

Braking Energy Recovery of Intra-City Trains Using Power Transmission Through Induction Coupling: A Case Study of Isfahan Metro

Akbar Barati^{1,2}, M.Sc., Ghazanfar Shahgholian^{1,2}, Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

² Smart Microgrid Research Centre, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

Abstract:

The problem of air pollution caused by the use of fossil fuels in transportation has caused the development of the electric transportation industry. The intra-city train (metro) is the most economical and widespread means of electric transportation, which is considered one of the ways to solve the problem of traffic and air pollution. Due to the lack and limitation of energy production resources and the high cost of energy production, there is a need to implement energy consumption management in the metro industry. Recovering electrical energy and reducing power losses in the urban train braking system is one of the necessary and important methods for optimal energy consumption. With the help of braking energy recovery system, the inertia of the train, which is converted into heat in friction brakes, can be converted into consumed electricity. In dynamic braking, the kinetic energy of the wheel is converted into electrical energy using the generator mode of the train's traction system when braking is applied, and this energy is usually wasted in braking resistors. In this paper, braking energy recovery of metro trains using power transmission through inductive coupling is presented. This structure is presented to optimize the braking energy of the train, which has been simulated and investigated as an example in the Isfahan subway. The proposed model consists of a two-way power electronic circuit. The primary circuit consists of a full-bridge inverter installed inside the train connected to the primary coil, and the secondary circuit is a full-bridge inverter circuit connected to the secondary coil, which is installed in subway stations. The primary and secondary connection is established by induction coupling between the primary and secondary coils, and the braking power is transferred to the outside of the train. The studied system model is implemented in Simulink MATLAB environment and the simulation results as well as the mechanical brake diagram and the traction power diagram of the train are shown.

Keywords: Brake energy recovery, Induction coupling, Power transmission, Subway trains

Received: 18 July 2024

Revised: 14 September 2024

Accepted: 2 October 2024

Corresponding Author: Dr. Ghazanfar Shahgholian, shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1129425>



فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

بازیابی انرژی ترمز قطارهای درون شهری با استفاده از انتقال توان از طریق تزویج القایی: مطالعه موردی متروی اصفهان

اکبر براتی^{۱،۲}، دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، غضنفر شاهقلیان^{۱،۲}، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

چکیده: مشکل آلودگی هوا ناشی از استفاده سوخت‌های فسیلی در حمل‌ونقل، باعث توسعه صنعت حمل و نقل برقی شده است. قطار درون شهری (مترو) مقرون به صرفه‌ترین و گسترده‌ترین وسیله حمل و نقل برقی است که یکی از روش‌های حل مشکل ترافیک و آلودگی هوا در نظر گرفته می‌شود. با توجه به کمبود و محدودیت منابع تولید انرژی و هزینه زیاد تولید انرژی، نیاز به اجرایی مدیریت مصرف انرژی در صنعت مترو است. بازیابی انرژی الکتریکی و کاهش تلفات توان در سیستم ترمز قطار شهری یکی از روش‌های ضروری و مهم جهت مصرف بهینه انرژی است. به کمک سیستم بازیابی انرژی ترمزی می‌توان لختی حرکتی قطار که در ترمزهای اصطکاکی به گرما تبدیل می‌شود را به برق مصرفی تبدیل کرد. در ترمز دینامیکی، انرژی جنبشی چرخ با استفاده از حالت ژنراتوری سیستم کشش قطار به هنگام اعمال ترمز، به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد که معمولاً این انرژی در مقاومت‌های ترمزی تلف می‌شود. در این مقاله بازیابی انرژی ترمز قطارهای مترو با استفاده از انتقال توان از طریق تزویج القایی ارائه شده است. این ساختار برای بهینه‌سازی انرژی ترمز قطار ارائه شده که به عنوان نمونه در متروی اصفهان شبیه‌سازی و بررسی شده است. مدل پیشنهادی از یک مدار دوطرفه الکترونیک قدرت تشکیل شده است. اولیه مدار شامل یک اینورتر تمام‌پل تعبیه شده در داخل قطار متصل به سیم‌پیچ اولیه است و ثانویه آن یک مدار اینورتر تمام‌پل متصل به سیم‌پیچ ثانویه است که در ایستگاه‌های مترو نصب می‌شود. ارتباط اولیه و ثانویه توسط تزویج القایی بین سیم‌پیچ اولیه و ثانویه برقرار می‌شود و انتقال توان ترمز به خارج از قطار انجام می‌گردد. مدل سیستم مورد مطالعه در محیط سیمولینک متلب پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی و نیز نمودار ترمز مکانیکی و نمودار توان کششی قطار نشان داده شده است.

واژه‌های کلیدی: انتقال توان، بازیابی انرژی ترمز، تزویج القایی، قطارهای مترو

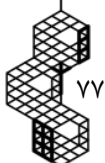
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۱۱

نویسنده مسئول: دکتر غضنفر شاهقلیان، shahgholian@iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1129425>





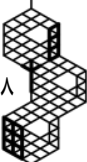
۱- مقدمه

یکی از شرایط اصلی بهره‌برداری ایجاد تعادل بین تقاضا و مصرف در شبکه برق برای هر لحظه است [۱،۲]. با افزایش نگرانی‌ها در مورد مصرف انرژی و اثرات زیست محیطی^۱ همراه با هزینه‌های عملیاتی در سیستم‌های قدرت، صرفه‌جویی و بهینه‌سازی در مصرف انرژی اهمیت زیادی پیدا کرده است [۳،۴]. مترو یا قطار درون شهری^۲ یک سیستم راه آهن زیرزمینی است که برای جابجایی تعداد زیادی مسافر در مناطق مختلف شهری و حومه‌ای استفاده می‌شود. از مزایای راه آهن شهری می‌توان به جلوگیری از آلودگی هوا، ایجاد نظم اجتماعی، بهبود بخش فرهنگی، توسعه بخش اقتصادی و صرفه‌جویی در سوخت اشاره نمود [۵،۶]. تقاضای مسافران با افزایش سریع ساکنان در شهرهای بزرگ برای سیستم‌های مترو به شدت و به‌طور پیوسته در حال افزایش است و لذا فشار زیادی بر عملیات اجرایی قطار وارد می‌شود. توسعه شبکه حمل و نقل ریلی شهری با چالش‌های جدیدی همراه خواهد بود که تاثیر زیادی بر عملکرد روزانه مصرف انرژی دارد [۷،۸]. سیستم‌های مترو در مقایسه با خودروهای شخصی از روش‌های حمل و نقل کارآمد است. با توجه به مقدار زیاد مصرف انرژی روزانه در یک شبکه مترو، پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای حفظ انرژی در حمل و نقل مترو وجود دارد لذا ارائه روش‌هایی جهت مدیریت بهتر انرژی در این بخش اهمیت زیادی پیدا کرده است [۹،۱۰]. در این میان با توجه به محدودیت منابع تامین انرژی و همچنین هزینه بالای تولید انرژی، بازیابی انرژی الکتریکی و جلوگیری از اتلاف آن مورد توجه گسترده‌ای قرار گرفته است [۱۱،۱۲].

هدف از مطالعات انجام شده در زمینه توسعه مترو به دو گروه (الف) بهبود زیرساخت مانند کاهش وزن وسایل نقلیه و نصب دستگاه‌های ذخیره انرژی و (ب) بهینه‌سازی عملیات قطار مانند کنترل بهینه قطار و جدول زمانی قطار طبقه‌بندی می‌شود [۱۳،۱۴]. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه کاهش هزینه‌های انرژی در صنعت حمل و نقل و کاربرد مترو توسط محققان انجام شده است [۱۵،۱۶]. مدل ترافیک راه آهن در یک خط، به عنوان رشته‌ای از قطارهای کروژ^۳ در حال تعامل در [۱۷] ارائه شده که تغییرات تصادفی هر قطار با یک فرآیند تصادفی توصیف شده است. معیار عملکرد بر مصرف انرژی و حداکثرهای توان ناشی از شتاب همزمان چند قطار تمرکز دارد. راهبردهای مختلفی برای هموار کردن حداکثرها مانند استفاده از بازیابی انرژی ترمز^۴ همراه با ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به کار برده شده است. همچنین یک مبادله بین عملکرد انرژی و منظم بودن ترافیک نشان داده شده است. روش بهینه‌سازی مشترک برای برنامه‌ریزی قطار مترو و اتصال‌های قطار همراه با استراتژی کنترل مسافر در یک خط مترو دو جهت در [۱۸] بررسی شده است. در این روش بهینه‌سازی مشارکتی به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط مشخص شده تا مبادله بین استفاده از قطارها، راهبرد کنترل توزیع مسافر و تعداد مسافرها در سکوها را در نظر گرفته شود.

یکی از روش‌های مدیریت بهینه انرژی در صنعت مترو بازیابی انرژی ترمز دینامیک قطار است که روش‌های مختلفی برای این منظور بررسی و به کارگیری شده است. روش استفاده از ابرخازن‌ها برای بازیابی انرژی ترمز دینامیک در [۱۹] بررسی شده است. در این روش با نصب چند خازن برقی دو لایه^۵ (ELDC) در قطار تا حدودی توان ترمز قطار با جلوگیری از اتلاف آن، قابل ذخیره شدن است و در مکان‌هایی که امکان نصب خط برق بالاسری وجود ندارد از آن می‌توان استفاده نمود. باید به این نکته توجه داشت که استفاده از این روش باعث افزایش وزن، قیمت و هزینه نگهداری تجهیزات می‌گردد. روش استفاده از الگوریتم حرکت و توقف قطارها در [۲۰] پیشنهاد شده است. در این روش اگر در یک قسمت از خط مترو چند قطار در حالت شتاب‌گیری و دقیقاً در همان زمان چند قطار در حالت ترمز‌گیری باشند، مقدار قابل توجهی از انرژی ترمز قطارهای در حال ترمز‌گیری در قطارهای در حال شتاب‌گیری قابل استفاده است و مقدار کمتری از توان ترمز دینامیک قطارها تلف می‌شود. بازیابی انرژی ناشی از ترمز گذرا قطارهایی که به ایستگاه راه آهن مقصد رسیده‌اند در [۲۱] اشاره شده تا یک ریزشبهک راه آهن متصل به مدار کشش را به منظور تامین شارژ ناوگان وسایل نقلیه الکتریکی تغذیه کند. ریزشبهک راه آهن در مورد پیکربندی مبدل پل دوگانه فعال به منظور تنظیم جریان برق در طول یک بازیابی انرژی گذرا بررسی شده است. مبدل در ریزشبهک به همراه ذخیره باتری برای ایجاد پایداری ولتاژ با توجه به شرایط عملکرد میکرو شبکه استفاده شده است.

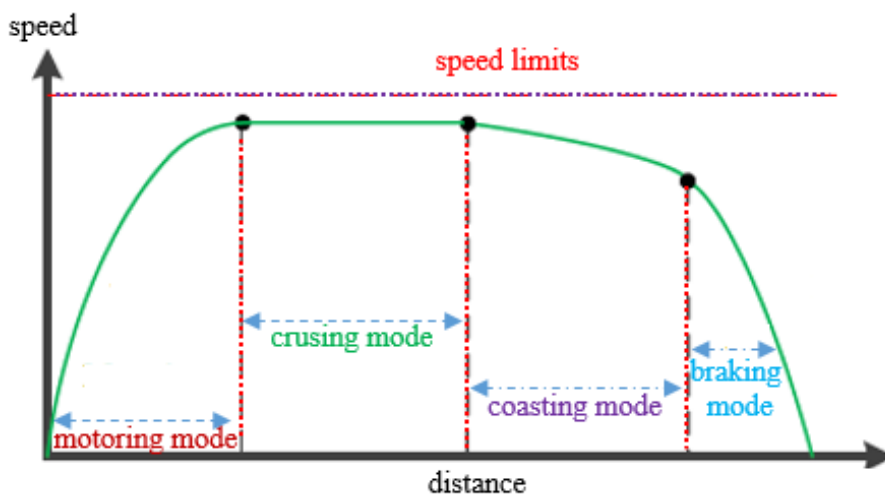
بررسی‌های انجام شده در متروی اصفهان نشان می‌دهد که تقریباً نیمی از انرژی ترمز دینامیک قطارها در مقاومت‌های ترمز به گرما تبدیل می‌شوند که به‌طور تقریبی در هر ماه به چند مگاوات می‌رسد که مقدار قابل توجهی است. در این مقاله روشی بر اساس انتقال توان از طریق تزویج القایی برای بازیابی انرژی ترمز دینامیک قطارهای شهری ارائه شده است. در این روش توان تولیدی توسط ترمزهای قطار به جای تلف شدن در مقاومت‌های ترمز، توسط یک مدار الکترونیک قدرت به خارج از قطار منتقل می‌شود و جهت مصرف در ایستگاه‌های مترو استفاده می‌شود. اگرچه این روش برای قطارهای مغناطیسی در کشورهایی مانند چین بررسی و به کارگیری شده، اما



برای اولین بار برای متروهای رایج (متروهای غیرمغناطیسی) مانند مترو اصفهان مطرح شده است. ساختار مقاله در ادامه به این شرح است. در قسمت دوم ساختار قطار برقی و چهار حالت عملکرد آن بیان شده است. در قسمت سوم بازیابی انرژی ترمز قطار اشاره شده است. در قسمت چهارم روابط مربوط به قطار به طور مختصر و روش پیشنهادی آمده است. در قسمت پنجم نتایج شبیه‌سازی با پیاده‌سازی مدل در سیمولینک متلب نشان داده شده است. در قسمت ششم به ازای تغییرات پارامترها نتایج شبیه‌سازی کشش و ترمز قطار نشان داده شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات در قسمت هفتم بیان شده است.

۲- ساختار قطار برقی

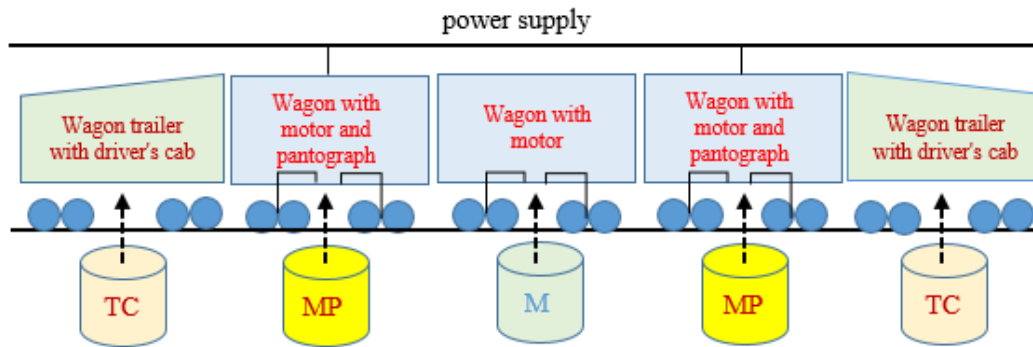
سیستم‌های مترو معمولاً از طریق تونل‌های زیرزمینی کار می‌کنند. اجزای اصلی یک قطار درون شهری شامل عناصر ساختاری مانند پایه‌ها و تیرهای انتقال برق برای سیستم‌های مترو مرتفع، سیستم کشش^۶ متشکل از موتورهای جریان متناوب و اینورترها، دستگاه‌های نظارت بر توان الکتریکی با سیستم‌های تشخیص ولتاژ و جریان، سیستم‌های ذخیره‌سازی و سیستم‌های ارتباطی است. چهار حالت عملیاتی به طور معمول برای قطار مطابق شکل (۱) وجود دارد که عبارتند از حالت شتاب، حالت سرعت ثابت (کروز^۷)، حالت دنده خلاص^۸ و حالت ترمز [۲۲،۲۳]. انرژی جنبشی چرخ در ترمز دینامیک با استفاده از حالت ژنراتوری موتور کشش در زمان اعمال ترمز دینامیک به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود که مقداری از انرژی تولیدی به شکل جریان به سایر قطارهای موجود در خط انتقال پیدا می‌کند و مقدار باقیمانده در مقاومت‌های ترمزی به صورت گرما تلف می‌شود [۲۴].



شکل (۱): چهار مد عملیاتی قطار بر حسب سرعت و فاصله

ساختار قطارهای مترو بر اساس نوع بهره‌برداری و ظرفیت مسافری شهر متفاوت هستند. در مطالعه موردی مترو اصفهان، قطارهای مترو شامل پنج واگن است. تغذیه سیستم قطارها از طریق شبکه بالاسری انجام می‌شود. برای سیستم برق‌رسانی به قطار درون شهری از شبکه dc و برای قطار بین‌شهری از شبکه ac استفاده می‌شود. برای تغذیه قطار در سیستم‌های ریلی شهری ولتاژهای ۷۵۰ و ۱۵۰۰ و ۳۰۰۰ ولت dc معمولاً استفاده می‌شود که در مترو اصفهان این ولتاژ ۱۵۰۰ ولت است.

شکل (۲) ساختار قطار درون شهری اصفهان و قسمت‌های مختلف آن را نشان می‌دهد که در آن TC نشان‌دهنده واگن تریلر (بدون موتور) و دارای کابین راهبری^۹، M نشان‌دهنده واگن موتور دار و MP نشان‌دهنده واگن موتوردار دارای پانتوگراف^{۱۰} برای انتقال برق بالاسری به قطار است. پانتوگراف وسیله بالای واگن‌های MP است که به خط برق بالاسری وصل می‌شود و برق را به قطار انتقال می‌دهد. در قطارهای درون شهری به شتاب اولیه بالا و سرعت گرفتن سریع قطار نیاز است و هر واگن موتوردار خود کشش بوده و دارای موتور مستقل است [۲۵]. برای رسیدن به شتاب اولیه بالا و سرعت گرفتن سریع قطار باید از موتورهای جریان مستقیم با اتصال سری (مانند قطار مترو در تهران) استفاده شود و یا از موتورهای آسنکرون قفس سنجابی^{۱۱} (مانند قطار مترو در اصفهان) که توسط اینورترهای قدرت تغذیه می‌شوند، استفاده شود.



شکل (۲): شماتیک قطار درون شهری اصفهان با ۵ واگن

۳- بازیابی انرژی ترمزی سیستم قطار شهری

با افزایش مصرف انرژی کشتی امکان ایجاد مشکل هزینه عملیات برای اپراتورهای سیستم حمل و نقل ریلی شهری وجود دارد. نیمی از انرژی مصرف شده در عملیات مترو مربوط به کشش قطار است. کاهش انرژی کشش قطار باعث کاهش تلفات و افزایش انرژی احیاکننده مجدد می‌شود [۲۶]. مسئله بازیابی انرژی ترمز دینامیک در قطارهای شهری از روش‌های با اهمیت در بهبود مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل ریلی است که در سال‌های اخیر با توجه به افزایش هزینه‌های تولید انرژی و پایان‌پذیری منابع فسیلی مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای بازیابی انرژی ترمزی می‌توان به کاهش خوردگی کفشک ترمز و چرخ، ذخیره‌سازی انرژی، کاهش صداهای ناشی از ترمز هوایی و افزایش راحتی مسافران به علت سرعت یکنواخت اشاره نمود [۲۷، ۲۸].

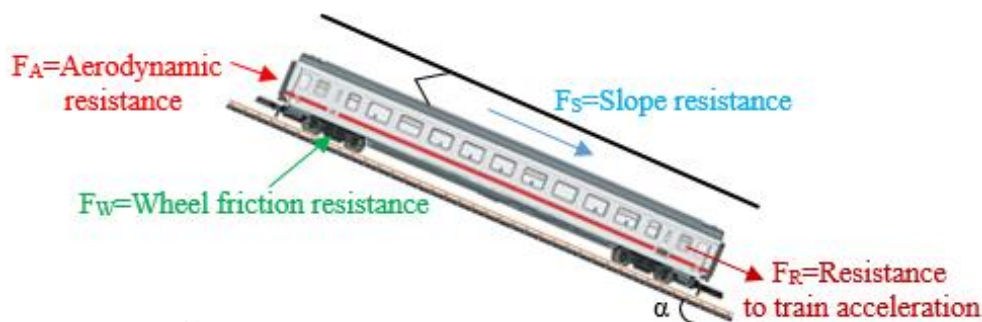
عملکرد ترمز دینامیکی در قطارهای بین شهری در سرعت‌های بالا (بر اساس نوع تجهیزات قطار، معمولاً سرعت‌های بیشتر از ۲۰ کیلومتر بر ساعت) به این صورت است که در هنگام اعمال ترمز به قطار، موتورهای قطار به ژنراتور تبدیل شده و تولید توان می‌کنند که با توجه به قابلیت شبکه، مقداری از آن به شبکه اصلی بازگردانده می‌شود. برای اینکه موتور به حالت ژنراتوری تبدیل شود باید سرعت میدان دوار روتور بیشتر از سرعت میدان دوار استاتور شود. برای حالت موتوری سرعت سنکرون n_s بیشتر از سرعت روتور n_r و در حالت ژنراتوری n_r بیشتر از n_s است. سرعت سنکرون با فرکانس متناسب و با تعداد قطب رابطه معکوس دارد. بنابراین برای تبدیل حالت موتوری به حالت ژنراتوری باید تعداد قطب و یا مقدار فرکانس تغییر کند. تعداد قطب که مقداری ثابت دارد و در هنگام ساخت و طراحی موتور در نظر گرفته شده و قابل تغییر نیست. بنابراین برای کاهش سرعت میدان دوار استاتور نیاز به تغییر فرکانس است. تغییر فرکانس از طریق اینورترهای قطار امکان‌پذیر است. با کم کردن تدریجی فرکانس، سرعت میدان دوار استاتور کمتر از سرعت میدان دوار روتور شده و موتور به حالت ژنراتوری تبدیل می‌شود و انرژی حرکتی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند، لذا با دریافت این توان از ژنراتور و مصرف آن سرعت کاهش پیدا خواهد کرد. مسئله اصلی توانایی شبکه برای بازگردانی انرژی ترمز دینامیکی است. ولتاژ جریان متناوب در پست‌های برق مترو به ولتاژ جریان مستقیم تبدیل می‌شود و خطوط تامین برق مترو نیز جریان مستقیم است، بنابراین محدود بودن توانایی خطوط در پذیرش انرژی تولیدی ترمز دینامیکی را به همراه دارد. این محدودیت به ولتاژ خط، چگالی ترافیک خط و موقعیت قطارها نسبت به یکدیگر بستگی دارد. لذا در زمان افزایش انرژی ترمز دینامیکی، انرژی اضافی به علت ساختار یک‌طرفه مبدل‌ها نمی‌تواند به خط تغذیه جریان متناوب انتقال پیدا کند. بنابراین خطوط دچار مشکل عدم پذیرش می‌شوند و به ناچار انرژی به سمت بانک‌های مقاومت ترمزی قطار هدایت شده و در مقاومت‌ها از بین می‌رود [۲۹، ۳۰]. در سال‌های اخیر از روش‌های مختلفی مانند نصب باتری در قطار و نصب خازن برقی دو لایه در قطار برای ذخیره‌سازی استفاده شده است [۳۱، ۳۲]، در حالی که به علت وزن و حجم باکس‌های المان‌های فوق، امکان خارج شدن قطار از تعادل وجود دارد و همچنین به علت افزایش وزن، مصرف انرژی برای حرکت قطار افزایش پیدا می‌کند و لذا بهینه‌سازی مصرف انرژی به خوبی انجام نمی‌شود.

۴- روش پیشنهادی

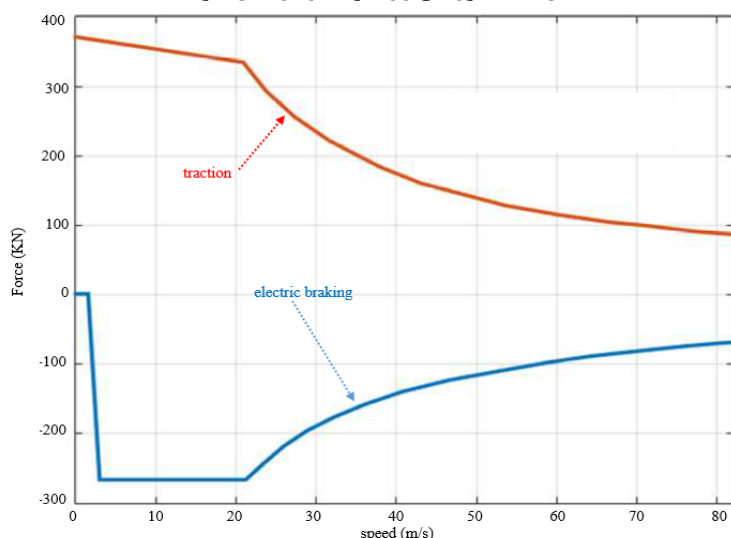
از پارامترهایی که بر رفتار دینامیکی قطار تأثیر دارند می‌توان به موقعیت قطار در مسیر، وزن قطار بدون و با مسافر، سرعت لحظه‌ای قطار و شتاب لحظه‌ای قطار^{۱۲} و همچنین سطح درخواست ترمز قطار و سطح کشش قطار و نیز شیب مسیر قطار اشاره کرد [۳۳]. شکل

(۳) نیروهای موثر در حرکت قطار را نشان می‌دهد که بر حداکثر سرعت و توانایی شتاب‌گیری قطار تأثیر دارند این نیروها عبارتند از: مقاومت در برابر شتاب قطار^{۱۳} (F_R)، مقاومت در اثر شیب^{۱۴} (F_S)، مقاومت در برابر اصطکاک چرخ^{۱۵} (F_W) و نیروی مقاوم در برابر حرکت قطار^{۱۶} (F_A). نیروهای F_W ، F_S و F_R با جرم قطار متناسب هستند. نیروهای F_W و F_S به ترتیب با کسینوس و سینوس زاویه شیب α متناسب هستند [۳۴،۳۵]. نیروی مقاوم نهایی (F_T) برابر است با:

$$F_T = F_R + F_S + F_W + F_A \quad (1)$$



شکل (۳): نیروهای وارد بر قطار در حال حرکت



شکل (۴): کشش و ترمز الکتریکی بر حسب سرعت

جدول (۱): حالت‌های مختلف حرکت قطار

کمیت بخش	حالت حرکت قطار	رابطه نیرو	زمان بر حسب ثانیه
اول	کشش	$C = f_q - w_i - w_r - w_s - w_o$	۱ الی ۲۵
دوم	خلاص	$C = -w_i - w_r - w_s - w_o$	۱ الی ۰/۸
سوم	ترمز	$C = w_i - w_r - w_s - w_o - w_z$	تا زمان ایستادن

نیروی کشش^{۱۷} و نیروی ترمز^{۱۸} الکتریکی در شکل (۴) بر حسب سرعت نشان داده شده است که در آن نامتقارن بودن مشخصه ترمز نسبت به کشش قابل مشاهده است. نیروی کشش در واحد وزن F_T از درون‌یابی خطی مطابق رابطه زیر بین دو نقطه (V_1, F_1) و (V_2, F_2) در سرعت V_Y تعیین می‌شود:

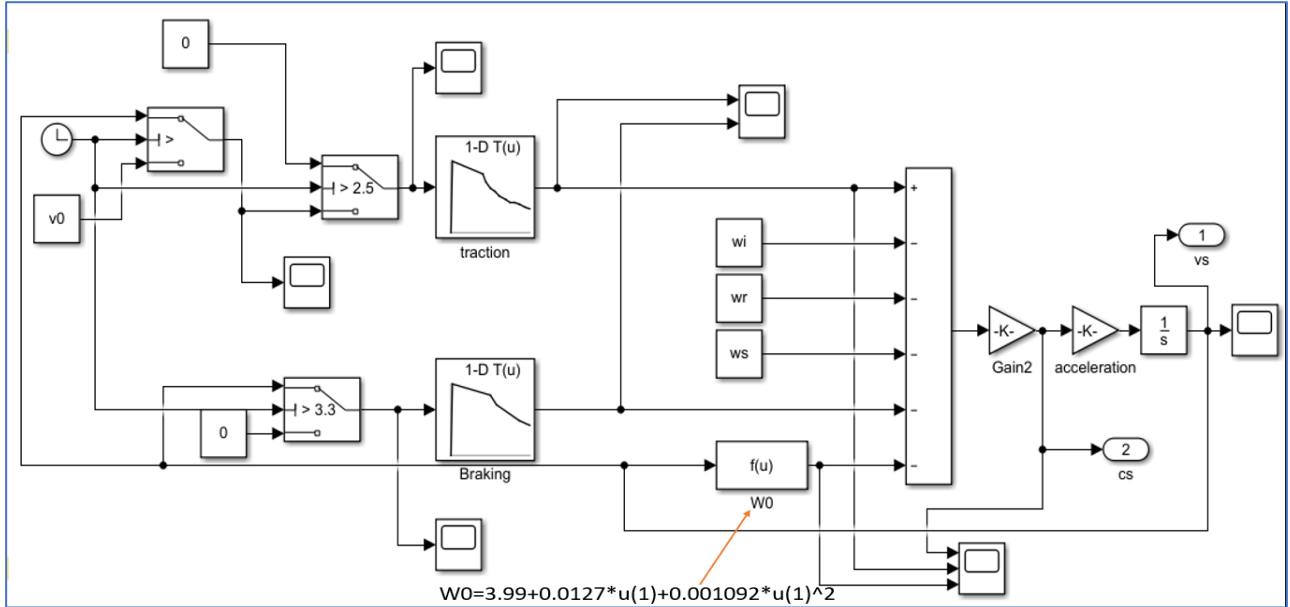
$$F_T = F_1 + \frac{F_2 - F_1}{V_2 - V_1} (V_Y - V_1) \quad (2)$$

به‌طور مشابه نیروی ترمز احیا کننده W_Z در سرعت V_Z از درون‌یابی خطی بین دو نقطه (V_1, W_1) و (V_2, W_2) از رابطه زیر در سرعت V_Z تعیین می‌شود [۳۶]:



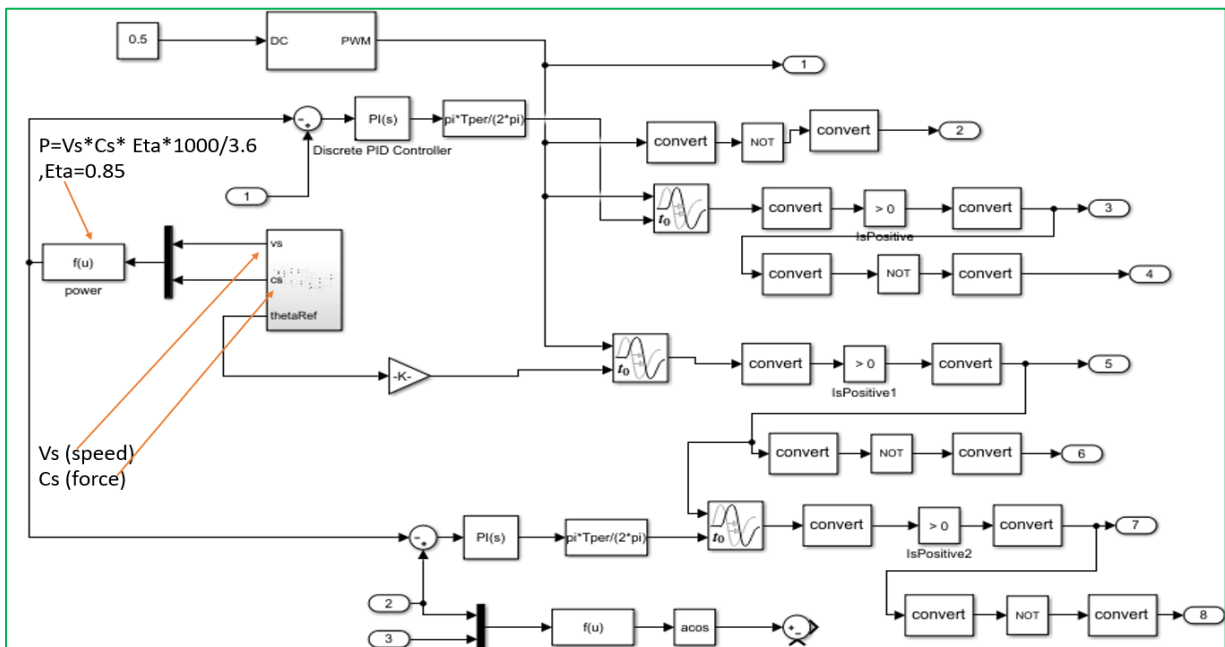
$$W_z = W_1 + \frac{W_2 - W_1}{V_2 - V_1} (V_z - V_1) \quad (3)$$

شکل (۵) مدل قسمت مکانیکی قطار پیاده‌سازی شده در محیط سیمولینک متلب را نشان می‌دهد که در آن نیروهای W_s ، W_r و W_f به ترتیب مقاومت شیب خط در برابر عبور قطار، مقاومت قوس خط و مقاومت اصطکاک تونل هستند همانطور که مشاهده می‌شود، این مدل شامل سه حالت کششی، دنده خلاص و ترمزی است که برای هر قسمت زمان مشخصی در نظر گرفته شده و در جدول (۱) این سه حالت شان داده شده است. با توجه به رابطه‌های نیروی کشش f_q و نیروی ترمز w_z در هر زمان مقدار نیروی مشخصی به قطار اعمال می‌شود.



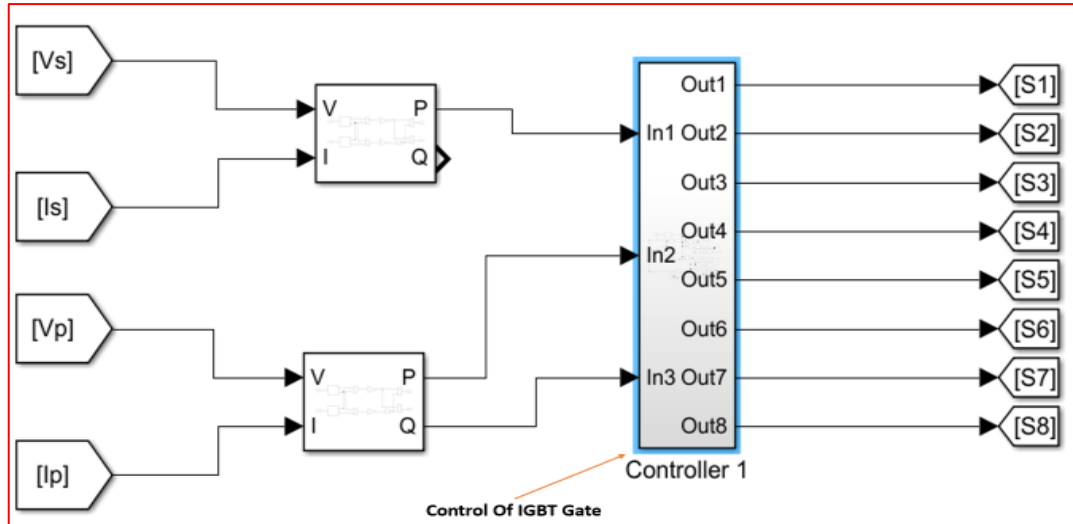
شکل (۵): مدل قسمت مکانیکی قطار در محیط سیمولینک متلب

با توجه به خروجی مدار شکل (۵) که V_s و C_s را نشان می‌دهد (که C_s مقدار نیرو و V_s مقدار سرعت قطار می‌باشد) و با استفاده از رابطه توان ترمزی P_z و توان کششی P_s که در روابط (۴) و (۵) آمده است، قسمت الکتریکی پیاده‌سازی می‌شود. شکل (۶) پیاده‌سازی قسمت الکتریکی برای تحریک IGBTها را نشان می‌دهد و در شکل (۷) ولتاژ و جریان ورودی با مقدار مرجع مقایسه شده و تحریک هشت گیت IGBT انجام می‌شود.



شکل (۶): پیاده‌سازی مدل قسمت الکتریکی مدار در محیط سیمولینک متلب





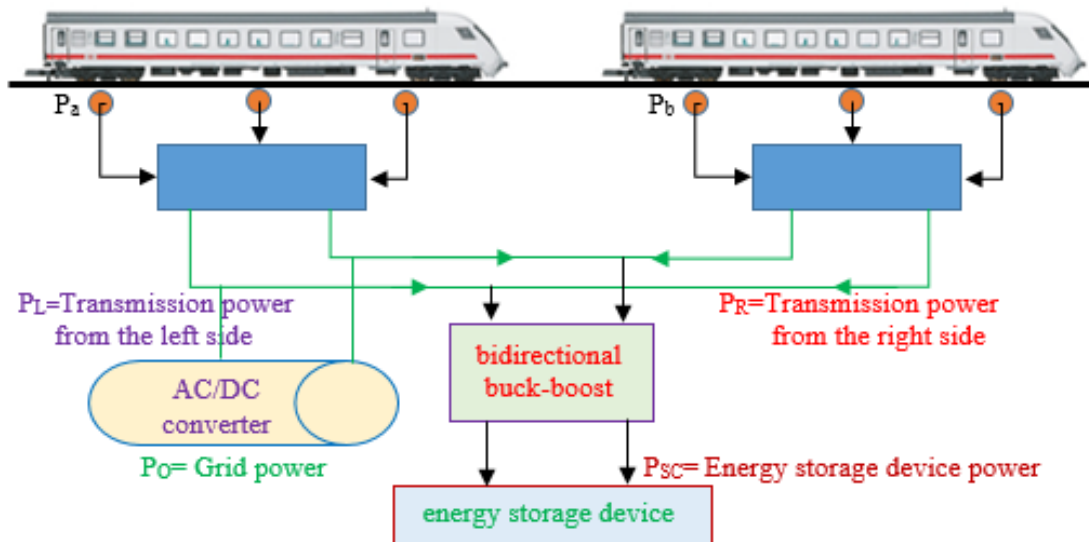
شکل (۷): مدل قسمت الکتریکی در محیط سیمولینک متلب

$$P_Z = \frac{1000 C_S V_S}{3.6} \eta \quad (۴)$$

$$P_S = \frac{1000 C_S V_S}{3.6 \eta} \quad (۵)$$

η مقدار بهره سیستم کششی قطار می‌باشد که در این مدل ۰/۸۵ در نظر گرفته شده است. در این مقاله از روش انتقال توان از طریق تزویج القایی^{۱۹} (ICPT) برای بازیابی انرژی ترمزی استفاده شده است. در این سیستم برای ایجاد یک تزویج خوب، سیم‌پیچ‌ها از طریق یک هسته مغناطیسی مشترک به هم متصل نمی‌شوند، بلکه روی یک هسته بزرگ از هم جدا می‌شوند [۳۷،۳۸]. از القای مغناطیسی در ترانسفورماتورهایی که به طور خاص برای این منظور ساخته شده‌اند برای پیاده‌سازی این سیستم استفاده می‌شود. در این ترانسفورماتورها انتقال انرژی از طریق هوا و به صورت القایی از سیم‌پیچ اولیه به ثانویه انجام می‌شود که معمولاً فاصله زیادی بین اولیه و ثانویه وجود دارد. این ترانسفورماتورها با توجه به تزویج خوب بین سیم‌پیچ‌ها، بسیار متفاوت از ترانسفورماتورهای معمولی است [۳۹،۴۰].

در این روش معایبی مانند اختلال در تعادل قطار و افزایش وزن قطار وجود ندارد. سیستم ICPT از یک مدار الکترونیک قدرت دوطرفه تشکیل شده که اولیه آن قطار و ثانویه آن خط و ایستگاه مترو است. سیم‌پیچ اولیه در زیر قطار تعبیه می‌شود تا در هنگام ترمزگیری انرژی از طریق آن به سیم‌پیچ ثانویه که خارج از قطار و در خط تعبیه شده است انتقال یابد. سیم‌پیچ ثانویه به مدار شارژ باتری ایستگاه‌ها متصل است و باتری‌ها را شارژ می‌کند. با توجه به طراحی مناسب قطارهای مترو و تنظیم ارتفاع اتوماتیک آن‌ها، ارتفاع قطار از سطح ریل تغییر نمی‌کند و طراحی و استفاده از این روش بسیار مناسب و کاربردی است. اما در عمل تعیین متغیرهای سیم‌پیچ‌ها و فرکانس تشدید کار ساده‌ای نخواهد بود و نیاز به محاسبات پیچیده و کنترل‌کننده مقاوم برای حفظ پایداری سیستم است [۴۱،۴۲]. این مدار برای شارژ باتری خودروهای الکتریکی و نیز در قطارهای مغناطیسی مورد استفاده قرار گرفته است، اما ایده اصلی، استفاده از این روش در قطارهای مترو (مطالعه موردی در مترو اصفهان) بررسی و شبیه‌سازی شده است که ساختاری جدید برای بهینه‌سازی انرژی ترمز دینامیک قطارها ارائه می‌شود. شکل (۸) روش پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آن P_a و P_b نشان دهنده توان‌های ترمز دینامیک قطارها هستند که توسط سلف‌های تزویج شده از قطار به ایستگاه‌ها انتقال پیدا می‌کند. توان‌های انتقالی از سمت راست و سمت چپ به ترتیب با P_L و P_R و توان دستگاه ذخیره کننده انرژی با P_{SC} نشان داده شده است. همچنین توان شبکه برق با P_O نمایش داده شده است [۴۳]. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود سلف اولیه داخل قطار و زیر قطار تعبیه شده و به مدار اولیه داخل قطار متصل شده است. سلف ثانویه در خط قرار دارد و توان ترمزی پس از عبور از سلف ثانویه به مدار اینورتر ثانویه انتقال یافته و خروجی آن به مدار شارژ باتری ایستگاه‌ها منتقل می‌شود.

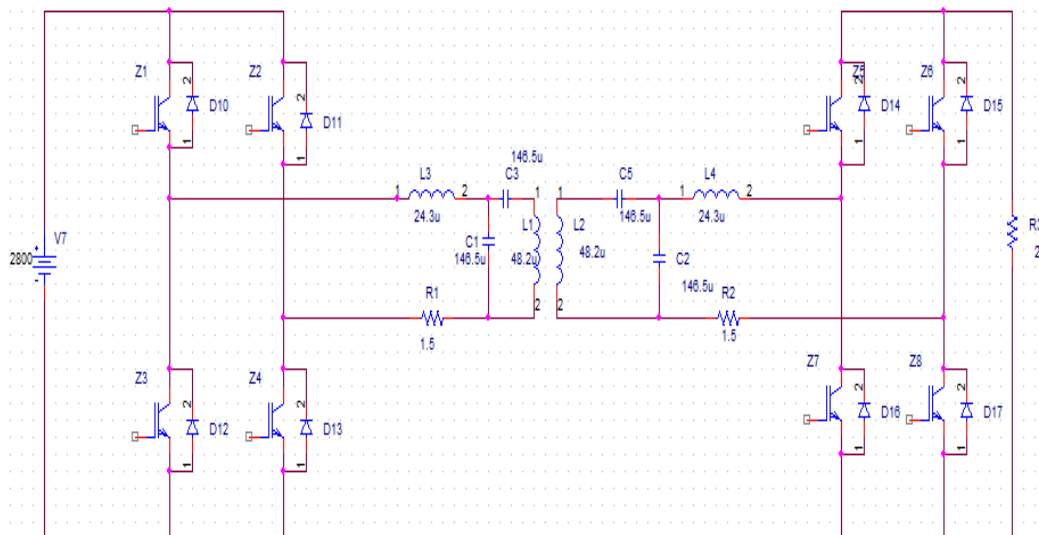


شکل (۸): روش پیشنهادی انتقال توان برای بازیابی انرژی ترمز در نرم افزار اورکد

۵- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی سیستم پیشنهادی برای برنامه‌ریزی و توسعه سیستم ریلی قبل از ساخت و آزمایش واقعی ضروری است. نمایش دقیق مشخصات مسیر قطار بر اساس موقعیت قطار در اثر سیستم قدرت راه‌آهن و تغییرات بار دینامیکی مشکل است. با توجه به نیاز به بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل ریلی، امروزه استفاده از ترمز دینامیکی در قطارهای برقی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از ترمزهای دینامیکی جهت بازگرداندن انرژی حاصل از ترمز الکتریکی به شبکه توزیع استفاده می‌شود. مدل مدار مبدل دوطرفه برای انتقال توان به روش تزویج القایی مورد استفاده در روش بازیابی انرژی ترمزی در شکل (۹) نشان داده شده است. این مدار از یک اینورتر در ورودی و یک اینورتر در خروجی تشکیل شده است. در این مدار انتقال توان توسط سیم‌پیچ‌های تزویج شده از ورودی به خروجی انجام می‌شود، به عبارت دیگر توان تولید شده توسط ترمز دینامیک از اولیه که قطار است به مدار ثانویه که در ایستگاه جانمایی شده است انتقال پیدا می‌کند. ولتاژ خط مترو اصفهان دارای ولتاژ ۱۵۰۰ ولت است. پارامترهای استفاده شده برای شبیه‌سازی در جدول (۲) آمده است. این پارامترها بر اساس یک نوع قطار در [۴۴] انتخاب شده‌اند با این تفاوت که ولتاژ کاری مدار برای مترو اصفهان ۱۵۰۰ ولت است.

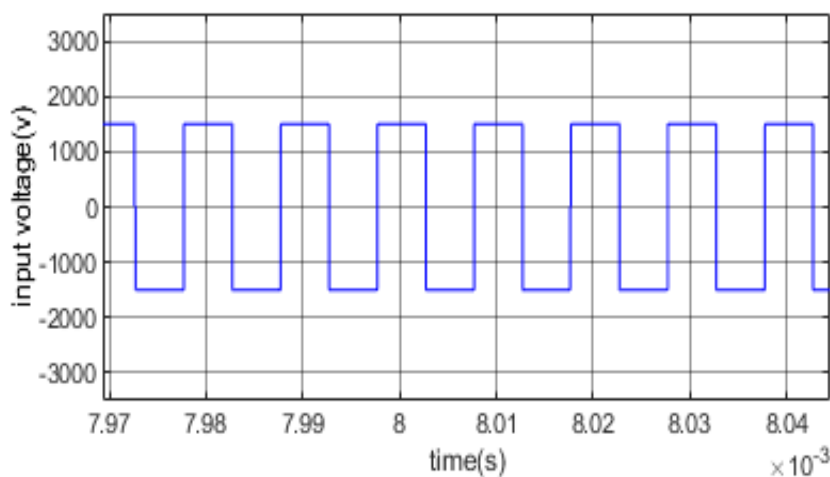
ولتاژ و جریان ورودی به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. ولتاژ و جریان خروجی به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقادیر ولتاژ و جریان ورودی و خروجی مدار مبدل دوطرفه یکسان است و به عبارت دیگر مبدل دوطرفه به صورت درست عمل می‌کند و توان را از اولیه به ثانویه منتقل کرده است. بنابراین توان ترمزی قطار به مصرف‌کننده‌های ایستگاه منتقل می‌شود. با توجه به رابطه توان (متناسب با حاصل ضرب ولتاژ و جریان) و با استفاده از نتایج موج‌های جریان و ولتاژ ورودی، توان ورودی مبدل تعیین می‌شود. قابل ذکر است که مقدار توان ورودی مبدل، متغیر و بر حسب میزان ترمزگیری افزایش یا کاهش پیدا می‌کند که در این مدار مقدار حداکثر توان ورودی در نظر گرفته شده و نتایج شبیه‌سازی مدار تعیین شده است. به طور مشابه با استفاده از نتایج موج‌های جریان و ولتاژ خروجی، توان خروجی مبدل تعیین می‌شود. در این حالت توان خروجی مبدل بر حسب توان ورودی قابل محاسبه است. اگر المان‌های مدار ایده‌آل در نظر گرفته شود، تمام توان ورودی در خروجی ظاهر می‌شود و به عبارت دیگر نحوه کار درست مدار را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بر اساس وجود حداکثر توان ورودی به مبدل تعیین شده که در حالت واقعی این مقدار بر حسب میزان ترمزگیری متفاوت است. شکل (۱۴) نمایش دهنده اطلاعات مربوط به قطار مترو اصفهان است که از صفحه نمایشگر صنعتی رابط انسان و ماشین^{۲۰} (HMI) قطار تصویربرداری شده است. پارامتر توان که در ردیف ۱۱ نشان داده شده، میزان توان تلف شده در مقاومت‌های ترمزی^{۲۱} را نشان می‌دهد که مقدار قابل توجه آن اهمیت روش پیشنهادی و توجه و استفاده بهینه از آن را بیان می‌کند.



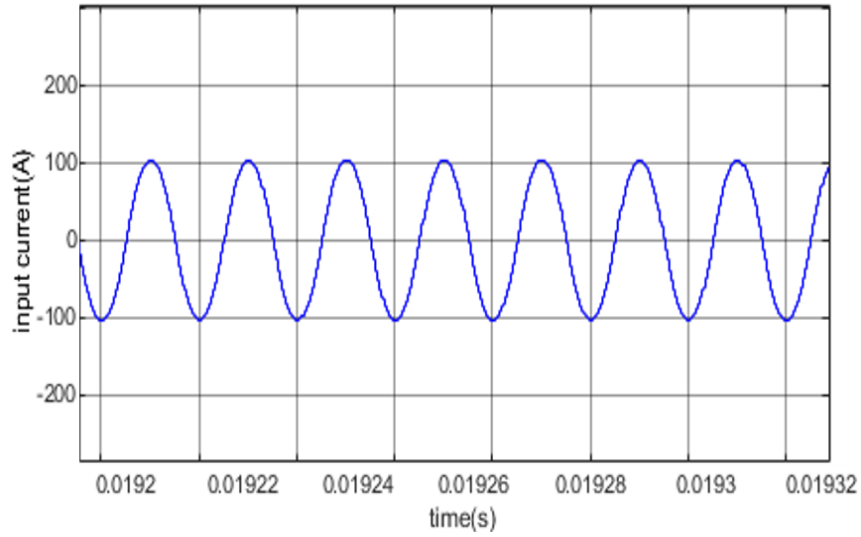
شکل (۹): پیاده‌سازی مدل مبدل دوطرفه

جدول (۲): پارامترهای سیستم مبدل دوطرفه

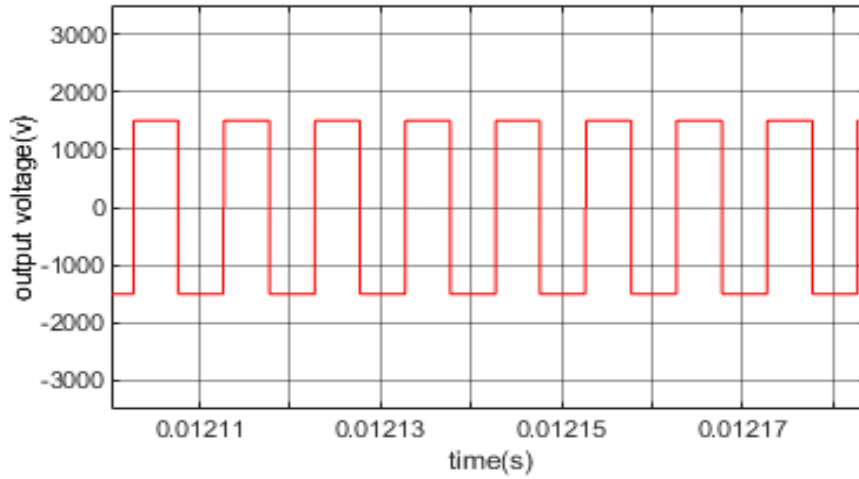
پارامتر	سمبل	مقدار	واحد
ولتاژ سمت فرستنده	U1	۱۵۰۰	V
خازن جبران ساز اولیه	C _{P1}	$۱۴۶/۵ \times ۱۰^{-۳}$	μF
خازن فیلتر اولیه	C _{P2}	$۱۴۶/۵ \times ۱۰^{-۳}$	μF
سلف اولیه فرستنده	L _{P1}	۲۸/۴	μH
سلف فیلتر اولیه	L _{P2}	۲۴/۳	μH
مقاومت مدار فرستنده	R _P	۱/۵	Ω
مقدار تزویج سیم‌پیچ‌ها	M	۱۶	μH
خازن جبران ساز ثانویه	C _{S1}	$۱۴۶/۵ \times ۱۰^{-۳}$	μF
خازن فیلتر ثانویه	C _{S2}	$۱۴۶/۵ \times ۱۰^{-۳}$	μF
سلف ثانویه گیرنده	L _{S1}	۴۸/۴	μH
سلف فیلتر ثانویه	L _{S2}	۲۴/۳	μH
مقاومت مدار گیرنده	R _S	۱/۵	Ω
فرکانس	f	۸۵	KHz



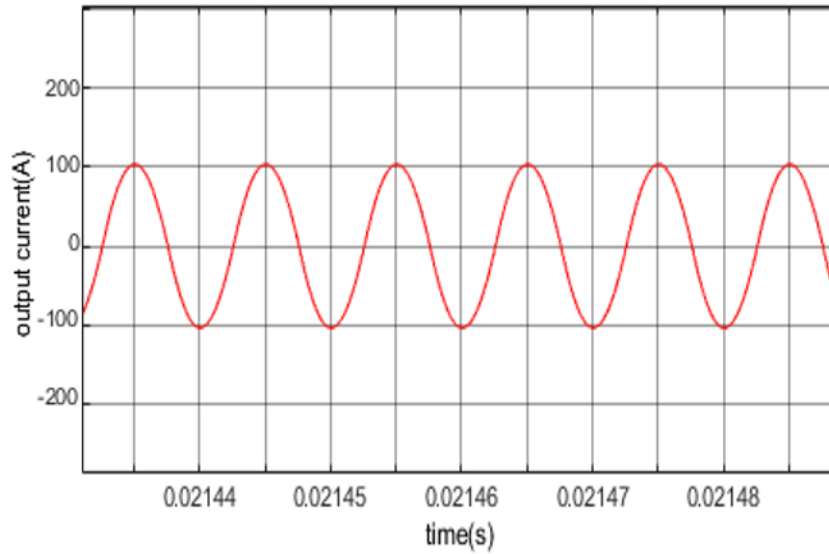
شکل (۱۰): ولتاژ ورودی مبدل دوطرفه



شکل (۱۱): جریان ورودی مبدل دوطرفه



شکل (۱۲): ولتاژ خروجی مبدل دوطرفه



شکل (۱۳): جریان خروجی مبدل دوطرفه



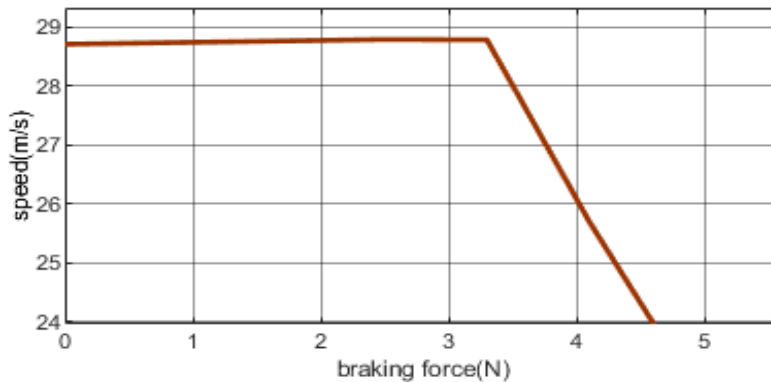
Operational data		
Component / System	Status	
1 Odometer	198857	km
2 Operational hours	9208	hrs
3 MCM Mp1 consumed energy	689	Mwh
4 MCM M consumed energy	690	Mwh
5 MCM Mp2 consumed energy	689	Mwh
6 Air compressor operational time Tc1	1171	hrs
7 Air compressor operational time Tc2	1123	hrs
8 ACM Tc1 consumed energy	157	Mwh
9 ACM M consumed energy	156	Mwh
10 ACM Tc2 consumed energy	156	Mwh
11 Resistor braking consumed energy	473	Mwh
12 Regeneration braking generated energy	790	Mwh

Active events

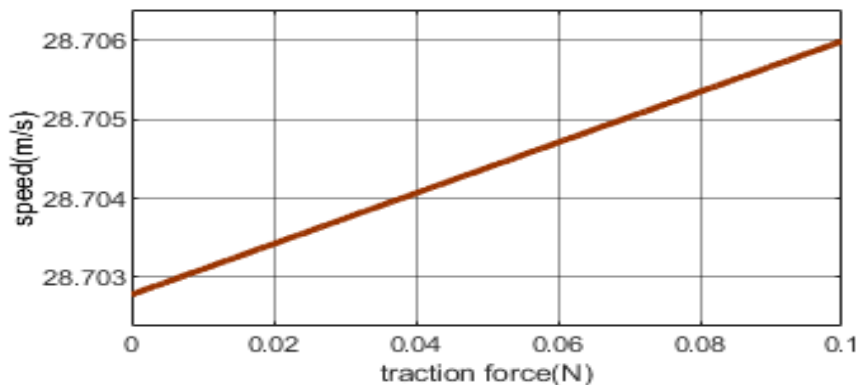
Doors Brakes / Air Prop/Auxd Battery HVAC PIS Public announcem. Operation Main menu

توان تلف شده در مقاومت‌های ترمزی قطار

شکل (۱۴): اطلاعات مربوط به HMI قطار مترو اصفهان



شکل (۱۵): نمودار ترمزی قطار در محیط متلب



شکل (۱۶): نمودار کششی قطار در محیط متلب

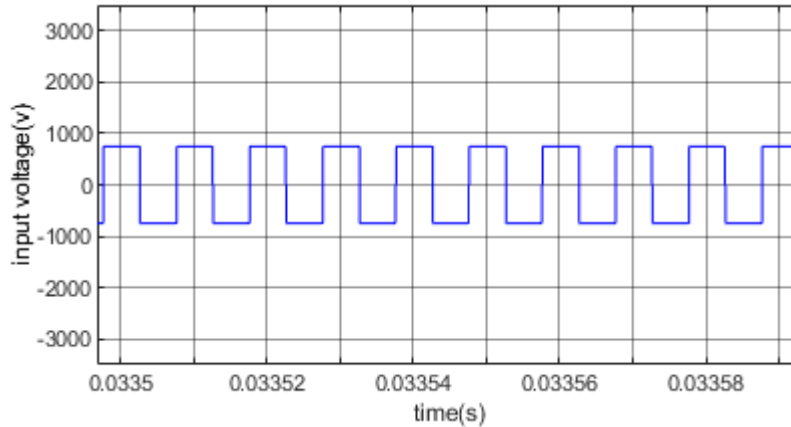
پارامترهای دیگر شامل مقدار کارکرد قطار (کیلومتر شمار^{۲۲}) برحسب کیلومتر بر ساعت ۱۹۸۸۵۷، کارکرد قطار (ساعات کاری^{۲۳}) برحسب ساعت ۹۲۰۸، انرژی تولید شده توسط مبدل‌های اول و دوم برحسب مگاوات-ساعت ۶۸۹ و ۶۹۰، مدت زمان کارکرد کمپرسورهای هوای^{۲۴} اول و دوم برحسب ساعت ۱۱۷۱ و ۱۱۲۳، انرژی تولید شده توسط مبدل‌های کمکی اول و دوم ۱۵۷ و ۱۵۶، انرژی بازیابی شده از انرژی ترمز برحسب مگاوات-ساعت ۷۹۰ است.



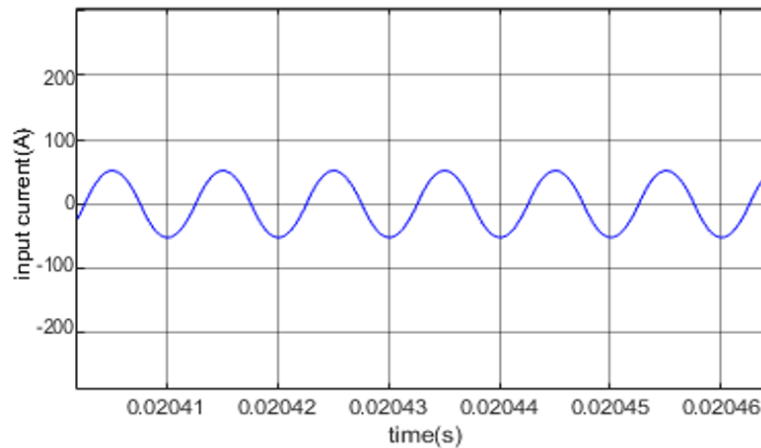
شکل (۱۵) نمودار سرعت قطار به ازای افزایش توان ترمزی را نشان می‌دهد که در آن کاهش سرعت با افزایش توان ترمزی مشاهده می‌شود. تغییرات سرعت به ازای افزایش توان کششی^{۲۵} در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان کششی، سرعت افزایش می‌یابد.

۶- تاثیر تغییرات پارامترها

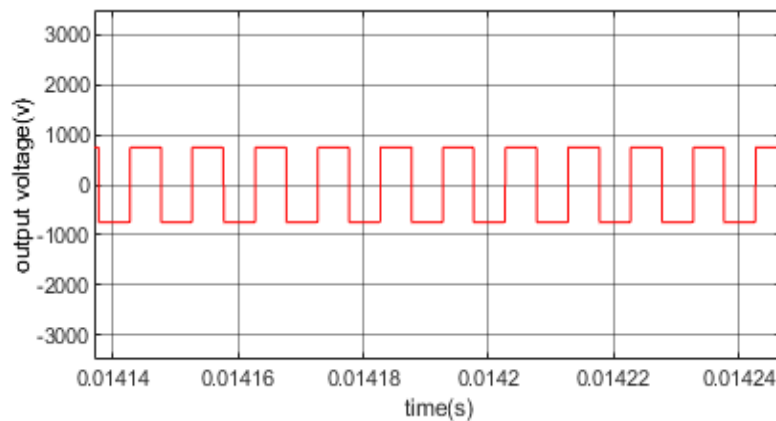
با توجه به اینکه قطارهای مترو تهران متفاوت و دارای ولتاژ خط ۷۵۰ ولت DC هستند، شبیه‌سازی سیستم مورد نظر بر اساس پارامترهای آن در شکل‌های (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. همچنین نمودار سرعت به ازای افزایش توان کششی و توان ترمزی در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۷): ولتاژ ورودی مبدل ۷۵۰ ولت

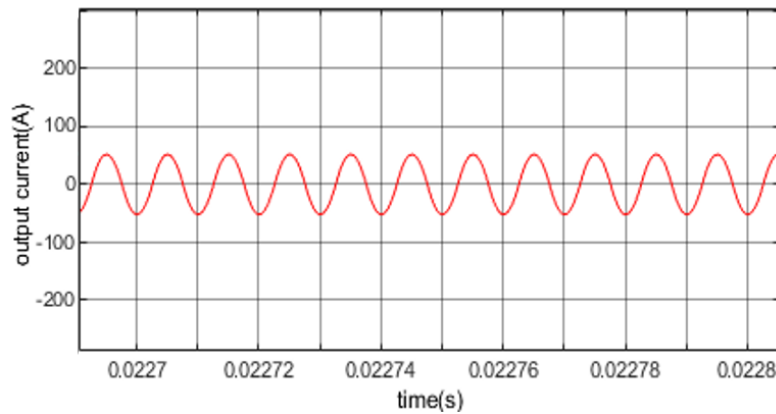


شکل (۱۸): جریان ورودی مبدل ۷۵۰ ولت

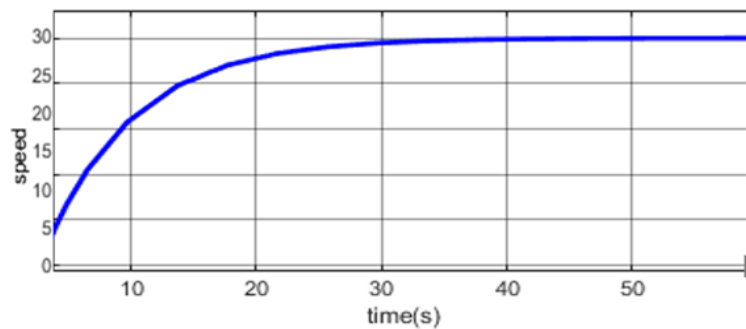


شکل (۱۹): ولتاژ خروجی مبدل ۷۵۰ ولت

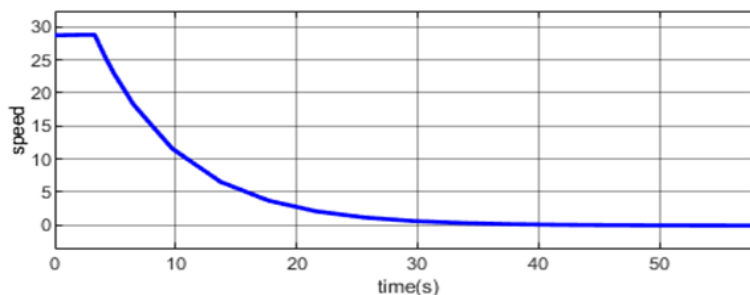




شکل (۲۰): جریان خروجی مبدل ۷۵۰ ولت



شکل (۲۱): نمودار افزایش سرعت به ازای افزایش توان کششی قطار در محیط متلب



شکل (۲۲): نمودار کاهش سرعت به ازای افزایش توان ترمزی قطار در محیط متلب

۷- نتیجه گیری

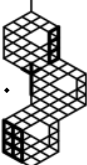
بازیابی و ذخیره سازی انرژی تولید شده در قطارهای متروی شهری با توجه به مصرف زیاد انرژی توسط این قطارها اهمیت فراوانی پیدا کرده است. توان زیادی از انرژی تولید شده ناشی از ترمز قطارهای متروی شهری قابلیت بازیابی و استفاده آن در شبکه اصلی را دارد. برای سیستم های قطار شهری که معمولاً در حال حرکت و ترمز هستند، استفاده مؤثر از بازیابی انرژی ترمز یک راه حل قابل توجه برای کاهش مصرف خالص انرژی است. به منظور افزایش بهره سیستم های ترمز دینامیکی در شبکه های جریان مستقیم، در این مقاله از روش تزویج القایی برای بازگشت انرژی ترمز دینامیک به چرخه بهره برداری بررسی شده است. در طرح ارائه شده انتقال انرژی به خارج از قطار با استفاده از روش القای مغناطیسی انجام شده و بهره برداری بهینه از انرژی صورت گرفته است. همچنین تا حد زیادی نیاز به تعمیر و نگهداری تجهیزات قطار کاهش پیدا می کند. با بررسی های میدانی انجام شده در مترو اصفهان و تعیین مقادیر واقعی از تجهیزات موجود، مشخص شد که در حال حاضر روزانه مقدار مصرف حدود ده هزار خانواده (مصرف روزانه هر خانواده حدوداً معادل ۶/۵ کیلووات است) معادل حدود ۱ مگاوات در مقاومت های ترمزی تلف می شود که آن را می توان با استفاده از روش فوق بازیابی نمود. البته با گسترش خطوط مترو مقدار بازیابی انرژی به نسبت افزایش قطارهای موجود در بهره برداری افزایش پیدا خواهد کرد. محاسبات برای بهره برداری از ۸ قطار مترو در یک خط که در حال حاضر در مترو اصفهان در حال بهره برداری می باشد، انجام شده است.



از داوران محترم مقاله که با نظرات ارزشمند خود بر کیفیت مقاله افزودند و همچنین از همکاران محترم در متروی اصفهان که ما را در این تحقیق یاری نمودند تشکر و قدردانی می‌نماییم.

مراجع

- [1] M. Jaberolansar, M.M. Rezaei, H. Khodadadi, S.M. Madani, "Optimizing the control of dfig based wind turbines using sensitivity analysis and particle swarm optimization method", *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 1, no. 3, pp. 75-90, Dec. 2022, doi: 10.30486/teeges.2022.1963760.1025.
- [2] S.A. Ardeh, M. Tabrizian, H. Shahmirzad, "Coordinated operation of gas-electricity integrated distribution network with CCHP and renewable energy sources", *Journal of Novel Researches on Smart Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 43-53, Dec. 2022, dor: 20.1001.1.23222468.1401.11.3.5.1.
- [3] A. Fathollahi, M. Gheisarnejad, B. Andresen, H. Farsizadeh, M.H. Khooban, "Robust artificial intelligence controller for stabilization of full-bridge converters feeding constant power loads", *IEEE Trans. on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 70, no. 9, pp. 3504-3508, Sept. 2023, doi: 10.1109/TCSII.2023.3270751.
- [4] G. Shahgholian, "A brief review on the application of the virtual impedance method in islanded alternating current microgrids to control reactive power sharing", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 11, no. 3, pp. 189-204, Sept. 2024, doi: 10.22104/hfe.2024.6989.1304.
- [5] Y. Yin, D. Li, Z. Han, S. Zhang, "Demand-driven flexible-periodicity train timetabling model and algorithm for a rail transit network", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 187, Article Number: 109809, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.cie.2023.109809.
- [6] Z. Tian, P. Weston, N. Zhao, S. Hillmansen, C. Roberts, L. Chen, "System energy optimisation strategies for metros with regeneration", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 75, pp. 120-135, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.trc.2016.12.004.
- [7] S. Yang, J. Wu, X. Yang, F. Liao, D. Li, Y. Wei, "Analysis of energy consumption reduction in metro systems using rolling stop-skipping patterns", *Computers and Industrial Engineering*, vol. 127, pp. 129-142, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.cie.2018.11.048.
- [8] Y. Lu, L. Yang, H. Yang, H. Zhou, Z. Gao, "Robust collaborative passenger flow control on a congested metro line: A joint optimization with train timetabling", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 168, pp. 27-55, Feb. 2023, doi:10.1016/j.trb.2022.12.008.
- [9] D. He, Y. Yang, Y. Chen, J. Deng, S. Shan, J. Liu, X. Li, "An integrated optimization model of metro energy consumption based on regenerative energy and passenger transfer", *Applied Energy*, vol. 264, Article Number: 114770, April 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114770.
- [10] X. Yang, Y. Li, X. Guo, M. Ding, J. Yang, "Simulation of energy-efficient operation for metro trains: A discrete event-driven method based on multi-agent theory", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 609, Article Number: 128325, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.physa.2022.128325.
- [11] M. Fooladgar, E. Rok-Rok, B. Fani, G. Shahgholian, "Evaluation of the trajectory sensitivity analysis of the DFIG control parameters in response to changes in wind speed and the line impedance connection to the grid DFIG", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 5, no. 20, pp. 37-54, March 2015, dor: 20.1001.1.23223871.1393.5.20.4.9.
- [12] G. Shahgholian, "A brief review on the application of the virtual impedance method in islanded alternating current microgrids to control reactive power sharing", *Hydrogen, Fuel Cell and Energy Storage*, vol. 11, no. 3, pp. 189-204, Sept. 2024, doi: 10.22104/hfe.2024.6989.1304.
- [13] G.M. Scheepmaker, R.M.P. Goverde, L.G. Kroon, "Review of energy-efficient train control and timetabling", *European Journal of Operational Research*, vol. 257, no. 2, pp. 355-376, March 2017, doi: 10.1016/j.ejor.2016.09.044.
- [14] X. Yang, X. Li, B. Ning, T. Tang, "A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 2-13, Jan. 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2447507.



- [15] B. Guan, H. Li, H. Yang, T. Zhang, X. Liu, X. Wang, "Leveraging cost-effectiveness of photovoltaic-battery system in metro station under time-of-use pricing tariff", *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, Article Number: 140268, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140268.
- [16] F. Shang, J. Zhan, Y. Chen, "An online energy-saving driving strategy for metro train operation based on the model predictive control of switched-mode dynamical systems", *Energies*, vol. 13, no. 18, Article Number: 4933, Sept. 2020, doi:10.3390/en13184933.
- [17] A. Trivella, F. Corman, "Modeling system dynamics of interacting cruising trains to reduce the impact of power peaks", *Expert Systems with Applications*, vol. 230, Article Number: 120650, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2023.120650.
- [18] R. Liu, S. Li, L. Yang, "Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy", *Omega*, vol. 90, Article Number: 101990, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.omega.2018.10.020.
- [19] E. Takahara, T. Wakasa, J. Yamada, "A study for electric double layer capacitor (EDLC) application to railway traction energy saving including change over between series and parallel modes", *Proceedings of the IEEE/PCC*, vol. 2, pp. 855-860, Osaka, Japan, April 2002, doi: 10.1109/PCC.2002.997632.
- [20] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, April 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [21] S. Menicanti, M. Benedetto, D. Marinelli, F. Crescimbin, "Recovery of trains' braking energy in a railway micro-grid devoted to train plus electric vehicle integrated mobility", *Energies*, vol. 15, no. 4, Article Number: 1261, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041261.
- [22] Y. Bai, Y. Cao, Z. Yu, T.K. Ho, C. Roberts, B. Mao, "Cooperative control of metro trains to minimize net energy consumption", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol. 21, no. 5, pp. 2063-2077, May 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2912038.
- [23] C. Sumpavakupa, T. Kulworawanichpong, "Multi-train movement simulation using MATLAB object-oriented programming", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 763, pp. 153-158, May 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.763.153.
- [24] S. Haładyn, "The problem of train scheduling in the context of the load on the power supply infrastructure: A case study", *Energies*, vol. 14, no. 16, Article Number: 4781, Aug. 2021, doi: 10.3390/en14164781.
- [25] M.E. Ari, İ. Esen, "Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method", *Demiryolu Mühendisliği*, no. 15, pp. 30-45, Jan. 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1018663.
- [26] S. Su, T. Tang, Y. Wang, "Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model", *Energies*, vol. 9, no. 2, Article Number: 105, Feb. 2016, doi:10.3390/en9020105.
- [27] G. Leoutsakos, A. Deloukas, K. Sarris, I. Apostolopoulos, C. Mamaloukakis, D. Kyriazidis, A. Bensmann, R. Hanke-Rauschenbach, "Metro traction power measurements sizing a hybrid energy storage system utilizing trains regenerative braking", *Journal of Energy Storage*, vol. 57, Article Number: 106115, Jan. 2023, doi:10.1016/j.est.2022.106115.
- [28] G.M. Scheepmaker, R.M.P. Goverde, "Energy-efficient train control using nonlinear bounded regenerative braking", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 121, Article Number: 102852, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.trc.2020.102852.
- [29] A. González-Gil, R. Palacin, 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, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.enconman.2013.06.039.
- [30] F. Cascetta, G. Cipolletta, A.D. Femine, J.Q. Fernández, D. Gallo, D. Giordano, D. Signorino, "Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train", *Measurement*, vol. 183, Article Number: 109793, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109793.
- [31] G. Zhang, Z. Tian, P. Tricoli, S. Hillmansen, Y. Wang, Z. Liu, "Inverter operating characteristics optimization for dc traction power supply systems", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 4, pp. 3400-3410, April 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2899165.
- [32] F. Meishner, D.U. Sauer, "Wayside energy recovery systems in dc urban railway grids", *eTransportation*, vol. 1, Article Number: 100001, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.04.001.



- [33] M. Ceraolo, G. Lutzemberger, "Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways", *Journal of Power Sources*, vol. 264, pp. 128-139, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.070.
- [34] M. Haghbin, F. Safaiy, V. Mahmoodi, "Practical modeling of existing trains in the shiraz metro using neural networks and PID-fuzzy controller for ATO system implementation", *International Journal of Railway Research*, vol. 10, no. 1, pp. 18-28, June 2023, doi: 10.22068/ijrare.317.
- [35] H.S. Hansen, M.U. Nawaz, N. Olsson, "Using operational data to estimate the running resistance of trains. Estimation of the resistance in a set of Norwegian tunnels", *Journal of Rail Transport Planning and Management*, vol. 7, no. 1-2, pp. 62-76, June/Sept. 2017, doi: 10.1016/j.jrtpm.2017.01.002.
- [36] R. Li, J. Wang, X. Zhao, X. Li, "Segmented power supply preset control method of high-speed rail contactless traction power supply system considering regenerative braking energy recovery", *Mathematical Problems in Engineering, Hindawi*, vol. 2020, pp. 1-15, Dec. 2020, doi: 10.1155/2020/6698688.
- [37] K.A. Kalwar, M. Aamir, S. Mekhilef, "Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging- A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 462-475, July 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.040.
- [38] A.F.A. Aziz, M.F. Romlie, Z. Baharudin, "Review of inductively coupled power transfer for electric vehicle charging", *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 14, pp. 3611-3623, Nov. 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.6011.
- [39] J. Xu, X. Li, Z. Xie, C. Fu, R. Du, "Design and analysis of inductively coupled power transfer system on mooring buoy with double ultracapacitor chargers using indirect control", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 67, no. 6, pp. 4836-4845, June 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2928249.
- [40] X. Ren, R. Liu, E. Tian, "T-S fuzzy model-based fault detection for inductively coupled power transfer systems with coil misalignment", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 73, pp. 1-10, 2024, Art no. 3501410, doi: 10.1109/TIM.2023.3331393.
- [41] L. Shi, Z. Yin, L. Jiang, Y. Li, "Advances in inductively coupled power transfer technology for rail transit", *CES Transa. on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 383-396, December 2017, doi: 10.23919/TEMS.2017.8241360.
- [42] C. Xia, W. Wang, S. Ren, X. Wu, Y. Sun, "Robust control for inductively coupled power transfer systems with coil misalignment", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 8110-8122, Sept. 2018, doi: 10.1109/TPEL.2017.2771532.
- [43] R. Li, X. Zhao, J. Wang, X. Li, "Research on energy distribution of regenerative braking in station for contactless traction power supply system based on bidirectional energy interaction ICPT system", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 203930-203944, Nov. 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3035092.
- [44] D.S. Hoo, K.H. Chua, Y.S. Lim, S. Morris, L. Wang, "Comparison of regenerative braking energy recovery of a DC third rail system under various operating conditions", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 155, Article Number: 109575, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109575.

زیر نویس ها

-
- ¹ Environmental
² Intercity train
³ Cruise trains
⁴ Brake energy recovery
⁵ Electric double layer capacitor
⁶ Traction system
⁷ Cruising mode
⁸ Coasting mode
⁹ Driving cabin
¹⁰ Wagon with pantograph
¹¹ Squirrel cage asynchronous motors
¹² Instantaneous train acceleration
¹³ Resistance against train acceleration
¹⁴ Slope resistance





- 15 Wheel friction resistance
- 16 Aerodynamic resistance
- 17 Traction force
- 18 Braking force
- 19 Inductively coupled power transfer
- 20 Human machine interface
- 21 Resistance braking energy consumed
- 22 Odometer
- 23 Operational hours
- 24 Air compressors operational time
- 25 Traction power

