

طراحی ذخیره‌ساز ابرخازنی و کنترل بهینه آن به منظور صرفه‌جویی انرژی در سیستم قطار شهری

الهام رحیمی نامقی^۱، کارشناس ارشد؛ علی دستفان^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - elhamrahimi_1367@yahoo.com

۲- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - dastfan@shahroodut.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی بر پایه ابرخازن، برای ذخیره‌سازی انرژی بازتولیدی پیشنهاد می‌شود. این سیستم ذخیره‌ساز، شامل یک ابرخازن و دو مبدل DC-DC نیم‌پل دو سوپه است. با توجه به این که شبکه مترو شامل یک مسیر رفت و یک مسیر برگشت است با استفاده از این سیستم ذخیره‌ساز پیشنهادی امکان تبادل انرژی بین خطوط رفت و برگشت میسر می‌شود. همچنین به دلیل استفاده از یک تجهیز ذخیره‌کننده برای هر دو مسیر از لحاظ هزینه‌های جاری و کاهش تلفات مقرون به صرفه است. بنابراین، هدف اصلی این مقاله طراحی سیستم ذخیره‌ساز و نیز تعیین پارامترهای کنترلی آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات با هدف صرفه‌جویی انرژی در شبکه مترو است. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB/Simulink و بر اساس داده‌های واقعی قطار شهری مشهد انجام شده است. شبیه‌سازی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن سیستم ذخیره‌ساز انرژی انجام شده است. برخی از پارامترهای عملکردی شامل ولتاژ باس و جریان پست‌ها در این دو حالت به دست آمده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی، کارآمدی سیستم ذخیره‌ساز پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: ابرخازن، سیستم ذخیره‌ساز انرژی، شبکه حمل و نقل ریلی، صرفه‌جویی انرژی، روش‌های بهینه‌سازی

Supercapacitor Storage Design and Optimal Control of it for Energy Saving in Urban Rail Transit System

E. Rahimi, MSc¹; A. Dastfan, Associate Professor²

1- Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran,

Email: elhamrahimi_1367@yahoo.com

2- Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email: dastfan@ieee.org

Abstract: In this paper, an energy storage system is proposed for saving regenerative braking energy based on supercapacitor. This storage system includes a supercapacitor and two bidirectional half-bridge DC-DC converters. Since the metro network includes a forward path and a backward path, by using this proposed storage system it is possible to exchange energy between forward and backward lines. Also, it is affordable in terms of operating costs and reduction of losses because of using one storage devices for both paths. Therefore, the main purpose of this paper is designing storage system and also determination of its control parameters using Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm with the objective of energy saving in metro network. Simulations has been done in MATLAB / Simulink software and based on actual data of Mashhad urban railway. The simulation has been done in two modes, with and without energy storage system. Some operational parameters including bus voltage and currents of substations have been obtained in these two modes. Comparison of simulation results shows the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Supercapacitor, energy storage system, railway transport network, energy saving, optimization methods.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۶ و ۱۳۹۵/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۸

نام نویسنده مسئول: علی دستفان

نشانی نویسنده مسئول: دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران

۱- مقدمه

امروزه توسعه صنعت حمل و نقل با چالش‌هایی از قبیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلودگی هوا مواجه است. از طرفی 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 یک سوکننده‌های دیودی، قابل بازگشت به شبکه نیست و معمولاً به‌صورت انرژی حرارتی تلف می‌شود. استفاده از تجهیزات ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند نقش به‌سزایی در کاهش تلفات، تنظیم ولتاژ و افزایش قابلیت اطمینان شبکه داشته باشد [۱-۴].

انرژی مورد استفاده در سیستم قطار شهری شامل انرژی کششی، انرژی مورد استفاده برای حرکت قطار و مصرف داخلی آن و انرژی غیرکششی، انرژی مورد استفاده برای تهویه و روشنایی است [۵]. از آنجا که قسمت عمده انرژی مصرفی (حدود ۸۰٪) در سیستم کششی مصرف می‌شود روش‌های صرفه‌جویی در این سیستم‌ها حائز اهمیت است [۶]. 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 [۷]. تزریق توان بازتولید شده به شبکه DC ممکن است باعث افزایش ولتاژ خط DC از مقدار مجاز آن شود. لذا باید یک یا چند مصرف‌کننده 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 بازتولیدی ترمزی توسط قطارهای در حال شتاب‌گیری شود. با این حال زمانی که ولتاژ خط DC به مقدار بحرانی برسد ترمز الکتروپنوماتیکی نیز جهت اتلاف توان در مقاومت‌های تلف‌کننده فعال می‌شود [۸]. راه کارهای زیر به‌منظور حداکثر کردن استفاده از انرژی بازتولیدی و در نتیجه حداقل کردن استفاده از مقاومت ترمزی پیشنهاد شده‌اند:

- بهینه‌سازی برنامه زمانی حرکت قطار (هنگام ترمز یک قطار در ایستگاه، قطار دیگری در آن نزدیکی در حال شتاب‌گیری باشد) [۹، ۱۰].
 - استفاده از پست‌های معکوس برای بازگرداندن انرژی به شبکه [۱۱].
 - استفاده از ذخیره‌ساز انرژی در شبکه قطار شهری [۱۲] که در این مقاله نیز مورد بحث قرار گرفته است.
- با توجه به شتاب و ترمزگیری‌های مکرری که در یک روز اتفاق

می‌افتد، نیاز به یک ذخیره‌ساز با چگالی توان بالا و تعداد سیکل‌های شارژ و دشارژ سریع است. از میان انواع فناوری‌های ذخیره‌سازی نظیر ابرخازن، باتری و چرخ طیار، ابرخازن با داشتن ویژگی‌های فوق بهترین گزینه برای استفاده در این زمینه است.

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به دو دسته ثابت و متحرک تقسیم‌بندی می‌شوند. مزایای هر یک از این سیستم‌ها در [۱۳] بحث شده اما اندازه تجهیزات، موقعیت و الگوریتم کنترلی بررسی نشده است. تمرکز ما در این مقاله روی سیستم ذخیره‌ساز ثابت است.

روش‌های کنترل شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز بر پایه ابرخازن، به‌طور کلی به دودسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند که برای هر دو نوع، سیستم‌های ذخیره‌ساز ثابت و متحرک مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۴].

- راهبرد کنترل ردیاب ولتاژ خط

هدف این روش تثبیت ولتاژ تغذیه در حین عملکرد موتوری یا ترمزی قطارها با استفاده از حالت شارژ (SOC) ابرخازن است. در این روش با توجه به تغییرات ولتاژ خط بالاسری، جریان‌های شارژ و دشارژ مشخص می‌شوند.

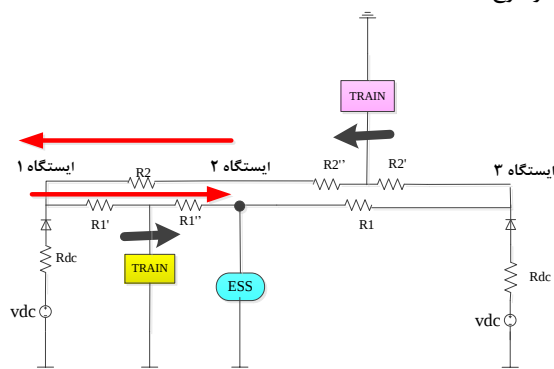
- راهبرد کنترل ردیاب جریان خط

هدف این روش کاهش پیک توان پست‌ها و در نتیجه تثبیت ولتاژ خط است. شارژ و دشارژ ابرخازن‌ها در طی فرایند ترمز و شتاب توسط جریان مرجع خط کنترل می‌شود. سختی این روش تعیین لحظه‌ای نقطه تنظیم جریان خط است. اگر مقدار این کمیت کم در نظر گرفته شود باعث تخلیه ابرخازن قبل از خاتمه شتاب‌گیری خواهد شد که نتیجه آن افزایش جریان خط و تلفات است و انتخاب بسیار زیاد آن باعث عدم استفاده از تمامی ظرفیت ذخیره‌ساز ابرخازن می‌شود.

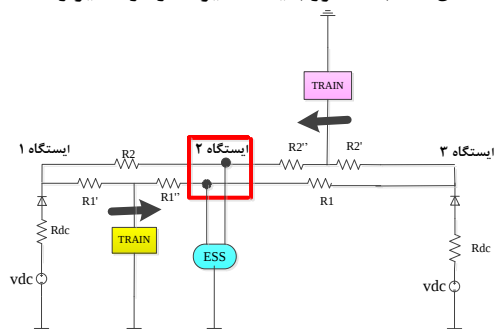
مرجع [۱۵] ابرخازن هیبریدی را به‌عنوان تجهیز ذخیره‌ساز انرژی به‌کار گرفته است. در این مرجع مدیریت انرژی بر اساس ردیابی ولتاژ خط بوده است. زمانی که ولتاژ خط تغذیه از مقدار مرجع بیش‌تر می‌شود ابرخازن شروع به شارژ شدن می‌کند و برعکس زمانی که ولتاژ خط کم‌تر از محدوده از پیش تعیین شده است ابرخازن دشارژ می‌شود. در این مرجع نیز از یک مبدل DC-DC نیم‌پل دو طرفه برای ارتباط ابرخازن با شبکه استفاده شده است. بنابراین، اثربخشی روش کنترلی و عملکرد ذخیره‌ساز، به‌طور عمده به انتخاب ولتاژ مرجع بستگی دارد. در این مقاله میزان صرفه‌جویی انرژی ۱۵٪ گزارش شده است.

در [۳] از ابرخازن به‌عنوان تجهیز برای ذخیره‌سازی انرژی بازتولیدی در شبکه مترو استفاده شده است این مرجع، به‌منظور تخمین سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب، خط ۳ شبکه متروی تهران را در شرایط پیک و غیرپیک بر اساس داده‌های واقعی مدل‌سازی کرده است و به‌منظور ارتباط ابرخازن با لینک DC از یک مبدل DC-DC نیم‌پل دوسویه استفاده کرده است. این مرجع روشی را به‌منظور پیش‌بینی حداکثر انرژی بازتولیدی که به‌صورت لحظه‌ای وارد هر ایستگاه می‌شود پیشنهاد داده است و بر اساس آن ذخیره‌ساز مناسب را

ارتباط و تبادل انرژی بین خطوط را نیز فراهم سازد. شکل ۲ بیان‌گر این موضوع است.



شکل ۱: شبکه مترو با یک ذخیره‌ساز در مسیر رفت



شکل ۲: مدل مداری شبکه مترو و برقراری ارتباط بین

مسیرهای رفت و برگشت

بنابراین طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی مناسب و بررسی عملکرد آن برای ایستگاه‌هایی که در آن‌ها ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود ندارد از اهداف اصلی این مقاله است. در بخش ۲ ساختار شبکه مترو معرفی می‌شود. مدل سیستم ذخیره‌ساز انرژی و روش کنترلی آن در بخش ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی مربوط به تأثیر روش کنترلی روی تنظیم ولتاژ باس DC و میزان صرفه‌جویی انرژی در شبکه مترو بیان شده و در نهایت، نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۵ بیان خواهد شد.

۲- مشخصات شبکه مترو

شکل ۲ مدل شبکه مترو شامل پست‌های یک‌طرفه، خطوط ارتباطی، وسایل نقلیه و سیستم ذخیره‌ساز انرژی را نشان می‌دهد. در ادامه جهت مدل‌سازی کل شبکه، روابط حاکم بر هر یک از اجزاء شبکه مترو به تفصیل بیان می‌شود.

۲-۱- پست‌های یک‌طرفه و خطوط ارتباطی

برای نمایش پست‌ها از یک منبع ولتاژ DC ایده‌آل با یک مقاومت داخلی سری با آن استفاده شده است. برای نمایش یک‌طرفه بودن آن‌ها نیز از دیود استفاده شده است. با در نظر گرفتن امپدانس پریونیت (Z_{pu}) برابر با ۱۰٪ و ظرفیت ترانسفورماتور برابر با ۱ MVA مطابق با رابطه (۲) مقدار امپدانس شبکه محاسبه شده است.

برای هر ایستگاه طراحی کرده است. در این روش میزان صرفه‌جویی برابر با ۲۵٪ است.

در [۲] نیز جریان بازیافتی هر ایستگاه محاسبه شده است و متناسب با آن، پیکربندی سیستم ذخیره‌ساز مناسب طراحی شده است. همچنین این مقاله ادعا کرده است که در مقایسه با [۳] روش کنترلی و مدل استفاده شده، دینامیکی و زمان واقعی است، همچنین سرعت اجرای بالاتر و خطای کوچک‌تری دارد. مدل شبیه‌سازی نیز پیچیده‌تر و جزئی‌تر است، به‌منظور کنترل شارژ و دشارژ ابرخازن از روش کنترل ردیاب ولتاژ خط استفاده شده است.

مراجع [۱۶، ۱۷] از ابرخازن به‌عنوان تجهیز ذخیره‌کننده انرژی استفاده کرده‌اند. مبدل مورد استفاده در این مراجع، مبدل DC-DC نیم‌پل دو سویه است. به‌منظور 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 مقایسه می‌شود. اگر جریان خط بیش‌تر از این مقدار باشد ابرخازن دشارژ می‌شود و بخشی از توان مورد نیاز قطار را تأمین 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.

در [۱۸] از سیستم ذخیره‌ساز ثابت استفاده شده است. طراحی مبدل DC-DC نیم‌پل به‌صورت مختصر بیان شده است اما در مورد تعیین ظرفیت ابرخازن و روش کنترل شارژ و دشارژ آن بحثی نشده است.

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در محل پست‌های کشتی یعنی ایستگاه‌های ۱ و ۳ ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود دارد، بنابراین در این ایستگاه‌ها با استفاده از یک مبدل DC-DC نیم‌پل دو سویه می‌توان انرژی حاصل از ترمز را ذخیره کرد. حال اگر فرض کنیم یک قطار در مسیر برگشت، در حال ترمز در ایستگاه ۲ و قطار دیگر در همین زمان در مسیر رفت در حال شتاب‌گیری از ایستگاه ۲ باشد. برای استفاده از این انرژی ترمزی دو راهکار وجود دارد.

- قرار دادن دو سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ایستگاه ۲ یکی برای مسیر رفت و دیگری برای مسیر برگشت به دلیل استفاده از دو تجهیز ذخیره‌کننده انرژی، از لحاظ هزینه‌های جاری و تلفات مقرون به صرفه نیست.
- قرار دادن فقط یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ایستگاه ۲ برای هر یک از مسیرهای رفت یا برگشت که در این روش انرژی ترمزی باید از طریق ایستگاه ۱ به قطار در حال شتاب‌گیری انتقال یابد در نتیجه بخشی از آن در خط تلف می‌شود. شکل ۱ بیان‌گر این موضوع است.

با توجه به موارد فوق این ایده به نظر رسید تا سیستم ذخیره‌ساز انرژی در ایستگاه ۲ قرار داده شود که علاوه بر ذخیره انرژی بازتولیدی،

در روابط (۵) تا (۹) نیروهای مقاومتی، m_t جرم کل قطار به همراه مسافران است که با توجه به مراجع [۳، ۱۵، ۱۶، ۲۰] ثابت و برابر با حداکثر ظرفیت قطار در نظر گرفته شده است. v سرعت قطار، $P_{traction}$ توان کششی، a شتاب، P_a توان مربوط به رو شنبایی و تهویه، η_g, η_m, η_i به ترتیب بازده اینورتر، موتور و جعبه‌دنده، $P_{braking}$ توان ترمزی، V_{bus} ولتاژ باس DC می‌باشند. روابط (۸) و (۱۰) توصیف کننده رفتار قطار هستند.

۳- طراحی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

صرفه‌جویی انرژی، بهبود کیفیت توان و تنظیم ولتاژ باس DC از مزایای استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی است. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی شامل سه جز ابرخازن، مبدل DC-DC و سیستم کنترل کننده شارژ و دشارژ می‌باشند. مبدل DC-DC به‌عنوان هسته اصلی سیستم ذخیره‌ساز محسوب می‌شود که ارتباط بین تجهیز ذخیره‌ساز و باس DC را فراهم می‌کند. شکل ۳ مبدل DC-DC پیشنهادی مورد استفاده در این پروژه به همراه تجهیز ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. ذخیره‌ساز در ایستگاه دو واقع شده است که ارتباط مستقیمی بین مسیرهای رفت و برگشت وجود ندارد. به‌منظور طراحی سیستم ذخیره‌ساز باید هر یک از اجزاء آن را به‌طور جداگانه مدل‌سازی کرد که در ادامه به آن خواهیم پرداخت.

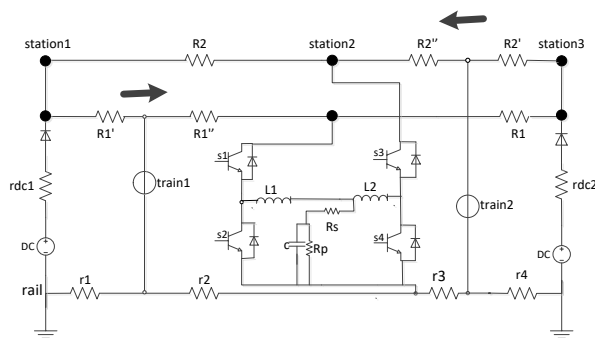
۳-۱- طراحی ابرخازن

ابرخازن استفاده شده در این شبیه‌سازی از یک خازن، یک مقاومت موازی (RP) که بیان‌کننده تلفات خوددشارژی است و یک مقاومت سری (RS) که بیان‌گر تلفات اهمی است تشکیل شده است. مقدار ظرفیت ابرخازن مورد نیاز مطابق با رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\frac{1}{2} C_{sc} V_{max}^2 (1 - \alpha^2) \geq E_{absorbed} \quad (11)$$

به عبارت دیگر:

$$C_{sc} \geq \frac{2E_{absorbed}}{V_{max}^2 (1 - \alpha^2)} \quad (12)$$



شکل ۳: شبکه مترو به همراه سیستم ذخیره‌ساز پیشنهادی

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (1)$$

$$Z_{real} = r_{dc} = Z_b \times Z_{pu} \quad (2)$$

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 این که قطارها بین دو ایستگاه حرکت می‌کنند مقاومت بین قطار با ایستگاه قبل و ایستگاه بعد متغیر با زمان است. روابط (۳) و (۴) مقدار این مقاومت‌ها را نشان می‌دهند.

$$R' = kx(t) \quad (3)$$

$$R'' = k(D - x(t)) \quad (4)$$

R' مقاومت الکتریکی خط بین قطار با ایستگاه قبل، R'' مقاومت الکتریکی خط بین قطار با ایستگاه بعد، D فاصله بین دو ایستگاه، K ضریب مقاومتی و $x(t)$ فاصله بین قطار با ایستگاه قبل است.

۲-۲- قطار

به‌منظور مدل‌سازی قطار از یک منبع جریان کنترل شده استفاده شده است. 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 (۷) و (۹) محاسبه می‌شوند [۳]. معروف‌ترین رابطه برای محاسبه نیروهای مقاومتی (F_r) معادله دیویس (DAVIS) است که به‌صورت رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$F_r = A + B \cdot V + C \cdot V^2 \quad (5)$$

ضرایب A، B و C در این رابطه، با توجه به عوامل مختلفی از جمله وزن قطار، تعداد محور وسیله نقلیه، سرعت و سطح مقطع وسیله نقلیه برای هر قطار به صورت متفاوت تعریف می‌شود. این ضرایب برای مترو مشهود به‌صورت تجربی مطابق با رابطه (۶) به‌دست می‌آید [۱۹].

$$F_r = (0.0064 \times m_t + 1.56) + (0.00014 \times m_t \times v + 0.00046 \times v^2) \quad (6)$$

$$P_{traction} = \frac{(m_t \times a + F_r) \times v}{\eta_g \times \eta_m \times \eta_i} + P_a \quad (7)$$

$$I_{train} = \frac{P_{traction}}{V_{bus}} \quad (8)$$

$$P_{braking} = (m_t \times a + F_r) \times v (\eta_g \times \eta_m \times \eta_i) + P_a \quad (9)$$

$$I_{train} = \frac{P_{braking}}{V_{bus}} \quad (10)$$

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 d برای کلید پایین و $(1-d)$ برای کلید بالا مقدار میانگین ولتاژ سلف مطابق با رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود.

$$v_L = L \frac{dI_{sc}}{dt} = (v_{sc} - v_{bus}) \times (1-d) \quad (19)$$

با توجه به این که رابطه (۱۹) غیرخطی است با استفاده از روش خطی‌سازی پس‌خورد و اعمال قانون کنترلی (۲۰) که معکوس رابطه (۱۹) است قسمت غیرخطی حذف می‌شود و برای سیستم خطی شده حاصل، کنترل‌کننده PI طراحی می‌شود.

$$d = f^{-1}(VI^*) = (V_{bus} - V_{sc} + V_L) \div V_{bus} \quad (20)$$

که در آن VI^* سیگنال خروجی کنترل‌کننده PI است. لازم به ذکر است که d مقداری بین ۰/۰۵ و ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۱- محاسبه سلف و خازن مبدل در حالت باک

در زمان ترمزگیری، مبدل به صورت باک عمل می‌کند و با شارژ ابرخازن از اضافه ولتاژ باس DC می‌کاهد. با در نظر گرفتن فرکانس کلیدزنی (f_s) برابر با ۱۰ kHz و مقدار DC جریان سلف برابر با حداکثر جریان در بانک ابرخازن [۲۲]، مقدار سلف توسط رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود [۲۳].

$$d_{buck} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{sc}}{V_{bus}} \quad (21)$$

$$L_{min} = \frac{V_o \times (1 - d_{buck})}{f_s \Delta i_L} \quad (22)$$

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 ریبیل جریان DC سلف است.

همچنین با در نظر گرفتن ۱۰٪ ریبیل ولتاژ، مقدار خازن مطابق با رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$C = \frac{(1 - d_{buck})}{(8Lf_s^2 \frac{\Delta v_o}{V_o})} \quad (23)$$

۳-۲-۲- محاسبه سلف مبدل در حالت بوست

در زمان شتاب‌گیری، مبدل به صورت بوست عمل می‌کند و با د شارژ ابرخازن از افت ولتاژ در باس DC می‌کاهد. رابطه (۲۵) مقدار سلف مبدل در حالت بوست را نشان می‌دهد [۲۳].

که در آن ظرفیت ابرخازن، V_{min} و V_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ کاری ابرخازن و $E_{absorbed}$ مقدار انرژی جذب شده توسط سیستم ذخیره ساز انرژی است. α ضریب د شارژ است و توسط رابطه (۱۳) تعریف می‌شود.

$$\alpha = \frac{V_{min}}{V_{max}} \quad (13)$$

$$E_{absorbed} = E_{RB} \times (1 - k_{in}) \quad (14)$$

k_{in} مقدار انرژی جذب شده توسط سایر قطارها است که عددی بین ۰ و ۱ است. با توجه به این که ظرفیت ابرخازن باید مطابق با بدترین شرایط (عدم جذب انرژی توسط سایر قطارها) تعیین شود مقدار k_{in} را برابر با صفر در نظر می‌گیریم. E_{RB} انرژی حاصل از ترمز است که مطابق با رابطه (۱۵) تعریف می‌شود.

$$E_{RB} = (\Delta E_K - \int_0^{T_b} (F_r \times v) dt) \times \eta_{Gear} \times \eta_{motor} \times \eta_{inverter} - \int_0^{T_b} p_a dt \quad (15)$$

ΔE_K تغییرات انرژی جنبشی است که از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\Delta E_K = \frac{1}{2} \times m_t \times (V_1^2 - V_2^2) \quad (16)$$

$$m_t = m_1 \times (1 + \delta) + m_2 \quad (17)$$

که در آن m_t جرم کل و سیله نقلیه با در نظر گرفتن جرم مسافران، m_1 جرم وسیله نقلیه، m_2 جرم مسافران، δ ضریب جرم گردان، V_1 سرعت در لحظه شروع ترمز، V_2 سرعت نهایی برابر با صفر و T_b مدت زمان ترمز است که مطابق با رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود.

$$T_b = \frac{V_1 - V_2}{a} \quad (18)$$

که در آن a شتاب ترمزی است.

بدین ترتیب ظرفیت خازن مورد نیاز محاسبه می‌شود. برای ایجاد این ظرفیت، از اتصالات سری و موازی ابرخازن‌ها استفاده شده است که ظرفیت هر سلول ۳۰۰۰ F و ولتاژ مربوط به آن ۲/۷ V است. سلول پیشنهادی متعلق به شرکت Maxwell است [۲۱].

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.

۳-۲-۳ طراحی مبدل پیشنهادی

برای مدل‌سازی مبدل‌ها از روشی تحت عنوان مدل میانگین مبدل استفاده شده است. در این روش 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

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 رابطه (۲۸) محاسبه می‌شود که در آن V_{sc} ولتاژ واقعی و V_{scmax} حداکثر ولتاژ ابرخازن است [۲۴].

$$I_{sc-re} = k_1(V_{scmax} - V_{sc})^{k_2} \quad (28)$$

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 به عنوان متغیر مستقل k_1 که متغیری وابسته است طبق رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود که در آن V_{scmin} حداقل ولتاژ ابرخازن و P_L حداکثر توان بار است.

$$P_L = k_1 \times V_{scmin} \times (V_{scmax} - V_{scmin})^{k_2} \quad (29)$$

ضرایب کنترل کننده PI و پارامتر کنترلی k_2 با هدف حداقل کردن خطا و محاسبه حداکثر صرفه‌جویی انرژی با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات یا PSO محاسبه شده‌اند. الگوریتم PSO یک روش سراسری کمینه سازی است که از روی رفتار اجتماعی پرندگان الهام گرفته شده است. این روش از تعدادی از ذرات (راه‌حل‌های نامزد) که در فضای جستجو دنبال یافتن بهترین راه‌حل هستند، استفاده می‌کند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می‌شوند. این ذرات به صورت تکرار شونده‌ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینه به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند [۲۵]. تابع هدف مسئله بهینه‌سازی و محدودیت مسئله به ترتیب مطابق با رابطه‌های (۳۰) و (۳۱) تعیین شده‌اند.

$$obj = -w_1 \times (1 - \frac{w_{sub_sc}}{w_{sub_nosc}}) + w_2 \times (|I_{sc_ref} - I_{sc}|) \quad (30)$$

$$300 \leq V_{sc} \leq 600 \quad (31)$$

با توجه به میزان اهمیت حداقل کردن خطا و حداکثر کردن صرفه‌جویی انرژی ضرایب وزندهی w_1 و w_2 به ترتیب برابر با $0/7$ و $0/3$ در نظر گرفته شده‌اند. I_{sc_ref} جریان مرجع ابرخازن و I_{sc} جریان لحظه‌ای ابرخازن است. w_{sub_sc} و w_{sub_nosc} به ترتیب مقدار انرژی کشیده شده از پست‌ها در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ابرخازن هستند. فلوچارت طراحی کنترل کننده سیستم ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده در شبکه مترو در شکل ۶ نشان داده شده است. با پیاده‌سازی و اجرای این فلوچارت در نرم‌افزار متلب، نمودار همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی PSO مطابق با شکل ۷ خواهد بود. هدف از اجرای برنامه بهینه‌سازی حداقل کردن رابطه (۳۰) است. در این برنامه معیار توقف، برابری مقدار تابع هدف به ازای ۲۰ تکرار متوالی است.

$$\frac{1}{(1-d_{boost})} = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{V_{bus}}{V_{sc}} \quad (24)$$

$$L_{min} = \frac{V_o \times d_{boost} (1-d_{boost})}{f_s \Delta I_L} \quad (25)$$

با توجه به این که برای حالت باک مقدار سلف برابر با $100 \mu H$ و برای حالت بوست مقدار سلف برابر با $53 \mu H$ محاسبه شده است مقدار سلف در نهایت، برابر با $100 \mu H$ در نظر گرفته شده است.

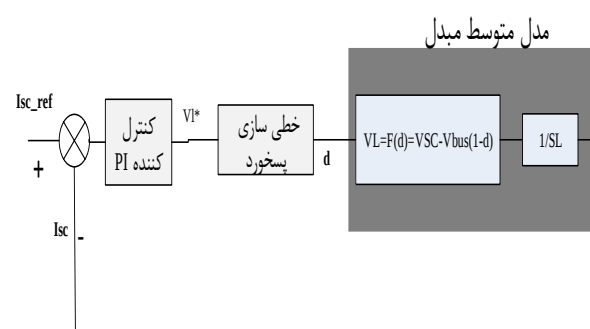
۳-۳- طراحی سیستم کنترلی ذخیره‌ساز با استفاده از PSO

کنترل مبدل بر اساس یک حلقه فیدبک جریان است که تنظیم جریان ابرخازن را بر عهده دارد. شکل ۴ این وضعیت را نمایش می‌دهد. جریان مرجع ابرخازن همان‌طور که در شکل ۵ و رابطه (۲۶) مشخص است شامل دو جزء I_{sc-L} (کنترل کننده تعادل توان) و I_{sc-re} (کنترل کننده حالت شارژ) است. I_{sc-L} با فرض بدون تلفات بودن مبدل و بر اساس محاسبات تعادل توان مطابق رابطه (۲۷) محاسبه می‌شود.

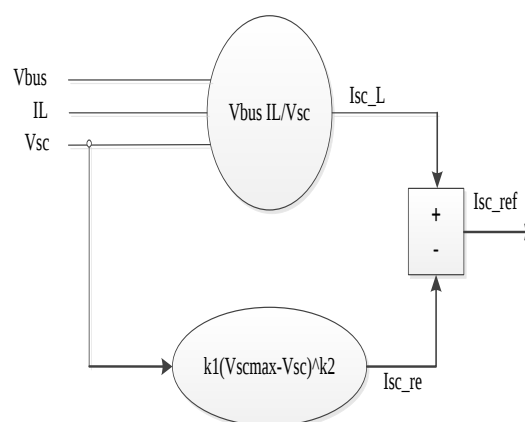
$$I_{sc-ref} = I_{sc-L} - I_{sc-re} \quad (26)$$

$$I_{sc-L} = \frac{V_{bus} \times I_L}{V_{sc}} \quad (27)$$

که در آن I_L جریان بار است.



شکل ۴: سیستم کنترل جریان ابرخازن



شکل ۵: دو جزء جریان مرجع ابرخازن

پیشنهادی در آن قرار دارد، قطار اول حرکت خود را از ایستگاه ۲ آغاز می‌کند. حرکت قطارها با سه وضعیت شتاب‌گیری، حرکت با سرعت ثابت و ترمزگیری همراه است. جدول‌های ۱ تا ۴ به ترتیب پارامترهای مربوط به شبکه، مبدل، مشخصات ابرخازن و قطار را نشان می‌دهند.

جدول ۱: پارامترهای مربوط به شبکه

پارامترها	مقدار
فاصله بین دو ایستگاه (m)	۱۰۸۰
مقاومت الکتریکی ریل (mΩ/km)	۲۲
مقاومت خط هوایی (mΩ/km)	۳۶
مقاومت داخلی پست (mΩ)	۱۸

جدول ۲: پارامترهای مربوط به مبدل

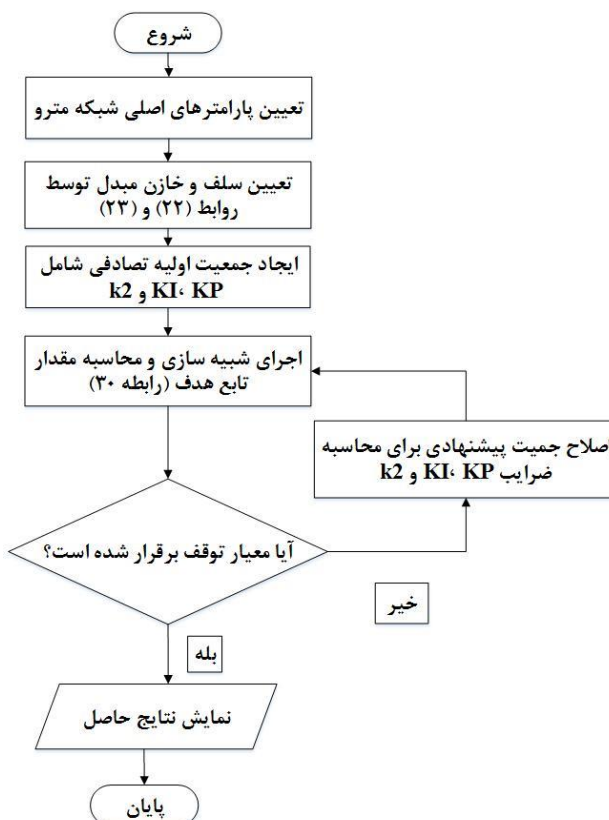
پارامترها	مقدار
سلف (μH)	۱۰۰
فرکانس کلیدزنی (kHz)	۱۰
K_P	۰/۰۰۰۱
K_I	۱۰
K_2	۱۵
خازن باس cbus (μF)	۵۹۰

جدول ۳: مشخصات مربوط به ابرخازن [۲۱]

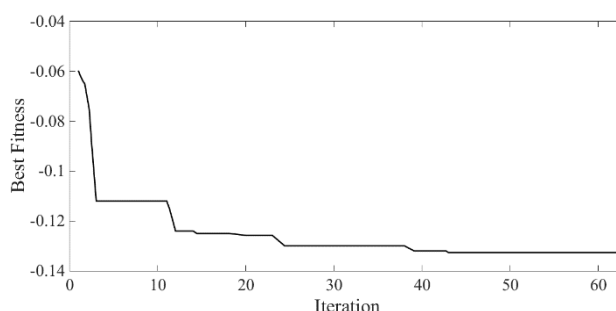
پارامترها	مقدار
ظرفیت (F)	۳۰۰۰
ولتاژ نامی (V)	۲/۷
مقاومت سری معادل (mΩ)	۰/۲۹
جریان نشتی (mA)	۵/۲
حداقل ولتاژ ابرخازن (V)	۳۰۰
حداکثر ولتاژ ابرخازن (V)	۶۰۰
حداکثر جریان پیوسته (A)	۲۱۰

جدول ۴: پارامترهای مربوط به قطار

پارامترها	مقدار
بازده جعبه‌دنده (%) (η_g)	۹۵
بازده موتور (%) (η_m)	۹۰
بازده اینورتر (%) (η_i)	۹۷
توان تهویه و روشنایی (kW) (P_a)	۷۰
حداکثر توان قطار (kW)	۵۰۰
حداکثر سرعت (m/s) (v)	۱۹/۴۴
حداکثر شتاب (m/s ²) (a)	۱
مقاومت ترمزی (Ω) (R)	۱/۴۲
جرم کل قطار با مسافران (m_t) (tn)	۵۶



شکل ۶: فلوچارت طراحی کنترل‌کننده سیستم ذخیره‌ساز انرژی

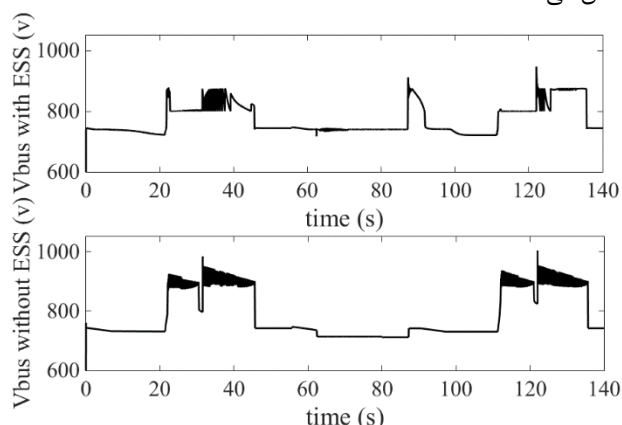


شکل ۷: نمودار همگرایی الگوریتم PSO

۴- نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشخص شده است سیستم مترو، شامل ۳ ایستگاه و ۲ پست کششی (پست‌های تأمین‌کننده انرژی مورد نیاز قطار از شبکه سراسری) در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. پست‌ها در محل ایستگاه‌های ۱ و ۳ واقع شده‌اند. train1 قطار در مسیر رفت و train2 قطار در مسیر برگشت را نمایش می‌دهد. مقاومت‌های R_1 ، R_2 ، R_3 ، R_4 مقاومت‌های مربوط به ریل، مقاومت‌های R_1' ، R_2' ، R_3' ، R_4' مقاومت‌های مربوط به مسیر رفت و مقاومت‌های R_1'' ، R_2'' ، R_3'' ، R_4'' مقاومت‌های مربوط به مسیر برگشت هستند. در این حالت فرض شده است که قطار ۱ در مسیر رفت از ایستگاه ۱ به سمت ایستگاه ۳ حرکت می‌کند. قطار ۲ نیز در مسیر برگشت از ایستگاه ۳ به سمت ایستگاه ۱ حرکت می‌کند. حرکت قطارها به‌گونه‌ای تنظیم شده است که دقیقاً هم‌زمان با ترمز قطار دوم نزدیک ایستگاه ۲ که مبدل

اول و دوم به ترتیب حالت با ذخیره‌ساز و بدون وجود ذخیره‌ساز را نشان می‌دهند.



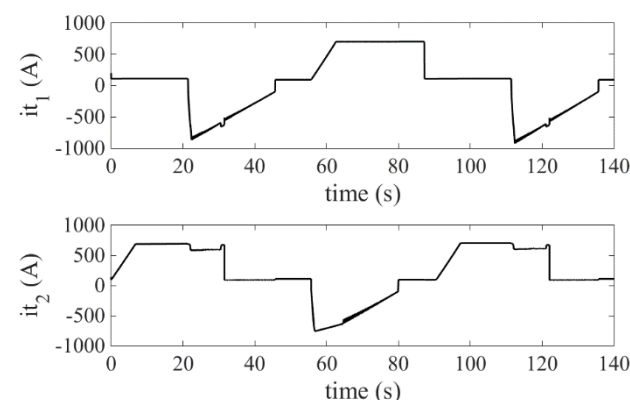
شکل ۱۰: ولتاژ باس در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

در ابتدا و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز چون فرض شده است قطار اول با سرعت ثابت حرکت می‌کند جریان کمتری از پست ۱ کشیده می‌شود. در همین زمان چون قطار ۲ در حال شتاب‌گیری است و به پست ۲ نزدیک‌تر است بیش‌تر جریان مورد نیاز خود را از پست ۲ تأمین می‌کند، بنابراین جریان کشیده شده از پست ۲ بیش‌تر است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود باوجود ذخیره‌ساز جریان کشیده شده از پست ۱ کاهش می‌یابد. شرط ورود ابرخازن به مدار قرار گرفتن ولتاژ باس خارج محدوده موردنظر است. در چند ثانیه اول چون افت ولتاژ باس ناچیز است شرط ورود ابرخازن به مدار برقرار نشده و ابرخازن وارد مدار نمی‌شود، بنابراین قطار انرژی لازم برای حرکت را از پست ۱ تأمین می‌کند. بعد از ورود ابرخازن به مدار جریان کشیده شده از پست ۱ کاهش می‌یابد. در بازه ۲۲ تا ۴۵ ثانیه که قطار اول در حال ترمز است جریانی از پست ۱ کشیده نشده است. در بازه ۴۵ تا ۵۵ که قطار اول در ایستگاه ۲ متوقف است جریان ثابتی برای مصرف واحدای کمکی (تهویه و روشنایی) از پست ۱ کشیده شده است. در این حالت میزان صرفه‌جویی انرژی حاصل شده مطابق با رابطه (۳۲) برابر با ۳۹٪ است.

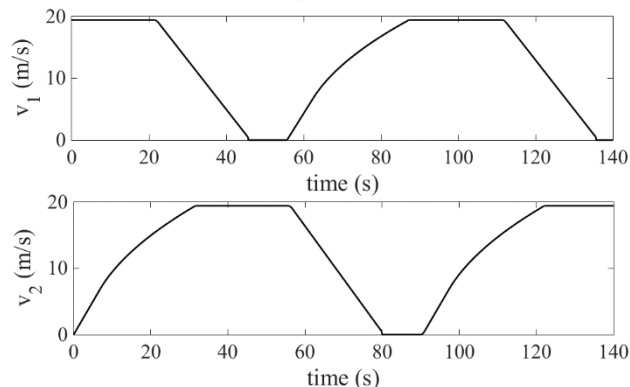
$$E_s = (1 - \frac{w_{sub_sc}}{w_{sub_nosc}}) \times 100 \quad (32)$$

با مقایسه میزان صرفه‌جویی به دست آمده با میزان صرفه‌جویی انرژی حاصل شده در سایر مقالات که در مقدمه نیز به آن اشاره شد می‌توان نتیجه گرفت که مبدل پیشنهادی باعث افزایش صرفه‌جویی انرژی شده است. در سیستم پیشنهادی علاوه بر ذخیره انرژی، بین خطوط نیز ارتباط برقرار می‌شود و از طریق مبدل انرژی از خط بالا به خط پایین منتقل می‌شود. به این ترتیب بخشی از انرژی مورد نیاز برای قطار اول که در حال شتاب‌گیری است تأمین می‌شود، بنابراین انرژی کمتری از پست‌ها کشیده شده است. این در حالی است که در مبدل‌های مطرح شده در سایر مقالات بین خطوط ارتباطی برقرار

شکل ۸ جریان مربوط به قطار اول و دوم را نشان می‌دهد. نمودار اول مربوط به جریان قطار اول (it_1) و نمودار دوم مربوط به جریان قطار دوم (it_2) است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود قطار اول با سرعت ثابت حرکت می‌کند در ۲۲ ثانیه ترمز می‌زند و در ۴۵ ثانیه در ایستگاه ۲ متوقف می‌شود. پس از ۱۰ ثانیه توقف در ایستگاه ۲ مجدداً در ۵۵ ثانیه شروع به حرکت می‌کند. قطار دوم نیز در همین زمان از ایستگاه ۳ در مسیر برگشت شروع به حرکت می‌کند و در ۵۵ ثانیه نزدیک ایستگاه ۲ ترمز می‌گیرد که به‌وضوح در شکل ۸ مشخص است. نمودار سرعت قطارهای ۱ و ۲ نیز در شکل ۹ نشان داده شده است.



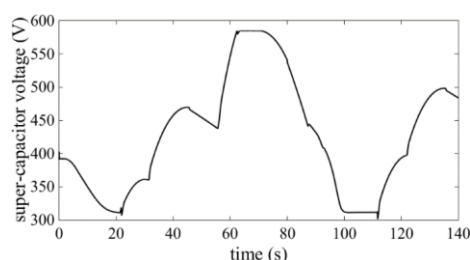
شکل ۸: نمودار جریان قطار اول و دوم



شکل ۹: نمودار سرعت قطار اول و دوم

شکل ۱۰ ولتاژ باس را برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهد. نمودار اول مربوط به حالت با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز و نمودار دوم مربوط به حالت بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز است. با ترمز قطار، ولتاژ باس افزایش می‌یابد. در این حالت مقاومت ترمزی به‌منظور کاهش سطح ولتاژ وارد مدار می‌شود. مقاومت ترمزی به‌صورت آنی نمی‌تواند این سطح ولتاژ را کاهش دهد بنابراین با نوساناتی این سطح ولتاژ را کاهش می‌دهد. 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.

شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به ترتیب جریان پست‌های ۱ و ۲ را برای هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهند. نمودارهای



شکل ۱۳: ولتاژ ابرخازن

اگر راه‌کار دوم یعنی قرار دادن فقط یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی در مسیر رفت ایستگاه ۲ را بررسی کنیم جدول ۶ میزان انرژی کشیده شده از پست‌های ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است به دلیل هدر رفتن بخشی از انرژی در خط مقدار انرژی بیشتری از پست‌ها کشیده شده است. در نتیجه میزان صرفه‌جویی انرژی در این حالت کم‌تر است.

شایان ذکر است که در این حالت K_P , K_I و k_2 با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO به ترتیب برابر با ۵، ۰/۰۱ و ۱۵ به‌دست آمده‌اند.

جدول ۶: مقدار انرژی کشیده شده از پست‌ها بدون در نظر گرفتن

ارتباط بین خطوط

پست	بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز (kWh)	با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز (kWh)
یک	۵/۱۹۸۶	۳/۸۵۳۹
دو	۶/۰۰۵۶	۴/۹۰۵۰

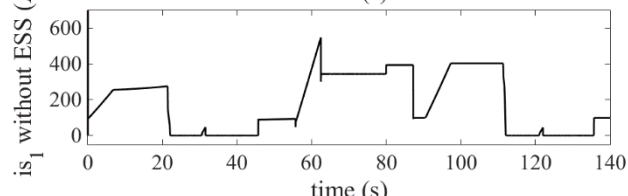
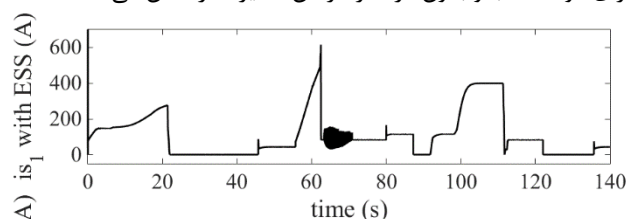
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی به‌منظور بازیابی انرژی ترمز در نرم‌افزار متلب با استفاده از اطلاعات مربوط به قطار شهری مشهد شبیه‌سازی شده است. پست‌های کششی به صورت یک در میان در ایستگاه‌ها قرار گرفته‌اند و فقط در محل این پست‌ها مسیر رفت و برگشت به هم متصل است. در ایستگاه‌هایی که پست‌های کششی قرار دارند با استفاده از یک مبدل DC-DC نیم پل دوسویه مناسب، نوسانات ولتاژ کاهش می‌یابد. اما 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 یافته و میزان صرفه‌جویی انرژی برابر با ۳۹٪ حاصل می‌شود.

مراجع

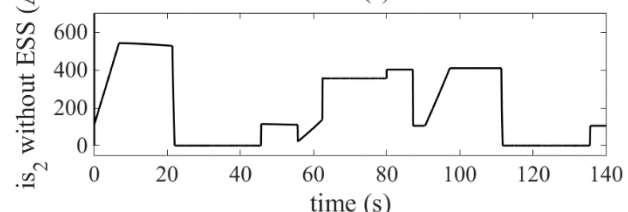
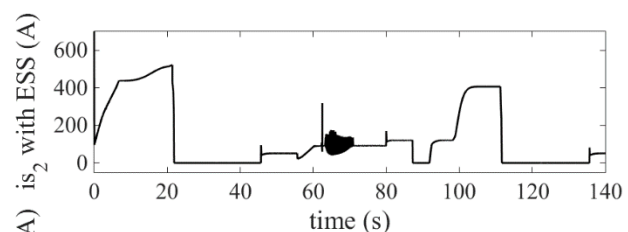
[۱] جمشید آقایی، سید احسان باقری، سجاد شفیعی، طاهر نیکنام و سید محسن باقری، «بررسی پاسخ‌گویی شبکه توزیع هوشمند به عملکرد خودروهای الکتریکی هیبریدی قابل اتصال به شبکه»، مجله

نمی‌شود. جدول ۵ مقدار انرژی کشیده شده از پست‌های یک و دو را برای دو حالت با و بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز نشان می‌دهد.



شکل ۱۱: جریان پست ۱ در دو حالت با و بدون

در نظر گرفتن ذخیره‌ساز



شکل ۱۲: جریان پست ۲ در دو حالت با و بدون

در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

جدول ۵: مقدار انرژی کشیده شده از پست‌ها با در نظر گرفتن

ارتباط بین خطوط

پست	بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز (kWh)	با در نظر گرفتن ذخیره‌ساز (kWh)
یک	۵/۱۹۸۶	۳/۰۸۳۱
دو	۶/۰۰۵۶	۳/۷۱۹۲

شکل ۱۳ ولتاژ دو سر ابرخازن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است ولتاژ ابرخازن در محدوده مجاز خود یعنی ۳۰۰ تا ۶۰۰ ولت قرار دارد. در ۲۱ ثانیه اول، با توجه به اینکه قطار اول با سرعت ثابت حرکت می‌کند و قطار دوم در حال شتاب‌گیری است ابرخازن دشارژ می‌شود. در ثانیه 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.

- systems,” *Power Engineering Society General Meeting*, 2006.
- [14] F. Ciccarelli, *Energy Management and Control Strategies for the Use of Supercapacitors Storage Technologies in Urban Railway Traction Systems*, Ph.D. Thesis, 2014.
- [15] F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, K. Kondo and L. Fratelli, “Line-voltage control based on wayside energy storage systems for tramway networks” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.31, no.1, pp. 884-899, 2016.
- [16] 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.
- [17] D. Iannuzzi and P. Tricoli, “Supercapacitor state of charge control based on changeover finite state controller for metro-train applications,” in *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, pp. 550-556, 2011.
- [18] 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*, pp. 1-4, 2008.
- [19] S. Ahmadi and A. Dastfan, “Energy saving in urban railway using speed profile optimization,” *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, PP. 1076-1081, 2016.
- [20] 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,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, pp. 1678-1686, 2013.
- [21] Supercapacitor datasheet, Maxwell site: <http://www.maxwell.com/Products/ultracapacitors/k2-3-series/documents>.
- [22] 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.
- [23] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*: John Wiley & Sons, 2007.
- [24] 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), Twenty-Fifth Annual IEEE*, pp. 1306-1312, 2010.
- [۲۵] سید محمدرضا موسوی، محمد خویشه، احسان ابراهیمی و فلاح محمدزاده، «دسته‌بندی اهداف سوناری توسط الگوریتم بهینه‌ساز ازدحام ذرات با گروه‌های مستقل»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۷۴-۲۶۳، ۱۳۹۶.
- مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۱، صفحات ۲۰-۱۱، ۱۳۹۶.
- [2] 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.
- [3] R. Teymourfar, B. Asaei and H. Iman-Eini, “Stationary supercapacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line,” *Energy Conversion and Management*, vol. 56, pp. 206-214, 2012.
- [4] M. Steiner, M. Klohr and S. Pagiela, “Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles,” *Power Electronics and Applications, European Conference*, pp. 1-10, 2007.
- [۵] سعید احمدی، علی دستفان، «صرفه‌جویی در مصرف انرژی الکتریکی سیستم قطار شهری با استفاده از الگوی سرعت مناسب»، *نهمین کنفرانس بین‌المللی برق*، ۱۳۹۳.
- [6] 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.
- [7] X.-l. Chen, D.-q. Liang and W.-d. Zhang, “Braking energy recovery for electric traction based on super-capacitor and bidirectional dc-dc converter,” *7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*, vol.2, pp. 879-883, 2012.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] A. Nasri, M. F. Moghadam and H. Mokhtari, “Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems,” *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, pp. 1218-1221, 2010.
- [11] D. Cornic, “Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation,” *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, pp. 1-9, 2010.
- [12] R. Barrero, X. Tackoen and J. Van Mierlo, “Improving energy efficiency in public transport: stationary supercapacitor based energy storage systems for a metro network,” *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-8, 2008.
- [13] F. Foiadelli, M. Roscia and D. Zaninelli, “Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway