نشریه علمی-تخصصی
پژوهش های نوین علوم مهندسی
ISSN: 2538-3809
سال هشتم، شماره ۳ (پیاپی: ۴۴)، تابستان ۱۴۰۲(ویژه نامه)

بررسی ویژگی‌های سیستم توزیع انرژی الکتریکی تغذیه کننده قطارهای برقی شهری

علی محمد زارع[1*]، قاسم رضائی[2]، مصطفی حدادی[3]، محمدجواد عظیمی موصلو[4]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷
کد مقاله: ۶۴۰۳۵

چکـیده

امروزه با توسعه سریع صنعت و شهری شدن کشورها با بحران انرژی و آلودگی زیست محیطی به عنوان مشکلات جدی مواجه هستند.از این رو استفاده از سیستم های حمل و نقل برقی به عنوان یکی از موثرترین راهکارها جهت کاهش استفاده از سوخت های فسیلی و متعاقباً کاهش آلودگی هوا و محیط زیست و همچنین افزایش ظرفیت جا به جایی مسافر در کشورهای پیشرفته پذیرفته شده است. هدف از این تحقیق بررسی ویژگی های سیستم توزیع انرژی الکتریکی تغذیه کننده قطارهای برقی شهری می باشد. این تحقیق از نوع توصیفی-تحلیلی می باشد. طرح اصل حفاظت سیستم های توزیع انرژی الکتریکی قطارهای برقی بر اساس حفاظت دیستانس صورت می گیرد زیرا حفاظت دیستانس ،بهترین دقیق ترین و سریع ترین سیستم حفاظتی در سیستم های قدرت محسوب می شود. نتایج تحقیق نشان می دهد که اندازه گیری های عملی کیفیت توان ارائه راهکارهای بهبود و استفاده از آن ها در این شبکه ها و بررسی نتایج استفاده از این روش ها در کنار مقایسه آنها با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده یکی دیگر از فعالیت های بسیار مفید در زمینه شبکه های تغذیه انرژی الکتریکی قطارهای برقی می تواند باشد. انجام این فعالیت ها با توجه به گسترش شبکه قطارهای برقی در ایران دارای اهمیت بسیار زیادی خواهد بود.

واژگـان کلـیدی: سیستم توزیع انرژی الکتریکی, تغذیه کننده قطار های برقی, قطارهای برقی شهری

۱- دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرقان(نویسنده مسئول)
zare.isi2023@gmail.com
۲- دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرقان
۳- دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرقان
۴- دانشجوی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زادشهر

۱- مقدمه

امروزه با توسعه سریع صنعت و شهری شدن کشورها با بحران انرژی و آلودگی زیست محیطی به عنوان مشکلات جدی مواجه هستند.از این رو استفاده از سیستم های حمل و نقل برقی به عنوان یکی از موثرترین راهکارها جهت کاهش استفاده از سوخت های فسیلی و متعاقباً کاهش آلودگی هوا و محیط زیست و همچنین افزایش ظرفیت جا به جایی مسافر در کشورهای پیشرفته پذیرفته شده است.قطارهای درون شهری (متروها) و همچنین خودروهای الکتریکی از مهمترین این سیستم ها به حساب می آیند. دی اکسید کربن تولید شده ناشی از جابه جایی مسافر برای هر اتومبیل برابر ۱۶۴ گرم و برای هواپیما ۱۰۸ گرم است.در حالی که این مقدار، برای سیستم ریلی تنها ۱۹ گرم است.(Kolomyjski, 2015) از طرف دیگر تا سال ۲۰۲۰ میلادی، خودروهای الکتریکی به عنوان یکی از اصلی ترین اجزا سیستم حمل و نقل در کشورهای پیشرفته شناخته خواهند شد، چراکه علاوه بر کاهش مصرف سوخت های فسیلی این خودروها خود می توانند به صورت یک تولید پراکنده انرژی عمل کرده و در شرایط نیاز شبکه، انرژی مازاد خود را به آن برگرداند. حال به منظور توسعه استفاده از خودروهای الکتریکی همانند خودروهای بنزینی، به ایستگاه های شارژی نیاز است که برای مصرف کنندگان، همانند پمپ بنزین های درون شهری عمل نموده و در سرتاسر شهر موجود باشند. استفاده از ایستگاه های شارژ سریع DC به عنوان بهترین ساختار جهت شارژ بلند مدت خودروها برای استفاده در مسافت های طولانی پیشنهاد نموده اند.علیرغم مزایای شبکه های حمل و نقل برقی این صنعت مصرف کننده بزرگ انرژی برای شبکه برق سراسری محسوب می شود، بنابراین توسعه آن به در نظر گرفتن زیرساخت های بزرگ و در نتیجه هزینه های بالا نیاز دارد. (Trindade, 2015) قطارهای برقی درون شهری و ایستگاه های شارژ سریع خودروهای الکتریکی در زمان پیک مصرف، تأثیرات منفی قابل توجهی بر شبکه سراسری دارند زیرا تفاوت زیاد مصرف برق توسط آنها در ساعات پیک و و غیر پیک می تواند مشکل زا باشد .از این رو در درخصوص حل مشکل شبکه های مترو و خودروهای الکتریکی به بررسی راهکارهایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان پرداخته می شود.هدف از این تحقیق بررسی ویژگی های سیستم توزیع انرژی الکتریکی تغذیه کننده قطار های برقی شهری می باشد.ابهری (۱۳۹۸) امروزه استفاده از قطارهای برقی به سبب مزایای مختلفی از جمله صرفه جویی در منابع انرژی، آلوده نکردن محیط زیست و کاهش بار ترافیک مسیرهای درون شهری و برون شهری رشد چشم گیری داشته است. سیستم قطارهای برقی بسته به نوع ترکشن موتورها مورد استفاده در آنها به دو نوع ac و dc تقسیم بندی می شوند. همچنین سیستم تغذیه آنها نیزبه دو صورت ریل سوم که به صورت dc است و شبکه بالاسری که بصورت ac تک فاز می باشد دسته بندی می شوند. یکی از اصلی ترین شاخص های کیفیت سیستم حمل و نقل ریلی میزان تاخیرات آنها در اعزام و دریافت قطارها می باشد و یکی از عوامل ایجاد تاخیرات، بروز اشکالات فنی در تجهیزات قطارهای برقی می باشد. (Tricoli, 2014)

از مهمترین اشکالات فنی که در سیستم قطارهای برقی وجود دارد، می توان به بروز اتصال کوتاه در تجهیزات اصلی سیستم قطارهای برقی نظیر ترکشن موتور و ترانسفورماتور و یا تجهیزات کمکی نظیر موتورهای خنک کننده ترکشن موتور و یکسو کننده ها اشاره کرد. با استفاده از محدودکننده های جریان ابررسانا مشخصه های جریان اتصال کوتاه، در زمان بسیار کم و در حدود نیم سیکل تشخیص و محدود گردیده و در نتیجه عملکرد ناوگان بهبود یابد. محدود کننده های جریان ابررسانا در حالت عادی مقاومت کمی در برابر جریان از خود نشان می دهند اما پس از وقوع اتصال کوتاه در لحظه اولیه شروع جریان، مقاومت آن به یکباره بزرگ شده و از بالا رفتن جریان اتصال کوتاه جلو گیری می کنند. همچنین از محدود کننده های جریان در سیستم کلیدهای قدرت خودکار،بهبود عملکرد ولتاژ تغذیه سیستم های قطار برقی نیز استفاده شده است.در شبکه های مترو درون شهری استفاده انرژی بازگشتی حاصل از ترمز قطار به عنوان یکی از راهکارهای اصلی پیشنهاد شده است دراین خصوص افزایش ولتاژ خط عاملی است که منجر به محدودیت این راهکار می شود. (Martirano, 2015) در استفاده از یک برنامه زمان بندی دقیق پیشنهاد می شود که این پیشنهاد به گونه ای است که به محض آنکه یک قطار ترمز می کند، قطار دیگر باید برای شتاب گیری خود از آن استفاده نماید. ولی با توجه به هدوی ها و ظرفیت ناوگان عملی نمودن این روش بسیار مشکل است.بحث استفاده انرژی مذکور در مصارف داخلی ایستگاه های مترو مطرح شده است که بزرگی انرژی مذکور باعث شده در این روش نیز انرژی مازاد بازگشتی وجود داشته باشد و نهایتاً به حرارت تبدیل شده و به هدر رود.روش هایی مانند استفاده از تولیدات پراکنده نیز در سیستم حمل و نقل برقی پیشنهاد شده است. مشخصاً برای خودروها استفاده از تولیدات پراکنده الکتریکی و ذخیره سازهای انرژی به منظور جبران تأثیر منفی خودروهای الکتریکی بر روی شبکه توزیع پیشنهاد شده است.با توجه به کلان بودن مقدار انرژی مورد نیاز برای کاهش تأثیرات، فقط قسمتی از آن فراهم خواهد شد. رویکرد دیگر در هدف مدیریت مصرف انرژی با طرح های تشویقی و اجباری را دنبال می کند که نوعی محدودیت برای مصرف کنندگان به حساب می آید و در صنعت عملی نخواهد بود. ساختار یکپارچه ای که جوانب موضوع را در برگرفته و محدودیت های روش های قبل را نداشته باشد مطرح می گردد (Krein, 2013) اگر بتوان یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند پیشنهاد نمود و در روند مصرف انرژی شبکه مترو و همچنین ایستگاه های شارژ سریع خودروهای

الکتریکی، از ذخیره کننده های انرژی و تولیدات پراکنده خورشیدی و انرژی بازگشتی حاصل ترمزگیری قطارها به صورت هدفمند بهره برد، به دنبال شکل گرفتن مدل بهینه مصرف انرژی، کاهش هزینه ادوات زیرساخت و بهره برداری حاصل خواهد شد و تأثیرات سوء سیستم حمل و نقل برقی نیز کاسته می گردد.بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال بررسی ویژگی های سیستم توزیع انرژی الکتریکی تغذیه کننده قطار های برقی شهری بود.

۲- روش و طرح تحقیق

این تحقیق از نوع توصیفی–تحلیلی می باشد.طرح اصل حفاظت سیستم های توزیع انرژی الکتریکی قطارهای برقی بر اساس حفاظت دیستانس صورت می گیرد زیرا حفاظت دیستانس ،بهترین دقیق ترین و سریع ترین سیستم حفاظتی در سیستم های قدرت محسوب می شود همچنین سیستم حفاظت اضافه جریان اضافه و افت ولتاژ و یک سیستم حفاظت دیفرانسیل نیز به صورت موازی با حفاظت دیستانس بکار رفته و مانع از عملکرد ناصحیح رله شود. به علاوه یک سیستم هوشیار به وصل مدار دارای اتصال کوتاه نیز در صورتی که کلید مدار دارای اتصال کوتاه را وصل نماید، آن را تشخیص و مدار را مجدداً قطع می نماید. مشخصه امپدانسی یک سیستم ساده تغذیه قطار برقی به صورت خطی است امپدانس سیستم در کار رله های دیستانس نقش بسیار مهمی دارد، بطوری که امپدانس بالا رله ها را در تعیین عیب دچار مشکل نماید. ستینگ رله ها را می توان به راحتی بر اساس فاصله محل عیب تا پست بر اساس اندازه گیری امپدانس تعیین نمود.از آنجایی که ریل ها مسیر برگشت جریان را تشکیل دهند و به دلیل وجود ارتباطات فیزیکی بین زمین و ریل ها همواره شاهد وجود جریان نشتی از ریل ها به زمین هستیم هدف از آرایش های مختلف زمین برای سیستم های تغذیه قطارهای برقی کاهش دادن و محدود نمودن میزان این جریانات و بالطبع ولتاژ لمس ناشی از آن خواهد بود.سه روش اساسی برای آرایش زمین سیستم های تغذیه انرژی الکتریکی قطارهای برقی بصورت AC وجود دارد در روش اول از سیستم باندینگ استفاده می شود و ریل ها که مسیر برگشت جریان را بهم متصل شده اند تا امپدانس معادل مسیر برگشت جریان از طریق ریل ها کاهش یابد و جریان برگشتی تمایل بیشتری برای عبور از مسیر ریل بجای زمین داشته باشد. یک سیم زمین ایزوله نشده نیز برای اتصال تمامی ساختارهای کنار خط به یکدیگر و به ریل ها بکار می رود و به این ترتیب مقدار بسیار کمی از جریان به زمین نشت خواهد نمود برای هم پتانسیل کردن ریل ها و بالانس کردن جریان در مدار برگشت که خط منفی شبکه جریان سیستم راه آهن برقی محسوب می شود از سیستم باندینگ در مسیر راه استفاده می گردد باندینگ به دو صورت ریل به ریل و به خط تعبیه می شود. قطارهایی که معمولاً از سیستمهای DC برای تغذیه آنها استفاده میشود شامل قطارهای سبک و متروها می باشند. فاکتورهایی نظیر طرح کل سیستم تراکشن تجهیزات ،محلی فواصل ایمنی مورد نیاز هزینه های عملیاتی و احداث و عوامل محیطی بر انتخاب نوع سیستم زمین تاثیرگذارد و بر همین اساس انتخاب مسیر برگشت جریان از طریق ریل سوم یا هادی های هوایی به عوامل مذکور بستگی دارد یکسو کننده و کلیدهای DC موجود در پست های تراکشن بایستی با استفاده از یک سیستم زمین با مقاومت بسیار زیاد از زمین ایزوله گردند و یا با مقاومت بسیار کم به شبکه توری زمین متصل باشند.

۳- افزایش بهره‌وری انرژی در سامانه‌های قطارشهری و توزیع زمان سفر قطارها

امروزه سامانه های قطار شهری به دلیل داشتن ویژگی هایی مانند ظرفیت حمل مسافر بالا سرعت عمل و وقت شناسی، کاهش ترافیک و کاهش آلودگی هوا به عنوان بهترین نوع ناوگان حمل و نقل شهری در شهرهای بزرگ مطرح می باشند از طرفی مصرف انرژی الکتریکی در این سامانه ها بالاست این موضوع می تواند برای شرکت های توزیع برق بخصوص در ساعت های اوج مصرف به عنوان چالش جدی بشمار آید. بهترین راهکار برای حل این مشکل صرفه جویی انرژی است. (Zhou, 2015) از آنجا که بخش عمده انرژی مربوط به سیستم کششی قطارهاست مطالعات انجام شده بیشتر در این حوزه هستند استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی (شامل ذخیره سازهای انرژی پست های با قابلیت برگشت توان به شبکه و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها) راهبری اقتصادی, کاهش در سامانه های تغذیه و آسایشی روش های صرفه جویی انرژی در تلفات سیستم کششی قطارها هستند راهبری اقتصادی (بهینه سازی مشخصه سرعت برحسب مکان پروفایل سرعت) و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها به دلیل سازگاری با سامانه های موجود و هزینه پایین بیش از همه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند. هدف اصلی در بهره برداری کارآمد قطار کاهش انرژی مصرفی ضمن رعایت قیدهای مربوط به زمان سفر است، گرچه اهداف دیگری نیز مانند هزینه و پارامترهای کیفیت توان وجود دارند که می توان مسئله را به صورت بهینه سازی تک هدفه همراه با قیدها و یا به صورت بهینه سازی چندهدفه در نظر گرفت قسمت عمده ای از این صرفه جویی را می توان با بهینه سازی مشخصه سرعت به دست آورد لذا مطالعات زیادی به این موضوع اختصاص یافته اند. (Harrison, 2015) اولین بار اصل ماکزیمم پونتریاگین برای پیدا کردن راهبرد در کنترل بهینه قطار مورد استفاده قرار گرفت. اخیراً نیز روش های مبتنی بر این اصل برای رسیدن به بهره برداری کارآمد در آن بکار رفته اند. از روش های کلاسیک نظیر برنامه ریزی ،دینامیکی، ضرایب لاگرانژ، روش گرادیان برنامه ریزی متوالی درجه

دوم و برنامه ریزی غیرخطی برای تعیین راهبری بهینه استفاده شده است. روش های هوشمند نیز در این حوزه استفاده وسیعی داشته اند.از تئوری مورچه ها نیز برای بهینه سازی مشخصه سرعت تک قطاره استفاده شده است. الگوریتم سرد کردن فلزات برای حداقل کردن انرژی کل مصرفی در قطار بکار رفته است. تئوری تصمیم و معیار غلبه کردن برای پیدا کردن جبهه پرتو در بهینه سازی دو هدفه انرژی زمان استفاده شده است. برای بهینه سازی مشخصه سرعت، در یک الگوریتم مبتنی بر کنترل مشارکتی برای تعیین زمان بهینه ترک ایستگاه ها معرفی شده است. مشخصه های سرعت بهینه برای بهره برداری خودکار با هدف بالا بردن میزان پذیرندگی شبکه تعیین می شود. دو روش بهینه سازی بر اساس صرفه جویی انرژی و بازیابی انرژی در معرفی شد. الگوریتم های تکاملی مبتنی بر شاخص ها و دیفرانسیل تکاملی و سرد کردن فلزات برای پیدا کردن مشخصه های سرعت کارآمد استفاده شده اند بهینه سازی چندهدفه ازدحام ذرات نیز به منظور تعیین مشخصه سرعت بهینه برای ATO و جبهه پرتوی انرژی زمان استفاده شده است. (Rodríguez, 2014) برای رسیدن به راهبری کارآمد، از الگوریتم های مبتنی بر سامانه های خبره و یادگیری تقویتی بدون نیاز به مشخصه های سرعت از پیش تعیین شده نیز استفاده شده است. در روش بهینه سازی مبتنی بر برنامه ریزی اعداد صحیح برای تنظیم جدول زمانی و الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای کنترل قطار ارائه شده است تا زمان سفر و انرژی کاهش داده شود. مرور جامعی بر بهره برداری کارآمد قطار در سامانه های قطار شهری انجام شده و در نهایت نتیجه گرفته شده است که در مطالعات آینده بهینه سازی یکپارچه جدول زمانی و مشخصه سرعت باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

۴- تخصیص بهینه باتری ذخیره ساز انرژی در شبکه توزیع انرژی الکتریکی

یکی از دلایل استفاده از ذخیره ساز در شبکه های توزیع، به تعویق انداختن توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار است. احداث فیدرهای جدید یا توسعه فیدرهای موجود برای شرکت های توزیع برق هزینه بر است .همچنین مالکیت اراضی، رفع حریم خطوط و سایر مشکلات نیز از مسایلی هستند که شرکت های توزیع برق با آن مواجه می باشند. علیرغم این موارد، شرکت های توزیع موظف به تأمین بار مورد تقاضا هستند. با استفاده از نتایج پیش بینی بار می توان فیدرهای دارای اضافه بار در آینده را مشخص کرده و با نصب ذخیره ساز مناسب بر روی آنها ضمن تأمین بار به صورت محلی، از اضافه بار شدن فیدر در زمان اوج بار جلوگیری به عمل آورد در این موارد با توجه به قیمت بالای ذخیره سازها و به ویژه باتری ها، با در نظر گرفتن مزیت های دیگری همچون خرید و فروش (تجارت) انرژی، کاهش قیمت دسترسی به سیستم انتقال و بهبود انتشار گازهای گلخانه ای توجیه پذیر می باشد (Wong, 2019). موضوع استفاده از ذخیره سازها امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است نویسندگان در یک راهبرد برای یافتن ظرفیت و نحوه شارژ و دشارژ بهینه باتری، به منظور کنترل ولتاژ و کاهش تلفات ارائه داده اند. در برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از باتری برای کاهش تلفات شبکه انجام شده است. در برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از سیستم های ذخیره ساز انرژی با هدف کاهش تلفات و افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده و در یک روش بهینه به منظور یافتن مکان و اندازه ذخیره ساز ارائه شده است. در یک برنامه ریزی چندهدفه به منظور کاهش تلفات و هزینه بهره برداری با در نظر گرفتن جبران سازی توان راکتیو ارائه شده است. در برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از باتری برای اهداف اقتصادی، زیست محیطی و فنی انجام شده است. در جایابی و اندازه بهینه ذخیره ساز با اهدافی همچون کاهش انحراف ولتاژ و هزینه سرمایه گذاری ذخیره ساز انجام شده است. مزیت تأخیر در توسعه شبکه لحاظ نشده است .مکان و اندازه بهینه ذخیره ساز به منظور کنترل ولتاژ ارائه شده و به عنوان راه حلی جایگزین برای به تأخیر انداختن توسعه شبکه معرفی شده است.

در برنامه‌ریزی بهینه باتری با تابع چند هدفه به منظور کاهش هزینه و بهبود منحنی ولتاژ انجام شده است. برنامه ریزی بهینه باتری با هدف کاهش تلفات و افزایش تجارت انرژی انجام شده است. برنامه ریزی بهینه ذخیره ساز با اهداف تجارت انرژی، کاهش تلفات و تأخیر در توسعه شبکه انجام شده است. (Repetto, 2019) مکان، اندازه و ضریب توان بهینه ذخیره سازهای کوچک پخش شده در شبکه با هدف کاهش حداکثر بار و تلفات شبکه محاسبه می شود. الگوریتمی را که قادر به محاسبه اندازه و مکان مناسب باتری باشد با لحاظ کردن تلفات پیشنهاد داده اند. برنامه ریزی بهینه استفاده از ذخیره ساز به منظور کاهش انحراف ولتاژ، فلیکر، تلفات و بار خط انجام شده است. برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از ذخیره ساز با هدف کاهش تلفات و مدیریت تراکم انجام شده است. مکان، اندازه و نحوه شارژ و دشارژ بهینه باتری ها به همراه یافتن نوع باتری مناسب محاسبه شده است. یک روش جدید برای محاسبه ظرفیت ذخیره ساز مناسب به منظور کاربرد در مصرف کننده های پایبندست ارائه شده است.بهره برداری بهینه از باتری به منظور کاهش تلفات و بهبود منحنی ولتاژ شبکه انجام شده است با توجه به نیاز به جابه جایی بار به واسطه اختلاف زیاد بار حداکثر و حداقل نحوه محاسبه ظرفیت بهینه باتری ها شده است. بررسی اندازه بهینه ذخیره ساز با هدف کاهش هزینه های کلی در مدار قرار گرفتن منابع انجام شده هدف و زیست محیطی نیز در نظر گرفته شده است اندازه بهینه باتری بدون جایابی تعیین شده است. با فرض مالکیت بهره بردار شبکه بر ذخیره ساز یک تابع هزینه اقتصادی برای محاسبه ظرفیت بهینه ذخیره ساز با هدف تجارت انرژی و تأخیر در توسعه شبکه ارائه شده است در مکان بهینه ذخیره ساز با هدف کاهش انحراف

ولتاژ بار خط و تلفات انجام شده است. (Chen, 2017) به منظور محاسبه اندازه و مکان مناسب ،باتری معیارهایی نظیر تجارت انرژی کاهش پیک شبکه و تلفات تعویق توسعه شبکه و کاهش اثرات گازهای گلخانه ای در نظر گرفته شده است. در برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از باتری با هدف افزایش مزایای اقتصادی انجام شده و برنامه ریزی و بهره برداری بهینه از باتری برای اهدافی همچون کاهش تلفات شبکه و ذخیره ساز ارائه شده است. از منحنی میانگین بار روزانه و نه بار تک تک روزها استفاده شده است. همچنین استفاده از ذخیره ساز می تواند منجر به کاهش هزینه توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار شود راهبرد مدیریت انرژی یک ریز شبکه با هدف کاهش هزینه بهره برداری باتری و هزینه مربوط به انرژی تأمین نشده پیشنهاد شده است (Paolone, 2018) مطالعات توسعه شبکه در حضور ذخیره ساز مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به کاهش اوج بار و افزایش قابلیت اطمینان باتری در دو حالت مطالعات بلندمدت و کوتاه مدت مناسب بوده است با توجه به رشد بار سریع مورد بررسی بعضی از پست ها در ساعات اوج بار در حالت اضافه ظرفیت بهره برداری می شوند به دلیل زمان بر بودن برنامه ریزی ارتقای پست ها و یا انتقال بخشی از بار این پست ها به سایر پست های کم بار استفاده شده است.

۵- یافته های تحقیق

۵-۱- شبکه بالاسری تک خطی

شبکه کنتاکت بالاسری تک خطی ساده ترین و رایج ترین روش تغذیه قطارهای برقی شهری و برون شهری AC و DC می باشد که جریان برق توسط پانتوگراف به موتورهای الکتریکی قطار منتقل شود. با این حال بدلیل خوردگی و اتصال فیزیکی اجتناب‌ناپذیر ریل های حرکت با زمین شاهد وجود جریان نشتی در سیستم خواهیم بود در حال حاضر در سیستم های ریلی با سرعت ۴۰ کیلومتر در ساعت تا ۴۰۰ کیلومتر در ساعت از شبکه بالاسری سیمی استفاده گردد. این سیستم دارای بهترین حالت الاستیسیته می باشد و می تواند ارتعاشات انتقالی از واگن ها در روی پانتوگراف در زیر شبکه بالاسری را خنثی نماید تا میزان اصطکاک کنتاکت به حداقل برسد. ذغال پانتوگراف و سیم بین حال حاضر بهترین و باکیفیت ترین شبکه های بالاسری شبکه های سیمی محسوب می شوند و با شبکه های بالاسری سیمی می توان نسبت به سرعت های تعیین شده با بهترین کیفیت تغذیه قطارها را تامین نمود همچنین از آنجائی که کل سیستم شبکه بالاسری سیمی از صدها قطعه تشکیل می یابد در دراز مدت می توان با تعویض قطعات اصلی عمر شبکه بالاسری را به صدها سال افزایش داد.

۵-۲- شبکه بالاسری دوخطی

برای رفع مشکلات ناشی از جریان برگشت و نشت جریان به زمین در شبکه های بالاسری تک خطی می توان از شبکه بالاسری دو خطی استفاده نمود که در آنها یک هادی به عنوان سیم فاز و یک هادی دیگر به عنوان هادی برگشت جریان با ایزولاسیون مناسب از هم قرار می گیرند. استفاده از این نوع شبکه کنتاکت مشکلات جریان نشتی را تا حد زیادی کاهش دهد اما احداث چنین شبکه هایی خصوصاً در محل پیچ ها و تقاطع ها بدلیل لزوم رعایت فاصله ایزولاسیون مناسب بین دو هادی بسیار مشکل می باشد.

۵-۳- محاسبه جریان هادی‌های شبکه بالاسری سیستم توزیع انرژی قطارهای برقی

توان لازم برای سیستم تغذیه انرژی الکتریکی قطارهای برقی وابسته به لحظات شروع به حرکت و ترمز قطار و همراه با تغییر گرادیان ،زمین به سر عت تغییر می کند. این بار تغییر یافته بایستی بسرعت از طریق هادی های شبکه بالاسری به قطار منتقل گردد به همین دلیل هادی های شبکه بالاسری بایستی بگونه ای انتخاب گردند تا از گرم شدن شدید و آسیب دیدن آنها جلوگیری گردد برای انتخاب هادی مناسب رابطه بین جریان و دمای هادی های شبکه بالاسری در حالت گذرا و پایدار بررسی گردد در حالت پایدار سطح مقطع هادی ها با توجه به جریان حالت پایدار انتخاب می گردد که ایـــن روش برای بارهایی با تغییرات بسیار کند مناسب می باشد و در صورت وجود تغییرات سریع بار افزایش سطح مقطع هادی‌ها و غیر اقتصادی بودن طرح را بدنبال خواهد داشت. حالت گذرا برای تغییرات سریع بار مناسب است که ابتدا مشخصات جریان گذرا بر اساس شبیه سازی های پخش بار در چندین زمان مختلف تعیین و مشخصات دمایی متناسب با تغییرات جریان برای هادی های انتخابی مورد بررسی قرار گرفته و تنها هادی هایی با دمای کمتر از دمای بحرانی مورد استفاده قرار می گیرند که اقتصادی بودن طرح را نتیجه می دهد.بار الکتریکی قطارهای برقی کاملاً متفاوت از سایر بارهای الکتریکی است اکثر بارهای الکتریکی تغییرات کند داشته و جریانات نسبتاً پایداری را در هادی های خطوط انتقال تولید می کنند ولی بدلیل تغییرات ناگهانی متداول در قطارهای ،برقی تغییرات توان مورد نیاز بسیار شدید می باشد. این تغییرات سریع می توانند موجب تغییرات آنی جریان در هادی های شبکه بالاسری گشته و موجب افزایش

ناگهانی دامنه جریان گردند بیشترین مقدار جریان در هادی های سیستم توزیع در هادی های فیدر و خط انتقال مجاور پست های تراکشن وجود دارد.

۵-۴- مقاومت هادی های شبکه بالاسری

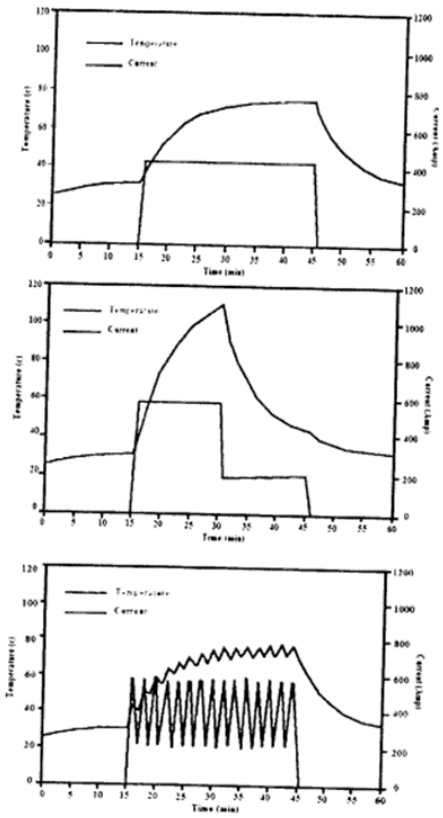
مقاومت هادی های شبکه بالاسری تابعی از تغییرات دمای هادی است که در رابطه ۱ آمده است. در این رابطه R2 و R1 مقاومت هادی به ترتیب در دمای a,T_1,T_2 و ضریب دمایی هادی می باشد.

$R_2=R_1[1+a.(T_2-T_1)]$

جریان های DC از تمامی سطح مقطع یک هادی عبور می کنند اما جریان های متناوب تمایل به عبور از سطح بیرونی هادی دارند که منجر به افزایش چگالی جریان و مقاومت موثر هادی می گردد. بدلیل این خاصیت پوستی هادی های دارای جریان AC در مقایسه با جریان DC مقاومت بیشتری از خود دهند. مقدار مقاومت هادی های دارای جریان AC از رابطه ۲ بدست می آید که در آن K ضریب مقاومت AC نسبت بهDC می باشد.

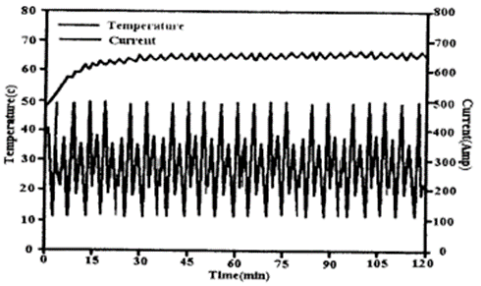
$R_{ar}=K.R_{dr}$

در شکل ۱ (الف) جریان هادی های شبکه بالاسری یک قطار برقی در بازه زمانی ۳۰ دقیقه نمایش داده شده است که دارای مقدار متوسط و موثر ۴۳۰ آمپر باشد. ماکزیمم دمای هادی خط انتقال در پایان این مدت به ۷۴ درجه سلسیوس می رسد در شکل ۱ (ب) نیز جریان هادی های آن شبکه دیده می شود که در ابتدا برابر ۵۷۵ آمپر بوده و سپس به ۲۰۰ آمپر کاهش یافته است. در بازه زمانی ۳۰ دقیقه مقدار موثر جریان مشابه حالت قبل ۴۳۰ آمپر می باشد ولی با این وجود ماکزیمم دمای هادی به ۱۰۷ درجه سلسیوس بالغ می.گردد در شکل ۱ (ج) نیز جریان هادی های آن شبکه نشان داده شده که در طول مسیر توقف و شروع به حرکت های مجدد دارد جریان هادی بین ۲۰۰ و ۵۷۵ آمپر نوسان می کند اما در بازه زمانی ۳۰ دقیقه همچنان دارای مقدار موثر ۴۳۰ آمپر می باشد ولی ماکزیمم دمای هادی در انتها برابر ۷۸ درجه سلسیوس می باشد.در شکل ۲ جریان هادی های شبکه بالاسری یک قطار برقی در زمان عملکرد عادی سیستم نشان داده شده و دمای هادی به ۶۵ درجه سلسیوس بالغ گردیده است. در شکل ۳ نیز جریان هادی های شبکه بالاسری یک قطار برقی در زمان بروز عیب اتصال کوتاه تک فاز به زمین برابر ۵ کیلو آمپر مشاهده شود. با فرض عملکرد رله ها در ۰/۵ ثانیه و ۳ بار اتوریکلوز کلید که در زمان اتوریکلوزهای اول و دوم عیب همچنان باقی بوده و در اتوریکلوز سوم سیستم وصل می گردد ماکزیمم دمای هادی خط انتقال به ۷۶ درجه سلسیوس بالغ می گردد.

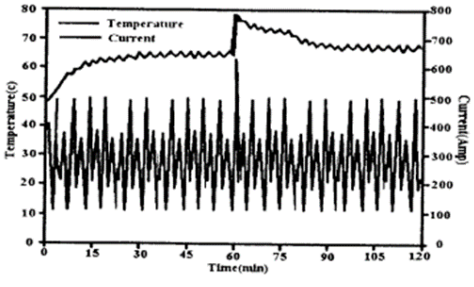


شکل۱- شکل موج های دما و جریان هادی خط انتقال قطار برای حالات مختلف

مشاهده می‌شود که در این آزمایش ها که برای شرایط محیطی یکسان و مقدار موثر جریان برابر صورت گرفته است حداکثر دمای هادی دارای مقادیر متفاوتی وابسته به نوع عملکرد قطار است تنها به اتکای یک نوع جریان نمی توان اقدام به انتخاب نوع هادی برای شبکه بالاسری سیستم تراکشن نمود انتخاب نوع هادی شبکه بالاسری سیستم تراکشن بایستی با مدنظر قرار دادن جریان هادی ها در حالات شروع به حرکت و توقف قطار و بروز عیب در سیستم صورت گیرد.



شکل۲- جریان و دمای هادی خط انتقال قطار برقی در حالت عادی



شکل۳- جریان و دمای هادی خط انتقال قطار برقی در حالت عیب

۶- نتیجه گیری

امروزه سامانه های قطار شهری به دلیل داشتن ویژگی هایی مانند ظرفیت حمل مسافر بالا سرعت عمل و وقت شناسی، کاهش ترافیک و کاهش آلودگی هوا به عنوان بهترین نوع ناوگان حمل و نقل شهری در شهرهای بزرگ مطرح می باشند از طرفی مصرف انرژی الکتریکی در این سامانه ها بالاست این موضوع می تواند برای شرکت های توزیع برق بخصوص در ساعت های اوج مصرف به عنوان چالش جدی بشمار آید. بهترین راهکار برای حل این مشکل صرفه جویی انرژی است.از آنجا که بخش عمده انرژی مربوط به سیستم کششی قطارهاست مطالعات انجام شده بیشتر در این حوزه هستند استفاده از انرژی بازتولیدی ترمزی (شامل ذخیره سازهای انرژی پست های با قابلیت برگشت توان به شبکه و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها) راهبری اقتصادی, کاهش در سامانه های تغذیه و آسایشی روش های صرفه جویی انرژی در تلفات سیستم کششی قطارها هستند راهبری اقتصادی (بهینه سازی مشخصه سرعت برحسب مکان پروفایل سرعت) و تنظیم جدول زمانی حرکت قطارها به دلیل سازگاری با سامانه های موجود و هزینه پایین بیش از همه مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته اند.یکی از دلایل استفاده از ذخیره ساز در شبکه های توزیع، به تعویق انداختن توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار است. احداث فیدرهای جدید یا توسعه فیدرهای موجود برای شرکت های توزیع برق هزینه بر است .همچنین مالکیت اراضی، رفع حریم خطوط و سایر مشکلات نیز از مسایلی هستند که شرکت های توزیع برق با آن مواجه می باشند. علیرغم این موارد، شرکت های توزیع موظف به تأمین بار مورد تقاضا هستند. با استفاده از نتایج پیش بینی بار می توان فیدرهای دارای اضافه بار در آینده را مشخص کرده و با نصب ذخیره ساز مناسب بر روی آنها ضمن تأمین بار به صورت محلی، از اضافه بار شدن فیدر در زمان اوج بار جلوگیری به عمل آورد در این موارد با توجه به قیمت بالای ذخیره سازها و به ویژه باتری ها، با در نظر گرفتن مزیت های دیگری همچون خرید و فروش (تجارت) انرژی، کاهش قیمت دسترسی به سیستم انتقال و بهبود انتشار گازهای گلخانه ای توجیه پذیر می باشد.

طراحی شبکه تغذیه انرژی الکتریکی قطارهای برقی و راهکارهای مناسبی جهت مدارات تغذیه سیستم های برق رسانی شبکه های کنتاکت بالاسری این شبکه ها از میان روش های متداول موجود پیشنهاد گردید. آنگاه ضمن معرفی ساختار و مشخصات فنی – الکتریکی شبکه های قطارهای برقی ایران ویژگی های چنین سیستم هایی از دیدگاه مطالعات سیستم شامل پخش بار پخش بار حالت عیب و قابلیت اطمینان و نیز از دیدگاه کیفیت توان شبکه برق و راهکارهای مناسبی جهت بهبود مسائل قابلیت اطمینان و کیفیت توان ارائه گردید همچنین به کمک شبیه سازی های انجام شده کارآیی روش های پیشنهادی در بهبود مسائل و مشکلات مربوطه به اثبات رسید.ارائه راهکارهای جدیدتر و مناسب تر برای بهبود ویژگی های سیستم های توزیع انرژی الکتریکی تغذیه کننده قطارهای برقی نظیر سیستم های بلاسری خطی و همچنین بررسی مطالعات سیستم این شبکه ها و ارائه راهکارهای سودمند جهت افزایش قابلیت اطمینان آنها و نیز بهبود مسائل بهره برداری چنین شبکه هایی نیز می تواند از موضوعات مهم در ادامه این فعالیت بشمار آیند. اندازه گیری های عملی کیفیت توان ارائه راهکارهای بهبود و استفاده از آن ها در این شبکه ها و بررسی نتایج استفاده از این روش ها در کنار مقایسه آنها با نتایج حاصل از شبیه سازی های انجام شده یکی دیگر از فعالیت های بسیار مفید در زمینه شبکه های تغذیه انرژی الکتریکی قطارهای برقی می تواند باشد. انجام این فعالیت ها با توجه به گسترش شبکه قطارهای برقی در ایران دارای اهمیت بسیار زیادی خواهد بود.

۶-۱- پیشنهادات پژوهش

- امکان شبیه سازی شبکه های ریلی بسیار پیچیده که دارای خطوط متعدد و انشعابات بسیار می باشند.
- امکان در نظر گرفتن ترافیک ترکیبی در بهره برداری از خطوط راه آهن برقی.

- در نظر گرفتن عناصر ذخیره سازی جهت ذخیره سازی انرژی ترمزی مازاد بازگشتی به پست کشش و استفاده از آن در شرایط پیک بار شبکه
- بحث پایداری ولتاژ شبکه راه آهن برقی در سیستم های چندسو

منابع

۱. اصغر بزرگ,مهدی فیروزی ابهری (۱۳۹۸) بررسی جریان اتصال کوتاه در سیستم راه آهن برقی و بکار گیری محدودساز جریان اتصال کوتاه, دانشگاه غیاث‌الدین جمشید کاشانی، دانشکده برق و کامپیوتر

2. L. A. Wong, et al., (2019) "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," J. Energy Storage, vol. 21, pp. 489-504, Feb..
3. P. Lazzeroni and M. Repetto, . (2019) "Optimal planning of battery systems for power losses reduction in distribution grids," Electric Power Systems Research, vol. 167, pp. 94-112, Feb.
4. M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, (2018) "Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution networks embedding grid reconfiguration," IEEE Trans. Power Systems, vol. 33, no. 2, pp. 1577-1590, Mar.
5. M. Chen, et al., (2017) "Optimal allocation method on distributed energy storage system in active distribution network," Energy Procedia, vol. 141, no. 4, pp. 525-531, Dec..
6. Lukasiak, P., Antoniewicz, P., Swierczynski, D. and Kolomyjski, W. (2015) Technology comparison of energy recuperation systems for DC rail transportation", 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Vol. 5, IEEE, pp. 372–376.
7. Sbordone, D., Bertini, I., Di Pietra, B., Falvo, M.C., Genovese, A. and Martirano, L. (2015) "EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm", Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 120, pp. 96– 108.
8. Martins, M. C. S. and Trindade, F. C. L. (2015) "Time series studies for optimal allocation of electric charging stations in urban area", Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM), 2015 IEEE PES, IEEE, pp. 142–147.

A. Albrecht, P. Howlett, P. Pudney, X. Vu, and P. Zhou, (2015) "The key principles of optimal train control- Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switching points," Transportation Research Part B: Methodological.

9. J. C. Goodwin, D. I. Fletcher, and R. F. Harrison, (2015) "Multi-train trajectory optimisation to maximise rail network energy efficiency under travel-time constraints," Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. f Rail Rapid Transit, Jul..
10. M. Domínguez, A. Fernández-Cardador, A. P. Cucala, T. Gonsalves, and A. Fernandez-Rodríguez, (2014) "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.
11. Ratniyomchai, T., Hillmansen, S. and Tricoli, P. (2014) "Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways", IET Electrical Systems in Transportation, IET, Vol. 4 No. 1, pp. 9–20.
12. Yilmaz, M. and Krein, P.T. (2013) "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces", IEEE Transactions on Power Electronics, IEEE, Vol. 28 No. 12, pp. 5673–5689