مذکور را به خوبی نشان می دهد. جدول های ۵-۱ تا ۵-۵ به ترتیب پارامترهای مربوط به شبکه، قطار، راندمان اجزاء، مشخصات ابرخازن و مبدل را نشان می دهند.

جدول ۵-۱: پارامترهای مربوط به شبکه

پارامتر	(d) فاصله دو ایستگاه (m)	مقاومت ریل (mΩ/km)	مقاومت خط هوایی (mΩ/km)	مقاومت داخلی پست (r _s) (mΩ)
مقدار	۱۰۸۰	۲۲	۳۶	۳۶

جدول ۵-۲: پارامترهای مربوط به قطار

پارامتر	(P_a) توان تهویه و روشنایی (kW)	(P_{max}) حداکثر توان قطار (kW)	(m_t) جرم کل قطار با مسافران (tn)	(R) مقاومت ترمزی (Ω)	(v) حداکثر سرعت (m/s)
مقدار	۷۰	۵۰۰	۵۶	۱/۴۲	۱۹/۴۴

جدول ۵-۳: راندمان اجزاء

پارامتر	(η_g) بازده جعبه دنده (%)	(η_m) بازده موتور (%)	(η_i) بازده اینورتر (%)
مقدار	۹۷/۵	۹۴	۹۷

جدول ۵-۴: مشخصات ابرخازن

پارامتر	ظرفیت (F)	ولتاژ نامی (V)	ESR مقاومت سری معادل ($m\Omega$)	جریان نشتی (mA)	حداقل ولتاژ ابرخازن (V)	حداکثر ولتاژ ابرخازن (V)	حداکثر جریان پیوسته (A_{rms})
مقدار	۳۰۰۰	۲/۷	۰/۲۹	۵/۲	۳۰۰	۶۰۰	۲۱۰

جدول ۵-۵: پارامترهای مربوط به مبدل

پارامتر	سلف (μH)	خازن μF	(f_s) فرکانس کلیدزنی (kHz)	K1	K2	K_p	K_i	ζ
مقدار	۱۰۰	۱۵۰	۱۰	۰/۰۱۸	۲	۰/۰۰۰۱	۱۰	۰/۰۰۱۶

۵-۱- حرکت قطار از ایستگاه یک به دو

در این حالت فرض شده است که تنها یک قطار در مسیر رفت وجود دارد و هیچ قطاری در مسیر

برگشت تردد نمی کند. این قطار از ایستگاه یک به سمت دو حرکت می کند و در لحظه $t = ۸۰$ ثانیه

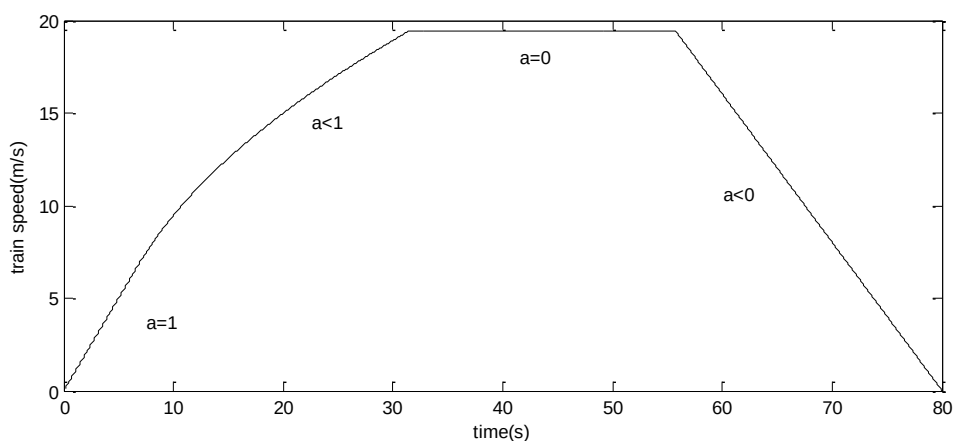
در ایستگاه دو متوقف می‌شود. شکل‌های ۱-۵ و ۲-۵ به ترتیب سرعت و جریان قطار را برای این وضعیت نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۵-۱ سه وضعیت کاری برای قطار در نظر گرفته شده است:

۱- شتابگیری (حرکت با شتاب 1 m/s^2 تا رسیدن به حداکثر توان، سپس حرکت با حداکثر توان

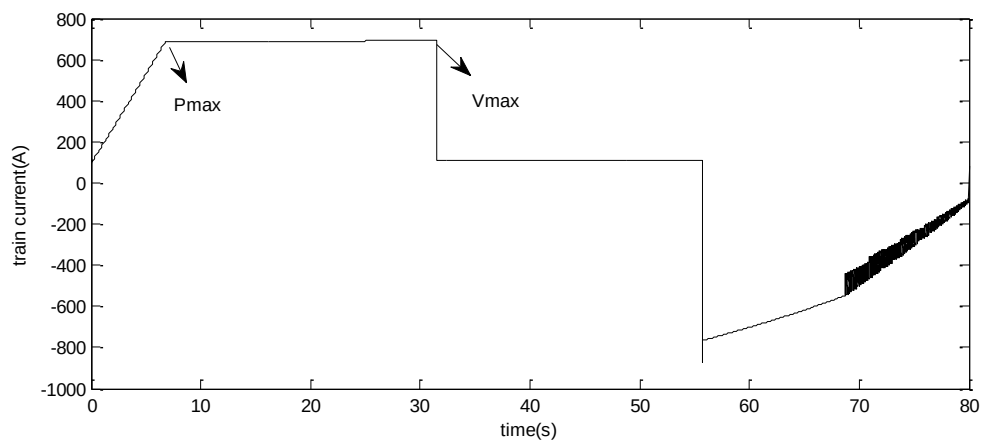
تا رسیدن به حداکثر سرعت) $a > 0$ ←

۲- حرکت با سرعت ثابت $a = 0$ ←

۳- ترمزگیری $a < 0$ ←



شکل ۵-۱: نمودار سرعت قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو



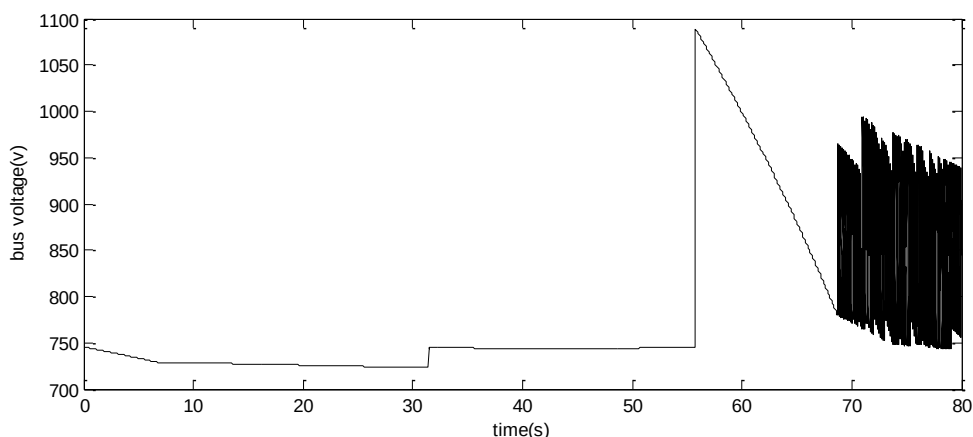
شکل ۵-۲: نمودار جریان قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو

۵-۱-۱- شبیه‌سازی مدار با استفاده از مقاومت ترمزی کنترل‌شده و بدون

سیستم ذخیره‌ساز

مقاومت‌های ترمزی یکی از ادوات مهم برای مهار انرژی جنبشی موجود در موتورهای می‌باشند. این مقاومت‌ها در کاربردهای مختلفی از جمله در سیستم ترمز خطوط ریلی، سیستم ترمز جرثقیل‌ها، آسانسورها و بالابرهای مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که قبلاً بیان شد در زمان ترمز، مقدار انرژی بازگشتی باعث بالا رفتن ولتاژ لینک DC می‌شود. با مقایسه این ولتاژ با مقدار مرجع موردنظر، می‌توان زمان ورود این مقاومت‌ها به مدار را تشخیص داد. برای این منظور، از یک مقاومت سری با یک سوئیچ کنترل‌شده استفاده می‌شود که در صورت دریافت سیگنال خطا، مقاومت وارد مدار می‌شود و انرژی برگشتی را تبدیل به حرارت می‌کند.

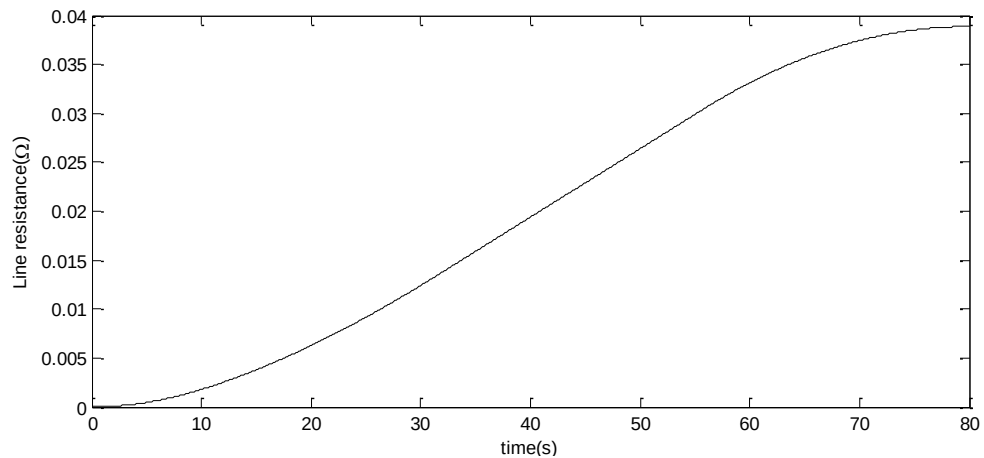
شکل ۵-۳ ولتاژ باس را با در نظر گرفتن مقاومت ترمزی و بدون سیستم ذخیره‌ساز نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در زمان شتاب‌گیری، ولتاژ باس کاهش می‌یابد و در لحظه‌ی ترمز ولتاژ باس افزایش شدیدی دارد. در این لحظه مقاومت ترمزی وارد مدار می‌شود و با تلف شدن انرژی در مقاومت از اضافه ولتاژ لینک DC کاسته می‌شود.



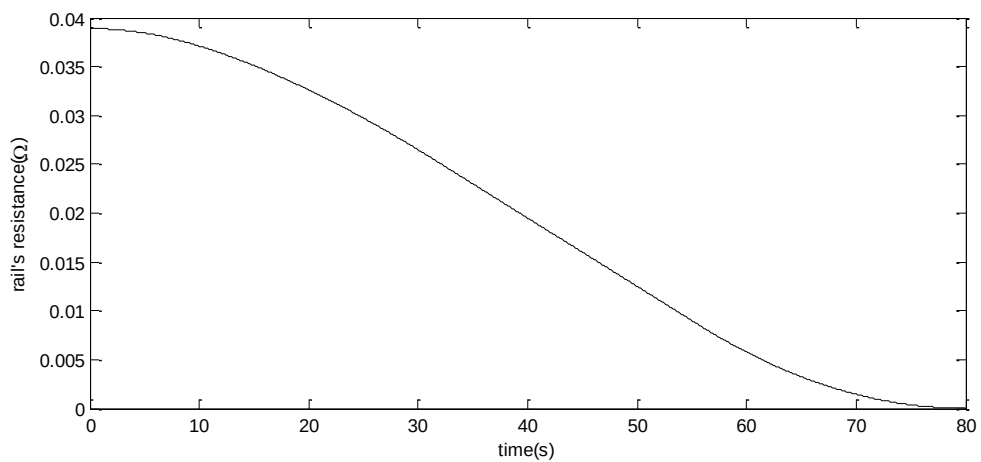
شکل ۵-۳: ولتاژ باس بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در حرکت قطار از ایستگاه یک به دو

همان‌طور که در بخش ۴-۱-۱ نیز بیان شد با توجه به این که قطار بین دو ایستگاه حرکت می‌کند مقاومت الکتریکی خطوط و مقاومت الکتریکی ریل با ایستگاه قبل و بعد قطار، متغیر با زمان است.

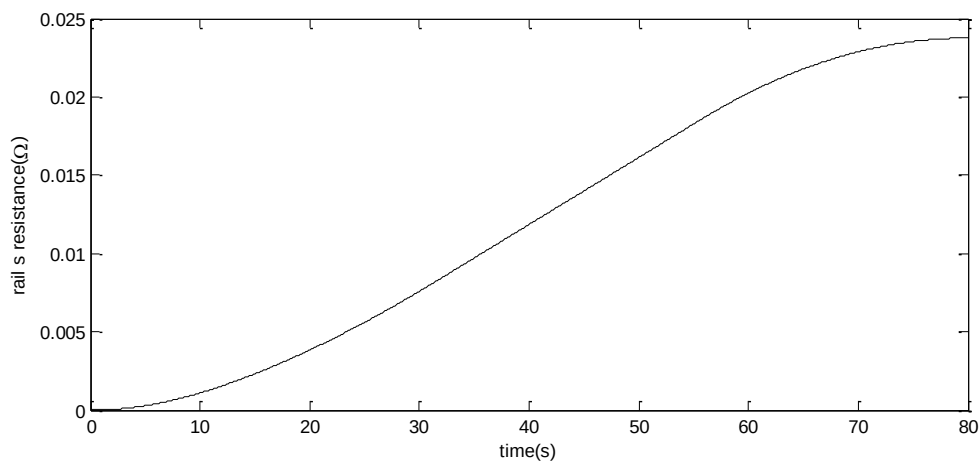
شکل‌های ۴-۵ و ۵-۵ به ترتیب مقاومت الکتریکی خط با توجه به موقعیت قطار با ایستگاه قبل و ایستگاه بعد را نشان می‌دهند. مقاومت الکتریکی ریل نیز با ایستگاه قبل و بعد قطار در شکل‌های ۶-۵ و ۷-۵ آورده شده است.



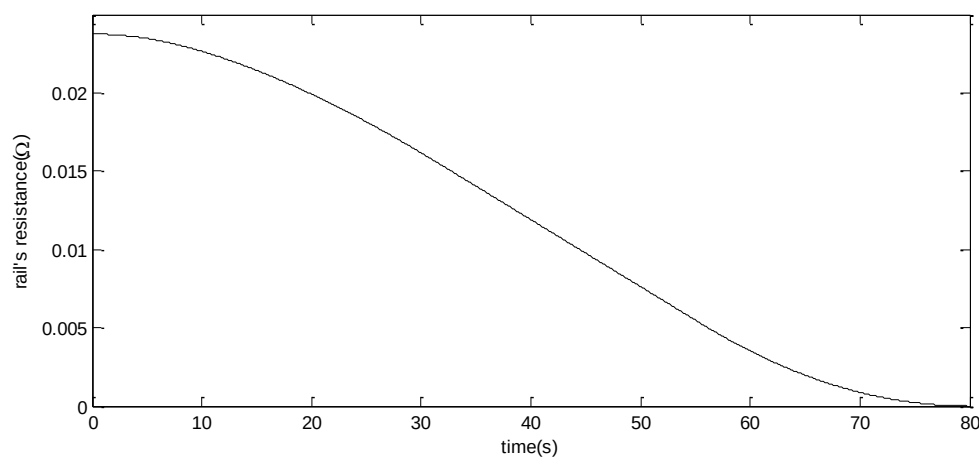
شکل ۴-۵: مقاومت الکتریکی قسمتی از خط، واقع شده بین قطار و ایستگاه یک



شکل ۵-۵: مقاومت الکتریکی قسمتی از خط، واقع شده بین قطار و ایستگاه دو

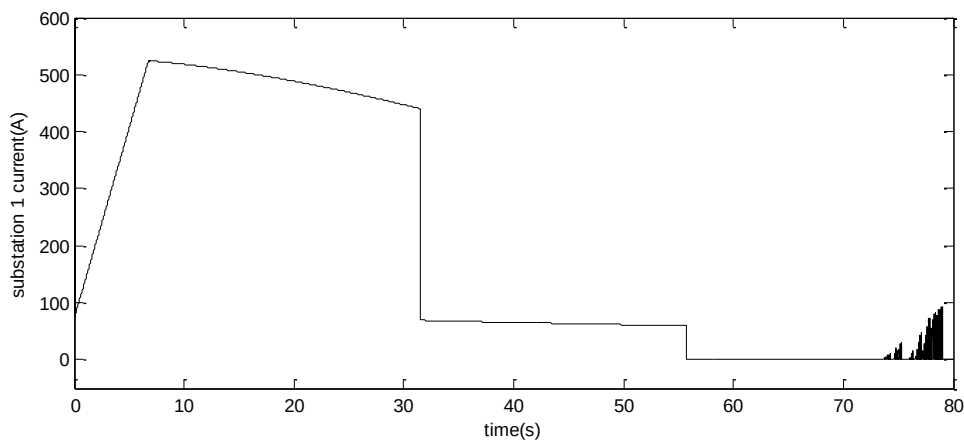


شکل ۵-۶: مقاومت الکتریکی ریل با ایستگاه قبل قطار

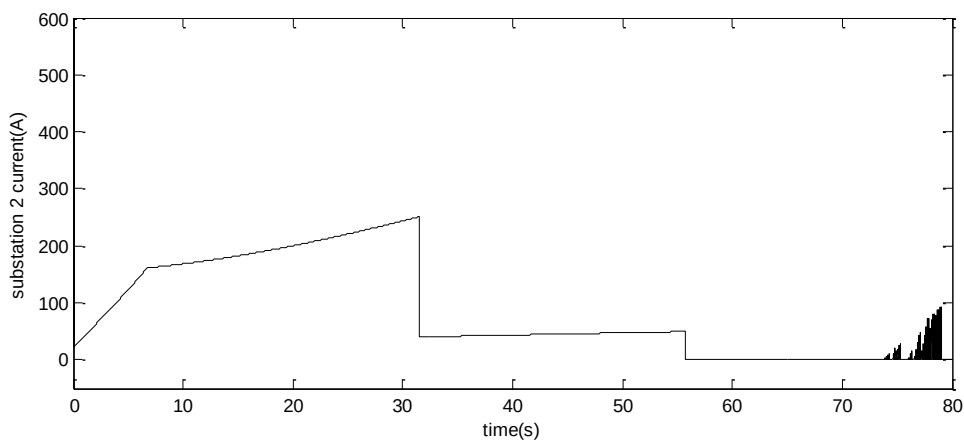


شکل ۵-۷: مقاومت الکتریکی ریل با ایستگاه بعد قطار

شکل‌های ۵-۸ و ۵-۹ به ترتیب جریان پست‌های یک و دو را بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهند. با توجه به این‌که قطار بین ایستگاه‌های یک و دو قرار دارد و هیچ قطاری بین ایستگاه‌های دو و سه وجود ندارد از دید قطار مقاومت بین ایستگاه‌های دو و سه مقدار ثابتی است. از آنجایی که جریان از مسیر با مقاومت کمتر عبور می‌کند، قطار جریان بیشتری از پست یک می‌کشد که این مسئله به وضوح در شکل ۵-۸ نشان داده شده است.



شکل ۵-۸: جریان کشیده شده از پست یک بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز



شکل ۵-۹: جریان کشیده شده از پست دو بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز

شکل ۵-۱۰ انرژی مورد نیاز قطار (بر حسب ژول)، در حرکت از ایستگاه یک به ایستگاه دو را نشان می‌دهد. مقدار انرژی کشیده شده از پست یک و دو مطابق با رابطه‌ی (۵-۱) محاسبه شده است و به ترتیب برابر با $2/8972 \text{ kwh}$ و $1/6708 \text{ kwh}$ است. مطابق شکل ۵-۱۰ انرژی مصرفی قطار تا رسیدن به سرعت نامی برابر با $3/975 \text{ kwh}$ است. این انرژی شامل انرژی لازم برای سیستم روشنایی و تهویه‌ی قطار و انرژی لازم برای شتابگیری است. با تفکیک این انرژی‌ها از هم، در نهایت مقدار انرژی لازم برای رسیدن به سرعت نامی برابر با $3/3611 \text{ kwh}$ و مقدار انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی طبق رابطه-ی (۵-۲) محاسبه شده و برابر با $3/0417 \text{ kwh}$ است. مابقی انرژی نیز در مقاومت‌های مربوط به خط و ریل تلف می‌شود.

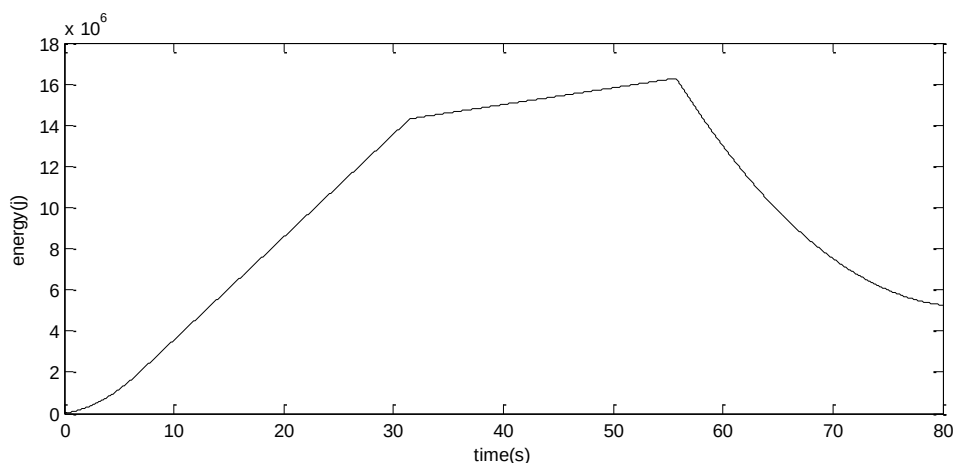
(۵-۱)

$$E_t = VIt$$

(۵-۲)

$$E_r = Ri^2t$$

در روابط (۵-۱) و (۵-۲) مقدار انرژی کشیده شده از پست‌ها، V ولتاژ پست، I جریان پست، R مقاومت ترمزی، i جریان مقاومت ترمزی و E_r انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی می‌باشد.

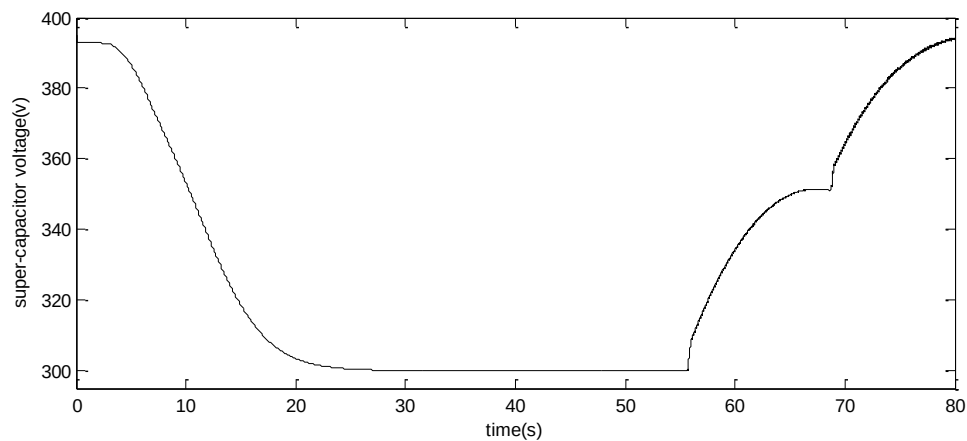


شکل ۵-۱۰: انرژی مورد نیاز قطار در حرکت از ایستگاه یک به دو بر حسب ژول

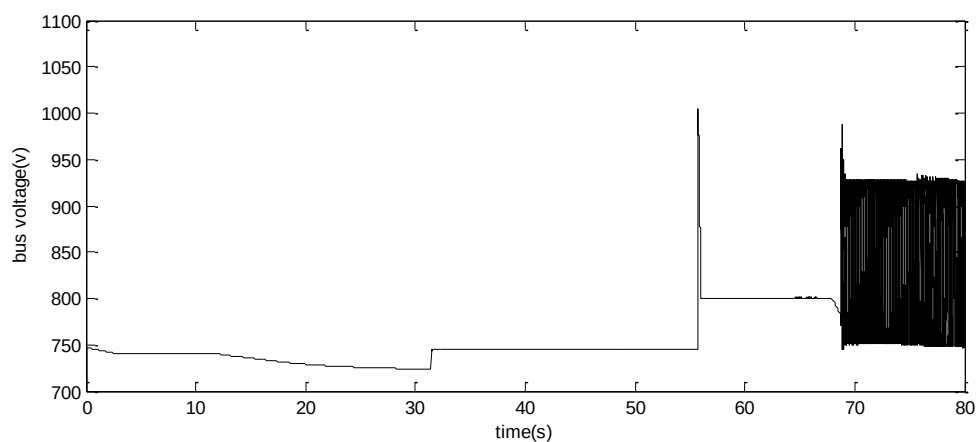
۵-۱-۲- شبیه‌سازی مدار با استفاده از مقاومت ترمزی کنترل‌شده و

سیستم ذخیره‌ساز کنترل‌شده

شکل‌های ۵-۱۱ و ۵-۱۲ به ترتیب ولتاژ ابرخازن و ولتاژ باس را نشان می‌دهند. شرط ورود ابرخازن به مدار قرار گرفتن ولتاژ باس خارج از محدوده‌ی ۷۴۰ تا ۸۰۰ ولت است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در چند ثانیه اول به دلیل افت ناچیز ولتاژ باس، ابرخازن وارد مدار نمی‌شود. با ورود ابرخازن به مدار چون قطار در حال شتابگیری است ابرخازن شروع به دشارژ شدن می‌کند تا افت ولتاژ باس را جبران کند. در زمان حرکت با سرعت ثابت نیز، چون افت ولتاژ باس ناچیز است شرط ورود ابرخازن به مدار برقرار نمی‌شود تا لحظه‌ی ترمز، که ابرخازن مجدداً وارد مدار می‌شود و شروع به شارژ شدن می‌کند.



شکل ۵-۱۱: ولتاژ ابرخازن

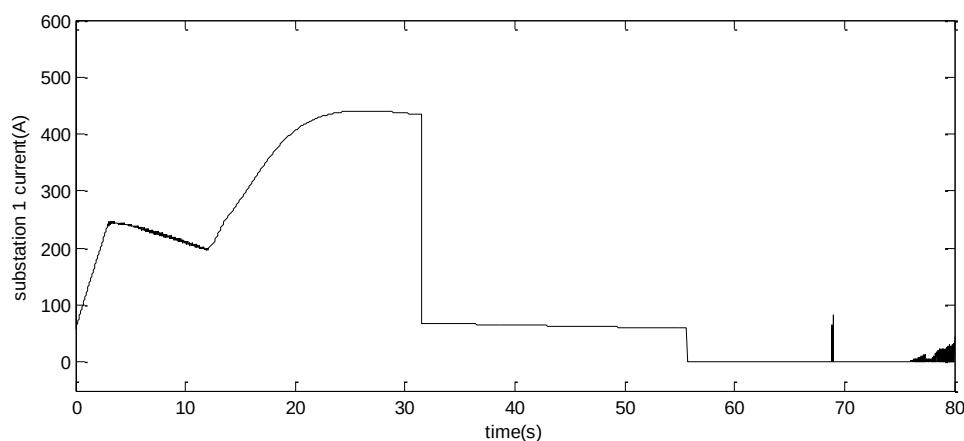


شکل ۵-۱۲: ولتاژ باس با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

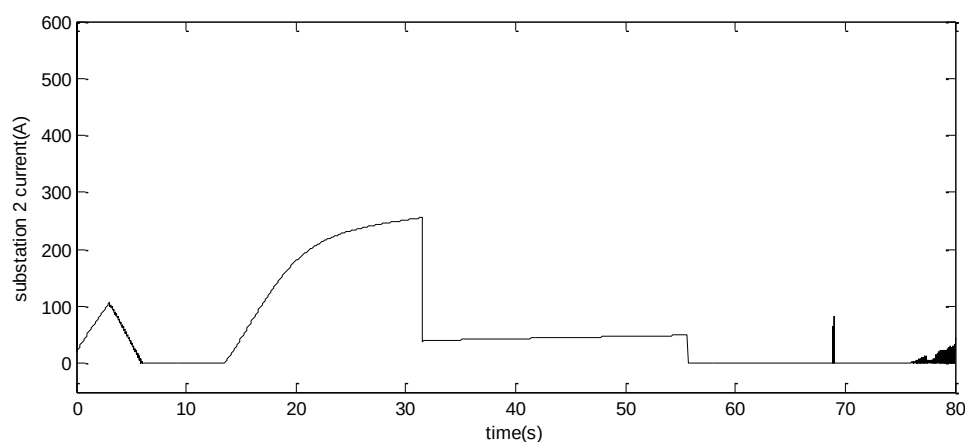
جریان کشیده شده از پست‌های یک و دو با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در شکل‌های ۵-۱۳ و ۵-۱۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است در چند ثانیه‌ی اول که ابرخازن وارد مدار نشده است پست‌های یک و دو تمام جریان مورد نیاز قطار برای حرکت را تأمین می‌کنند. با ورود ابرخازن به مدار جریان کشیده شده از پست‌ها کاهش می‌یابد و با کاهش انرژی تأمین شده توسط ابرخازن جریان کشیده شده از پست‌ها مجدداً افزایش می‌یابد. مقدار انرژی کشیده شده از پست یک و دو به ترتیب برابر با $2/3631 \text{ kwh}$ و $0/9778 \text{ kwh}$ است. مقدار انرژی عرضه شده توسط ابرخازن نیز مطابق با رابطه‌ی (۵-۳) محاسبه می‌شود و برابر با $1/2308 \text{ kwh}$ است. انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی نیز برابر با $1/7997 \text{ kwh}$ است. همان‌طور که مشخص است با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز، علاوه بر کاهش در مقدار انرژی کشیده شده از پست‌ها، تلفات در مقاومت ترمزی نیز کاهش می‌یابد.

$$E_c = \frac{1}{2} C (V_2^2 - V_1^2) \quad (5-3)$$

در رابطه‌ی (۵-۳) C ظرفیت ابرخازن، V_2 ولتاژ نهایی ابرخازن، V_1 ولتاژ اولیه‌ی ابرخازن و E_c مقدار انرژی ذخیره شده در ابرخازن می‌باشد.



شکل ۵-۱۳: جریان کشیده شده از پست یک با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



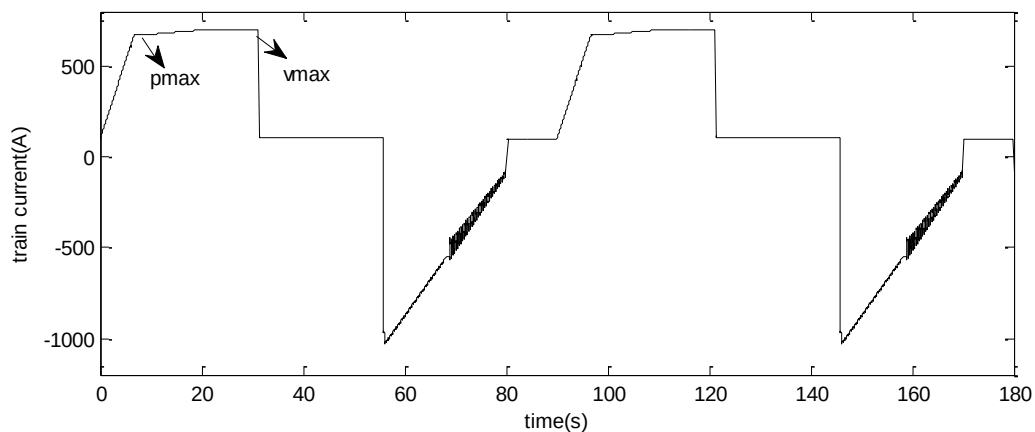
شکل ۵-۱۴: جریان کشیده شده از پست دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

۵-۲- حرکت قطار از ایستگاه یک به سه

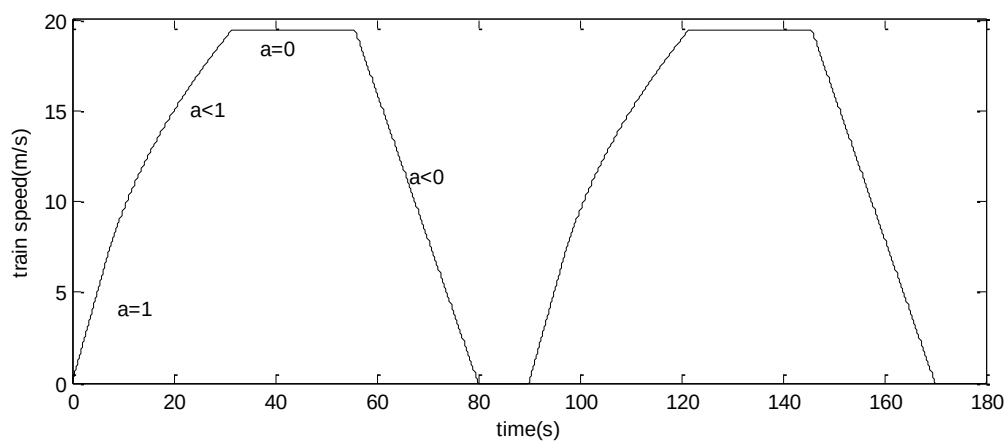
در این حالت فرض شده است قطار از ایستگاه یک به سمت ایستگاه دو حرکت می‌کند و پس از

۱۰ ثانیه توقف در ایستگاه دو مجدداً حرکت خود را به سمت ایستگاه سه آغاز می‌کند. شکل‌های ۵-

۱۵ و ۵-۱۶ به ترتیب جریان و سرعت قطار را برای این وضعیت نشان می‌دهند.

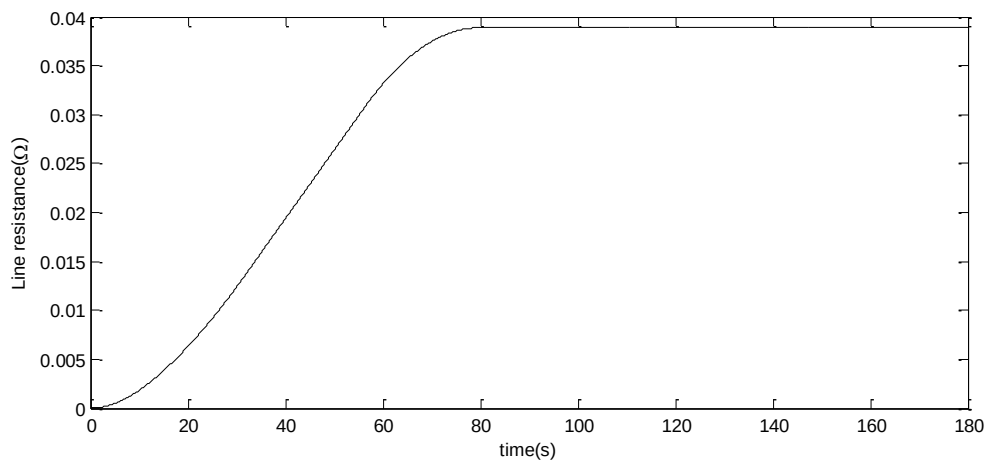


شکل ۵-۱۵: نمودار جریان قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه

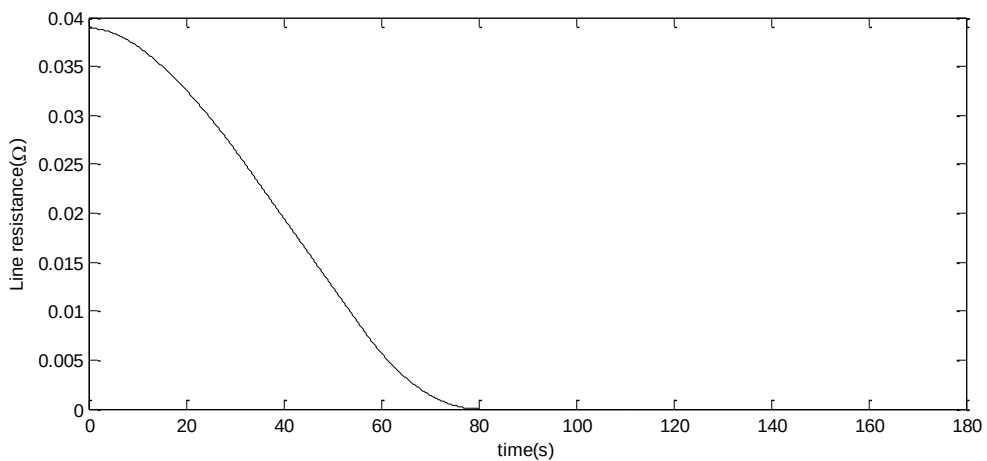


شکل ۵-۱۶: نمودار سرعت قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه

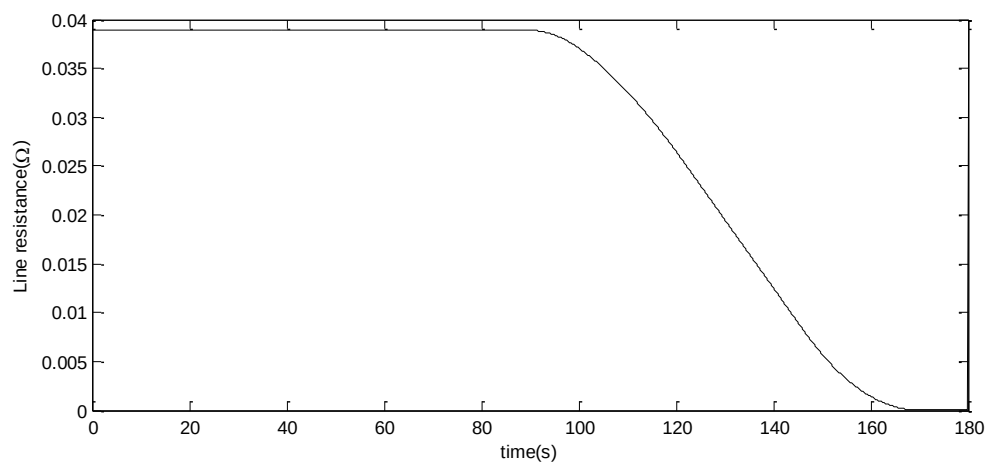
شکل‌های ۵-۱۷ و ۵-۱۸ مقاومت خط را در شرایطی که قطار در حال حرکت از ایستگاه یک به ایستگاه سه است نشان می‌دهند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود زمانی که قطار بین ایستگاه یک و دو حرکت می‌کند مقاومت خط مربوط به موقعیت قطار با ایستگاه یک در حال افزایش و با ایستگاه دو در حال کاهش است. پس از عبور از ایستگاه دو، مقاومت بین ایستگاه یک و دو از دید قطار مقداری ثابت و برابر با 0.389 اهم است. زمانی که قطار بین ایستگاه دو و سه در حال حرکت است مقاومت قطار با ایستگاه دو، در حال افزایش و با ایستگاه سه، در حال کاهش است. شکل‌های ۵-۱۹ و ۵-۲۰ بیان‌کننده این موضوع می‌باشند.



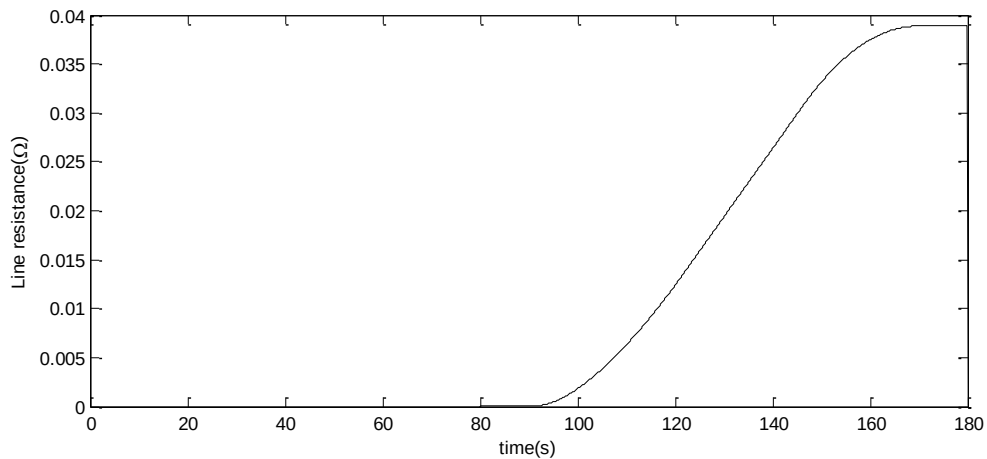
شکل ۵-۱۷: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه یک (قرارگیری قطار بین ایستگاه یک و دو)



شکل ۵-۱۸: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه دو (قرارگیری قطار بین ایستگاه یک و دو)

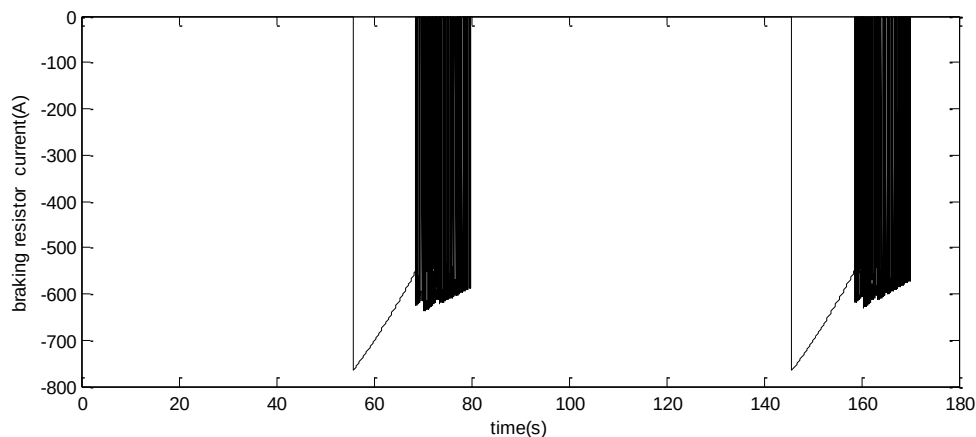


شکل ۵-۱۹: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت با ایستگاه دو (قرارگیری قطار بین ایستگاه دو و سه)



شکل ۵-۲۰: مقاومت الکتریکی خط در موقعیت قطار با ایستگاه سه (قرارگیری قطار بین ایستگاه دو و سه)

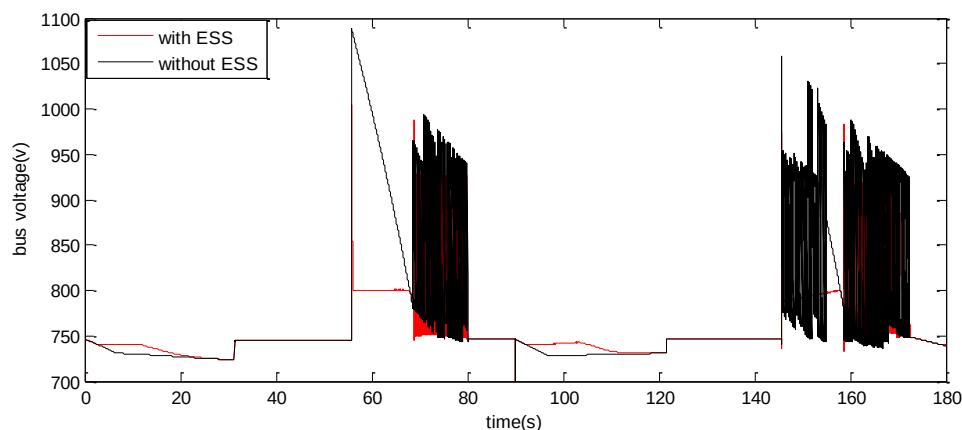
جریان مقاومت ترمزی در مدت زمان حرکت قطار از ایستگاه یک به ایستگاه سه بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد مقاومت ترمزی تنها در زمان ترمزگیری وارد مدار می‌شود.



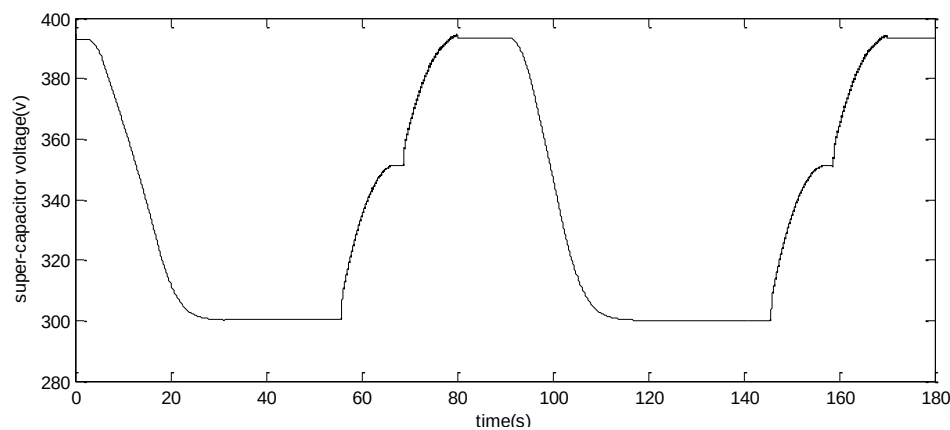
شکل ۵-۲۱: جریان مقاومت ترمزی بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

شکل ۵-۲۲ ولتاژ باس را در دو حالت با ذخیره‌ساز (نمودار قرمز) و بدون ذخیره‌ساز (نمودار مشکی) نشان می‌دهد. با مقایسه دو نمودار خواهیم دید که، با وجود ذخیره‌ساز در مدت زمان شتاب‌گیری، افت ولتاژ کاهش چشم‌گیری دارد. شکل ۵-۲۳ ولتاژ ابرخازن را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدت زمان شتاب‌گیری به علت افت ولتاژ باس DC، مبدل نیم‌پل مانند مبدل بوست عمل کرده و ابرخازن دشارژ می‌شود تا این افت ولتاژ را جبران کند و تا حد امکان ولتاژ باس را ۷۵۰ ولت ثابت نگه دارد. در مدت زمان حرکت با سرعت ثابت به دلیل افت ناچیز ولتاژ باس

شرط ورود ابرخازن به مدار برقرار نمی‌شود بنابراین ابرخازن در مدار نیست. در مدت زمان ترمزگیری با توجه به افزایش ولتاژ باس، عملکرد مبدل نیم‌پل مانند مبدل باک است و در این حالت فرمان شارژ ابرخازن صادر می‌شود. پس از ۱۰ ثانیه توقف در ایستگاه دو، قطار مجدداً حرکت خود را آغاز می‌کند و بخشی از انرژی مورد نیاز خود برای شتابگیری را، از همین انرژی ذخیره شده در ابرخازن تأمین می‌کند.



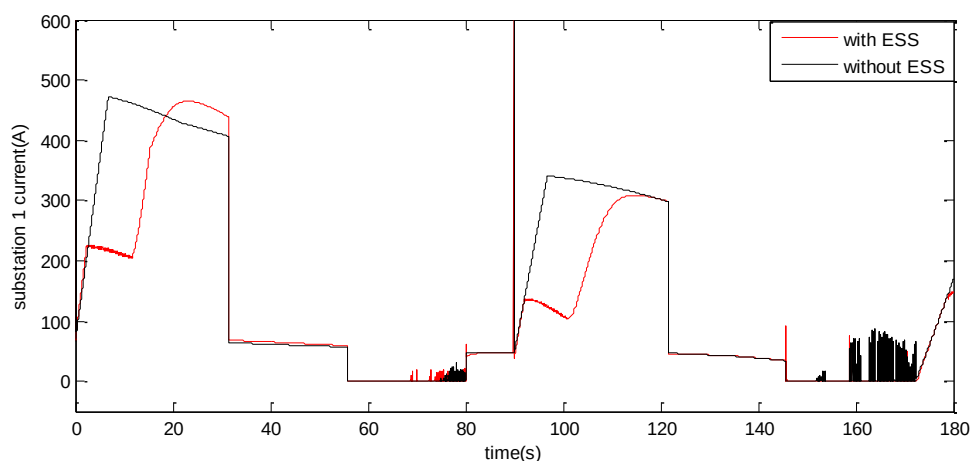
شکل ۵-۲۲: ولتاژ باس با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



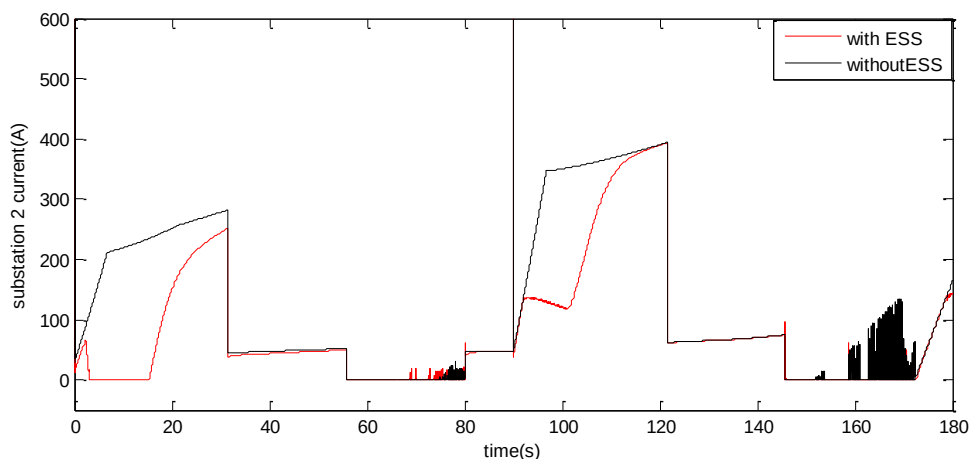
شکل ۵-۲۳: ولتاژ دو سر ابرخازن

مقدار جریان کشیده شده از پست‌های یک و دو در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز به ترتیب با نمودارهای قرمز و مشکی در شکل‌های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی دو شکل می‌توان مشاهده کرد که در حین حرکت قطار از ایستگاه یک به سه جریان کشیده شده از پست یک کاهش می‌یابد و جریان کشیده شده از پست دو افزایش می‌یابد. در حالت بدون ذخیره‌ساز در مدت زمان شتاب‌گیری، جریان زیادی از پست‌ها کشیده می‌شود. در زمان حرکت با سرعت ثابت

این جریان کاهش می‌یابد و در زمان ترمز، به دلیل وجود یکسوکننده‌های دیودی موجود در پست‌ها جریانی وارد پست‌ها نمی‌شود. در مدت زمان ۸۰ تا ۹۰ ثانیه که قطار در ایستگاه دو متوقف است جریان ثابتی برای مصارف کمکی مثل تهویه و روشنایی از پست‌ها کشیده می‌شود. همان‌طور که مشخص است با ورود ابرخازن به مدار جریان کشیده شده از پست‌ها کاهش می‌یابد، پس از دشارژ ابرخازن و کاهش سطح ولتاژ آن، جریان کشیده شده از پست‌ها مجدداً افزایش می‌یابد. در زمان حرکت با سرعت ثابت چون ابرخازن در مدار نیست در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز، جریان پست‌ها بر هم منطبق است. با توجه به اینکه ولتاژ پست‌ها ۷۵۰ ولت می‌باشد، در مدت زمان ترمز با وجود مقاومت ترمزی ولتاژ باس کمتر از ۷۵۰ ولت می‌شود که باعث جاری شدن جریان از پست‌ها در ناحیه‌ی ترمزی می‌شود.

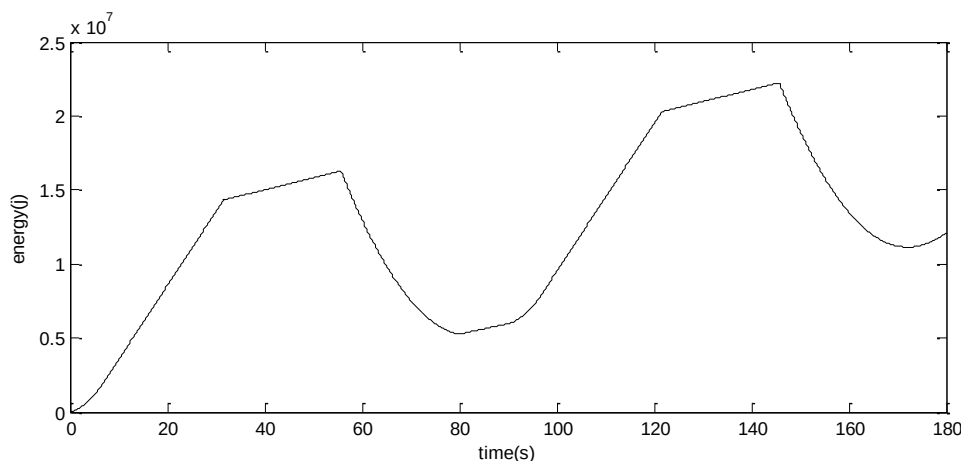


شکل ۵-۲۴: جریان کشیده شده از پست یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



شکل ۵-۲۵: جریان کشیده شده از پست دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

کل انرژی مورد نیاز قطار برای رسیدن از ایستگاه یک به سه در شکل ۵-۲۶ نشان داده شده است. با وجود ذخیره‌ساز مقدار انرژی کشیده شده از پست یک و دو به ترتیب برابر با $4/2306 \text{ kwh}$ و $2/9222 \text{ kwh}$ است. مقدار انرژی عرضه شده توسط خازن نیز برابر با $2/46 \text{ kwh}$ می‌باشد. مقدار انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی برابر با $3/5278 \text{ kwh}$ است. بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز مقدار انرژی کشیده شده از پست یک و دو به ترتیب برابر با $5/2667 \text{ kwh}$ و $4/3944 \text{ kwh}$ است. انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی نیز برابر با $6/0819 \text{ kwh}$ می‌باشد. با توجه به نتایج فوق، انرژی کشیده شده از پست یک و دو به ترتیب 20% و 33% کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی نیز 42% کاهش می‌یابد.



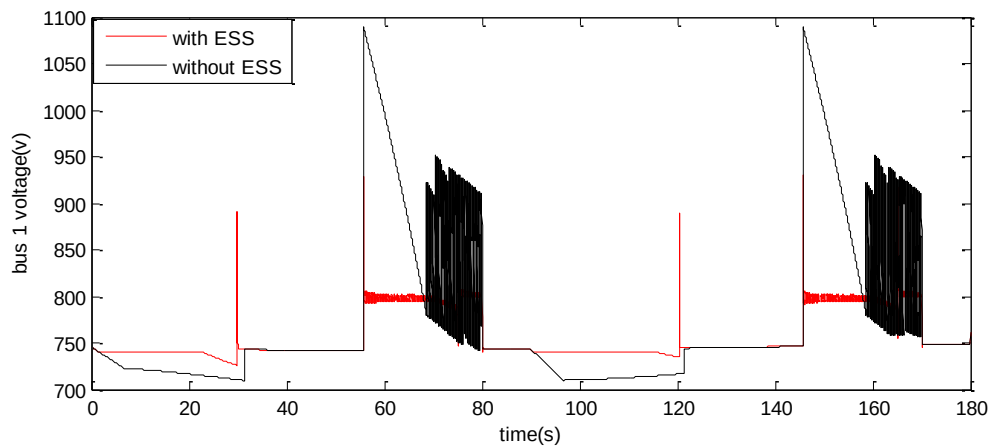
شکل ۵-۲۶: کل انرژی مورد نیاز قطار در حرکت از ایستگاه یک به سه

۵-۳- ورود هم‌زمان قطارها به ایستگاه دو و خروج هم‌زمان آنها از

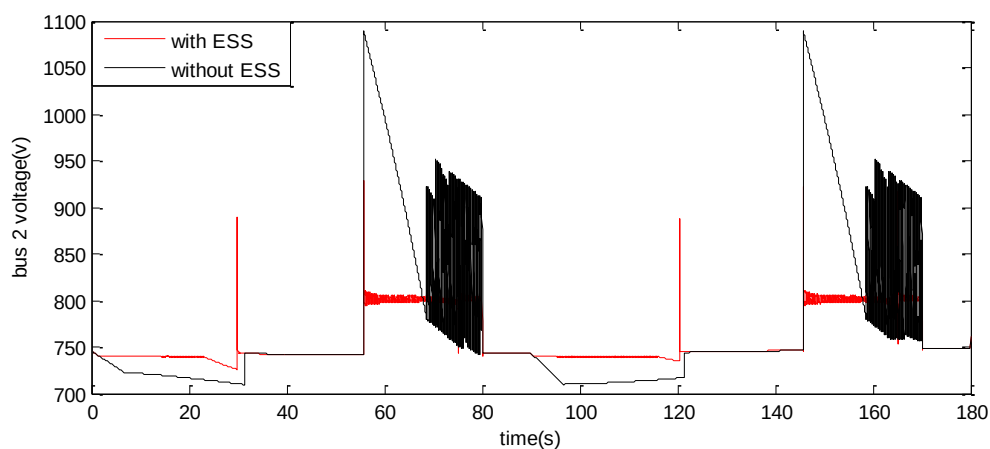
ایستگاه دو

در این حالت فرض شده است قطار ۱ در مسیر رفت از ایستگاه یک به سمت ایستگاه دو حرکت می‌کند و همچنین قطار ۲ نیز در همین زمان در مسیر برگشت از ایستگاه سه به سمت ایستگاه دو حرکت می‌کند. بنابراین هر دو هم‌زمان در ایستگاه دو ترمز می‌گیرند و هم‌زمان از ایستگاه دو حرکت می‌کنند. ولتاژ باس‌های یک و دو در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در شکل‌های ۵-۲۷

و ۵-۲۸ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، با در نظر گرفتن ذخیره ساز، ولتاژ باس-ها در زمان شتابگیری و حرکت با سرعت ثابت در مقایسه با حالتی که ذخیره ساز در مدار نیست جز در لحظه ی ترمز تقریباً ۷۵۰ ولت است.

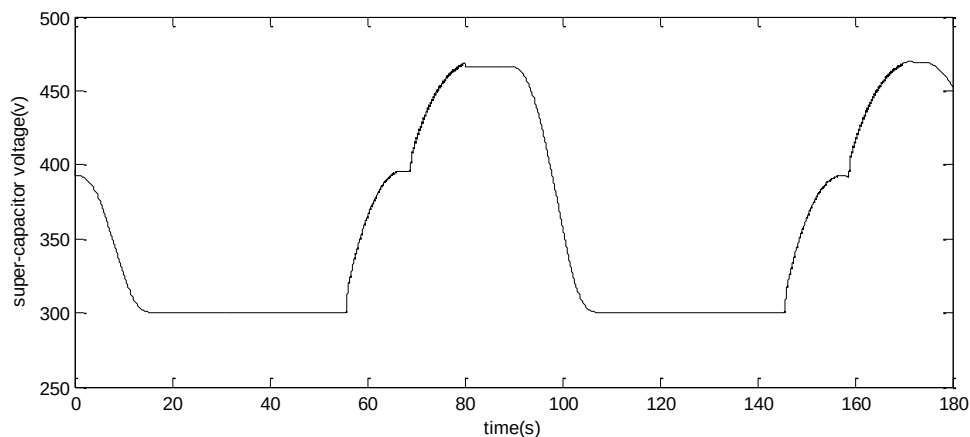


شکل ۵-۲۷: ولتاژ باس یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز



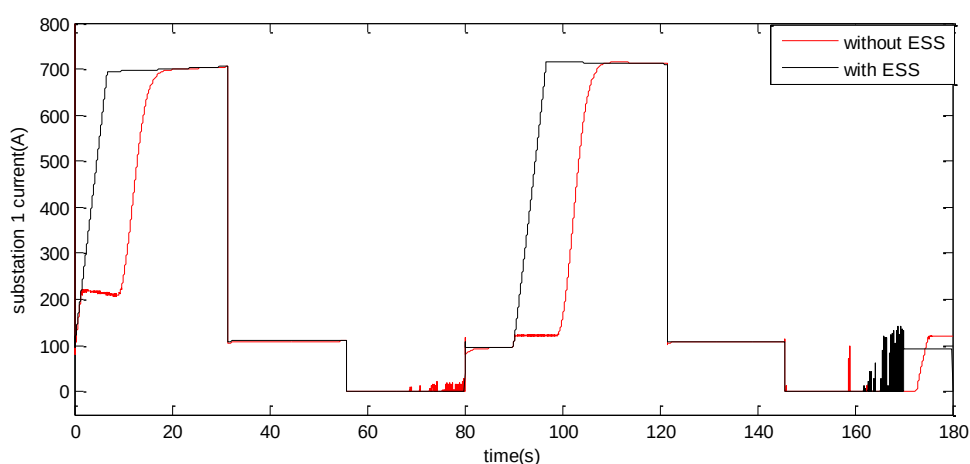
شکل ۵-۲۸: ولتاژ باس دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره ساز

شکل ۵-۲۹ ولتاژ دو سر ابرخازن را نشان می دهد. در مدت زمانی که قطار در حال شتابگیری است ابرخازن دشارژ می شود. در زمان حرکت با سرعت ثابت همان طور که قبلاً اشاره شد به دلیل افت ناچیز ولتاژ باس ابرخازن وارد مدار نمی شود. با ترمز قطار به دلیل این که ولتاژ باس افزایش می یابد شرط ورود ابرخازن به مدار برقرار می شود و ابرخازن شروع به شارژ شدن می کند. در بازه ی ۸۰ تا ۹۰ ثانیه قطار در ایستگاه دو متوقف شده بنابراین ولتاژ ابرخازن همان مقدار ثابت باقی می ماند.

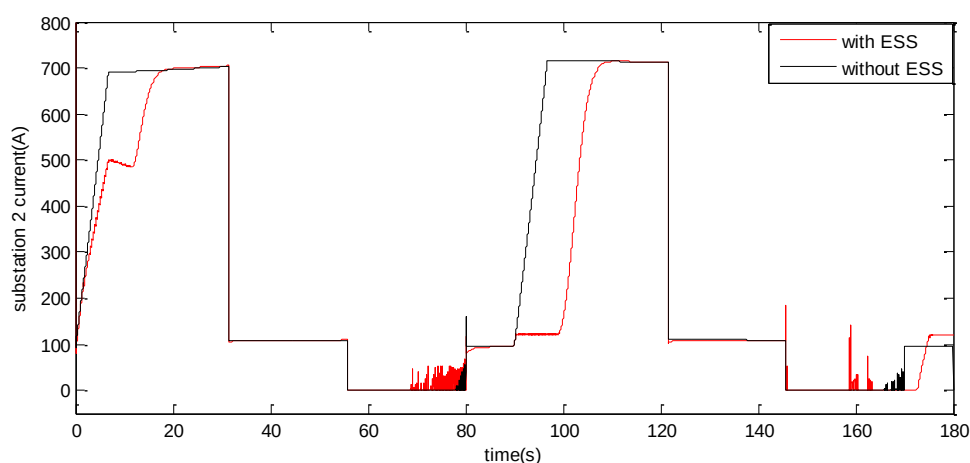


شکل ۵- ۲۹: ولتاژ دو سر ابرخازن

شکل‌های ۵-۳۰ و ۵-۳۱ به ترتیب جریان پست یک و دو را برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز با نمودار قرمز و مشکی نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۵-۳۰ مشخص است بدون وجود ذخیره‌ساز جریان زیادی از پست یک کشیده می‌شود. با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز در چند ثانیه اول چون افت ولتاژ باس ناچیز است ابرخازن وارد مدار نمی‌شود. بنابراین قطار جریان مورد نیاز خود برای حرکت و روشنایی را از پست یک تأمین می‌کند. با ورود ابرخازن به مدار جریان کشیده شده از پست یک کاهش می‌یابد. پس از دشارژ ابرخازن و کاهش سطح ولتاژ آن، جریان کشیده شده از پست یک مجدداً افزایش می‌یابد. در زمان حرکت با سرعت ثابت که ابرخازن خارج از مدار است جریان کشیده شده از پست یک در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز بر هم منطبق است. مدت زمانی که قطار در ایستگاه دو متوقف است جریان ثابتی برابر با ۹۳ آمپر از پست یک کشیده می‌شود. که این جریان صرف سیستم‌های روشنایی و تهویه‌ی قطار می‌شود.



شکل ۵-۳۰: جریان کشیده شده از پست یک با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



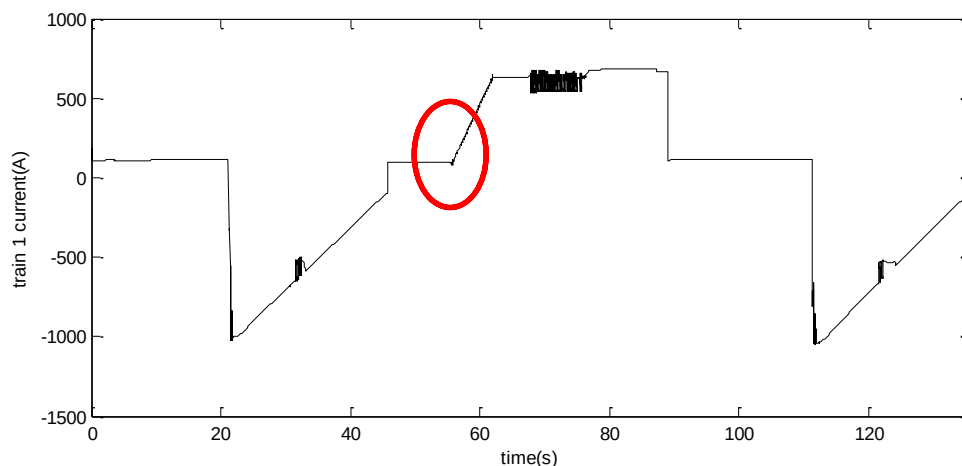
شکل ۵-۳۱: جریان کشیده شده از پست دو با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

۴-۵- آغاز شتابگیری قطار اول از ایستگاه دو هم‌زمان با ترمزگیری

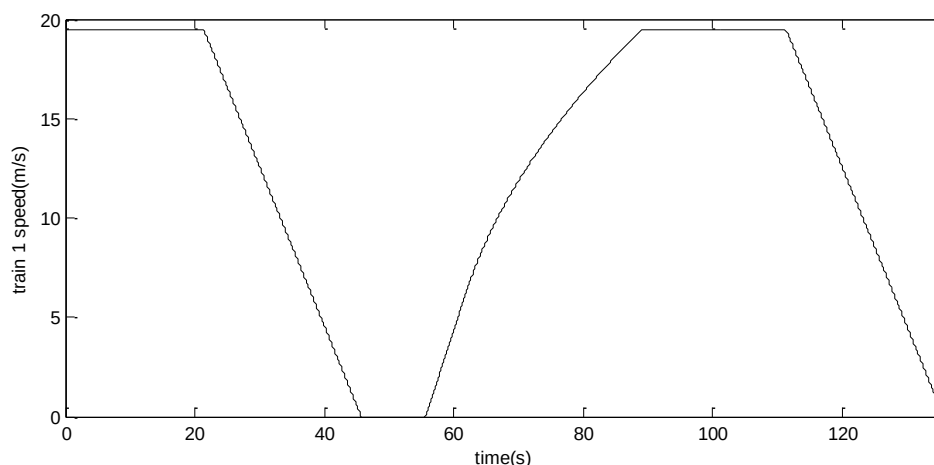
قطار دوم در ایستگاه دو

در این حالت فرض شده است که قطار اول در مسیر رفت از ایستگاه یک به سمت ایستگاه سه حرکت می‌کند. قطار دوم نیز در مسیر برگشت از ایستگاه سه به سمت ایستگاه یک حرکت می‌کند. حرکت قطارها به گونه‌ای تنظیم شده است که دقیقاً هم‌زمان با ترمز قطار دوم نزدیک ایستگاه دو که مبدل پیشنهادی در آن قرار دارد، قطار اول حرکت خود را از ایستگاه دو آغاز کند. شکل‌های ۵-۳۲ و ۵-۳۳ به ترتیب جریان و سرعت مربوط به قطار اول را برای این وضعیت نشان می‌دهند. همان‌طور

که در شکل ۳۲-۵ مشاهده می‌شود قطار با سرعت ثابت حرکت می‌کند در ۲۱ ثانیه ترمز می‌زند و در ۴۵ ثانیه در ایستگاه دو متوقف می‌شود. پس از ۱۰ ثانیه توقف در ایستگاه دو مجدداً در ۵۵ ثانیه شروع به حرکت می‌کند.

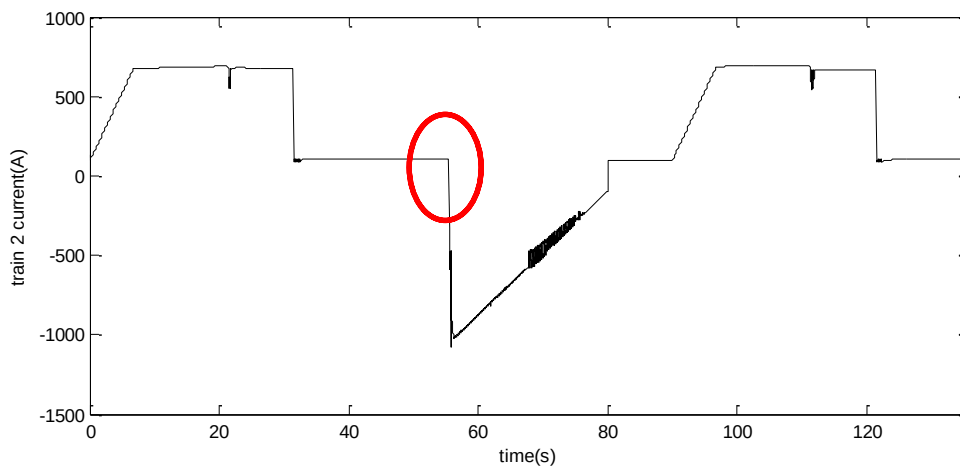


شکل ۳۲-۵: نمودار جریان قطار اول در حرکت از ایستگاه یک به سه

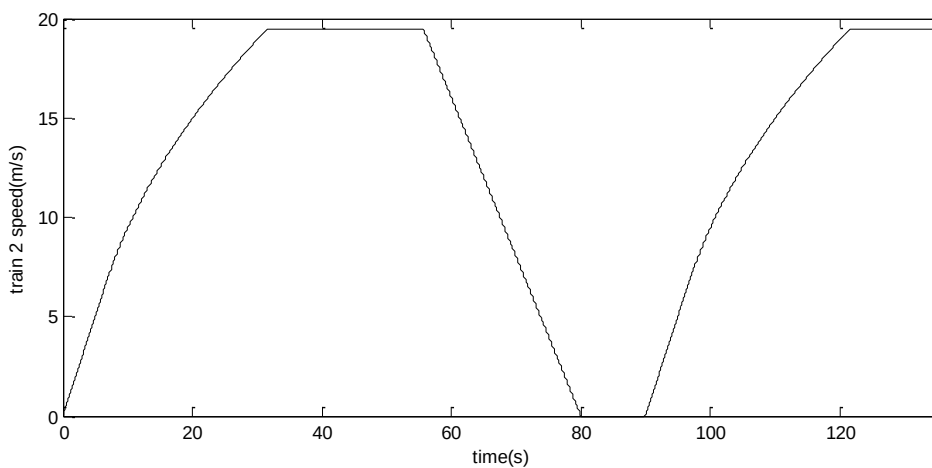


شکل ۳۳-۵: نمودار سرعت قطار اول در حرکت از ایستگاه یک به سه

همان‌طور که در شکل ۳۴-۵ نشان داده شده است قطار دوم از ایستگاه سه در مسیر برگشت شروع به حرکت می‌کند و در ۵۵ ثانیه نزدیک ایستگاه دو ترمز می‌گیرد و پس از طی مسافتی، در ۸۰ ثانیه در ایستگاه دو متوقف می‌شود. پس از ۱۰ ثانیه توقف در ایستگاه دو، مجدداً حرکت خود را آغاز می‌کند. شکل ۳۵-۵ نمودار سرعت، مربوط به قطار دوم را نشان می‌دهد.

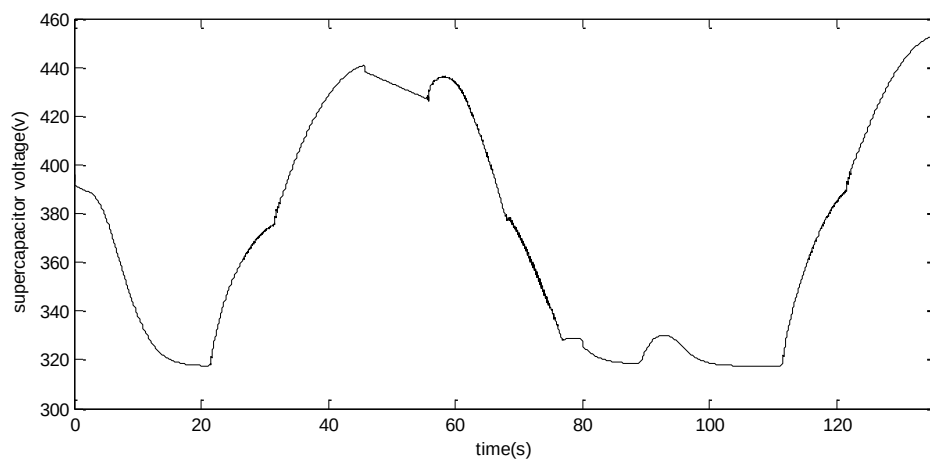


شکل ۳۴-۵: نمودار جریان قطار دوم در حرکت از ایستگاه یک به سه



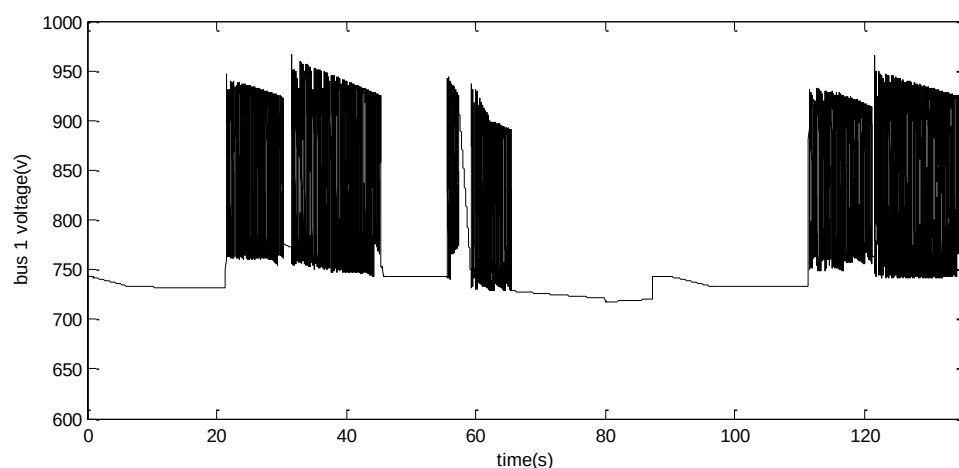
شکل ۳۵-۵: نمودار سرعت قطار دوم در حرکت از ایستگاه یک به سه

شکل ۳۶-۵ ولتاژ دو سر ابرخازن را نشان می‌دهد. در ۲۱ ثانیه‌ی اول، با توجه به اینکه قطار اول با سرعت ثابت حرکت می‌کند و قطار دوم در حال شتاب‌گیری است ابرخازن دشارژ می‌شود. در ثانیه‌ی ۲۱ که قطار اول ترمز می‌زند ابرخازن شروع به شارژ شدن می‌کند. در مدت زمانی که قطار دوم ترمز می‌گیرد چون قطار اول در حال شتاب‌گیری است بخشی از انرژی مورد نیاز برای حرکت قطار اول توسط ابرخازن، بخشی توسط انرژی بازتولیدی قطار دوم و مقدار کمی توسط پست‌ها تأمین می‌شود.

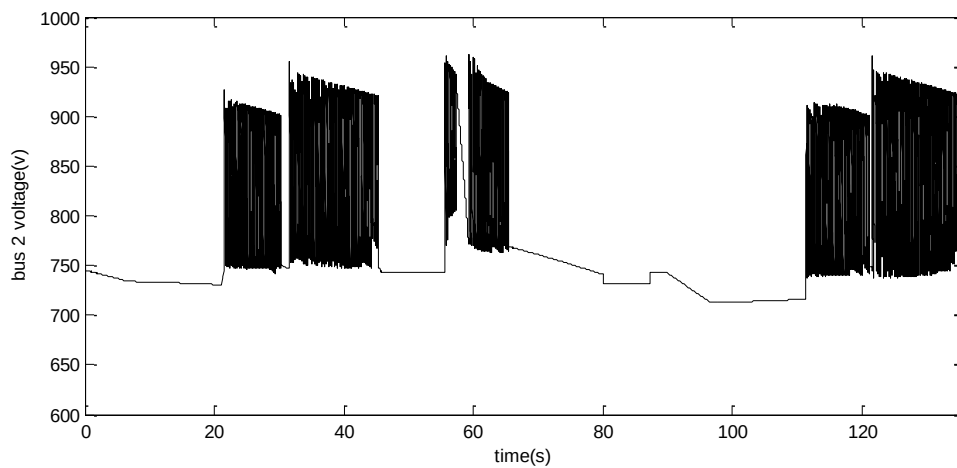


شکل ۵-۳۶: ولتاژ ابرخازن در حرکت قطار از ایستگاه یک به سه

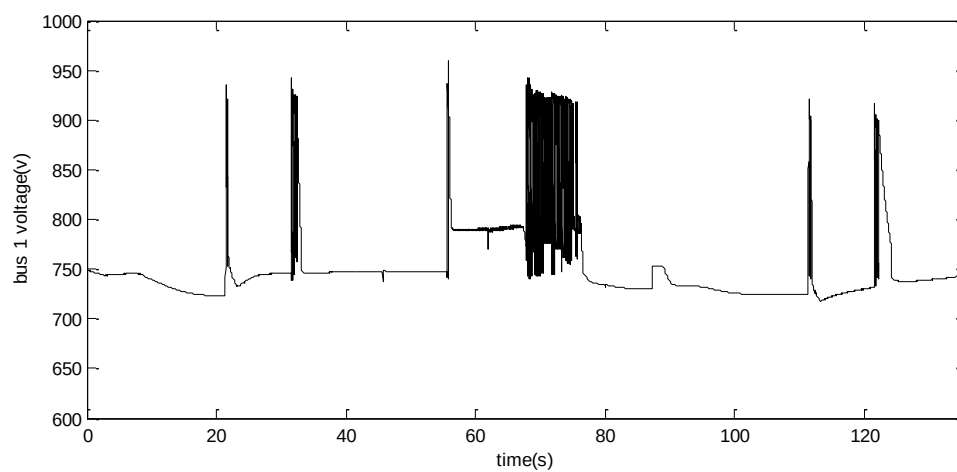
ولتاژ باس‌های یک و دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز به ترتیب در شکل‌های ۵-۳۷ و ۵-۳۸ نشان داده شده است. با ترمز قطار، ولتاژ باس افزایش می‌یابد. در این حالت مقاومت ترمزی به منظور کاهش سطح ولتاژ وارد مدار می‌شود. مقاومت ترمزی به صورت آنی نمی‌تواند این سطح ولتاژ را کاهش دهد بنابراین با نوساناتی این سطح ولتاژ را کاهش می‌دهد. شکل‌های ۵-۳۹ و ۵-۴۰ به ترتیب ولتاژ باس یک و دو را با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهند. با ورود ابرخازن به مدار چون بخش اعظم انرژی ذخیره می‌شود مقاومت ترمزی سطح انرژی کمتری را تلف می‌کند بنابراین نوسانات ولتاژ کمتر است و سریعتر از بین می‌رود.



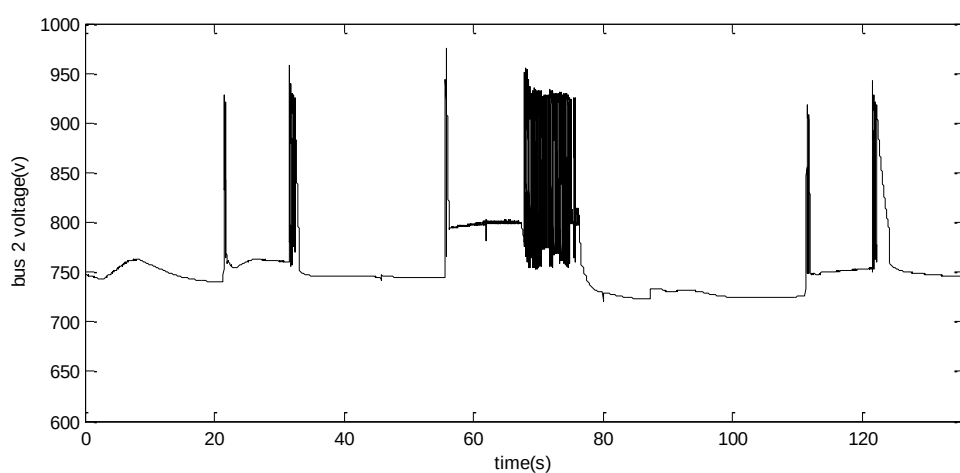
شکل ۵-۳۷: ولتاژ باس یک بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



شکل ۵-۳۸: ولتاژ باس دو بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



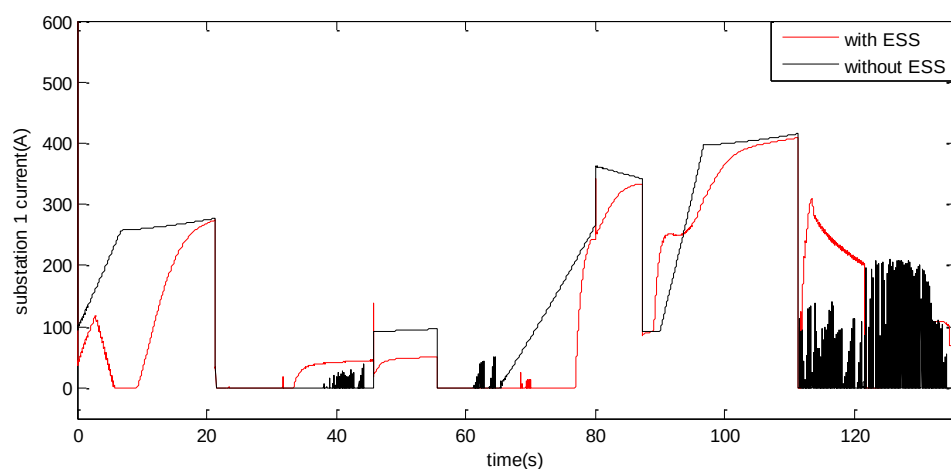
شکل ۵-۳۹: ولتاژ باس یک با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



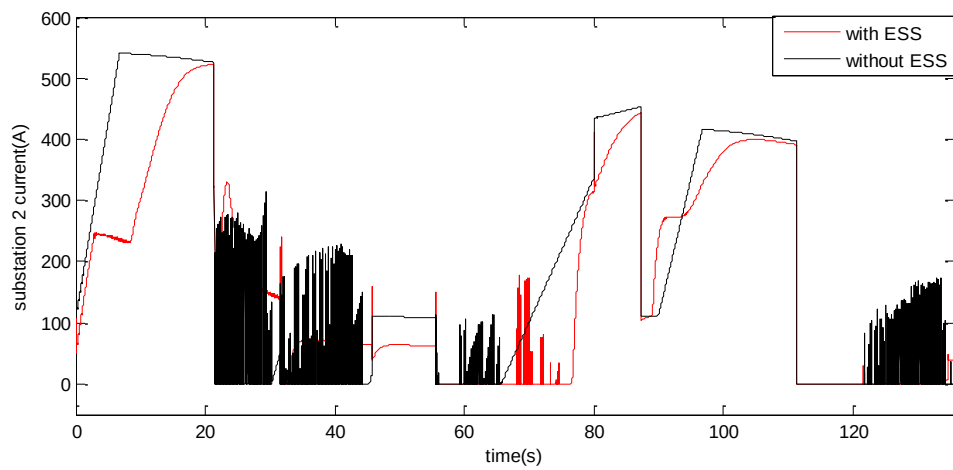
شکل ۵-۴۰: ولتاژ باس دو با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

شکل‌های ۵-۴۱ و ۵-۴۲ به ترتیب جریان پست‌های یک و دو را برای هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهند. نمودار قرمز مربوط به حالت، با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز است و

نمودار مشکی حالت بدون ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. در ابتدا و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز چون فرض شده است قطار اول با سرعت ثابت حرکت می‌کند جریان کمتری از پست یک کشیده می‌شود در همین زمان چون قطار دوم در حال شتاب‌گیری است و به پست دو نزدیکتر است بیشتر جریان مورد نیاز خود را از پست دو تأمین می‌کند، بنابراین جریان کشیده شده از پست دو بیشتر است. همان‌طور که در شکل ۵-۴۱ مشاهده می‌کنید با وجود ذخیره‌ساز جریان کشیده شده از پست یک کاهش می‌یابد. شرط ورود ابرخازن به مدار قرار گرفتن ولتاژ باس، خارج بازه ۷۴۰ تا ۸۰۰ ولت است در چند ثانیه‌ی اول چون افت ولتاژ باس ناچیز است ابرخازن وارد مدار نمی‌شود، بنابراین قطار انرژی لازم برای حرکت را از پست یک تأمین می‌کند. بعد از ورود ابرخازن به مدار جریان کشیده شده از پست یک به صفر کاهش می‌یابد و حدود چند ثانیه جریانی از پست یک کشیده نمی‌شود. با کاهش انرژی ذخیره‌ساز، جریان کشیده شده از پست یک مجدداً افزایش می‌یابد.



شکل ۵-۴۱: جریان کشیده شده از پست یک در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



شکل ۵-۴۲: جریان کشیده شده از پست دو در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه، یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی به منظور بازیابی انرژی ترمز، در نرم‌افزار متلب با استفاده از اطلاعات مربوط به قطار شهری مشهد، شبیه‌سازی شده است. قطار شهری مشهد شامل ۲۲ ایستگاه، ۱۱ پست کششی، یک مسیر رفت و یک مسیر برگشت است. پست‌های کششی (پست‌های تأمین‌کننده برق مترو از شبکه سراسری) به صورت یک در میان در ایستگاه‌ها قرار گرفته‌اند و فقط در محل این پست‌ها مسیر رفت و برگشت به هم متصل است. شتاب و یا ترمز وسیله نقلیه در هر یک از این مسیرها موجب افزایش یا کاهش ولتاژ خط DC از مقدار مجاز خود می‌شود. از سوی دیگر اختلاف ولتاژ به وجود آمده بین دو مسیر، سبب جاری شدن جریان زیادی در محل اتصال مسیرهای رفت و برگشت خواهد شد که این جریان زیاد به تجهیزات آسیب می‌رساند. در ایستگاه‌هایی که پست‌های کششی قرار دارند، با استفاده از یک مبدل DC-DC نیم پل دوسویه مناسب، نوسانات ولتاژ کاهش می‌یابد. ولی برای ایستگاه‌هایی که اتصال مستقیم بین مسیر رفت و برگشت وجود ندارد از مبدل DC-DC دوسویه‌ای برای هر یک از خطوط استفاده شده است که انرژی حاصل از ترمز را در یک ابرخازن ذخیره می‌کند. با این روش علاوه بر تنظیم ولتاژ باس DC، مقدار جریان کشیده شده از پست‌ها نیز کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، با حرکت قطار از ایستگاه یک به سه، با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز، در پست یک و دو به ترتیب میزان ۲۰٪ و ۳۳٪ صرفه‌جویی انرژی حاصل می‌شود. همچنین انرژی تلف شده در مقاومت ترمزی نیز ۴۲٪ کاهش می‌یابد.

۶-۲- پیشنهادات

با توجه به اهمیت موضوعات مطرح شده در قالب این پایان نامه و به منظور پیشرفت سریع تر در این حوزه ها، پیشنهاداتی برای انجام پژوهش های جدید ارائه می شود:

۱- تحلیل اقتصادی سیستم ذخیره ساز استفاده شده در این پایان نامه

۲- جایابی مناسب سیستم ذخیره ساز

- [1] F. Ciccarelli, "Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems," 2014.
- [2] G. Zongyu, F. Jianjun, Y. Zhang, and S. Di, "Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, pp. 181-190, 2014.
- [۳] نیاستی . م، رساله‌ی دکتری، "مدل‌سازی سیستم حمل و نقل ریلی برقی به منظور تعیین حداکثر ولتاژ ریل و جریان سرگردان با توجه به شرایط واقعی و عملی سیستم"، دانشکده‌ی مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۸.
- [4] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, and P. Tricoli, "Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 24, pp. 36-49, 2012.
- [5] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, and J. Powell, "A systems approach to reduce urban rail energy consumption," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 509-524, 2014.
- [6] C. Goodman, L. Siu, and T. Ho, "A review of simulation models for railway systems," in *International Conference on Developments in Mass Transit Systems 1998*, 1998.
- [7] K. D. PHAM, R. S. THOMAS, and W. E. STINGER JR, "Operational and Safety Considerations for Light Rail DC Traction Electrification System Design," *Experience, Economics, and Evolution*, pp. 650, 2003.
- [8] A. Killer, A. Armstorfer, A. E. Díez, and H. Biechl, "Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems," in *Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS), 2012 IEEE Colombian*, pp. 1-6, 2012.
- [۹] احمدی . س، دستفان . ع، "صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی سیستم قطار شهری با استفاده از الگوی سرعت مناسب"، نهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۹۳.
- [10] A. González-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.
- [11] A. Adinolfi, R. Lamedica, C. Modesto, A. Prudenzi, and S. Vimercati, "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 1536-1542, 1998.
- [12] T. Albrecht, "Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control," *Power Supply, Energy Management and Catenary Problems*, pp. 3, 2004.
- [13] A. Nasri, M. F. Moghadam, and H. Mokhtari, "Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, 2010, pp. 1218-1221.

- [14] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2010*, 2010, pp. 1-9.
- [15] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, 2008, pp. 1-8.
- [16] C. Gong, S. Zhang, F. Zhang, J. Jiang, and X. Wang, "An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One," *Energies*, vol. 7, pp. 7305-7329, 2014.
- [17] M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A. P. Cucala, A. Ramos, and R. R. Pecharromán, "Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* , vol. 226, pp. 397-408, 2012.
- [18] R. Barrero, X. Tackoen, and J. V. Mierlo, "Analysis and configuration of supercapacitor based energy storage system on-board light rail vehicles," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008 . 13th*, 2008, pp. 1512-1517.
- [19] X. Shen, S. Chen, G. Li, Y. Zhang, X. Jiang, and T. T. Lie, "Configure methodology of onboard supercapacitor array for recycling regenerative braking energy of URT vehicles," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 49 , pp. 1678-1686, 2013.
- [20] M. Steiner, M. Klohr, and S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles," in *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*, 2007, pp. 1-10.
- [21] M. Meinert, "New mobile energy storage system for rolling stock," in *Power Electronics and Applications, 2009. EPE'09. 13th European Conference on*, 2009, pp. 1-10.
- [22] M. d. M. M. Spain, "Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices".
- [23] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, and R. R. Pecharromán, "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles," *Automation Science and Engineering, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 496-504, 2012.
- [24] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Metro trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*, 2010, pp. 750-756.
- [25] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Supercapacitor state of charge control based on changeover finite state controller for metro-train applications," in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 550-556.
- [26] A. Rufer, D. Hotellier, and P. Barrade, "A supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 629-636, 2004.

- [27] F. Foiadelli, M. Roscia, and D. Zaninelli, "Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE*, 2006, pp. 6.
- [28] D. Iannuzzi and P. Tricoli, "Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 2129-2140, 2012.
- [29] S. Koohi-Kamali, V. Tyagi, N. Rahim, N. Panwar, and H. Mokhlis, "Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 25, pp. 135-165, 2013.
- [30] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafáfila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2154-2171, 2012.
- [31] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 499-514, 2014.
- [32] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, and V. Efthimiou, "Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 13, pp. 1513-1522, 2009.
- [33] D. Soetanto and K. Cheng, "Superconducting magnetic energy storage systems for power system applications," 2009.
- [34] I. Szenasy, "Improvement the energy storage with ultracapacitor in metro railcar by modeling and simulation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, 2008, pp. 1-5.
- [35] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi, and A. Troudi, "Battery/supercapacitors combination in uninterruptible power supply (UPS)," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 28, pp. 1509-1522, 2013.
- [36] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," *Progress in Natural Science*, vol. 19, pp. 291-312, 2009.
- [37] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 3881-3895, 2010.
- [38] Z. Yi-cheng, W. Lu-lu, Z. Xue-jun, and L. Hai-quan, "Design of supercapacitor-based energy storage system for metro vehicles and its control rapid implementation," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC'08. IEEE*, 2008, pp. 1-4.
- [39] R. Teymourfar, B. Asaei, and H. Iman-Eini, "Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line," *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 206-214, 2012.
- [40] 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," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 67, pp. 439-447, 2015.
- [41] R. Barrero, X. Tackoen, and J. Van Mierlo, "Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network,"

- Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224, pp. 207-225, 2010.
- [42] K. Kwon, J. Choi, and S. Baek, "Efficiency Improvement of ESS for DC Transit System," in *7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012. ECCE. IEEE*, 2012, pp. 2641-2646.
 - [43] R. Todd, D. Wu, J. dos Santos Girio, M. Poucand, and A. Forsyth, "Supercapacitor-based energy management for future aircraft systems," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, 2010, pp. 1306-1312.
 - [44] K. Inoue, K. Ogata, and T. Kato, "A Control Method of a Regenerative Power Storage System for Electric Machinery," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE*, 2006, pp. 1-5.
 - [45] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power electronics: converters, applications, and design*: John Wiley & Sons, 2007.
 - [46] A. Masmoudi, A. Abdelkafi, and L. Krichen, "Electric power generation based on variable speed wind turbine under load disturbance," *Energy*, vol. 36, pp. 5016-5026, 2011.
 - [47] Supercapacitor datasheet, maxwell.

Abstract

Nowadays, the urban rail transit networks have been taken attention by researchers due to advantages such as safety, rapid transit, no environmental pollution and high passenger capacity. Considering the high amount of energy loss in urban rail lines, methods of saving energy in these systems are important. Due to the use of rectifier diodes the braking energy is not reversible to the network and is usually lost in the form of thermal energy. The use of energy storage equipment can play a significant role in the reduction of losses, voltage regulation and increasing reliability of the network.

In this thesis, the metro system including three stations and two substation of traction is simulated in MATLAB software. Given that in the place of substation of traction there is direct connection between forward and backward paths, in references a half-bridge DC-DC converter has been used for storage of braking energy. While in this thesis, the purpose is the design of a suitable energy storage system and investigation of its performance when there is no direct connection between forward and backward paths. It should be noted that according to the parameters such as speed of charging and discharging, efficiency and lifetime, the super-capacitor has been selected as the appropriate equipment for storage. The advantage of proposed converter for reproductive energy storage, in addition to the easier control method is the use of one super-capacitor for both forward and backward paths. Substations of traction that supply the required energy for train are located in stations one and three and the proposed converter has been installed in the station two. Three different scenarios including train movement from station one to three, simultaneous arrival of trains to the station two and simultaneous exit of trains from station two are investigated. In these scenarios the train movement is associated with three conditions of accelerating, moving at a constant speed and braking. The obtained results show that the proposed DC-DC converter reduces losses in the braking resistor in addition to reducing the current drawn from the Substations of traction and DC bus voltage regulation.

Keywords:

Super-capacitor, energy storage systems, half-bridge DC-DC converter, electrical rail transit network, energy saving



Shahrood University of Technology

Faculty of Electrical & Robotic Engineering

**Design and simulation a multi input/output converter and its
controller system for super-capacitor based energy storage system in a
metro**

Elham Rahimi Namaghi

**Supervisor:
Dr. Ali Dastfan**

February 2016