



مقاله علمی-ترویجی

صرفه جویی انرژی الکتریکی در قطار شهری با استفاده هم‌زمان از ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت بهینه قطار

■ سعید احمدی/ دپارتمان مهندسی برق و کامپیوتر/ دانشکده منتظری- دانشگاه فنی و حرفه ای استان خراسان رضوی / s-ahmadi@tvu.ac.ir

■ علی دستفان/ دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود / Dastfan@shahroodut.ac.ir

■ محسن اصیلی/ دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود / m.assili@shahroodut.ac.ir

چکیده

بحران انرژی و آلودگی محیط زیست، دو عامل مهم هستند که باعث شده اند، کاهش مصرف انرژی در حمل و نقل و به خصوص در سامانه‌های قطار شهری مورد توجه بهره برداران و محققین قرار گیرد. بهینه‌سازی مشخصه سرعت می‌تواند با صرفه‌جویی، در کاهش مصرف انرژی مؤثر باشد. استفاده از ذخیره‌سازها نیز می‌تواند با بازیابی انرژی باز تولیدی ترمزی، به افزایش بازده انرژی سیستم کمک کند. در این مقاله از دو راهکار فوق به صورت هم‌زمان استفاده شده است. ابتدا انرژی مصرفی کل و ظرفیت ذخیره ساز ساکن مورد نیاز برای شبکه با قطارهای با مشخصه سرعت عادی تعیین شده است، سپس مقدار انرژی و اندازه ذخیره ساز برای قطارهای با مشخصه سرعت بهینه محاسبه شده است. نشان داده شده است که با استفاده از مشخصه سرعت بهینه، ضمن حصول به کاهش قابل توجه انرژی، ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی ساکن مورد نیاز نیز نسبت به حالت مشخصه سرعت عادی، کاهش پیدا می‌کند. با استفاده از نتایج عملی استخراج شده از خط ۱ قطار شهری مشهد، شبیه‌سازی شبکه واقعی انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از کاهش قابل توجه انرژی کل ورودی و ظرفیت ذخیره ساز مورد نیاز در حالت مشخصه سرعت بهینه است که می‌تواند هزینه ذخیره‌سازها را نیز به دنبال داشته باشد.

کلمات کلیدی: صرفه‌جویی انرژی، قطار شهری، انرژی باز تولیدی ترمزی، مشخصه بهینه سرعت قطار، سامانه ذخیره‌ساز انرژی ساکن، ابرخازن.

Electric Energy Saving in Urban Railways by Using Energy Storage System and Optimal Speed Profiles Simultaneously

■ Saeed Ahmadi/ Department of Electrical and Computer Engineering/ Faculty of Montazeri/ Khorasan Razavi Branch/ Technical and Vocational University (TVU)/ Mashhad, Iran/ s-ahmadi@tvu.ac.ir

■ Ali Dastfan/ Department of Electrical and Robotic Engineering/ Shahrood University of Technology/ Shahrood, Iran/ Dastfan@shahroodut.ac.ir

■ Mohsen Assili/ Department of Electrical and Robotic Engineering/ Shahrood University of Technology/ Shahrood, Iran/ m.assili@shahroodut.ac.ir

Abstract

Energy crisis and environmental pollution are two important factors that have caused the operators and

researchers to prioritize the reduction of energy consumption in transportation and especially in urban railway systems. Speed profile optimization could be effective in decreasing energy consumption. The use of energy storage systems (ESSs) can also help to increase energy efficiency by recovering regenerative braking energy. In this paper, the above two measures were used simultaneously. First, the total energy consumption and stationary energy storage capacity was determined for a network consisting of trains with normal speed. Then the amount of energy and ESS size required for trains with optimal speed profiles were calculated. It was shown that by using the optimum speed profiles, while achieving a significant increase in energy saving, the required ESS capacity is also reduced compared to the normal speed profile. By using the practical results extracted from line 1 of Mashhad urban railway, the real network simulation was performed. The simulation results showed a significant reduction in the total input energy and ESS capacity associated with the optimal speed profile mode, which can also lead to lower ESS costs.

Keywords: energy saving, urban railway, regenerative braking energy, optimal speed profile, stationary energy storage system, super capacitor.

۱- مقدمه

فقط از قابلیت هم‌زمانی شتاب‌گیری و ترمزگیری قطارها استفاده شده است.

در رابطه با استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی نیز مطالعات زیادی انجام شده است که بعضی از آن‌ها مانند [۱۷] به مقایسه انواع روش‌های استفاده از انرژی بازتولیدی و انواع ذخیره‌سازها پرداخته‌اند. در [۱۸] ذخیره‌سازهای ساکن و قابل نصب روی قطار مقایسه شده‌اند. در [۱۹-۲۱] روش‌های کنترلی شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها و تأثیر آن‌ها بر میزان بالا بردن بازده انرژی بررسی شده است و در ضمن بهبود بعضی از پارامترهای کیفیت توان مانند نوسانات ولتاژ و حداکثر توان لحظه‌ای مدنظر قرار داده شده است. تعیین اندازه و محل نصب بهینه ذخیره‌سازهای ساکن در [۲۲-۲۷] مورد مطالعه قرار گرفته است. در تحقیقات مربوط به ذخیره‌سازها نیز فقط بالا بردن بازده انرژی سیستم با استفاده از بازبایی انرژی بازتولیدی ترمزی در نظر گرفته شده است و ظرفیت ذخیره‌سازها برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر تعیین شده است که هزینه بالای تأمین ذخیره‌ساز را به‌دنبال دارد در حالی که ممکن است به‌ندرت از حداکثر ظرفیت آن استفاده شود.

در تحقیق حاضر با استفاده هم‌زمان از ذخیره‌سازهای انرژی و مشخصه سرعت بهینه، بازده انرژی افزایش داده شده است. به‌عبارت دیگر با ترکیب روش صرفه‌جویی انرژی با بازبایی انرژی بازتولیدی ترمزی، ضمن کاهش بیشتر انرژی مصرفی کل شبکه، ظرفیت ابرخازن مورد استفاده نیز کاهش یافته است. به این منظور ابتدا برای شبکه با مشخصه سرعت عادی، ظرفیت ذخیره‌ساز حساب شده است، سپس مقدار ابرخازن موردنیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه محاسبه شده است و نشان داده شده که در حالت اخیر هم ظرفیت ذخیره‌ساز کاهش یافته و هم انرژی دریافتی کل شبکه کم شده است.

۲- شبیه‌سازی سیستم قطار شهری

شبکه قطار شهری شامل پست‌ها و خطوط تغذیه و ریل‌ها به‌عنوان شبکه تغذیه‌کننده و قطارها به‌عنوان بارهای الکتریکی است که ذخیره‌سازهای ساکن نیز به‌عنوان تجهیزات تکمیلی با هدف افزایش بازده انرژی به تجهیزات فوق اضافه می‌شوند که مدل‌سازی هر بخش به‌صورت خلاصه بیان می‌شود.

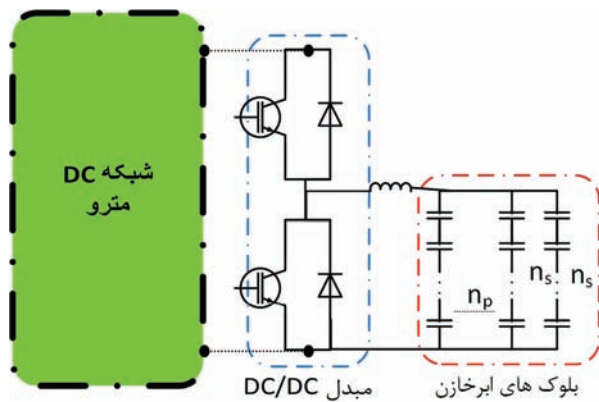
۲-۱- مدل‌سازی قطار

برای مدل‌سازی عملکرد قطار از معادلات مکانیکی حاکم بر آن استفاده می‌شود که طبق رابطه (۱) بیان می‌شود [۲۸]:

ناوگان حمل‌ونقل ریلی الکتریکی درون‌شهری به دلیل ویژگی‌هایی نظیر ایمنی و بازده انرژی بالا، ظرفیت بالای حمل مسافر، دقت و وقت‌شناسی و کاهش آلودگی محیط‌زیست، روز بروز در حال توسعه است. از طرفی مصرف بالای انرژی یکی از چالش‌های اساسی این سیستم‌ها است که نظر محققین زیادی را به خود جلب کرده است. دو راهکار اساسی برای بالا بردن بازده انرژی در این سیستم‌ها به‌خصوص در قسمت انرژی کششی مربوط به قطارها وجود دارد؛ یکی صرفه‌جویی در انرژی مصرفی است که این موضوع در اغلب تحقیقات گذشته با انجام راهبری مناسب و اقتصادی مترادف شده است. راهکار دوم استفاده مجدد از انرژی بازتولیدی قطارها در زمان ترمزگیری است که می‌تواند با روش‌هایی مانند تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها، استفاده از پست‌های تغذیه با قابلیت برگرداندن انرژی به شبکه بالادستی و استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی انجام شود [۱،۲].

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در زمینه صرفه‌جویی انرژی با استفاده از راهبری بهینه قطار انجام شده است. اغلب این مطالعات در راستای بهینه‌سازی مشخصه سرعت سیستم تک‌قطاره انجام شده‌اند. در [۳] از تئوری کنترل بهینه و اصل حداکثر سازی پونت‌ریاگین استفاده شده است. در [۴-۷] از الگوریتم ژنتیک، سرد کردن فلزات، تئوری مورچه‌ها، تئوری تصمیم و سیستم‌های خبره استفاده شده است. در همه تحقیقات فوق، زمان سفر ثابت فرض شده و سعی شده است که با بهینه کردن نقاط تغییر حالت حرکت قطار و استفاده بیشتر از حالت خلاصی، انرژی مصرفی حداقل شود. در [۸-۱۲] سیستم تک‌قطاره با چند هدف جهت بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی نظیر بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات الگوریتم تکاملی سعی شده است که علاوه بر حداقل کردن انرژی مصرفی، زمان سفر نیز حداقل شود. به‌عبارت دیگر جبهه پرتوی انرژی برحسب زمان تعیین شده است. در همه تحقیقات فوق، موضوع انرژی باز تولیدی در نظر گرفته نشده است. در [۱۳، ۱۴] که در زمینه سیستم‌های چند قطاره هستند نیز باز تولید انرژی ترمزی مطرح نشده است. در [۱۵، ۱۶] ضمن بهینه کردن مشخصه سرعت قطار، با تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها سعی شده است که حداکثر استفاده از انرژی بازتولیدی قطارها به عمل آید. در این تحقیقات که اغلب با عنوان بهره‌برداری کارآمد قطارها شناخته می‌شوند، گرچه به موضوع باز تولید انرژی پرداخته شده است، ولی

عمر کاری بالایی باشد که در میان فناوری‌های موجود، ابرخازن‌ها در مجموع مناسب‌ترین گزینه هستند و چون تحقیق حاضر بر روی شبکه از قبل ساخته شده انجام می‌شود، نوع ساکن که از لحاظ نصب و اجرا محدودیت‌های کمتری دارد در نظر گرفته شده است. سامانه ذخیره‌ساز از دو بخش اصلی تشکیل شده است؛ قسمت اول عنصر ذخیره کننده که از نوع ابرخازن است. چون ولتاژ نامی ابرخازن‌ها پایین و حدود ۲،۵ ولت است، به‌طور معمول توسط شرکت‌های سازنده بلوک‌های آماده به‌صورت مجموعه سری از خازن‌ها ساخته می‌شود. حال با توجه به ولتاژ نامی شبکه تعداد مناسبی از این بلوک‌ها با یکدیگر سری می‌شوند و با توجه به توان و انرژی مورد نیاز، تعداد کافی از این زنجیره‌های سری با یکدیگر موازی می‌شوند. بخش دوم مبدل DC/DC است که برای اتصال ذخیره‌ساز به شبکه بکار می‌رود. این مبدل به‌صورت دوطرفه کار می‌کند و هنگام ترمزگیری و افزایش ولتاژ شبکه به‌صورت مبدل کاهنده عمل کرده و انرژی را در خازن‌ها ذخیره می‌کند و در زمان شتاب‌گیری به‌صورت افزایش‌دهنده وارد عمل شده و انرژی را به شبکه برمی‌گرداند تا توسط قطارهای در حال شتاب‌گیری استفاده شود. سامانه ذخیره‌ساز شامل بلوک‌های ابرخازن و مبدل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: سامانه ذخیره‌ساز ساکن خازنی متصل به شبکه مترو

برای کنترل عملکرد مبدل نیاز به یک سیستم مدیریت توان است که از اهمیت بالایی برخوردار است و همان‌طور که قبلاً اشاره شد مطالعات زیادی در زمینه نحوه کنترل مبدل و در نتیجه حداکثر کردن بازده ذخیره‌ساز انجام شده است. الگوریتم کنترلی مورد استفاده در شبیه‌سازی مشابه روش استفاده شده در [۱۸] است. ضمن اینکه در تغییر وضعیت از شارژ و دشارژ به خاموش یا برعکس که پرس ناگهانی برای جریان خازن‌ها ایجاد می‌شود، برای جلوگیری از کاهش عمر خازن‌ها، محدودیت حداکثر نرخ تغییرات جریان در نظر گرفته شده است. سه حالت کاری شارژ، دشارژ و خاموش، با بازخورد گرفتن از سه پارامتر ولتاژ شبکه، وضعیت شارژ ابرخازن‌ها و جریان لحظه قبل ذخیره‌ساز، تعیین می‌شود. این مجموعه را می‌توان با یک منبع جریان کنترل شونده مدل کرد که در شکل (۳) در شبکه قطار شهری نشان داده شده است.

۲-۳- مدل‌سازی شبکه

سیستم تغذیه به‌طور معمول از نوع DC با ولتاژ ۶۰۰، ۷۵۰، ۱۵۰۰ یا ۳۰۰۰ ولت است که در کشور ما در حال حاضر از سیستم ۷۵۰ ولت استفاده می‌شود. ولتاژ تغذیه از طریق پست‌های کشش توسط ترانسفورماتورهای قدرت از شبکه بالادستی تأمین می‌شود، سپس

$$M \frac{dv}{dt} = F_T(x, v) - R_T(x, v) \quad (1)$$

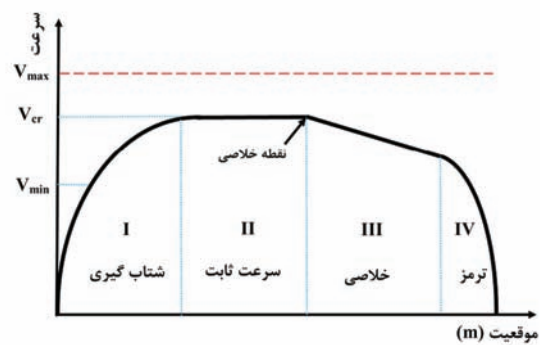
که M جرم کل قطار و مسافران، v سرعت لحظه‌ای حرکت قطار، F_T نیروی کشش قطار و R_T نیروی مقاوم کل قطار است. با توجه به مشخصه فیزیکی مسیر، مقدار مقاومت قطار معلوم است و برای شتاب معین می‌توان مقدار نیروی کشش مورد نیاز را از روی مشخصه قطار تعیین کرد. مقدار توان الکتریکی مصرفی قطار P_{cons} در حالت موتوری و توان بازتولید ترمزی P_{regen} در حالت ژنراتوری با استفاده از روابط (۲) و (۳) تعیین می‌شود و می‌توان قطار را به‌عنوان یک بار الکتریکی در شبکه مدل‌سازی کرد که علاوه بر مقدار توان، موقعیت آن نیز در هر لحظه از زمان تغییر می‌کند.

$$P_{cons} = \frac{F_T \times v}{\eta} \quad (2)$$

$$P_{regen} = F_T \times v \times \eta \quad (3)$$

که η بازده مجموعه موتور (ژنراتور) الکتریکی، اینورتر و گیربکس است.

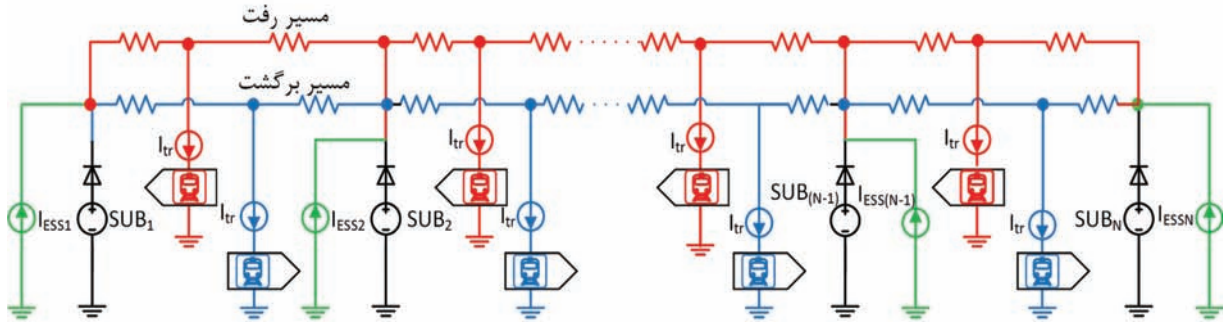
شکل (۱) مشخصه سرعت برحسب مکان نمونه را برای قطار نشان می‌دهد که در حالت کلی می‌تواند شامل ۴ ناحیه کاری شتاب‌گیری، سرعت ثابت، خلاصی و ترمزگیری باشد. برای به‌دست آوردن مشخصه‌های مختلف سرعت برای قطار در این مقاله از دو متغیر تصمیم سرعت ورود به ناحیه سرعت ثابت (V_{cr}) و زمان ورود به ناحیه خلاصی (t_{cr}) استفاده شده است. محدوده تغییرات V_{cr} می‌تواند بین V_{max} (حداکثر سرعت مجاز قطار) و V_{min} (حداقل سرعتی که مقادیر کمتر آن نارضایتی مسافران را به‌دنبال دارد) باشد. معادلات کامل حرکت قطار و روابط مقاومت قطار و نحوه شبیه‌سازی آن‌ها در [۲۹] آورده شده است.



شکل ۱: مشخصه سرعت برحسب مکان قطار

۲-۲- مدل‌سازی ذخیره‌ساز

در سال‌های اخیر به موضوع استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی جهت بهبود عملکرد سیستم‌های حمل‌ونقل ریلی توجه خاصی نشان داده شده است که اهداف اصلی آن، افزایش بازده انرژی، کاهش نوسانات ولتاژ و کاهش دامنه حداکثر جریان پست‌ها است. برای این منظور از هر دو نوع ذخیره‌ساز ساکن و قابل نصب روی قطار استفاده شده است [۲]. ذخیره‌سازهای مورد استفاده به‌طور معمول از نوع باتری، چرخ طیار و ابرخازن‌ها هستند. با توجه به تعداد زیاد و سرعت بالای شتاب و ترمزگیری‌های قطار در طول یک روز، سامانه ذخیره‌ساز باید دارای مشخصه‌های مناسب یعنی چگالی توان، چگالی انرژی و



شکل ۳: مدل شبکه قطار شهری همراه با ذخیره‌سازهای انرژی

توسط سیستم یک‌سوساز که به‌طور معمول نوع دیودی ۱۲ پالسه است، ولتاژ DC موردنیاز فراهم می‌شود. تغذیه قطارها از طریق خطوط خروجی پست‌های فوق و توسط شبکه بالاسری یا ریل سوم انجام می‌شود. در تحلیل شبکه، پست‌ها توسط یک منبع ولتاژ DC همراه با مقاومت داخلی و یک دیود سری مدل می‌شوند و خطوط تغذیه و ریل‌ها توسط مقاومت اهمی مدل می‌شوند. قطارها نیز با منابع جریان مدل می‌شوند که موقعیت آن‌ها نیز در حال تغییر است. در شکل (۳) مدل یک شبکه قطار شهری نمونه همراه با ذخیره‌سازهای ساکن انرژی نشان داده شده است.

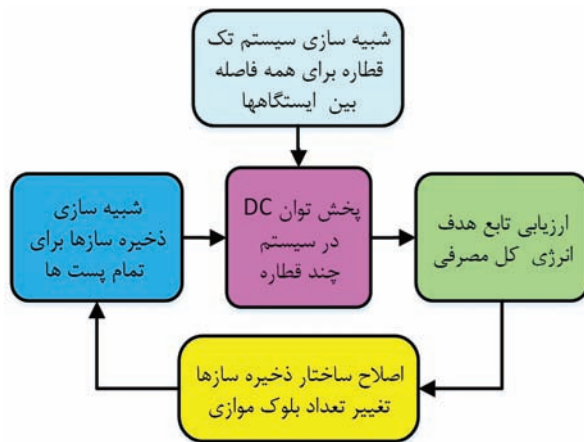
۳- الگوریتم پیشنهادی

هدف اصلی این تحقیق کاهش مصرف انرژی الکتریکی است، از این‌رو مساله به‌صورت حداقل‌سازی انرژی کل دریافتی شبکه از پست‌های کشش تعریف می‌شود که در رابطه (۴) نشان داده شده است.

$$\min E_{in-tot} = \sum_{k=1}^{N_{sub}} \int_0^T V_{sub-k} \cdot I_{sub-k} dt \quad (4)$$

$$s.t. \int_0^T V_{ESS-k} \cdot I_{ESS-k} dt = 0, k = 1, 2, \dots, N_{sub} \quad (5)$$

که E_{in-tot} انرژی کل دریافتی شبکه در یک دوره تناوب کاری برحسب kWh، N_{sub} تعداد پست‌های کشش، V_{sub-k} و I_{sub-k} به ترتیب ولتاژ و جریان پست k ام، V_{ESS-k} و I_{ESS-k} ولتاژ و جریان ذخیره‌ساز واقع در پست k ام و T دوره زمانی که همان فاصله زمانی حرکت قطارها در نظر گرفته شده است. چون حرکت قطارها به‌صورت تناوبی است، مجموع انرژی دریافتی و تحویلی هر بانک خازنی باید در یک دوره تناوب صفر باشد که این موضوع به‌صورت قید رابطه (۵) بیان شده است. ظرفیت بانک خازنی باید طوری انتخاب شود که انرژی کل مصرفی در بازه زمانی مورد نظر حداقل شود. بانک خازنی نیاز به محل مشخصی برای نصب خازن‌ها و تجهیزات وابسته دارد و با توجه به محدودیت فضا، فرض شده که ذخیره‌سازها فقط در ایستگاه‌های دارای پست کشش نصب می‌شود. تعداد بلوک‌های سری n_s در یک زنجیره بانک خازنی با توجه به ولتاژ نامی شبکه انتخاب می‌شود و ثابت است. پارامتر متغیر np یعنی تعداد شاخه‌های موازی در هر ذخیره‌ساز است. این تعداد می‌تواند بین صفر و حداکثر مقدار ممکن تغییر کند. اگر برای یک پست $np=0$ شود یعنی ذخیره‌ساز وجود ندارد. حداکثر مقدار np در [۲۲] با فرض برگشت‌پذیر بودن پست‌ها با استفاده از بیشترین مقدار لحظه‌ای توان منفی پست‌ها محاسبه شده است. روش فوق به‌دلیل اینکه ممکن است در بعضی موارد توان لحظه‌ای زیاد باشد ولی توان



شکل ۴: فرآیند کاهش انرژی مصرفی کل شبکه

در همه مطالعات قبلی که در زمینه محاسبه ظرفیت ذخیره‌سازها یا بهینه‌سازی آن‌ها انجام شده‌اند، ظرفیت ذخیره‌سازها برای مشخصه سرعت عادی یا مشخصه با حداقل زمان سفر تعیین شده است که ضمن هزینه بالای خرید و نصب تجهیزات ذخیره‌ساز، ممکن است در خیلی از شرایط از حداکثر ظرفیت آن استفاده نشود. ویژگی بارز این تحقیق این است که با بهینه کردن مشخصه سرعت قطارها بدون هیچ هزینه‌ای، ظرفیت ذخیره‌ساز موردنیاز نیز کاهش یافته است. ضمن اینکه مزایای دیگری مانند کاهش استهلاک قطارها را نیز به همراه دارد. برای رسیدن به این هدف، شبیه‌سازی در ۴ سناریو انجام شده است. ابتدا انرژی کل مصرفی در حالت عادی محاسبه شده و خازن مورد نیاز محاسبه شده است، سپس مقدار خازن مورد نیاز برای شبکه با مشخصه سرعت بهینه به‌دست آمده است. نتایج در بخش

بعد به تفصیل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند.

۴- تحلیل نتایج شبیه سازی در سیستم مورد مطالعه

۴-۱- سیستم مورد مطالعه

خط ۱ شبکه قطار شهری مشهد به عنوان سیستم مورد نظر برای مطالعه در نظر گرفته شده است که مشخصات آن در جدول (۱) آورده شده است. فاصله زمانی بین حرکت قطارها ۵ دقیقه است و در هر لحظه ۹ قطار در هر طرف خط در حال حرکت هستند.

جدول ۱: مشخصات خط ۱ قطار شهری مشهد

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی شبکه	۷۵۰ V DC
ولتاژ بی باری پست	۸۴۰ V DC
تعداد پست های کشش	۱۱
تعداد ایستگاه مسافری	۲۲
مقاومت اهمی خط بالاسری	۰.۰۳۶ Ω/km
مقاومت اهمی ریل	۰.۰۲۲ Ω/km
طول تقریبی خط (در هر جهت)	۱۹ کیلومتر

در حال حاضر هر قطار شامل ۲ واگن است که مشخصات واگن ها در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: مشخصات هر واگن قطار خط ۱ قطار شهری مشهد

پارامتر	مقدار
جرم واگن خالی (AW_0)	۴۳ تن
حداکثر جرم مسافر (AW_3)	۱۸.۹ تن
جرم قسمت گردان	۳.۷ تن
بازده مجموعه موتور، اینورتر و گیربکس	۸۶٪
حداکثر شتاب موتوری	۱.۳ m/s ²
حداکثر شتاب ترمزی	۱.۲ m/s ²
حداکثر جرک مجاز	۱ m/s ³
حداکثر مصرف داخلی	۴۲ kW

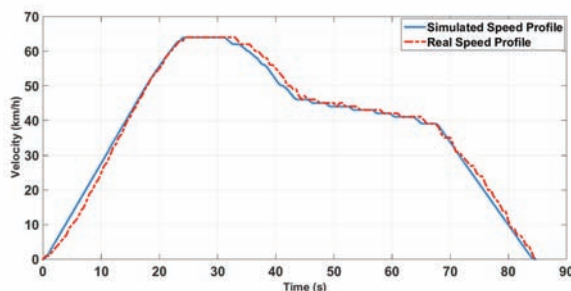
ابرخازن های مورد استفاده در ذخیره سازها ساخت شرکت Maxwell هستند. حداقل ظرفیت هر ذخیره ساز، یک زنجیره با توان نامی kW ۱۸۰ و ولتاژ نامی V DC ۷۵۰ شامل ۶ بلوک سری ابرخازن است که مشخصات فنی هر بلوک ابرخازن در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات هر بلوک ابرخازن مورد استفاده در ذخیره ساز

پارامتر	مقدار
ولتاژ نامی	۱۲۵ V
ظرفیت نامی	۶۳ F
حداکثر جریان پیوسته	۲۴۰ A
حداکثر توان پیوسته	۱۸۰ kW
حداکثر انرژی قابل ذخیره	۱۳۷ Wh
تعداد ابرخازن سری	۴۸
انرژی قابل ذخیره در هر خازن	۳ Wh

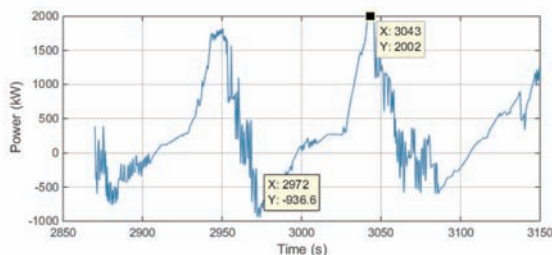
۴-۲- مقایسه نتایج شبیه سازی سناریوهای مختلف

برای شبیه سازی کل شبکه، ابتدا حرکت قطار در هر فاصله بین ایستگاهی با استفاده از شبیه ساز تک قطاره مدل سازی شده است. با توجه به اینکه مشخصه سرعت واقعی قطار در راهبری دستی به شدت به رفتار راهبران وابسته است، برای مدل سازی حرکت در حالت واقعی، از داده های ذخیره شده در سامانه ضبط کننده رویداد قطارها استفاده شده است (در هر ثانیه ۲ نمونه از سرعت قطار ذخیره می شود). مشخصه های سرعت متنوعی از قطارها در ساعت ها و شرایط مختلف کاری رسم شده است. سپس نزدیک ترین نمونه از نظر زمان سفر به زمان برنامه ریزی شده انتخاب شده است و توسط نرم افزار شبیه سازی شده است. در شکل (۵) یک نمونه مشخصه سرعت واقعی و شبیه سازی شده برای یک فاصله بین ایستگاهی نمونه نشان داده شده است. این کار برای تمام فاصله های بین ایستگاهی سیستم مورد مطالعه انجام شده است و در نهایت با انجام پخش توان DC برای کل شبکه، کلیه پارامترهای الکتریکی شامل ولتاژها، جریان ها، توان ها و انرژی مصرفی کل شبکه محاسبه شده اند. نتایج حالت واقعی به عنوان سناریوی پایه (سناریوی A) در سطر اول جدول (۴) نشان داده شده است در این سناریو زمان سفر بین ایستگاه ها و زمان سفر کل مسیر مطابق جدول زمان بندی شرکت بهره برداری قطار شهری مشهد در نظر گرفته شده است.



شکل ۵: مشخصه سرعت واقعی و شبیه سازی شده برای یک IS

در سناریوی دوم (B) مانند مطالعات قبلی میزان خازن مورد نیاز برای کاهش مصرف انرژی کل سیستم عادی محاسبه شده است. برای تخمین حداکثر تقریبی خازن ها، با فرض برگشت پذیر بودن پست ها، پخش توان انجام شده است و مقدار توان لحظه ای منفی در تمام پست ها به دست آورده شده است. توان لحظه ای پست کشش شماره ۳ به عنوان نمونه در سیستم مورد مطالعه در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: توان لحظه ای در یک پست کشش شماره ۳ با فرض برگشت پذیر بودن پست حداکثر تعداد بلوک موازی خازن ها $n_{p_{max}}$ در هر پست از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$n_{p_{max}} = \frac{P_{max}^{neg}}{0.75 \times P_{string}} \quad (6)$$

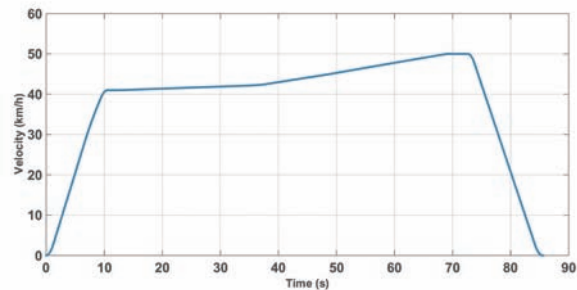
که P_{max}^{neg} حداکثر توان منفی در پست و P_{string} توان نامی هر

بلوک ابرخازن است. برای ابرخازن داده شده با توان نامی هر زنجیره ۱۸۰ kW و پست نمونه که توان آن در شکل (۶) نشان داده شده است:

$$\eta_{pmax} = \frac{936}{0.75 \times 180kw} = 6.93 \approx 7$$

ضریب ۰,۷۵ به این دلیل در رابطه استفاده شده است که در عمل برای افزایش طول عمر خازن‌ها، اجازه داده نمی‌شود که SOC از ۰,۲۵ کمتر شود. لذا بخشی از ظرفیت خازن استفاده نمی‌شود. شبیه‌سازی با بلوک‌های مختلف خازن انجام شده است و با فرض مساوی بودن تعداد بلوک‌ها در تمام پست‌ها و عدم وجود محدودیت، تعداد بلوک‌های موازی تا جایی افزایش داده شده است که دیگر تأثیری بر کاهش مصرف انرژی نداشته باشد. نتایج نهایی این سناریو در سطرهای ۲ تا ۴ جدول (۴) برای ۵، ۶ و ۷ بلوک موازی خازن آورده شده است.

در سناریوی C با استفاده از الگوریتم ارایه شده در [۲۹] با استفاده از متغیرهای تصمیم سرعت کروز و زمان خلاصی - که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد، مشخصه بهینه سرعت برای همه فاصله‌های بین ایستگاهی به‌دست‌آمده است، ضمن اینکه قید زمان سفر برنامه‌ریزی شده بین ایستگاه‌ها و کل مسیر و سایر قیده‌های فیزیکی رعایت شده است. مشخصه سرعت بهینه تعیین‌شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای فاصله بین ایستگاهی نمونه در شکل (۷) نشان داده شده است. سپس با انجام پخش توان، انرژی‌های شبکه محاسبه شده است و نتایج در سطر ۵ جدول (۴) آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، بهینه‌سازی مشخصه سرعت به‌تنهایی کاهش قابل توجهی در انرژی کل مصرفی دارد.



شکل ۷: مشخصه سرعت بهینه شبیه‌سازی شده برای IS نمونه

در سناریوی آخر (D)، با انجام شبیه‌سازی مشابه سناریوی B برای شبکه با مشخصه‌های سرعت بهینه، مقدار خازن مورد نیاز جهت کاهش انرژی مصرفی کل محاسبه شده است و نتایج در سطرهای ۶ تا ۸ برای ۵، ۶ و ۷ بلوک موازی خازن خلاصه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، صرفه‌جویی انرژی در سناریوی D به میزان قابل توجهی بیشتر از سناریوی B است. ضمن اینکه مقدار خازن مورد نیاز هم کمتر است. در شبکه با مشخصه سرعت عادی، با استفاده از ۷ بلوک خازن، مصرف کل انرژی کمتر شده است، در حالی که با مشخصه سرعت بهینه، با ۶ بلوک خازن، انرژی کل کمترین مقدار خود را داراست. نتایج نشان می‌دهد که بهینه کردن مشخصه سرعت و سپس خازن‌گذاری، از یک‌طرف کاهش انرژی بیشتری به‌دنبال دارد و از طرف دیگر، با توجه به نیاز به تعداد کمتر خازن، از نظر هزینه‌های سرمایه‌گذاری نیز صرفه‌جویی به‌دنبال خواهد داشت. در جدول (۴)، ΔE ، درصد کاهش انرژی کل مصرفی نسبت به حالت مبنا (سناریوی A) است. مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش

مصرف انرژی در سناریوی D با ۶ بلوک خازن موازی به میزان ۲۳,۹ درصد است و با افزایش خازن‌ها به ۷ بلوک در این سناریو، انرژی کل زیاد شده است. Econ-trains انرژی مصرفی کل قطارهاست که شامل انرژی مورد نیاز جهت حرکت قطار و روشنایی و تهویه است. Egen-trains انرژی باز تولیدی همه قطارهاست که از طریق خط بالاسری به شبکه برگردانده می‌شود.

جدول ۴: انرژی‌های شبکه در سناریوهای مختلف

Scenario	n_p	E_{in-tot}	$\Delta E\%$	$E_{con-trains}$	$E_{gen-trains}$	E_{loss}	E_{block}	E_{Ess}
A	۰	۳۲۵,۲	۰,۰	۴۲۴,۵	۱۱۹,۷	۲۰,۴	۴۶,۳	۰
B	۵	۲۸۴,۷	۱۲,۵	۴۱۷,۳	۱۵۲,۹	۲۰,۳	۵,۹	۷۸,۴
	۶	۲۸۱,۴	۱۳,۵	۴۱۶,۸	۱۵۵,۸	۲۰,۳	۲,۵	۸۵,۳
	۷	۲۷۹,۷	۱۴,۰	۴۱۶,۴	۱۵۷	۲۰,۴	۰,۸	۸۶,۲
C	۰	۲۷۵,۹	۱۵,۲	۳۲۰,۳	۵۷,۷	۱۳,۴	۳۴	۰
D	۵	۲۵۱,۱	۲۲,۸	۳۱۸,۵	۸۴,۱	۱۳,۸	۵,۷	۵۱,۵
	۶	۲۴۷,۵	۲۳,۹	۳۱۸,۵	۸۴,۷	۱۳,۸	۵	۵۰,۳
	۷	۲۴۹,۲	۲۳,۴	۳۱۸,۵	۸۳,۱	۱۳,۸	۶,۸	۴۷,۵

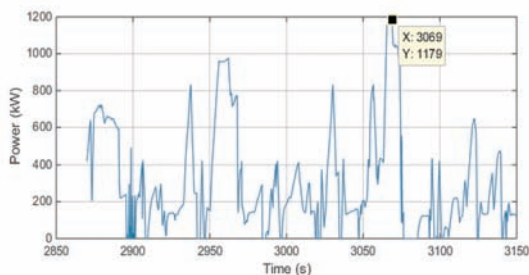
Eblock بخشی از انرژی باز تولیدی همه قطارهاست که توسط بقیه قطارها در شبکه جذب نشده است و به‌طور معمول در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود. چون معمولاً پذیرندگی شبکه ۱۰۰٪ نیست، Egen-trains از مجموع باز تولیدی قطارها کمتر است. Eregen کل انرژی باز تولیدی هر قطار است که بسته و وضعیت سایر قطارها و شبکه مقداری از آن استفاده خواهد شد و بقیه در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود.

$$E_{block} = \left(\sum_{All\ trains} E_{regen} \right) - E_{gen-trains} \quad (۷)$$

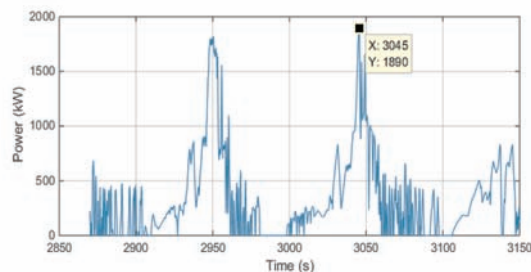
یکی از مهم‌ترین مزایای استفاده از ذخیره‌سازها همان‌طور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود این است که، استفاده از ابرخازن‌ها منجر به کاهش تلفات در مقاومت‌های ترمزی می‌شود، ولی اگر مقدار ذخیره‌ساز از حدی بیشتر شود، می‌تواند دوباره باعث افزایش این تلفات شود. Eloss کل تلفات الکتریکی در شبکه است (غیر از تلفات در مقاومت‌های ترمزی) که با انجام پخش بار DC در کل سیستم، محاسبه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر:

$$E_{in-tot} = E_{cons-trains} - E_{gen-trains} + E_{loss} \quad (۸)$$

با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، انرژی مصرفی و باز تولیدی قطارها هردو کاهش پیدا می‌کنند ولی چون مقدار عددی کاهش انرژی مصرفی بیشتر است، انرژی خالص دریافتی کل سیستم نیز کم می‌شود. مشاهده می‌شود که خازن‌گذاری از نوع ساکن تقریباً تأثیری بر تلفات کل انرژی در شبکه ندارد. مقدار انرژی دریافتی و تحویلی خازن‌ها در یک دوره تناوب در جدول با EBSS نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، استفاده از مشخصه سرعت بهینه باعث می‌شود که میزان انرژی مبادله شده خازن‌ها در هر دوره تناوب، کمتر از مقدار انرژی مبادله شده با مشخصه سرعت عادی است. این به معنی شارژ و دشارژ کمتر و در نتیجه طول عمر بیشتر خازن‌هاست. از مزایای دیگر استفاده از ذخیره‌سازها همراه با بهینه‌سازی مشخصه سرعت، بهبود مشخصه ولتاژ پست‌ها و قطارها و کاهش دامنه حداکثر توان پست‌ها است. که به‌عنوان پارامترهای کیفیت توان حائز اهمیت



ب- استفاده هم‌زمان از ذخیره‌ساز و مشخصه سرعت بهینه



الف- استفاده از ذخیره‌ساز با مشخصه سرعت عادی

شکل ۸: توان لحظه‌ای در پست کشش شماره ۳

عملی انرژی در قطارها و پست‌ها، همکاری صمیمانه داشته‌اند، کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] V. De Martinis, M. Gallob, "Models and methods to optimize train speed profiles with and without energy recovery systems: a suburban test case," Proc. Social and Behavioral Sciences, vol. 87, pp. 222 – 233, 2013.
- [2] A. Gonzalez 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.
- [3] G. M. Scheepmaker and R. M. P. Goverde, "The interplay between energy-efficient train control and scheduled running time supplements," Journal of Rail Transport Planning & Management, vol. 5, no. 4, pp. 225–239, Dec. 2015.
- [4] K. Kim, S. Chien, "Optimal train operation for minimum energy consumption considering track alignment, speed limit, and schedule adherence," J. Transp. Eng. Vol. 137, no. 9, pp. 665–674, 2011.
- [5] S. Lu, S. Hillmansen, T. Kin Ho, and C. Roberts, "Single-train trajectory optimization," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 14, no. 2, pp. 743–750, Jun. 2013.
- [6] M. Domínguez, A. Fernández, A. P. Cucala, and P. Lukaszewicz, "Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption," Proc. Inst. Mech. Eng. Part F-J. Rail Rapid Transit, vol. 225, no. 5, pp. 463–474, Sep. 2011.
- [7] J. Yin, D. Chen, and L. Li, "Intelligent train operation algorithms for subway by expert system and reinforcement learning," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 15, no. 6, pp. 2561–2571. 2014.
- [8] R. Chevrier, P. Pellegrini, J. Rodriguez, "Energy saving in railway timetabling: A bi-objective evolutionary approach for computing alternative running times," Transportation Research Part C, vol. 37, pp. 20–41, 2013.
- [9] M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, T. Gonsalves, and A. Fernandez-Rodríguez, "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines," Eng. Appl. Artif. Intell. vol. 29, pp. 43–53, Mar. 2014.
- [10] W. ShangGuan, X. H. Yan, B. G. Cai and J. Wang, "Multi-objective optimization for train Speed trajectory in CTCS high-speed railway with hybrid evolutionary algorithm," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 4, pp. 2215 - 2225, Mar. 2015.
- [11] A. Fernández-Rodríguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, M. Domínguez, and T. Gonsalves, "Design of robust and energy-efficient ATO speed profiles of metropolitan lines considering train load variations and delays," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 16, no. 4, pp. 2061–2071,

« ادامه در صفحه ۵۷

است. در شکل (الف-۸) توان لحظه‌ای مربوط به پست ۳ با ذخیره‌ساز در مشخصه سرعت عادی و در شکل (ب-۸) توان لحظه‌ای همان پست با ذخیره‌ساز و مشخصه سرعت بهینه نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از ذخیره‌ساز به تنهایی، باعث کاهش ۵٫۶٪ حداکثر توان لحظه‌ای (از ۲۰۰۲ kW به ۱۸۹۰ kW) شده است درحالی‌که استفاده هم‌زمان باعث کاهش ۴۱٪ حداکثر توان لحظه‌ای (از ۲۰۰۲ kW به ۱۱۷۹ kW) شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله مصرف انرژی در قطار شهری با استفاده هم‌زمان از مشخصه‌های سرعت بهینه حرکت قطار و ذخیره‌سازهای ساکن ابرخازنی کاهش داده شد. نتایج نشان می‌دهد که اگر ظرفیت ذخیره‌سازها با پروفایل سرعت عادی محاسبه شود، حداکثر ۱۴٪ صرفه‌جویی حاصل می‌شود (np=۷). درحالی‌که اگر ابتدا مشخصه‌های سرعت بهینه شود، سپس ظرفیت ذخیره‌ساز محاسبه شود، صرفه‌جویی انرژی به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش پیدا می‌کند و به حدود ۲۳٫۹٪ می‌رسد. ضمن اینکه مقدار ابرخازن مورد نیاز برای این کار کمتر از حالت مشخصه عادی سرعت است (np=۶). استفاده از مشخصه سرعت بهینه در هنگام محاسبه ذخیره‌سازها، نه تنها باعث کاهش ظرفیت ابرخازن موردنیاز می‌شود، بلکه با کم شدن انرژی مبادله شده ذخیره‌سازها در هر دوره تناوب از حدود ۸۵kW به ۵۰kW، باعث افزایش عمر کاری ابرخازن‌ها می‌شود. از طرفی مشاهده می‌شود که بهینه کردن مشخصه سرعت، تلفات شبکه را نیز کاهش می‌دهد که به دلیل کاهش توان مصرفی و بازتولیدی قطارها و در نتیجه، کاهش جریان خط است. نتیجه کاهش تلفات، افزایش بیشتر بازده انرژی کل شبکه است. ذخیره‌سازهای ساکن تأثیری بر تلفات شبکه ندارند، درحالی‌که باعث کاهش تلفات در مقاومت‌های ترمزی قطارها و در نتیجه افزایش راندمان می‌شوند. بهبود پارامترهای کیفیت توان مانند حداکثر توان لحظه‌ای و نوسانات ولتاژ، از مزایای دیگر روش پیشنهادی است، بطوریکه کاهش ۵٫۶ درصدی حداکثر دامنه توان لحظه‌ای یک پست نمونه به ۴۱٪ تبدیل شده است. در پایان لازم به ذکر است که در این مقاله هدف فقط کاهش انرژی ورودی کل شبکه بود و با داشتن هزینه انرژی و قیمت ذخیره‌سازها و انجام تحلیل اقتصادی، ظرفیت بهینه ذخیره‌سازها نیز قابل‌محاسبه خواهد بود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از کلیه کارکنان شرکت بهره‌برداری قطار شهری مشهد که در استخراج مشخصات فنی خط ۱ و اندازه‌گیری