Archive of SID

مدیریت هوشمند انرژی در سیستم حمل و نقل برقی

سپهر نجفی لاریجانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

سید سعید فاضل(مسئول مکاتبات)، استادیار، دانشکده راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

E-mail: fazel@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۷/۲۲

چکیده

آلودگی محیط زیست و کمبود انرژی به عنوان بحران‌های جدی، پژوهشگران و صنعت‌گران را بر آن داشته تا به دنبال راهکارهایی مناسب با هدف مدیریت انرژی باشند. صنعت حمل و نقل برقی به ویژه سیستم‌های مترو درون شهری و ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی از جمله مصرف‌کنندگان بزرگ انرژی برای شبکه برق سراسری محسوب می‌گردند، به گونه‌ای که مصرف این بارها، معمولاً با پیک تقاضای برق از شبکه اصلی همزمان است، به همین دلیل این بارها آثار نامطلوبی بر شبکه سراسری برق دارند. استفاده از انرژی عظیم حاصل از ترمز قطارها می‌تواند یکی از مؤثرترین راهکارها برای حل مشکل مذکور باشد. در واقع همانند شبکه‌های قدرت که به دنبال استفاده از منابع تولید پراکنده جهت افزایش بهره‌وری سیستم هستند، انرژی بازگشتی قطارها نیز در سیستم‌های حمل و نقل برقی می‌تواند همچون یک منبع تولید پراکنده در نظر گرفته شود. بنابراین، برای اولین بار، ساختار یک سیستم یکپارچه متشکل از شبکه مترو و ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی با در نظر گرفتن یک ذخیره‌کننده انرژی و با بهره‌گیری از انرژی حاصل از ترمزگیری و انرژی خورشیدی به عنوان تولیدات پراکنده در این مقاله ارائه می‌گردد. این روند به گونه‌ای صورت می‌گیرد که مصرف انرژی مدیریت شده و به منظور کاهش تأثیرات سوء و هزینه‌های زیرساخت و بهره‌برداری، مدل مصرف انرژی از نظر فنی و اقتصادی بهینه‌سازی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، تولیدات پراکنده، ذخیره‌کننده انرژی، سیستم حمل و نقل برقی، مدیریت هوشمند انرژی

www.SID.ir

Archive of SID

۱. مقدمه

امروزه با توسعه سریع صنعت و شهری شدن، کشورها با بحران انرژی و آلودگی زیست محیطی به عنوان مشکلات جدی مواجه هستند [Fuente, de la Mazumder and Ignacio González Franco., 2014; Pankovits et al. 2013]. از این رو، استفاده از سیستم‌های حمل و نقل برقی به عنوان یکی از موثرترین راهکارها جهت کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و متعاقباً کاهش آلودگی هوا و محیط زیست، و همچنین افزایش ظرفیت جا به جایی مسافر در کشورهای پیشرفته، پذیرفته شده است [Srinivasaraghavan and Khaligh, 2011] قطارهای درون شهری (متروها) و همچنین خودروهای الکتریکی از مهمترین این سیستم‌ها به حساب می‌آیند. دی اکسید کربن تولید شده ناشی از جابه‌جایی مسافر برای هر اتومبیل برابر ۱٦٤ گرم و برای هواپیما ۱۰۸ گرم است [Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011]، در حالیکه این مقدار، برای سیستم ریلی تنها ۱۹ گرم است. از طرف دیگر، طبق [Yilmaz and Krein, 2013] تا سال ۲۰۲۰ میلادی، خودروهای الکتریکی به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزا سیستم حمل و نقل در کشورهای پیشرفته شناخته خواهند شد، چراکه علاوه بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، این خودروها خود می‌توانند 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 ایستگاه‌های شارژی نیاز است که برای مصرف کنندگان، همانند پمپ بنزین‌های درون شهری عمل نموده و در سرتاسر شهر موجود باشند. در مقالات مختلف ساختار ایستگاه‌های شارژ مختلفی برای این منظور بررسی شده است، که قریب به اتفاق آنها استفاده از ایستگاه‌های شارژ سریع DC را به عنوان بهترین ساختار جهت شارژ بلند مدت خودروها برای استفاده در مسافت‌های طولانی پیشنهاد نموده‌اند [Aggeler et al. 2010].

علیرغم مزایای شبکه‌های حمل و نقل برقی، این صنعت، مصرف کننده بزرگ انرژی برای شبکه برق سراسری محسوب می‌شود، بنابراین توسعه آن به در نظر گرفتن زیرساخت‌های بزرگ و در نتیجه هزینه‌های بالا نیاز دارد. قطارهای برقی درون شهری و ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی در زمان پیک مصرف، تأثیرات منفی قابل توجهی بر شبکه سراسری دارند [Yilmaz and Krein, 2013]، زیرا تفاوت زیاد مصرف برق توسط آنها در ساعات پیک و و غیر پیک می‌تواند مشکل‌زا باشد.

از این رو، در مقالات مختلف، درخصوص حل مشکل شبکه‌های مترو و خودروهای الکتریکی، به بررسی راه‌کارهایی برای کاهش مصرف انرژی و افزایش راندمان پرداخته شده است. از آن جمله در شبکه‌های مترو درون شهری، استفاده انرژی بازگشتی [Cornic, 2010; Gunselmann, 2005; Hayashiya et al. 2012] 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 می‌شود. در [González-Gil, Palacin and Batty., 2013] استفاده از یک برنامه زمان‌بندی دقیق پیشنهاد می‌شود؛ این پیشنهاد به گونه‌ای است که به محض آنکه یک قطار ترمز می‌کند، قطار دیگر باید برای شتاب‌گیری خود از آن استفاده نماید. ولی با توجه به هدوی‌ها و ظرفیت ناوگان عملی نمودن این روش بسیار مشکل است. در مقالات دیگر [Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011 Lukasiak et al. 2015] بحث استفاده انرژی مذکور در مصارف داخلی ایستگاه‌های 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. در ادامه به استفاده از ذخیره کننده‌های انرژی از جمله: باتری‌ها، فلای‌ویل [Bolund, Bernhoff and Leijon, 2007; Tzeng, Emerson and Moy., 2006]، و ابرخازن‌ها [Steiner, Klohr and Pagiela., 2007] برای استفاده مجدد از انرژی مذکور، نیز در مقالات مختلف پرداخته شده است [Okui et al. 2010; Ratniyomchai, Hillmansen and Tricoli., 2014] که این ایده پایه‌ای برای ساختار پیشنهادی این مقاله خواهد بود.

روش‌هایی مانند استفاده از تولیدات پراکنده نیز در سیستم حمل و نقل برقی [Hayashiya et al. 2013; Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011] پیشنهاد شده است. مشخصاً برای خودروها استفاده از تولیدات پراکنده الکتریکی [Lund and Kempton, 2008] و ذخیره‌سازهای انرژی [Sbordone et al. 2015] به منظور جبران تأثیر منفی خودروهای الکتریکی بر روی شبکه توزیع پیشنهاد شده است؛ در این روش با توجه به کلان بودن مقدار انرژی مورد نیاز برای

www.SID.ir

Archive of SID

کاهش تأثیرات، فقط قسمتی از آن فراهم خواهد شد. رویکرد دیگر در [Yilmaz and Krein, 2013] هدف مدیریت مصرف انرژی با طرح‌های تشویقی و اجباری را دنبال می‌کند که نوعی محدودیت برای مصرف کنندگان به حساب می‌آید و در صنعت عملی نخواهد بود. از این رو، روش‌های ارائه شده امکان مرتفع کردن مشکلات مطروحه را فراهم نمی‌کنند. در نتیجه، ساختار یکپارچه‌ای که جوانب موضوع را در برگرفته و محدودیت‌های روش‌های قبل را نداشته باشد، در این مقاله مطرح می‌گردد.

اگر بتوان یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند پیشنهاد نمود و در روند مصرف انرژی شبکه مترو و همچنین ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی، از ذخیره‌کننده‌های 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 بهره‌برداری حاصل خواهد شد و تأثیرات سوء سیستم حمل و نقل برقی نیز کاسته می‌گردد.

۲. اجزای یکپارچه سیستم حمل و نقل برقی هوشمند

اولین قدم در یکپارچه‌سازی سیستم حمل و نقل برقی، شناخت مشخصات تغذیه و مصرف‌کنندگان آن است. در ساختار هوشمند پیشنهادی در این مقاله، چهار مورد بدنه اصلی سیستم، یعنی راه‌آهن برقی درون شهری (مترو)، ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی، ذخیره‌ساز انرژی و پنل‌های خورشیدی قرار است با یکدیگر تبادل انرژی داشته باشند، که در ادامه به شرح مشخصات هر یک پرداخته خواهد شد.

۲-۱ سیستم راه آهن برقی درون شهری

سیستم راه‌آهن برقی درون شهری معمولاً با ولتاژ DC با سطوح ۷۵۰ و ۱۵۰۰ ولت کار می‌کند. بزرگی و متغیر بودن مصرف برق توسط این سیستم باعث شده تا بهره‌برداران این حوزه پست جداگانه به نام کشش برای تغذیه آن در نظر بگیرند [Fuente, de las Mazumder and Ignacio González Franco, 2014] و سعی بر بهبود مدل مصرف انرژی آن داشته باشند. مصرف انرژی در لایه‌های مختلف برق‌رسانی به این سیستم چند مورد اصلی را در بر می‌گیرد: تلفات و مصارف اصلی زیرساخت، بار کشش، مصارف داخلی ایستگاه‌ها، مقاومت‌های حرکتی و تلفات ناشی از ترمز که درصد زیادی از انرژی کل را تشکیل می‌دهد و مقدار آن بسته به ساختار و نوع سیستم متفاوت است [González-Gil et al. 2013]. مقدار انرژی حاصل از ترمز به طور میانگین نصف مقدار کل انرژی داده شده به سیستم قطار برقی گزارش شده که با افزایش تعداد ترمزها در قطارهای درون شهری افزایش می‌یابد [Steiner and Scholten, 2004]. یک سوم این مقدار به دلیل تلفات درمبدل‌ها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال و البته تلفات داخلی موتورها قابل بازگشت نیست. بنابراین در حالتی که موتورهای الکتریکی به حالت ژنراتوری عمل کنند، مقدار بازیابی بیش از ۳۰٪ مقدار کل انرژی ممکن است. اگر سیستم تغذیه در ایستگاه‌ها و پست کشش به صورت دوطرفه در نظر گرفته شود، انرژی مازاد مذکور قابلیت تزریق به شبکه اصلی برق و یا به قطارهای مجاور در صورت حضور و نزدیکی دارد[Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011]. در غیر این صورت انرژی مذکور توسط مقاومت‌هایی که روی قطارها یا در کنار خط تعبیه شده است تبدیل به گرما می‌شود [Lukasiak et al. 2015].

برای جلوگیری از این اتلاف انرژی، مصرف آن در داخل و یا خارج از سیستم، راهکار مناسب خواهد بود. بکارگیری ذخیره کننده‌های انرژی، به عنوان واسطه‌ای برای تبادل انرژی مورد بحث در مقالات روز دنیا به حساب می‌آید که جزئیات آن در قسمت بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲-۱ ذخیره‌کننده‌های انرژی ESS[1]

اهدافی که سیستم ذخیره کننده انرژی برای پیاده سازی ایدهٔ ساختار هوشمند این مقاله دنبال خواهد کرد به شرح ذیل خواهد بود :

۱- کاهش پیک مصرف توان به منظور متعادل کردن مصرف برق
۲- پایدارسازی ولتاژ [Gunselmann, 2005]
۳- جلوگیری از پیک‌های شدید در سیستم DC مورد نظر
٤- پاسخگویی به موقع به تقاضای مصرف‌کننده در صورت لزوم

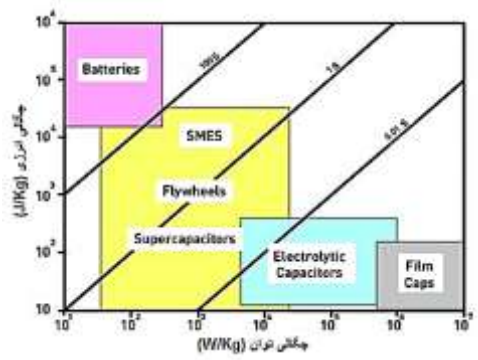
بنابراین، ذخیره‌کننده‌های انرژی در ساختار یکپارچه پیشنهادی، نقش ذخیره‌سازی انرژی را دارند، تا در شرایط مشخص شده

www.SID.ir

Archive of SID

توسط سیستم مدیریت هوشمند انرژی، به عنوان منبع تغذیه کمکی مورد استفاده قرار گیردند.

پژوهش‌های به عمل آمده در خصوص فناوری ذخیره‌کننده‌های انرژی، کاربرد آنها را در زمینهٔ حمل و نقل افزایش داده است. در خصوص کاربرد مذکور، سه مورد شامل ابرخازن‌های دولایه، باتری‌ها و فلایویل‌ها کارآمدی خود را نشان داده‌اند. مقایسه ذخیره کننده‌های انرژی همانطور که در شکل (۱) نمایش داده شده است، بر حسب چگالی انرژی، چگالی توان و دینامیک آنها انجام می‌گردد. چگالی توان نامناسب باتری‌ها یک ویژگی بد برای آنها محسوب می‌شود، این در حالی است که بهترین چگالی انرژی بین ذخیره کننده‌ها را دارا است. ابرخازن‌ها این مشکل را ندارند و به علاوه نسبت به باتری ها تعداد سیکل‌های بیشتری می‌توانند ایجاد کنند که باعث افزایش طول عمر آن‌ها می‌شود. اما از طرفی چگالی توان پایین ابرخازن‌ها، به کارگیری آنها را زیر سوال می‌برد. بنابراین ایده‌هایی مثل استفاده از هردوی آنها به صورت اصطلاحاً هایبرید می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱. ویژگی‌های سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی [Akli et al. 2007]

در خصوص ذخیره کننده انرژی مورد استفاده در سیستم‌های قطار برقی شایان ذکر است مطابق شکل (۲)، آنها می‌توانند هم

شکل ۲. سیستم قطار برقی با در نظر گرفتن ذخیره کننده انرژی

مراکز تجاری را فراهم کرده و به راحتی قابلیت تبادل انرژی با شبکه‌های دیگر را دارد. پیش‌بینی شده است که در آینده مطابق

کنار خط ریل و هم بر روی قطارها نصب گردند. مسلماً به دلیل نبود تلفات خط انتقال، راندمان سیستم های نصب شده روی قطار بالاتر خواهد بود اما از طرفی وزنی که آنها متوجه قطارها می‌کنند محدودیت برای استفاده از آنها به شمار می‌رود [Akli et al. 2007].

۲-۲ خودروهای الکتریکی EV[۲]

خودروهای الکتریکی به علت استفاده از انرژی الکتریکی به جای سوخت‌های فسیلی به تازگی به عنوان یک جایگزین مناسب برای خودروهای مرسوم در نظر گرفته شده‌اند [Lassila et al. 2012] مدت‌ها جامعه مهندسی وسایل نقلیه بر روی استاندارد J1772 که در خصوص شارژرهای خودروهای الکتریکی است، کار کرده است و سه دسته‌بندی برای آنها ارائه می‌کند [Dickerman and Harrison, 2010] :

الف) دسته اول: شارژرها برروی خودروها نصب شده است که ولتاژ AC ۱۲۰ یا ۲٤۰ ولتی با بیشینه جریان ۱۵ آمپر را فراهم می‌کنند و منجر به ایجاد توان بیشینه ۳,۳ کیلووات می‌گردند.

ب) دسته دوم: شارژرها برروی خودروها نصب شده است که ولتاژ AC ۲٤۰ ولتی با بیشینه جریان ٦۰ آمپر را فراهم می‌کند و منجر به ایجاد توان بیشینه ۱٤,٤ کیلووات می‌گردند.

ج) دسته سوم: شارژرها در ایستگاه‌ها نصب شده است که ولتاژ DC را مستقیماً با توان بیشینه ۲٤۰ کیلوواتی به باتری خودرو تزریق می‌کنند. این نوع از شارژرها به اسم ایستگاه‌های شارژ سریع DC شناخته شده‌اند، در حالی که انواع قبلی به دلیل اینکه فقط از شبکه AC تغذیه می‌شوند به کندی عمل شارژ را انجام می‌دهند [Morrow, Karner and Francfort., 2008].

از بین این دسته‌ها، نوع سوم شارژرها مورد استقبال صنعت‌گران واقع شده است زیرا امکان نصب آنها در مکان‌های عمومی مثل

www.SID.ir

Archive of SID

مشکلات ذکر شده فائق آمد که در قسمت آخر به جزئیات آن پرداخته خواهد شد.

۲-۳ منابع تولید پراکنده خورشیدی

امروزه ایدهٔ تولید محلی انرژی الکتریکی به عنوان یک منبع انرژی کمکی، برای کاهش آلودگی و بهینه کردن مصرف انرژی، بحث روز مقالات و صنعت هست. استفادهٔ این منابع در سیستم حمل و نقل برقی بستگی به ویژگی‌های سیستم و قابل استفاده بودن آن‌ها در ساختار مورد نظر دارد. با توجه به مقالات ارائه شده در این زمینه، استفاده از انرژی تولیدی پنل‌های خورشیدی PV[۳] در سیستم قطار و خودروهای الکتریکی امکان پذیر هست [Faranda and Leva, 2007; TramStore21, n.d]. به طوری که ایدهٔ نصب پنل‌ها بر روی سقف ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی و ایستگاه‌های توقف قطار برقی، در امتداد خط ریل و نهایتاً پایانه‌های قطار برقی در مقالات ارائه شده است [Hayashiya, Furukawa, et al. 2011].

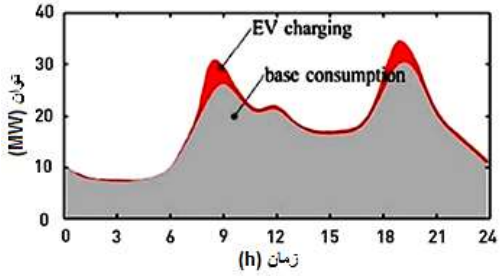
انرژی خورشیدی از طریق پنل‌ها می‌تواند به انرژی الکتریکی در حالت DC تبدیل گردد. بنابراین برای به کارگیری در برخی مصارف الکتریکی، ولتاژ باید به حالت AC تبدیل گردد و این پروسه در راندمان ۸۷ درصد اتفاق می‌افتد [Jaffery et al. 2012] به علاوه در [Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011] نیز ترجیح استفاده از این منابع در کاربرد حمل و نقل، در حالت DC اعلام شده است. بنابراین در سیستم حمل و نقل برقی که مورد بحث این مقاله است به کارگیری منابع تولید خورشیدی، توجیه‌پذیر خواهد بود.

پروژهٔ Emission Free که در ژاپن محقق گردیده است به عنوان یک نمونه استفاده از پنل‌های خورشیدی در سیستم قطار برقی است. این پروژه با استفاده از مدیریت هوشمند و بهره گیری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی، تغذیه انرژی مصرفی یک ایستگاه قطار برقی، حتی در زمان پیک مصرف را در ۱۷۰ روز از سال به تنهایی انجام می‌دهد [Hayashiya et al. 2013].

به علاوه در پژوهش‌ها نشان داده شده است که این منابع تولید پراکنده می‌توانند در تغذیه سیستم‌های سیگنالینگ و مصارف داخلی ایستگاه‌های قطار برقی [Vrignaud, 2011] و ایستگاه‌های شارژ سریع DC خودروهای الکتریکی نقش مکمل را ایفا کنند [Lund and Kempton, 2008] و مصرف انرژی از شبکه اصلی و هزینه منتجه از آن را بکاهند. نمونه نصب شده شکل (۳) این ایستگاه‌ها نقش جایگزین برای پمپ‌های بنزین را بازی کنند [Aggeler et al. 2010]. از این رو کشورهای توسعه یافته قصد برنامه ریزی مدون برای به کارگیری این سیستم‌ها را در برنامه دارند.

اما از طرفی، ایستگاه‌های شارژ سریع می‌توانند تأثیرات بدی بر شبکه بالاسری خود (شبکه توزیع) وارد کنند، زیرا توان مصرفی آنها بالا بوده و تقریباً دوبرابر مشترکین خانگی مصرف برق دارند. از آنجایی که زمان تقاضای توان توسط خودروهای الکتریکی با پیک مصرف دیگر مشترکین شبکه اصلی برق هم‌پوشانی دارد، مشکلاتی از قبیل افزایش پیک مصرف شبکهٔ اصلی مطابق شکل (٤)، کاهش قابلیت اطمینان، انحراف ولتاژ، افزایش تلفات، کاهش ضریب بار، ایجاد اضافه بار بر روی کابل و ترانسفورماتورهای شبکه توزیع و افزایش هزینه برق مصرفی را به دنبال خواهد داشت [Yilmaz and Krein, 2013].

شکل ۳. ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی [Botsford and Szczepanek, 2009]



شکل ٤. نمودار مصرف شبکه اصلی برق با و بدون در نظر گرفتن خودروهای الکتریکی و بدون در نظر گرفتن سیستم مدیریت هوشمند انرژی [Yilmaz and Krein, 2013]

حال با ارائه ساختاری که در آن سیستم مدیریت هوشمند انرژی اولویت مصرف قطارهای برقی درون شهری و خودروی الکتریکی را مشخص می‌کند و با در نظر گرفتن ذخیره کننده‌های انرژی و پنل‌های خورشیدی [Lund and Kempton, 2008] به عنوان مکملی برای سیستم تغذیه، می‌توان بر

www.SID.ir

Archive of SID

2011] که به عنوان واسطه‌ای برای تبادل انرژی بین سیستم قطار برقی و دیگر مصارف الکتریکی معرفی شد، راه حلی مناسب برای مرتفع کردن این مشکل نیز قلمدادخواهد گردید.

۳. یکپارچه‌سازی سیستم حمل و نقل برقی

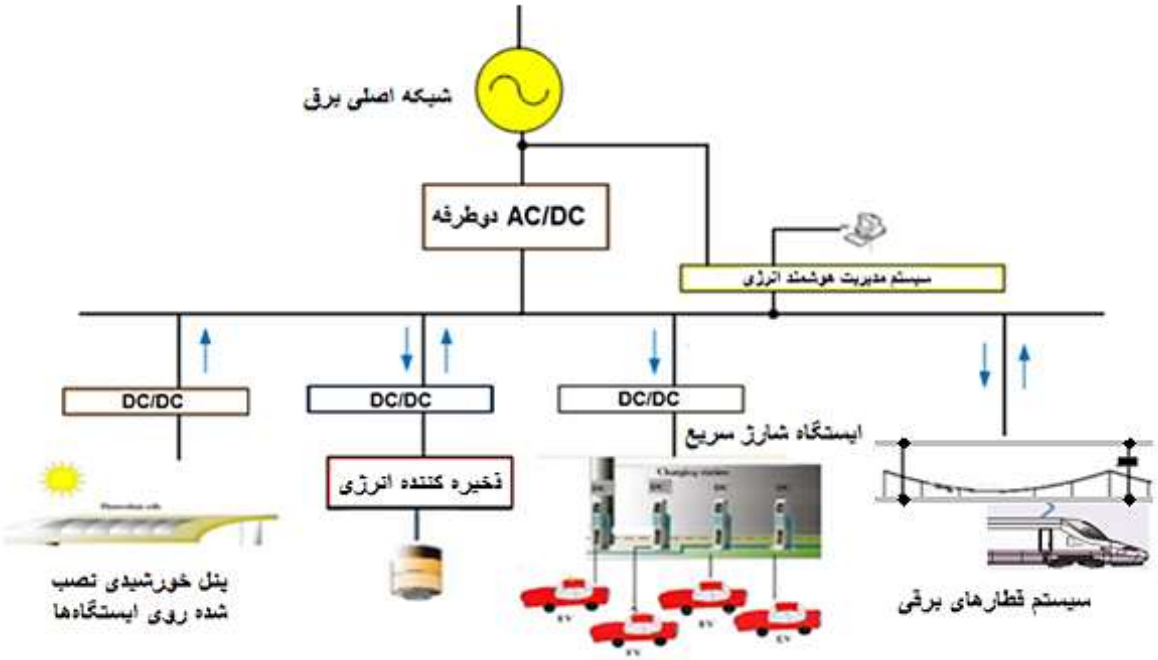
پس از شناخت اجزای سیستم حمل و نقل مورد نظر، می‌توان به بررسی ساختار یکپارچه آنها در کنار یکدیگر پرداخت. به منظور یکپارچه سازی، می‌توان آرایش مناسبی در نظر گرفت که با توجه به الزامات سیستم، هر آرایش شاخص‌های متعدد مثل قابلیت اطمینان، بازده، هزینه و سایر موارد مد نظر یک بهره‌بردار را با کیفیت متفاوت برآورده می‌سازد. بنابراین آرایش مناسب، با توجه به شرایطی که بهره‌بردار مطرح می‌نماید، انتخاب می‌گردد.

با در نظر گرفتن یک ساختار ساده و با توجه به اینکه تمامی اجزا سیستم حمل و نقل برقی مورد بحث، با ولتاژ DC کار می‌کنند، این امکان وجود دارد که با انتخاب یک شین DC به عنوان واسطه تبادلات انرژی مطابق شکل (٦)، ارتباط تمامی اجزا برقرار گردد.

پنل‌های خورشیدی در ایستگاه توقف قطار برقی در ژاپن در شکل (۵) آورده شده است.

شکل ۵. نمونه پنل خورشیدی نصب شده بر روی سقف ایستگاه سیستم قطار برقی در ژاپن [Hayashiya, Yoshizumi, et al. 2011]

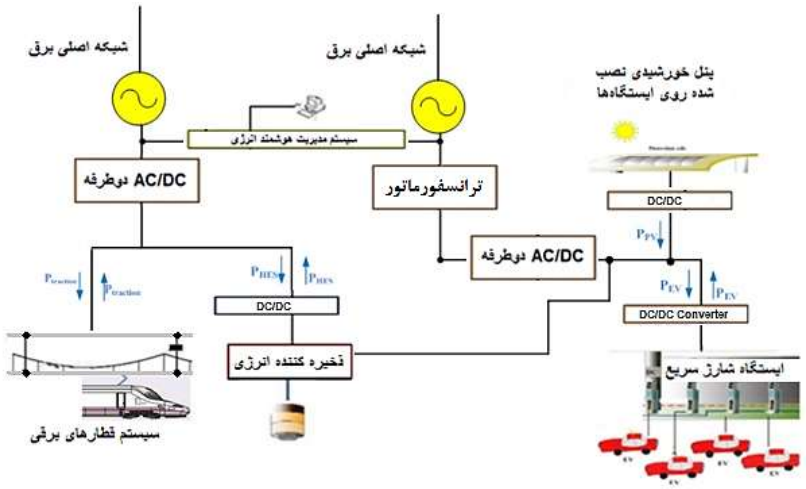
شایان ذکر است، با تمام اوصاف ذکر شده، محدودیت‌هایی در این خصوص وجود دارد که عدم تطبیق زمانی و مکانی تولید این منابع با مصارف مورد نظر مهمترین آن‌ها است. بنابراین ذخیره کننده‌های انرژی [Hayashiya, Furukawa, et al.



شکل ٦. ساختار یکپارچه اجزا، با در نظر گرفتن شین DC به عنوان واسطه تبادلات انرژی

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۷. ساختار یکپارچه اجزا، با در نظر گرفتن ذخیره‌کننده انرژی به عنوان واسطه تبادلات انرژی

شده و تبادل انرژی بین آنها مطابق شکل (۷) از طریق ذخیره کننده به عنوان واسطه تبادلات انرژی، به عمل آید.

به منظور بررسی تفاوت‌های دو پیکره‌بندی، می‌بایست در نظر داشت در ساختاری که تمام اجزا به شین DC متصل هستند، نوسان ولتاژ بر روی شین DC (به دلیل اتصال مستقیم تولیدات پراکنده بدون ذخیره کننده انرژی به شین) مشکل‌زا خواهد بود که باید با بهره‌گیری از یک سیستم کنترلی پیچیده، پایداری ولتاژ شین تضمین گردد. همچنین مبدل‌های استفاده شده در این ساختار باید به گونه‌ای باشند که روند ازبین بردن فلیکرهای ولتاژ را میسر کنند. این در حالی است که در ساختار پیشنهادی دوم، پنل‌های خورشیدی به ذخیره کننده انرژی متصل هستند (حالت Dispatchable) و انرژی برگشتی حاصل از ترمزگیری قطار نیز، مستقیماً به ذخیره‌کننده انرژی که واسطه تبادل انرژی بین مترو و خودرو الکتریکی در نظر گرفته شده است، تزریق می‌شود. بنابراین، طبق استاندارد IEEE-1547 مشکل فلیکر ولتاژ به صورت خودبه خودی مرتفع می‌گردد. در ادامه گفتنی است که برخوردار بودن از یک زیرساخت مجزا برای هر مصرف کننده مسلماً قابلیت ضریب اطمینان را افزایش خواهد داد. اما از طرفی احداث و بهره‌برداری از دو زیرساخت مطمئناً مستلزم در نظر گرفتن تعداد تجهیزات و هزینه دو برابر و سیستم مدیریت جامع پیچیده‌تر و پرهزینه‌تر خواهد بود.

بنابراین، با توجه به این هدف دراین مقاله توزیع بهینه توان از نظر اقتصادی مد نظر است، آرایش اول که از نظر اقتصادی بهینه‌تر بوده، مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

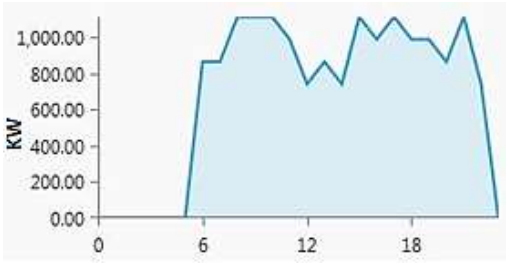
با نگاه دیگر، زیرساخت ایستگاه‌های شارژ سریع خودرو الکتریکی که برای اولین بار پایه گذاری می‌شود مستلزم جایابی مناسب در سطح شهر خواهد بود و هزینه‌های زیرساخت قابل توجهی را به دنبال خواهد داشت. با توجه به فاصله‌های کم بین ایستگاه‌های مترو در شهر، می‌توان ایستگاه‌های شارژ سریع خودروهای الکتریکی را به گونه‌ای طراحی کرد که در مجاورت ایستگاه‌های مترو، قرار گیرند، بدین ترتیب ساخت ایستگاه‌های شارژ به طور گسترده (که الزام آن در قسمت مربوطه ذکر شد)، در زیر ساخت‌های مترو، به راحتی برآورده می‌گردد. در واقع می‌توان این‌گونه تعبیر نمود که یک ریزشبکه DC در سراسر شهر ایجاد خواهد شد تا اجزای سیستم حمل و نقل پیشنهادی در آن تبادل هوشمند انرژی داشته باشند. در این ساختار است یک زیرساخت برای سیستم تأمین توان هر دو ایستگاه مترو و خودرو الکتریکی در نظر گرفته می‌گردد و پنل‌های خورشیدی نیز می‌توانند بر روی سقف ایستگاه‌ها نصب گردند تا سطح انرژی موجود در ذخیره کننده‌ها به عنوان سیستم تغذیه کمکی، افزایش یابد.

این تولیدات پراکنده و ذخیره کننده‌های انرژی نیز می‌بایست به شین DC مشترک متصل گردند. به دلیل عدم تطابق زمان مصرف و تولید اجزای سیستم، یک ذخیره‌ساز واسط به منظور امکان پذیر نمودن تبادل انرژی بین آنها لازم است.

بنابراین ساختاری دیگر با قابلیت اطمینان بیشتر، که امکان تبادل انرژی با راندمان بهتر را برای سیستم فراهم می‌کند به صورتی است که مترو و خودرو الکتریکی با زیرساخت جداگانه تغذیه

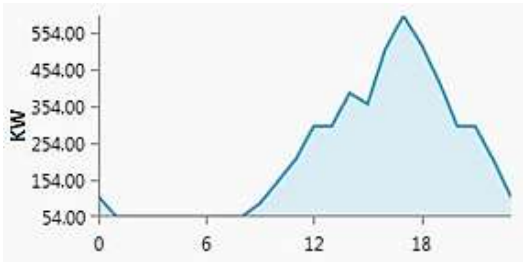
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸ . بار مصرفی سیستم قطار درون شهری

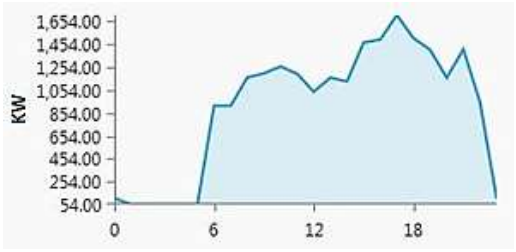
برای مصرف‌کنندهٔ ایستگاه شارژ سریع خودرو الکتریکی با در نظر گرفتن چهار شارژر ۱۵۰ کیلوواتی برای ایستگاه پیشنهادی طبق[Martins and Trindade, 2015] پروفیل مصرف توان مطابق شکل (۹) منظور شده است.



شکل ۹. بار مصرفی ایستگاه شارژ سریع DC خودرو الکتریکی

شکل (۱۰) مجموع دو بار مصرفی را به صورت نمودار نمایش داده است که به عنوان کل بار سیستم در طی ساعات روز می‌بایست تغذیه گردد.

$$P_{GRID}+P_{PV}+P_{ESS}+P_{Regenerative\ Braking}= P_{Fast\ Charging\ Station}+P_{Electric\ Railway\ System} \quad (۱)$$



شکل ۱۰. مجموع دو بار مصرفی سیستم حمل و نقل برقی

٤. بهینه‌سازی اقتصادی توزیع توان

در ابتدا باید توجه داشت، تأثیر منفی ایستگاه‌های شارژ خودرو الکتریکی بر روی شبکه، به مراتب بیشتر از شبکه‌های مترو است زیرا این ایستگاه‌ها به عنوان مصرف کننده‌های مستقیم شبکه‌های توزیع در نظر گرفته می‌شوند، در حالیکه شبکه‌های مترو معمولاً پست‌های تغذیه جداگانه خود را دارند [Fuente, de la Mazumder and Ignacio González Franco., 2014]. این مهم، باعث شده تا تولید پراکنده این قطارها یعنی انرژی حاصل از ترمزگیری، فقط در داخل سیستم خود قطار استفاده نشود و مقداری از آن در اختیار خودروهای الکتریکی قرار گیرد. بنابراین برای توزیع توان، رابطه (۱) برقرار می‌گردد، که در یک طرف تساوی منابع تأمین توان سیستم حمل و نقل مورد نظر از جمله شبکه اصلی برق، تولیدات پراکنده (انرژی خورشیدی و انرژی حاصل ترمزگیری قطارها) و ذخیره‌کننده‌های انرژی قرار دارند و در طرف دیگر مصرف‌کننده‌ها واقع شده‌اند.

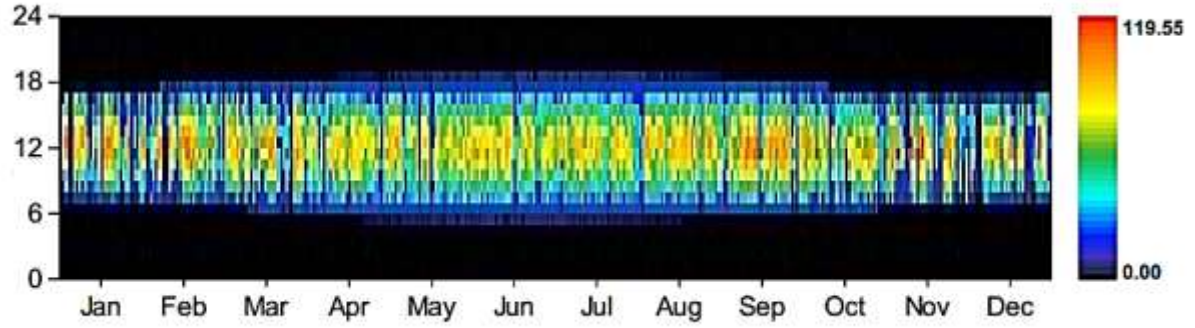
در رابطه شماره (۱)، P_{GRID} توان کشیده شده از شبکه سراسری برق، P_{PV} توان تولیدی پنل خورشیدی، P_{ESS} توان ذخیره‌کننده انرژی، $P_{Regenerative\ Braking}$ توان تولیدی حاصل ترمزگیری قطارها، $P_{Fast\ Charging\ Station}$ توان مصرفی ایستگاه‌های شارژ سریع خودرو و $P_{Electric\ Railway\ System}$ توان مصرفی مترو هست.

در این مقاله سیستم حمل و نقل مورد بحث، در محیط نرم‌افزار HOMER شبیه‌سازی شده تا با بهره‌گیری از الگوریتم PSO[٤]، مقدار متغیرهای رابطه مذکور در هر دقیقه (به عنوان گام زمانی) در بهینه‌ترین حالت در طول روز، از نظر اقتصادی و فنی منظور شود. در این رابطه متغیرها P_{GRID} و P_{ESS} هستند و برای بقیه مقادیر در هر دقیقه طبق نمونه واقعی اندازهٔ معینی در نظر گرفته شده است.

برای مصرف‌کنندهٔ سیستم قطار برقی درون شهری، مصرف روزانه یک ایستگاه مترو خط یک تهران از پست RS[٥]، به عنوان نمونه و مطابق شکل (۸) در نظر گرفته شده است.

www.SID.ir

Archive of SID



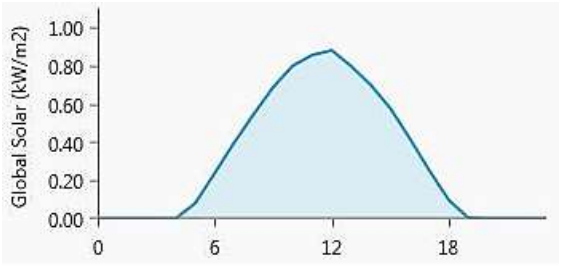
شکل ۱۱. توان خروجی PV در طول سال در سیستم پیشنهادی

در خصوص تولید پراکنده انرژی خورشیدی با استفاده از نرم‌افزار HOMER که به مرکز ناسا وصل هست، پروفیل تولید توان در تهران در طی سال به صورت شکل (۱۱) قابل ملاحظه خواهد بود.

مقدار توان PV نصب شده روی سقف ایستگاه، طبق رابطه (۲) و نمودار شکل (۱۲) محاسبه خواهد شد. با واحد در نظر گرفتن بازدهی و باتوجه به اینکه ایستگاه نمونه ۱۰۰ متر مربع فضای دسترس برای نصب پنل خورشیدی دارد، بنابراین عدد ۱۰۰ کیلووات برای مقدار بیشینه در نظر گرفته می‌شود و برای بقیه زمان‌ها متعاقباً مقادیر قابل محاسبه خواهند بود.

$$P_{pv}=S_{pv}.Ir.\eta \qquad (۲)$$

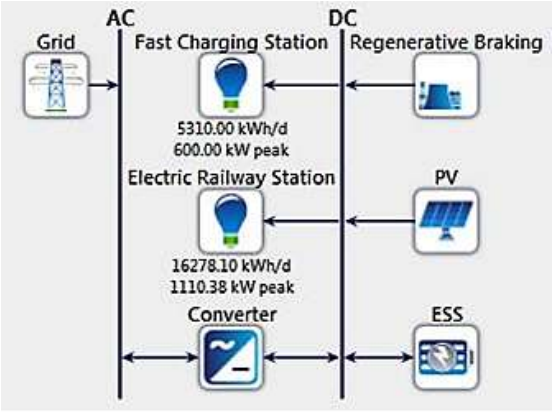
این رابطه بیانگر توان تولیدی پنل‌های خورشیدی است که در مقاله [Pankovits et al. 2013] برای سیستم مشابه مورد بحث قرار گرفته است و در آن I_r مربوط به تابش خورشید (محور عمودی شکل (۱۲))، S_{pv} سطح ناحیه نصب و η بازدهی است.



شکل ۱۲. تابش خورشید در طول یک روز نمونه در سیستم پیشنهادی (Ir)

در خصوص انرژی حاصل از ترمزگیری قطارها نیز، باتوجه به توضیحات قسمت قطارهای برقی در این مقاله، مقدار ۳۰ درصد از توانی که توسط این سیستم مصرف می‌شود به عنوان تولید پراکنده در نظر گرفته شده است.

در ادامه همانطور که شماتیک سیستم مورد بحث در شکل (۱۳) مشاهده می‌گردد، ساختار در محیط نرم‌افزار HOMER شبیه‌سازی می‌گردد. تا تفاوت آن با سیستم سنتی که دو مصرف کننده صرفاً از شبکه اصلی تغذیه می‌گردند، مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۳. پیکره‌بندی سیستم

www.SID.ir

Archive of SID

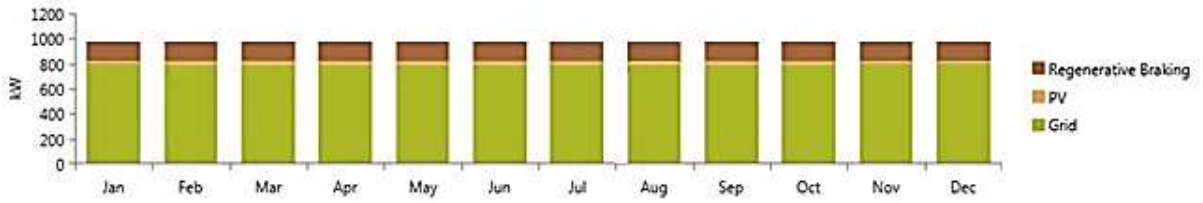
در این مطالعه با پیاده‌سازی الگوریتم MOPSO[٦] یعنی PSO چند منظوره، قیود مصرف انرژی و قیمت را مبنا قرار داده تا بهینه‌ترین مقادیر متغیرها را در هر زمان بدست آوریم و با در نظر گرفتن سه مقدار متفاوت برای قیمت خریداری برق از شبکه اصلی، تفاوت هزینه در طول روز، به صورت پویا منظور گردیده است.

در شکل (١٤) توزیع قیمت در طول روز نشان داده شده است که رنگ سبز به معنای مصرف کم بارها (off peak)، رنگ قرمز پیک مصرف (peak) و رنگ آبی به معنای مصرف معمولی (shoulder) است.

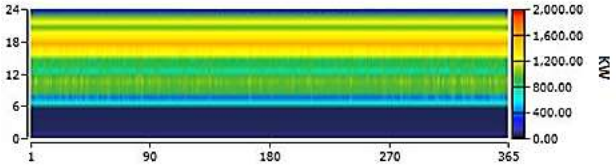
شکل ١٤. توزیع قیمت در طول روز

همانطور که در شکل (١٥) ملاحظه می‌گردد، به دلیل استفاده از ذخیره‌کننده انرژی و بهره‌گیری از سیستم مدیریت هوشمند، علاوه بر کاهش پیک مصرف بارها از ١٦٥٤ کیلووات به ١٠٠٠ کیلووات در میانگین ماهانه، قسمتی از آن توسط تولیدات پراکنده تأمین شده است. به علاوه با توجه به نتایج به دست آمده توسط نرم‌افزار، برق خریداری شده از شبکه اصلی از مقدار ٨٧٥٠٤٨٠ به ٦٩٩٦٩٥٣ کیلووات ساعت کاهش یافته است.

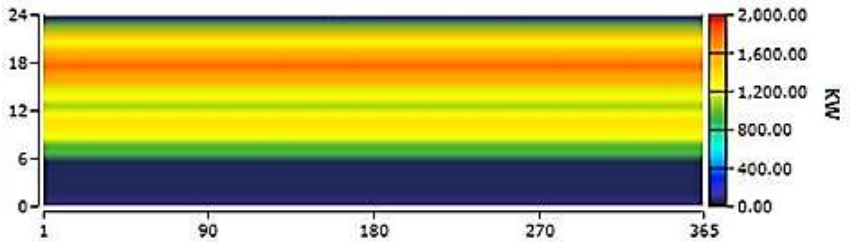
در ادامه همانطور که در اهداف مقاله ذکر شد، به کارگیری این ساختار هوشمند منجر به کاهش تأثیرات منفی سیستم حمل و نقل برقی به شبکه اصلی خواهد شد. این مهم، از مقایسه شکل‌های (١٦) و (١٧) قابل استنباط است. در سیستم سنتی، مصرف برق از شبکه در ساعت‌های پیک نزدیک به طیف رنگ قرمز بوده که به معنای تأمین تمام ١٦٥٤ کیلووات (پیک مصرف بارها) به طور کامل از شبکه است. اما در سیستم پیشنهادی این ساعت از روز به سمت طیف زرد رنگ رفته و این به معنای کاهش مصرف از شبکه در ساعت پیک و متعاقباً کاهش اثرات سوء بر آن است. (در شکل‌های (١٦) و(١٧) محور افقی ٣٦٥ روز سال است.)



شکل ١٥. میانگین ماهانه مصرف توان الکتریکی در سیستم پیشنهادی



شکل ١٦. انرژی خریداری شده از شبکه در طول سال در سیستم پیشنهادی



شکل ١٧. انرژی خریداری شده از شبکه در طول سال در سیستم سنتی

www.SID.ir

Archive of SID

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با نگاه سیستمی به صنعت حمل و نقل برقی، ساختار یکپارچه‌ای از اجزای آن برای اولین بار در کنار هم مورد بررسی قرار گرفت. با بررسی ویژگی‌های هر یک از اجزای ساختار، یعنی تولیدات پراکنده و ذخیره کننده‌های انرژی در کنار سیستم قطار برقی درون شهری و ایستگاه‌های شارژ سریع DC خودرو الکتریکی، آرایش مناسب برای سیستم حمل و نقل برقی ارائه گردید. سپس در محیط نرم‌افزار HOMER پیکره‌بندی مورد نظر با در نظر گرفتن نمونه‌های واقعی اجزا، شبیه‌سازی شد. نتیجه‌ی این شبیه‌سازی نمایانگر آن است که با پیک‌سایی مصرف بارها، علاوه بر جلوگیری از تأثیرات منفی سیستم تغذیه سیستم حمل و نقل برقی مذکور، مدل مصرف انرژی و نهایتاً نحوه‌ی توزیع توان الکتریکی از دیدگاه اقتصادی و فنی بهینه گردیده است.

٦. پی نوشت‌ها

1. Energy Storage System
2. Electric Vehicle
3. Photovoltaic
4. Particle Swarm Optimization
5. Rectifier Station
6. Multi Objective Particle Swarm Optimization

۷. مراجع

- Aggeler, D., Canales, F., Zelaya, H., La Parra, D., Coccia, A., Butcher, N. and Apeldoorn, O. (2010) "Ultra-fast DC-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE, pp. 1–8.

- Akli, C. R., Roboam, X., Sareni, B. and Jeunesse, A. (2007) "Energy management and sizing of a hybrid locomotive", Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on, Vol. c, IEEE, pp. 1–10.

- Bolund, B., Bernhoff, H. and Leijon, M. (2007) "Flywheel energy and power storage systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, Vol. 11, No. 2, pp. 235–258.

- Botsford, C. and Szczepanek, A. (2009) "Fast charging vs. slow charging: Pros and cons for the new age of electric vehicles", International Battery Hybrid Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, pp. 1–9.

- Cornic, D. (2010) "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation", Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE, pp. 1–9.

- Dickerman, L. and Harrison, J. (2010) "A new car, a new grid", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 8, No. 2, p. 55.

- Faranda, R. and Leva, S. (2007) "Energetic sustainable development of railway stations", 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, pp. 1–6.

- Fuente, E. P. de la, Mazumder, S. K. and Ignacio González, Franco (2014) "Railway electrical smart grids", IEEE Electrification Magazine, September, pp. 49–55.

- González-Gil, A., Palacin, R. and Batty, P. (2013) "Sustainable urban rail systems: Strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy", Energy Conversion and Management, Elsevier, Vol. 75, pp. 374–388.

- Gunselmann, W. (2005) "Technologies for increased energy efficiency in railway systems", Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, IEEE, p. 10–pp.

- Hayashiya, H., Furukawa, T., Itagaki, H., Kuraoka, T., Morita, Y., Fukasawa, Y. and Mitoma, Y., ... (2011) "Potentials, peculiarities and prospects of solar power generation on the railway premises", 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 11-14 November 2012.

- Hayashiya, H., Kikuchi, S., Matsuura, K., Hino, M., Tojo, M., Kato, T., Ando, M., et al. (2013) "Possibility of energy saving by

www.SID.ir

Archive of SID

- Okui, A., Hase, S., Shigeeda, H., Konishi, T. and Yoshi, T. (2010) "Application of energy storage system for railway transportation in Japan", 2010 International Power Electronics Conference - ECCE Asia -, IPEC 2010, pp. 3117–3123.

- Pankovits, P., Ployard, M., Pouget, J., Brisset, S., Abbes, D. and Robyns, B. (2013) "Design and operation optimization of a hybrid railway power substation", Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, IEEE, pp. 1–8.

- 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.

- 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.

- Srinivasaraghavan, S. and Khaligh, A. (2011) "Deterministic scheduling of a fleet of plug-in hybrid vehicles for distributed generation", IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 9 No. 4, pp. 46–53.

- Steiner, M., Klohr, M. and Pagiela, S. (2007) "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles", Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on, IEEE, pp. 1–10.

- Steiner, M. and Scholten, J. (2004) "Energy storage on board of DC fed railway vehicles", Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual, Vol. 1, IEEE, pp. 666–671.

- TramStore21. (n.d.). "sustainable and efficient tram depots for cities in the 21st century, TramStore21 project, 2013".

- Tzeng, J., Emerson, R. and Moy, P. (2006) "Composite flywheels for energy storage", introducing energy conversion and energy storage technologies in traction power supply system", Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, IEEE, pp. 1–8.

- Hayashiya, H., Yoshizumi, H., Suzuki, T., Furukawa, T., Kondoh, T., Kitano, M., Aoki, T., et al. (2011) "Necessity and possibility of smart grid technology application on railway power supply system", Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1–10.

- Jaffery, S. H. I., Khan, H. A., Khan, M. and Ali, S. (2012) "A study on the feasibility of solar powered railway system for light weight urban transport", Proc World Renewable Energy Forum, Vol. 2012, pp. 1892–1896.

- Lassila, J., Haakana, J., Tikka, V. and Partanen, J. (2012) "Methodology to analyze the economic effects of electric cars as energy storages", IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE, Vol. 3, No. 1, pp. 506–516.

- 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.

- Lund, H. and Kempton, W. (2008) "Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G", Energy Policy, Elsevier, Vol. 36 No. 9, pp. 3578–3587.

- 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.

- Morrow, K., Karner, D. and Francfort, J. (2008) "US Department of energy vehicle technologies program—advanced vehicle testing activity—plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review", Final Report by Battelle Energy Alliane, No. 58517, p. 34.

www.SID.ir

Archive of SID

- 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.

Composites Science and Technology, Elsevier, Vol. 66 No. 14, pp. 2520–2527.

- Vrignaud, G. (2011) "Substation with zero auxiliary consumption", 9th World Congress on Railway research–WCRR.

www.SID.ir

Archive of SID

سپهر نجفی لاریجانی، سید سعید فاضل

سپهر نجفی لاریجانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳۹۲ از دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب أخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان شبکه‌های هوشمند، بازار برق، حمل و نقل هوشمند، شهر هوشمند و الکترونیک قدرت بوده و در حال حاضر دانشجوی ترم آخر کارشناسی ارشد در رشته مهندسی راه‌آهن برقی در دانشگاه علم و صنعت ایران است. ایشان در هر دو دوره، به عنوان دانشجوی ممتاز دانشگاه برگزیده شده و برای ادامه تحصیل در مقطع دکتری به صورت مستقیم در دانشگاه علم و صنعت ایران معرفی گردیده است.

سید سعید فاضل، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳٦۹ از دانشگاه صنعتی اصفهان و درجه کارشناسی ارشد در رشته برق قدرت را در سال ۱۳۷۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران أخذ نمود. ایشان در سال ۱۳۸٦ موفق به کسب درجه دکتری در رشته برق قدرت از دانشگاه صنعتی برلین آلمان گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان الکترونیک قدرت، درایوهای الکتریکی، شبکه‌های هوشمند، حمل و نقل هوشمند و شهر هوشمند بوده و در حال حاضر عضو هیأت علمی با مرتبه استادیار و همچنین رییس دانشکده راه‌آهن دانشگاه علم و صنعت ایران است.

www.SID.ir