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

شبیه سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابر خازن‌ها در شبکه قطار شهری جهت بازیابی انرژی ترمزی

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

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷
کد مقاله: ۶۱۶۳۸

چکـیده

امروزه سامانه‌های قطار شهری به دلیل داشتن ویژگی هایی مانند ظرفیت حمل مسافر بالا سرعت حمل و وقت شناسی کاهش ترافیک و کاهش آلودگی هوا به عنوان بهترین نوع ناوگان حمل و نقل شهری در شهرهای بزرگ مطرح می باشند.هدف از این تحقیق شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی مبتنی بر ابر خازن‌ها در شبکه قطار شهری جهت بازیابی انرژی ترمزی می باشد.این تحقیق از نوع توصیفی تحلیلی می باشد.نرم افزار مورد استفاده جهت شبیه سازی نمونهPSCAD است. نرم افزار PSCAD یک نرم افزار تخصصی مهندسی برق قدرت است.نتایج تحقیق نشان می دهد که برای افزایش قابلیت اطمینان ترمز وسیله نقلیه معمولا از ترمزهای ترکیبی که شامل ترمز دینامیکی و هیدرولیکی است استفاده می شود تا در صورت عمل نکردن ترمز دینامیکی از ترمز مرسوم هیدرولیکی استفاده شود. همچنین ذخیره سازهای انرژی ترمزی و نحوه استفاده از ذخیره سازها برای ذخیره انرژی ترمزی که پرکاربردترین ذخیره ساز برای کاربرد در ذخیره سازی انرژی بازیافتی در قطار برقی، ابرخازن ها هستند.

واژگـان کلـیدی: سیستم ذخیره سازی انرژی, شبیه سازی, ابر خازن ها, شبکه قطار شهری, بازیابی انرژی ترمزی

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

۱- مقدمه

امروزه سامانه‌های قطار شهری به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند ظرفیت حمل مسافر بالا سرعت حمل 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 به خصوص 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 (Freris, 2020) 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 تلفات در سامانه های تغذیه و آسایشی روش های صرفه جویی انرژی در سیستم کششی قطارها هستند راهبری اقتصادی 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.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.هدف از این تحقیق شبیه سازی سیستم ذخیره سازی انرژی مبتنی بر ابر خازن ها در شبکه قطار شهری جهت بازیابی انرژی ترمزی می باشد.رشیدی (۱۴۰۱) در موضوعی مشابه با این عنوان که مدل سازی و تحلیل دقیق سیستم ذخیره سازی انرژی هیبریدی باتری–ابر خازن در سیستم های ریز شبکه با افزایش تقاضای جهانی برای انرژی الکتریکی منجر به کاهش سوخت‌های فسیلی و افزایش انتشار کربن شده است. به‌منظور حل این مشکل، منابع انرژی تجدید پذیر پدیدار شده است. بااین‌حال، ویژگی‌های تصادفی و متناوب ذاتی منابع انرژی تجدید پذیر می‌تواند باعث نوسانات توان و همچنین ناپایداری فرکانس و ولتاژ شود. بنابراین یک سیستم ذخیره انرژی یک‌راه حل مؤثر برای رسیدگی به مسائل ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر است. مفهوم ریز شبکه برای ادغام فناوری‌های مختلف منابع تولید پراکنده، ازجمله منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، منابع انرژی متعارف، و بارها به‌صورت محلی معرفی‌شده است تا به‌عنوان یک خوشه واحد در نظر گرفته شوند. از این رو در این تحقیق در یک ریزشبکه DC که اختلاف بین توان تولیدی و توان مصرفی که نوسانات توان نامیده می‌شود باید بر روی سیستم ذخیره شده هیبریدی شامل باتری و ابرخازن ذخیره شده و یا از آن دریافت گردد، مدل‌سازی می‌شود. همواره در باتری‌ها افزایش تعداد شارژ و دشارژ باعث کاهش طول عمر باتری می‌شود. از طرف دیگر، باتری‌ها دارای دینامیک لختی هستند. (Chanana, 2018) یعنی شارژ/دشارژ کوتاه مدت تأثیر چندانی در سطح شارژ آن‌ها ندارد. حال اگر این جریان اغتشاشی دارای نوسانات بالایی باشد به این معنی که در یک دوره زمان بسیار کوتاه مدت جریان ورودی باتری مثبت و یا منفی گردد و یا به عبارت دیگر در یک دوره کوتاه مدت باتری شارژ و دشارژ شود طول عمر باتری‌ها کاهش پیدا می‌کند که هدف اصلی این پژوهش بالا بردن عمر باتری‌ها و به طور کلی مدیریت صحیح انرژی ذخیره سازهای ترکیبی می‌باشد. لذا بهتر است که مؤلفه‌های فرکانسی در این جریان اغتشاشی جدا شده و مؤلفه هایی که دارای فرکانس پایین هستند بر روی باتری ذخیره شوند و نیز مؤلفه های فرکانس بالا بر روی ابر خازن ذخیره کردند. زیرا ابرخازن برخلاف باتری دارای دینامیک سریع‌تری است. از این طریق طول عمر باتری‌ها افزایش پیدا کرده و عملکرد ابر خازن نیز بهتر می‌شود. برای این منظور از یک فیلتر ویولت در این تحقیق استفاده شده تا مؤلفه‌های فرکانسی این توان نوسانی جدا شده و برای ذخیره بر روی باتری و ابر خازن انتخاب گردند. از طرفی، یکی دیگر از اهداف این تحقیق تثبیت ولتاژ بأس DC در این ریزشبکه DC می‌باشد. (Tang, 2016) به عبارت دیگر طراحی یک سیستم مدیریت انرژی برای ذخیره انرژی بر روی باتری‌ها و ابر خازن‌ها به گونه‌ای است که به افزایش طول عمر باتری کمک کرده و ولتاژ بأس DC ثابت ماند. با توجه به پیشرفت تکنولوژی و نیاز روزافزون جامعه و صنعت در سراسر جهان، سیستم‌های قدرت متداول با کاهش تدریجی منابع سوخت های فسیلی بازده انرژی پایین و آلودگی‌های زیست محیطی مواجه هستند همچنین افزایش نیاز به استفاده از منابع انرژی نو به عنوان تولید کننده کهنه شدن شبکه های انتقال و توزیع سرمایه گذاری کلان برای توسعه و نو کردن شبکه و نیاز به انرژی برق با کیفیت و قابلیت انعطاف پذیری بالا دنیای امروز را به سوی روش های نوین تامین انرژی برق پیش می برد.بدین منظور تحقیق حاضر به دنبال شبیه سازی سیستم ذخیره سازی انرژی مبتنی بر ابر خازن‌ها در شبکه قطار شهری جهت بازیابی انرژی ترمزی بود.

۲- روش و طرح تحقیق

این تحقیق از نوع توصیفی–تحلیلی می باشد.نرم افزار مورد استفاده جهت شبیه سازی نمونهPSCAD است. نرم افزار PSCADیک نرم افزار تخصصی مهندسی برق قدرت است و مخفف Aided Computer Systems Power Design است PSCAD بیش از ۳۳ سال، تحت توسعه برنامه‌نویسان آن و همچنین الهام گرفتن از ایده ها و پیشنهادات کاربران جهانی است. همین ویژگی در توسعه نرم افزار منجر به تبدیل شدن PSCAD به یکی از توانمندترین و اساسی ترین نرم افزارهای

طراحی کامپیوتری موجود شده است به طور خلاصه PSCAD به کاربر توانایی طرح ریزی مدار اجرای شبیه سازی، تحلیل نتایج و مدیریت داده ها را در یک محیط گرافیکی کاملا جامع می دهد. همچنین توابع رسم درون خطی وکنترل هایی که در نرم افزار قرار داده شده، کاربر را قادر به تغییر یا اصلاح پارامترهای سیستم در طول اجرای شبیه سازی می سازد و بدین وسیله اثرات ناشی از این تغییرات در حین پیشرفت شبیه سازی قابل مشاهده است.برای محاسبه میزان انرژی مصرف شده برای حرکت شبکه قطار شهری و همچنین میزان انرژی بازیابی شده در هنگام ترمز نیاز به اطلاعات اولیه است که شامل این موارد می شودکه بیشینه سرعت حرکت قطار شهری,کمترین شتاب قابل قبول در بازه های سرعت مختلف, بیشینه تعداد مسافران ,قطر چرخ, بیشینه شتاب ترمز گیری, شیب مسیر حرکت مقادیر محاسبه شده بر اساس اطلاعات اولیه به قرار زیر هستند که نیروهای کشش و مقاوم قطار شهری و نیروهای مقاوم شامل نیروی مقاومت هوا، نیروی لازم برای غلبه بر اینرسی دورانی چرخ ها، نیروی لازم برای غلبه بر شیب و مانند آنها هستند شتاب اولیه حرکت که گشتاور تولید شده بر روی شفت موتور برای ایجاد نیروی کشش مورد نیاز و توان مورد نیاز موتورها ,زمان های رسیدن سرعت قطار شهری به مقادیر مهم مانند سرعتی که برای محاسبه شتاب اولیه تعیین شده و یا بیشینه سرعت می باشد.

۳- بازیابی شبکه های توزیع انرژی الکتریکی

امروزه با پیشرفت های چشم گیری که در صنعت برق رخ داده است انتظار می رود شرکت های توزیع در هر شرایطی، توان با کیفیت بالا را به دست مشتریان خود برسانند. یکی از شرایطی که می تواند این انرژی رسانی به مشترکین را دچار مشکل کند، رخداد خطا در شبکه و به خاموشی فرو رفتن قسمتی از آن است. پس از وقوع خطا و عمل کردن کلیدهای حفاظتی، به دلیل شعاعی بودن ساختار شبکه توزیع، تا زمانی که المان خطادار تعمیر یا تعویض نشود، بارهای پایین دست نقطه خطا بی برق باقی می مانند. (Rahman, 2017) در مدت زمان بین جداسازی خطا و رفع عیب، می توان با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه، از مسیرهای دیگر قسمتی یا تمام بارهای بی برق را بازیابی کرد.روند بازیابی باید به گونه ای است که از یک طرف، رضایت مشترکین را برآورده سازد و از طرف دیگرکاهش درآمدهای ناشی از قطعی برق شرکت های توزیع را بهبود بخشد. پس از رخداد خطا و پاکسازی آن باید یک برنامه ریزی دقیق و کارآمد در اختیار اپراتورهای شرکت های توزیع قرار گیرد که با کمترین هزینه، بیشترین بارهای بی برق شبکه را بازیابی کند. اصلی ترین هزینه های بازیابی شامل هزینه های کلیدزنی و انرژی توزیع نشده می باشد که اولی با کاهش تعداد کلیدزنی و دومی با افزایش مقدار بارهای بازیابی شده کاهش می یابند. (Romero, 2018) در شرایطی که در شبکه توزیع هیچ منبع تولید پراکنده ای وجود نداشته باشد، بارهای شبکه تنها از طریق فیدرهای شبکه تغذیه می شوند و بازیابی نیز تنها از طریق انتقال بارهای بی برق به فیدرهای برق دار همسایه امکان پذیر خواهد بود. در این حالت پس از وقوع خطا و پاکسازی آن، تمام ناحیه پایین دست خطا به خاموشی فرو می رود.از آنجا که با افزایش ابعاد شبکه، ترکیب کلیدزنی های ممکن برای بازیابی آن نیز افزایش می یابد، با تقسیم بندی کلیدها در شش گروه مختلف، فضای جستجو کاهش یافته و روند بازیابی سریع‌تر شده است. کلیدها در شش گروه مختلف بدین صورت دسته بندی می شوند.

- گروه اول: کلیدهای حفاظتی (کلیدهایی که ناحیه سالم شبکه را از ناحیه بی برق جدا کرده اند و در حالت باز هستند).
- گروه دوم: کلیدهای ایزوله سازی (کلیدهایی که ناحیه خطادار را به ناحیه بی برق متصل کرده اند و در حالت بسته قرار دارند و پس از خطا برای ایزوله کردن آن باز می شوند).
- گروه سوم: کلیدهای بسته (کلیدهای که دو ناحیه یکسان را به هم وصل کرده اند و در حالت بسته قرار دارند).
- گروه چهارم: کلیدهای بین دو گروه فعال (کلیدهای در حالت عادی باز بین دو گروه برق دار).
- گروه پنجم: کلیدهای بین دو گروه غیر فعال (کلیدهای در حالت عادی باز بین دو گروه بی برق).
- گروه ششم: کلیدهای بازیابی (کلیدهای در حالت عادی باز که بین یک گروه برق دار و یک گروه بی برق قرار دارند).

طبق این دسته بندی، کلیدهای گروه اول و دوم را می توان در روند بازیابی در نظر نگرفت، کلیدهای گروه سوم، چهارم و پنجم برای انتقال بار از یک بخش به بخش دیگر به کار می روند (کلیدهای لازم جهت بازآرایی) و کلیدهای گروه ششم کلیدهای اساسی هستند که می توانند بارهای قابل بازیابی را به شبکه برق دار متصل کنند (کلیدهای لازم جهت بازیابی اولیه). (Delbem, 2018)

پس با این نحوه دسته بندی کلیدها می توان فضای جستجوی الگوریتم را کاهش داد و به مراتب زمان رسیدن به جواب بهینه نیز کاهش می یابد.بازآرایی شبکه و بهینه سازی عملیات قطع بار با هدف بازیابی حداکثر بار ممکن شبکه با کمترین عملیات کلیدزنی انجام می شود. پس از وقوع خطا در شبکه و بی برق شدن ناحیه پایین دست خطا، ابتدا با بستن کلیدهای در حالت عادی

باز و رعایت قیود بهره برداری شبکه، سعی در بازیابی حداکثر بار ممکن می شود (مرحله بازیابی اولیه شبکه) در صورتی که تمامی بارهای بی برق بازیابی نشده باشند، با بازآرایی شبکه تلاش می شود که انرژی رسانی مجدد به بارهای بی برق انجام شود و در نهایت چنان چه قیود شبکه هنوز رعایت نشده باشند، عملیات بهینه سازی قطع بار تا برقراری کامل قیود انجام می شود.

۴- پایداری سیستم در ریزشبکه‌ای متشکل از منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره ساز انرژی

حفاظت شبکه در شرایط وقوع خطا یک نیاز اساسی در سیستم قدرت به خصوص در شبکه توزیع است که بیش از ۸۰٪ خاموشی ها در آن رخ می دهدچهارچوب حفاظت بهینه بایستی قادر بـه قطع بخشی از شبکه دچار خطا در کمترین زمان ممکن توسط هماهنگی ما بین ادوات حفاظتی مانند رله ها و محدود کننده جریان خطا (FCL) باشد (Hegazy, 2018) علاوه بر این توجه شود که به تازگی شبکه توزیع متشکل از چندین ریزشبکه به علت حضور فناوری های جدید منبع انرژی تجدید پذیر (RES)، سیستم ذخیره سازی انرژی (ESS) و موارد دیگر است که هر ریزشبکه به صورت شبکه چندسو تغذیه می باشد و قادر است در مدهای اتصال به شبکه و جزیره ای فعالیت کند از این رو رله اضافه جریان تنظیم دوگانی (DSOR) نقش مهمی برای حفاظت ریزشبکه در شرایط خطا بازی می کند. این رله قادر است که در دو جهت جلورونده و معکوس با تنظیم پارامترهای مرتبط هر کدام فعالیت کند؛ همچنین با پهنای باند مخابراتی کم می تواند هماهنگی حفاظتی مناسبی را برقرار کند. بنابراین هماهنگی حفاظتی بهینه (OPC) مرسوم در این شرایط مناسب نیست زیرا آن برای شبکه یک سو تغذیه طراحی شده است (Radha, 2019) طرح OPC متناسب با ریزشبکه چند سو تغذیه متشکل از RES ها و ESS ها با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره ای برای تنظیم بهیئهٔ DSOR ها و انتخاب بهینه اندازه راکتانس FCL را ارائه می دهد.در زمینه طرح هماهنگی حفاظتی در شبکه توزیع و ریزشبکه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است به طوری که یک طرح OPC در ریزشبکه برای هماهنگی بهینه مابین رله های اضافه جریان جهتی تنظیم دوگانی ارائه کرده اند. همچنین الگوریتم بهینه سازی فاخته خطی در مرجع برای حل مسئله OPC به منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای تنظیم DSOR ها و اندازه FCL استفاده شده است.شاخص پایداری سیستم شاخص امنیت ناشی از پیشامد N – ۱ در طرح OPC را مطرح می شود. عموماً طرح مذکور دارای چهارچوب بهینه سازی غیرخطی است؛ لذا به ترتیب از الگوریتم ژنتیک (GA)، الگوریتم ژنتیک مبنی بر تئوری فازی، بهینه سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) متناسب با ابزار تصمیم گیری فازی (FDMT)، و الگوریتم کرم شب تاب اصلاح شده تطبیقی (AMFA) برای حل مسئله OPC استفاده کرده اند. توجه شود که چهارچوب هماهنگی حفاظتی در شبکه متشکل از تولیدات پراکنده نسبت به طرح OPC مرسوم متفاوت است زیرا در این شرایط شبکه یک سو تغذیه به شبکه چندسو تغذیه مبدل خواهد شد.تعیین بهینه پارامترهای تنظیم شاخص زمانی (TDS) و جریان پیکاپ به ترتیب برای رله های اضافه جریان و DSOR ها با فرض ظرفیت ثابت برای تولیدات پراکنده بیان شده است. (Zeineldin, 2018) در نهایت با توجه به پیشینه تحقیق سه شکاف تحقیقاتی مهم در طرح OPC که عموماً بیشتر تحقیقات روش OPC را برای داده های شبکه در یک لحظه و ظرفیت ثابت تولیدات پراکنده مدل سازی کرده اند از این رو متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا را توسط معادلات پخش بار محاسبه می کنند ولی توجه شود که عموماً ریز شبکه ها دارای RES ها جهت کاهش آلودگی زیست محیطی ESS ها برای بهبود انعطاف پذیری شبکه هستند. لذا طرح OPC نیاز به بهره برداری بهینه روزانه ریزشبکه دارد. طرح هماهنگی حفاظتی زمانی مفید و مؤثر خواهد بود که علاوه بر دستیابی به راه حل حفاظتی سریع در شرایط خطا، پایداری شبکه را که شامل تولیدات پراکنده مختلف است نیز تأمین کند.برای رفع شکاف های تحقیقاتی ارائه شده در طرح OPC هماهنگی حفاظتی بهینه مقید به پایداری سیستم (SSCOPC) در ریزشبکه ای با مدهای عملکردی اتصال به شبکه و جزیره ای متشکل از RES ها و ESS ها برای تعیین راه حل حفاظتی سریع که پایداری تولیدات پراکنده یا به طور کلی پایداری سیستم را نیز در نظر گرفته است، (Karegar, 2019) طرح SSCOPC پیشنهادی به صورت یک مسئله تصادفی مدل سازی می شود که کمینه سازی میانگین زمان عملکرد کل DSOR ها را در دو مدهای حفاظتی اولیه و پشتیبان تحت عنوان تابع هدف بر عهده دارد. همچنین آن محدودیت های فاصله زمانی هماهنگی (CTI)، پارامترهای تنظیم TDS و جریان پیکاپ در دو جهت جلو رونده و معکوس، اندازه راکتانس FCL و پایداری سیستم را به عنوان قیود مسئله در نظر گرفته است. قابل توجه است که پایداری سیستم متناظر با پایداری RES ها و ESS ها ناشی از سیگنال های خطا در شرایط وقوع اتصال کوتاه می باشد علاوه بر این ریز شبکه ها عموماً متشکل از RES ها و ESS ها هستند (Saleh, 2017) لذا طرح پیشنهادی برای محاسبات متغیرهای شبکه قبل از رخداد خطا نیاز به بهره برداری بهینه روزانه ریزشبکه در مدهای عملکرد مختلف است. از این رو در این مسئله کمینه سازی مجموع هزینه های بهره برداری ریزشبکه و ریزش بار آن در مد جزیره ای به عنوان تابع هدف منظور می شود. همچنین قیود این مسئله برابر معادلات پخش توان بهینه (OPF) ریز شبکه در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و ذخیره سازهای انرژی است. علاوه بر این برنامه ریزی تصادفی مبنی بر سناریو (SBSP) برای مدل سازی پارامترهای عدم قطعیت بار مصرفی و توان تولیدی RESها در طرح پیشنهادی استفاده می شود.

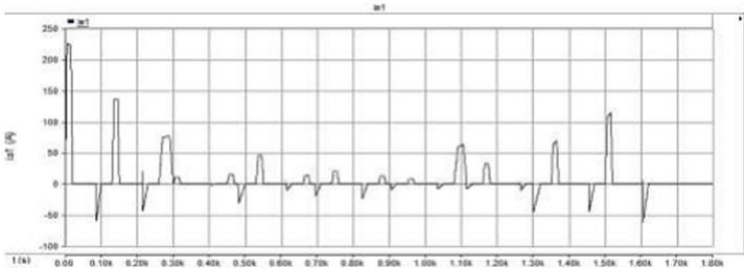
۵- یافته‌های تحقیق

۵-۱- مکان یابی ذخیره ساز ابرخازن

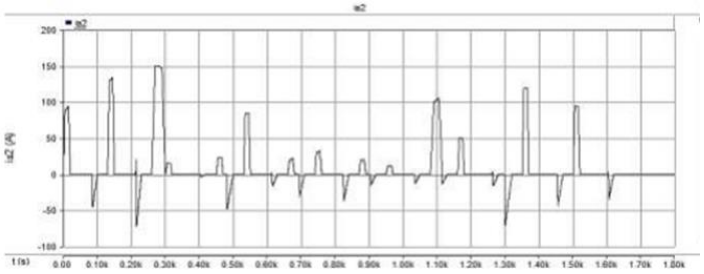
کاربردی ترین ذخیره ساز جهت استفاده در شبکه حمل و نقل برقی، ابرخازن‌ها هستند چراکه در شبکه قطار برقی سرعت گرفتن و ترمزگیری قطار شهری در زمان کمی صورت می‌گیرد و نیاز به ذخیره سازی است که شارژ و دشارژ سریعی داشته باشد و همچنین چون فرآیند سرعت‌گیری و ترمزگیری به تناوب انجام می شود، ذخیره ساز باید قابلیت شارژ و دشارژ بسیار زیاد داشته باشد و با توجه به این شرایط مناسب‌ترین ذخیره ساز ابرخازن است و از ابرخازن ها استفاده می‌شود. برای تعیین مکان و تعداد مناسب ذخیره‌سازها روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. برخی با استفاده از چندین طرح پیشنهادی متفاوت از نظر مکان و تعداد، طرحی که بهترین نتایج را بدست دهد را انتخاب می‌کنند برخی دیگر با استفاده شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک مکان و ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز در شبکه قطارشهری را محاسبه می‌کنند همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبودیافته نیز می‌توان مکان و ظرفیت بهینه را تعیین کرد.اندازه این ذخیره سازها به گونه‌ای است که ظرفیت ذخیره انرژی در ابرخازن بیشتر از انرژی جنبشی قطار شهری است، بدین معنی که در حالت ایده آل این ذخیره سازها می توانند تمامی انرژی جنبشی قطار شهری را در خود ذخیره کنند.

۵-۲- حالت نصب ذخیره ساز

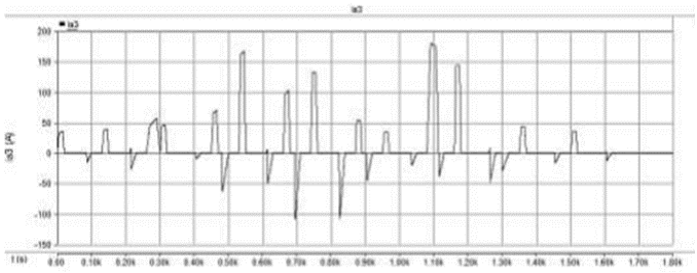
در این حالت چهار سیستم ذخیره ساز مجزا در تمامی پست‌های کشش نصب شده است .شکل های ۱تا ۴ جریان پست های مختلف را نشان می دهد. شکل ۵ جریان ذخیره ساز نصب شده در پست شماره دو و شکل ۶ جریان ذخیره ساز نصب شده در پست شماره چهار را نشان می دهد.



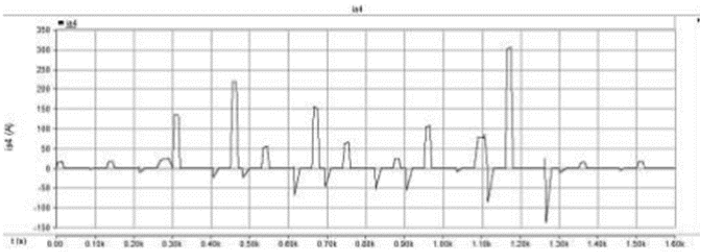
شکل ۱- جریان پست شماره ۱ در نصب ذخیره ساز



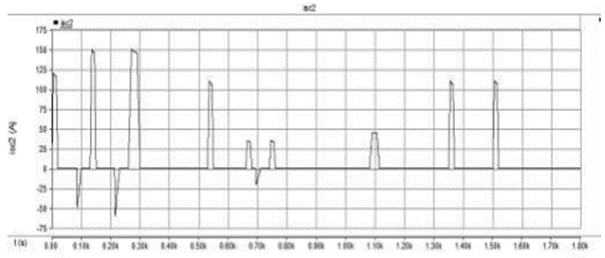
شکل ۲- جریان پست شماره ۲ در نصب ذخیره ساز



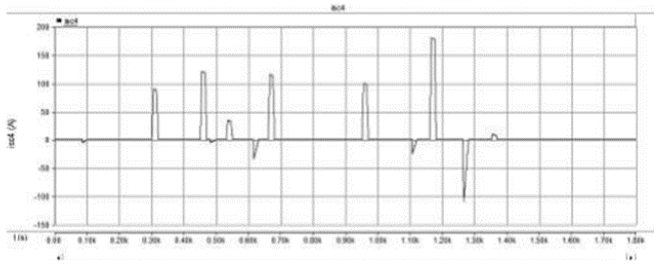
شکل ۳- جریان پست شماره ۳ در نصب ذخیره ساز



شکل ٤- جریان پست شماره ٤ در نصب ذخیره ساز

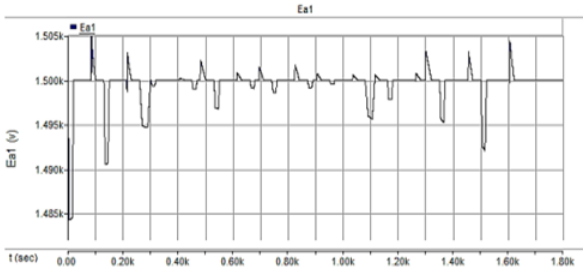


شکل ٥- جریان ذخیره ساز در پست شماره ٢ در نصب ذخیره ساز

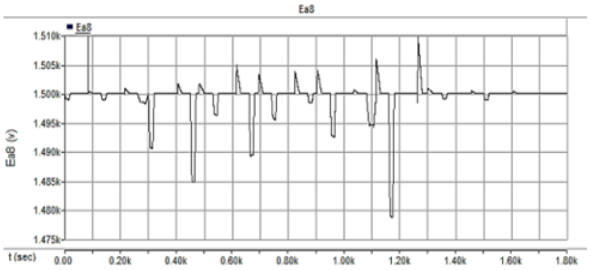


شکل ٦- جریان ذخیره ساز در پست شماره ٤ در نصب ذخیره ساز

در این حالت مشاهده می شود که جریان و توان مصرفی در تمامی پست های کشش، کاهش محسوس و چشمگیری داشته اند. همچنین جریان بازیابی تزریقی به پست در تمامی پست ها کاهش زیادی داشته است که به این دلیل است که این جریان های بازیابی شده در ذخیره سازهای موجود در هر پست ذخیره می شود و از تزریق آن به پست می کاهد. در این حالت شکل موج ولتاژ پست یک و سه به ترتیب به صورت شکل ۷ و شکل ۸ است.

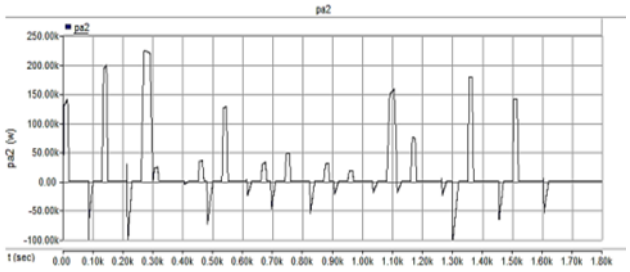


شکل ۷- شکل موج ولتاژ در پست شماره ۱ در نصب ذخیره ساز

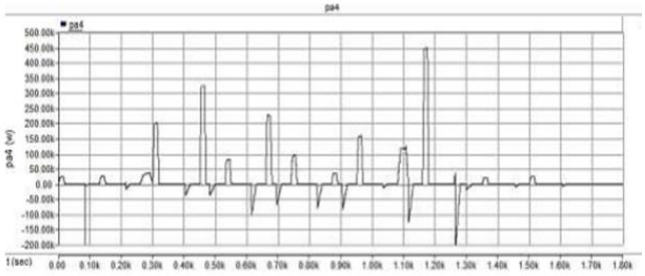


شکل ۸- شکل موج ولتاژ در پست شماره ۳ در نصب ذخیره ساز

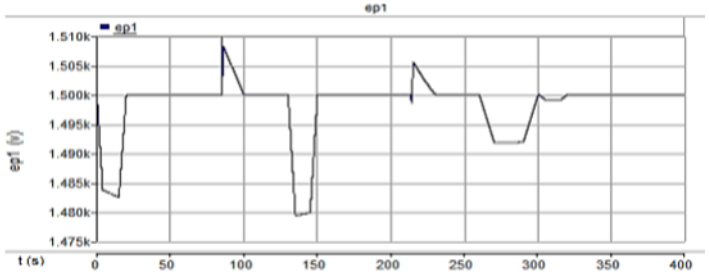
شکل موج توان در پست های دوم و چهارم به ترتیب به صورت شکل ۹ و شکل ۱۰ است و شکل موج ولتاژ پانتوگراف در شبکه قطار شهری شماره یک و دو به ترتیب به صورت شکل ۱۱ و شکل ۱۲ است.



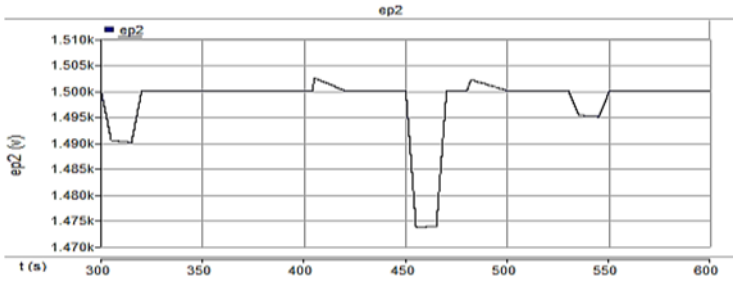
شکل ۹- توان پست شماره ۲ در نصب ذخیره ساز



شکل ۱۰- توان پست شماره ٤ در نصب ذخیره ساز



شکل ۱۱- ولتاژ پانتوگراف قطار شماره یک در نصب ذخیره ساز



شکل ۱۲- ولتاژ پانتوگراف قطار شماره دو در نصب ذخیره ساز

بیشینه جریان و توان کشیده شده در نصب ذخیره ساز بسیار کمتر از بیشینه جریان و توان در حالت بدون ذخیره ساز است. مشاهده می کنیم که نصب ذخیره ساز بهترین حالت نصب است که موجب کاهش چشم گیر مصرف انرژی خواهد شد و اتلاف انرژی را به حداقل می رساند.

جدول۱- مقایسه جریان و توان پست کشش اول تا چهارم

	بیشینه جریان مصرفی (A)	بیشینه جریان بازیابی (A)	بیشینه توان مصرفی (KW)
پست کشش اول	۲۲۰	۶۱,۴	۳۳۰
پست کشش دوم	۱۴۷	۷۲	۲۲۰,۵
پست کشش سوم	۱۷۸	۱۰۶	۲۶۷
پست کشش چهارم	۳۰۰	۱۴۰	۴۵۱

جدول ۲- بیشینه و کمینه ولتاژ پست ها

پست کشش اول		پست کشش دوم		پست کشش سوم		پست کشش چهارم	
بیشینه ولتاژ	کمینه ولتاژ	بیشینه ولتاژ	کمینه ولتاژ	بیشینه ولتاژ	کمینه ولتاژ	بیشینه ولتاژ	کمینه ولتاژ
۱۵۰۵,۸	۱۴۷۸,۳	۱۵۰۷,۸	۱۴۹۳	۱۵۱۰,۹	۱۴۸۰,۱	۱۵۱۴,۹	۱۴۷۰,۵
۱۵۰۵,۱	۱۴۸۱	۱۵۰۷,۵	۱۴۸۳,۷	۱۵۱۰,۹	۱۴۸۰,۳	۱۵۱۴,۹	۱۴۷۰,۵
۱۵۰۵,۲	۱۴۸۰,۷	۱۵۰۵,۹	۱۴۷۸,۹	۱۵۱۰,۶	۱۴۸۱,۴	۱۵۱۴,۸	۱۴۷۰,۵
۱۵۰۵,۳	۱۴۸۰,۴	۱۵۰۷,۵	۱۴۸۳,۵	۱۵۱۰,۹	۱۴۸۱	۱۵۱۱,۳	۱۴۷۴
۱۵۰۵,۲	۱۴۸۱	۱۵۰۵,۹	۱۴۸۸,۱	۱۵۰۷,۵	۱۴۸۷,۲	۱۵۱۵	۱۴۷۰,۵
۱۵۰۴,۷	۱۴۸۱,۷	۱۵۰۷	۱۴۸۴,۵	۱۵۰۸,۲	۱۴۸۶,۷	۱۵۱۵,۱	۱۴۷۰,۵
۱۵۰۴,۲	۱۴۸۳,۷	۱۵۰۵,۳	۱۴۸۹,۵	۱۵۰۸	۱۴۸۷	۱۵۱۵	۱۴۷۰
۱۵۰۴	۱۴۸۳	۱۵۰۵	۱۴۸۹	۱۵۰۷	۱۴۸۷	۱۵۱۰	۱۴۷۸

با استفاده از جدول ۲ مشاهده می شود که در نصب ذخیره ساز ، بیشینه و کمینه ولتاژ پست ها بهبود یافته است بنابراین در نصب ذخیره سازها جهت کاهش جریان کشیده شده از پست ها با هدف به حداقل رساندن بیشینه جریان کشیده شده از هر پست پیشنهاد می شود.

۶- نتیجه گیری

با پیشرفت های چشم گیری که در صنعت برق رخ داده است انتظار می رود شرکت های توزیع در هر شرایطی، توان با کیفیت بالا را به دست مشتریان خود برسانند. یکی از شرایطی که می تواند این انرژی رسانی به مشترکین را دچار مشکل کند، رخداد خطا در شبکه و به خاموشی فرو رفتن قسمتی از آن است. پس از وقوع خطا و عمل کردن کلیدهای حفاظتی، به دلیل شعاعی بودن ساختار شبکه توزیع، تا زمانی که المان خطادار تعمیر یا تعویض نشود، بارهای پایین دست نقطه خطا بی برق باقی می مانند. در مدت زمان بین جداسازی خطا و رفع عیب، می توان با تغییر در وضعیت کلیدهای شبکه، از مسیرهای دیگر قسمتی یا تمام بارهای بی برق را بازیابی کرد.روند بازیابی باید به گونه ای است که از یک طرف، رضایت مشترکین را برآورده سازد و از طرف دیگرکاهش درآمدهای ناشی از قطعی برق شرکت های توزیع را بهبود بخشد. پس از رخداد خطا و پاکسازی آن باید یک برنامه ریزی دقیق و کارآمد در اختیار اپراتورهای شرکت های توزیع قرار گیرد که با کمترین هزینه، بیشترین بارهای بی برق شبکه را بازیابی کند. اصلی ترین هزینه های بازیابی شامل هزینه های کلیدزنی و انرژی توزیع نشده می باشد که اولی با کاهش تعداد کلیدزنی و دومی با افزایش مقدار بارهای بازیابی شده کاهش می یابند.

حفاظت شبکه در شرایط وقوع خطا یک نیاز اساسی در سیستم قدرت به خصوص در شبکه توزیع است که بیش از ۸۰٪ خاموشی ها در آن رخ می دهدچهارچوب حفاظت بهینه بایستی قادر بـه قطع بخشی از شبکه دچار خطا در کمترین زمان ممکن توسط هماهنگی ما بین ادوات حفاظتی مانند رله ها و محدود کننده جریان خطا (FCL) باشد.علاوه بر این توجه شود که به تازگی شبکه توزیع متشکل از چندین ریزشبکه به علت حضور فناوری های جدید منبع انرژی تجدید پذیر (RES)، سیستم ذخیره سازی انرژی (ESS) و موارد دیگر است که هر ریزشبکه به صورت شبکه چندسو تغذیه می باشد و قادر است در مدهای اتصال به شبکه و جزیره ای فعالیت کند از این رو رله اضافه جریان تنظیم دوگانی (DSOR) نقش مهمی برای حفاظت ریزشبکه در شرایط خطا بازی می کند.

در هر سیستم حمل و نقل، ترمز بخش جدایی ناپذیر و الزامی است. در فرآیند ترمز مرسوم انرژی جنبشی بخش های حرکتی معمولا به علت اصطحکاک به گرما تبدیل می شد و از بین می رفت .اما در ترمز بازیابی، بیشتر انرژی جنبشی بازیابی می شود و در یک ذخیره ساز ذخیره می شود یا همزمان به شبکه برگردانده می شود.موتور القایی و موتور جریان مستقیم سری، موتورهای مناسبی برای کاربرد در شبکه قطار شهری هستند و از میان این دو نوع موتور موتور القایی برای کاربرد در قطار شهری مناسب تر است. بهترین نوع ترمز در این قطارها ترمز بازگشتی است زیرا در این نوع ترمز تلفات به شدت کاهش می یابد و سر و صدا و دیگر معایب ترمزهای دیگر را ندارد. در عمل برای افزایش قابلیت اطمینان ترمز وسیله نقلیه معمولا از ترمزهای ترکیبی که شامل ترمز دینامیکی و هیدرولیکی است استفاده می شود تا در صورت عمل نکردن ترمز دینامیکی از ترمز مرسوم هیدرولیکی استفاده شود . همچنین ذخیره سازهای انرژی ترمزی و نحوه استفاده از ذخیره سازها برای ذخیره انرژی ترمزی که پرکاربردترین ذخیره ساز برای کاربرد در ذخیره سازی انرژی بازیافتی در قطار برقی، ابرخازن ها هستند.

۶-۱- پیشنهادهای پژوهش

- به کارگیری انواع ذخیره سازهای انرژی در شبکه قطار شهری به منظور بهبود کیفیت توان الکتریکی
- بهینه سازی برنامه زمانی حرکت قطارها به منظور کاهش انرژی مصرفی
- بازیافت انرژی در یک شبکه قطار شهری با استفاده از ذخیره ساز SMES
- تأثیر هارمونیک های شبکه قطار شهری با ذخیره ساز بر روی شبکه توزیع

منابع

۱. علیرضا لعل پور, علیرضا نصیری, فرزان رشیدی (۱۴۰۱), مدل سازی و تحلیل دقیق سیستم ذخیره سازی انرژی هیبریدی باتری–ابر خازن در سیستم های ریز شبکه DC, دانشگاه هرمزگان، دانشکده فنی و مهندسی

2. Infield, D. and L. Freris, Renewable energy in power systems. (2020): John Wiley & Sons.
3. Tejeswini, M.V., Jacob -Raglend, I., Yuvaraja, T. and Radha, B.N.,(2019)"An advanced protection coordination technique for solar in -feed distribution systems " , Ain Shams Engineering Journal, Vol. 10. No. 2, pp. 379 – 388.
4. Hamidpour, H., Aghaei, J., Pirouzi, S., Dehghan, S. and Niknam, T., "Flexible, Reliable and Renewable Power System Resource Expansion Planning considering Energy Storage Systems and Demand Response Programs " , IET Renewable Power Generation, No. 11, pp.1 -12, (2019).
5. Soleymani -Aghdam, T., Kazemi -Karegar, H. and Zeineldin, H.H.,(2019). "Optimal Coordination of Double Inverse Overcurrent Relays for Stable Operation of DGs " , IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 1, pp. 183 -192,
6. Kakran, S. and S. Chanana, (2018) Smart operations of smart grids integrated with distributed generation: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews,. 81: p. 524-535.
7. J. C. Lopez, J. F. Franco, M. J. Rider, and R. Romero, (2018)"Optimal restoration/maintenance switching sequence of unbalanced threephase distribution systems," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6058- 6068, Nov.
8. Sharaf, H.M., Zeineldin, H.H., and El -Saadany, E., (2018) "Protection Coordination for Microgrids With GridConnected and Islanded Capabilities Using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays " , IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 1, pp. 143 -151,
9. L. T. Marques, A. C. Delbem, and J. B. London, , May (2018)"Service restoration with prioritization of customers and switches and determination of switching sequence," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 9, no. 3, pp. 2359 - 2370.
10.] Abel -Hafez, A., Omran, W.A. and Hegazy, Y.G., , (2018) "A Decentralized Technique for Autonomous Service Restoration in Active Radial Distribution Networks " , IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 9, No. 3, pp. 1911 – 1919.
11. Solati -Alkaran, D., Vatani, M.R., Sanjari, M.J., Gharehpetian, G.B. and Naderi, M.S., (2018)"Optimal Overcurrent Relay Coordination in Interconnected Networks by Using Fuzzy -Based GA Method " , IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 9, No. 4, pp. 3091 - 3101,.
12. J. C. Cebrian, S. Rahman, and N. Kagan, (2017) "Restoration in distribution systems to reduce financial losses related to process trips," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 1, pp. 219-227, Jan.
13. Wang, et al., (2017)."A multi-stage restoration method for mediumvoltage distribution system with DGs," IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 8, no. 6, pp. 2627-2636, Nov.
14. Saleh, K.A., Zeineldin, H.H. and E l -Saadany, E.F., , (2017) "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N-1 Contingency " , IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 13, No. 5, pp. 2270 -2278.
15. Tjahjono, A. and et al., (2017) "Adaptive modified firefly algorithm for optimal coordination of overcurrent relays " , IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 10, pp. 2575 -2585,.
16. Korde, P.N. and Bedekar, P.P., "Optimal overcurrent relay coordination in distribution system using nonlinear programming method (2016) International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), pp. 372 -376, 2016.

17. X. Yang, X. Li, B. Ning, and T. Tang, (2016) "A survey on energyefficient train operation for urban rail transit," IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 17, no. 1, pp. 2-13, Jan.
18. Messac, (2015) Optimization in Practice with MATLAB: For Engineering Students and Professionals, Cambridge University Press.