

بهینه سازی مصرف انرژی با استفاده از ترمز بازیابی در قطارهای برقی

نام محور مقاله: نقش فناوری های نوین در ناوگان باری و مسافری
ساسان ژاله پور^۱

چکیده

امروزه با توجه به محدودیت و هزینه بالای تولید انرژی، لزوم توجه به بهینه سازی مصرف انرژی حائز اهمیت می باشد. سیستم حمل و نقل ریلی شامل قطارهای EMU قادر به تبدیل و برگرداندن انرژی ترمز الکتریکی از نوع بازیاب^۲ به شبکه برق می باشند. قسمت کمی از این انرژی الکتریکی صرف مصارف داخلی قطار می گردد و باقی انرژی الکتریکی می تواند توسط دیگر قطارهای EMU موجود در مسیر در صورت نیاز و به شرط نزدیک بودن به قطار در حال ترمزگیری مورد استفاده قرار گیرد. نیاز به انرژی الکتریکی توسط قطارهای موجود در مسیر و اعمال ترمز بازیاب توسط سایر قطارها معمولاً بشکل همزمان صورت نمی گیرد. به عبارت دیگر ممکن است که خط، قدرت پذیرش انرژی الکتریکی را نداشته باشد و سطح ولتاژ افزایش یابد در نتیجه انرژی مازاد در بانکهای مقاومتی تلف می گردد. این مشکل که بویژه در خطوط DC که پستهای برق نیز توانایی پذیرش انرژی ترمز بازیاب را نداشته، حادث می باشد و باعث می گردد تا تنها ۳۰٪ الی ۵۰٪ از انرژی ترمز بازیاب مورد استفاده قرار گیرد. با در نظر گرفتن مشکل فوق الذکر، لزوم توجه به بحث ذخیره سازی انرژی تولیدی ترمز بازیاب در شرایط عدم نیاز و جلوگیری از اتلاف انرژی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد.

کلمات کلیدی

ترمز بازیابی (regenerative)، قطار EMU، ادوات ذخیره کننده انرژی، خازن EDLC، باتری، Flywheel

۱- مقدمه

در سیستم ترمز بازیاب با استفاده از موتورهای سیستم محرکه (در نقش ژنراتور)، انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی تبدیل می گردد.

^۱ . کارشناس برق - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو (ایریکو)، آدرس: اتوبان تهران کرج، آزادشهر، ساختمان سریر تلفن: ۰۲۱-۴۴۱۸۲۱۳۳

Email: sasan175571@gmail.com

^۲ Regenerative

این انرژی تولیدی به شکل جریان به پستهای تغذیه الکتریکی و یا به سایر قطارهای موجود در خط، انتقال می‌یابد [۹]. همچنین از این انرژی تولیدی ترمز بازیاب می‌توان در قطارهای EMU و یا هیبرید برای تامین انرژی در هنگام شتاب گیری و یا بالارفتن از سطوح شیبدار استفاده کرد [۳].

امروزه ترمز بازیاب در هر دو نوع شبکه AC و DC قابل استفاده می‌باشد ولی از آنجایی که نوع شبکه تاثیر بسزایی در سهولت بکارگیری این سیستم ترمزی دارد. در ادامه به بررسی بکارگیری ترمز بازیاب در خطوط AC و DC پرداخته می‌شود هزینه تجهیزات ترمز بازیاب در شبکه DC نسبت به AC کمتر می‌باشد ولی با این وجود توانایی خطوط DC در پذیرش انرژی تولیدی از ترمز بازیاب در مقایسه با خطوط AC محدودتر است. شایان ذکر است که تجهیزات ترمز بازیاب در شبکه AC در مقایسه با شبکه DC پیچیده تر می‌باشد ولی خطوط AC قدرت پذیرش بالاتری برای انرژی تولیدی ترمز بازیاب دارند [۲]. همچنین از آنجایی که فاز و فرکانس انرژی تولیدی در شبکه‌های AC با شبکه خط بالاسری و یا ریل سوم باید مطابقت داده شود لذا بکارگیری ترمز بازیاب در شبکه‌های DC نسبت به شبکه‌های AC از سهولت بیشتری برخوردار می‌باشد با این وجود استفاده از ترمز بازیاب در خطوط AC مرسوم تر می‌باشد.

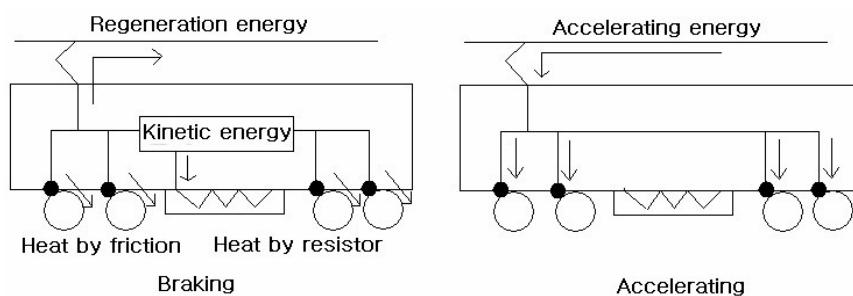
در شبکه‌های DC بازگشت توان الکتریکی به پستهای برق با مشکلات بیشتری همراه می‌باشد و تنها در صورتی که قطارهای در حال تردد در همان مسیر به این انرژی نیاز داشته باشند، انرژی بازیاب تولیدی می‌تواند به این قطارها برگردانده شود و در غیر اینصورت این انرژی به شکل گرما در بانکهای مقاومتی تلف می‌گردد [۹].

انرژی ترمز بازیاب بیشتر در خطوط با ترافیک بالا موثر می‌باشد براساس بررسی های انجام شده انرژی بازیاب در خطوط DC وقتی موثرتر می‌گردد که ۶ تا ۱۰ قطار در هر ساعت در خط در حال استفاده باشند که این تعداد منجر به ۱۲ تا ۱۶٪ صرفه جویی انرژی می‌گردد ولی در سیستم های AC این مقایسه برابر با ۲ تا ۱۰ قطار در هر ساعت می‌باشد که منجر به ۱۲٪ صرفه جویی انرژی می‌گردد. به عنوان مثال متروی Lisbon و متروی Delhi با استفاده از ترمز بازیاب به ترتیب، ۳۰٪ و ۳۴٪ در مصرف انرژی صرفه جویی داشته‌اند [۹].

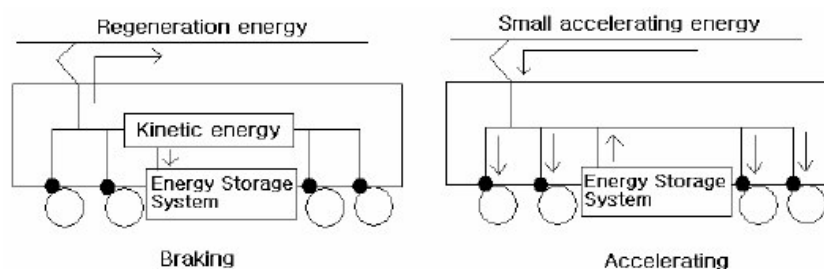
مزایای استفاده از ترمز بازیاب بطور خلاصه بشرح زیر می‌باشد [۱] و [۱۰].

۱. کاهش خوردگی کفشک ترمز و چرخ
 ۲. افزایش ایمنی به علت کاهش خوردگی کفشک و همچنین افزایش تعداد سیستم ترمزگیری مورد استفاده.
 ۳. کاهش تاخیر ناشی از بازرسی کهنه شدن کفشکهای ترمز و ...
 ۴. ذخیره سازی و استفاده مجدد از انرژی
 ۵. افزایش راحتی مسافران به علت سرعت یکنواخت و کاهش صداهای ناشی از ترمز هوا.
- در مقابل این مزایا باید به این نکته توجه داشت که استفاده از ترمز بازیاب باعث افزایش وزن، قیمت و هزینه نگهداری تجهیزات می‌گردد.

در سیستمهای قدیمی اگر هیچ قطاری در خط جهت مصرف انرژی ترمز بازیاب نبود، این امر باعث بالارفتن ولتاژ خط می‌گردید که بی ثبات شدن سیستم را به همراه داشت. وقتی سطح ولتاژ به حد آستانه سیستم می‌رسید در مقاومت های موجود در سیستم بشکل حرارت تلف می‌گردید (شکل ۱). اما این روش مطابق با استانداردهای حال حاضر نمی‌باشد و در سیستمهای مدرن می‌توان با نصب اینورتر بازیاب در پستهای برق DC، ولتاژ برق را از نوع DC به نوع AC سیستم توزیع ولتاژ پستهای برق AC تبدیل کرد و مجدد در نقاط دیگر شبکه مورد استفاده قرار دارد. همچنین می‌توان با نصب تجهیزاتی مانند باطری و یا خازن با ظرفیت بالا، انرژی را ذخیره کرد (شکل ۲) [۶] و [۷]. شایان ذکر است که اینورتر بازیاب اولین بار در ژاپن در دهه اول سال ۱۹۹۰ به شکل تجاری مورد استفاده قرار گرفت [۸].



شکل ۱- ترمز بازیاب بدون ذخیره کننده انرژی [۱۲].



شکل ۲- ترمز بازیاب به همراه ذخیره کننده انرژی [۱۲].

در سیستمهای قدیمی ترمز بازیاب به هنگام عدم وجود قطارهای دیگر در خطوط جهت جذب انرژی بازیاب، این انرژی به ناچار به شکل گرما در بانکهای مقاومتی قطار تلف می‌گردد. این امر دو مشکل عمده را به همراه دارد.

۱. در نتیجه این اتلاف، دما به صورت موضعی در پیرامون سیستم ترمز در قطار افزایش می‌یابد.

۲. همچنین باعث می‌گردد تا وقتی که قطار در ایستگاه متوقف می‌باشد، این گرمای تولیدی باعث افزایش غیرقابل کنترلی دما در داخل و یا پیرامون قطار شود که خود کاهش طول عمر تجهیزات قطار را به دنبال دارد.

جهت مرتفع کردن مشکل شماره ۱ نیاز به سیستمهای خنک کننده اضافی برای سیستم ترمز هستیم که باعث افزایش هزینه استفاده از قطار می‌گردد. همچنین در مشکل ۲، وقتی که قطار در ایستگاه توقف می‌کند، گرما تولیدی باعث افزایش دمای پیرامون قطار در ایستگاه می‌گردد که در نتیجه لزوم استفاده از سیستمهای خنک کننده اضافی در ایستگاه احساس می‌شود و خود افزایش مجدد هزینه‌ها را به دنبال دارد. لذا جهت جلوگیری از اتلاف انرژی ترمز بازیاب در بانکهای مقاومتی و کاهش هزینه‌های مربوطه، بهینه سازی مصرف انرژی که شامل ذخیره سازی انرژی بازیاب در ادوات ذخیره کننده انرژی الکتریکی هستند، کاملاً محسوس می‌باشد.

۲- متغیر پذیرش^۳ شبکه

اعمال ترمز بازیاب وابسته به توانایی قطارهای دیگر موجود در همان مسیر برای پذیرش جریان حاصل از ترمز می‌باشد. میزان این پذیرش توسط متغیری بنام متغیر پذیرش تعریف می‌گردد. متغیر پذیرش در بحث ترمز بازیاب وابسته به عواملی به شرح ذیل می‌باشد [۱].

۱. ولتاژ خط

۲. چگالی ترافیک خط

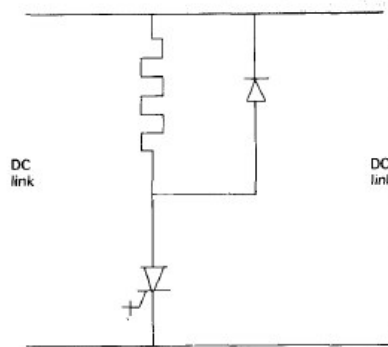
۳. موقعیت قطارها و فاصله نسبت به یکدیگر

از مشکلات سیستم ترمز بازیاب در خطوط DC می‌توان به مشکل عدم پذیرش^۴ اشاره داشت. در این مشکل خط بالاسری یا ریل سوم امکان پذیرش جریان تولیدی در حالت ترمز بازیاب را ندارد و در نتیجه باعث تولید امپدانس بالا در قطار می‌گردد. تغذیه برق در

^۳ Receptivity

^۴ Non-Receptive

خطوط DC در هر پست DC از طریق یکسوسازی در پست برق AC اصلی صورت می‌گیرد. در صورتی که انرژی شبکه در هر کدام از بخشها بواسطه ترمز بازیاب افزایش یابد، انرژی مازاد در هر بخش به علت ساختار یکطرفه یکسوکننده‌ها نمی‌تواند به خط تغذیه AC برگردد. در نتیجه پستهای تغذیه DC بصورت محلی (بخشی) دچار مشکل عدم پذیرش می‌شوند. این مشکل در خطوط AC بعلت اتصال مستقیم خط AC به پست برق AC کمتر می‌باشد و در نتیجه قدرت پذیرش بالاتری را دارد. حالت عدم پذیرش در سیستم ترمز بازیاب باعث بالا رفتن ولتاژ می‌گردد که این افزایش ولتاژ باید به سرعت کنترل گردد. کنترل ولتاژ در عمل توسط تجهیزاتی مشابه با شکل ۳ بنام ترمز رئوستاتیک از نوع کنترل چاپری انجام می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، انرژی مازاد تولیدی در مقاومت تلف می‌شود [۲].



شکل ۳- ترمز rheostatic از نوع کنترل چاپری [۲].

از جمله دیگر راه‌های مشکل عدم پذیرش در پستهای برق DC در شبکه‌های DC را می‌توان بصورت زیر خلاصه کرد.

۱. استفاده از اینورتر ترایستوری (مانند SCR^۵ و GTO^۶): در صورت استفاده از این سیستم می‌توان انرژی ترمز بازیاب را به خط ۳ فاز پست برق برگرداند [۳].
۲. ذخیره سازی انرژی تا وقتی که توسط دیگر قطارها و یا خود قطار مورد استفاده قرار گیرد: این ذخیره سازی توسط نصب Flywheel، باتری‌ها با ظرفیت بالا و همچنین نصب خازن در پستهای برق DC و یا داخل قطار انجام می‌شود. روشهای ذکر شده، امروزه در حال بهبود بازدهی و کاهش هزینه‌ها می‌باشند [۱] و [۳]. ذخیره سازی انرژی در پستهای برق DC باعث کاهش پیک انرژی الکتریکی و در نتیجه هزینه تامین انرژی می‌شود. از جمله مثالهایی که می‌توان در خصوص پیاده سازی این روشها در پستهای برق DC نام برد، می‌توان به قطار سبک شهری در Cologne اشاره کرد [۳].

۳- استفاده از انرژی تولیدی در ترمز بازیاب

موارد استفاده انرژی ترمز بازیاب به شرح زیر قابل تقسیم بندی می‌باشند [۴].

۱. کاربردهای کمکی و مصارف تامین راحتی در قطار: این مصارف معمولاً بعلت پایین بودن میزان توان قادر نیستند تا تمام برق تولیدی توسط ترمز بازیاب را مصرف کنند.
۲. انرژی تولیدی به خط بالاسری برگردانده می‌شود تا توسط سایر قطارهای دیگری که به اندازه کافی نزدیک باشند مورد استفاده قرار گیرد (در همان بخشی که قطار انرژی ترمز بازیاب را تولید می‌کند).

در خصوص پستهای DC اگر این پستها، مجهز به واحدهای اینورتر ترایستوری باشند می‌توانند انرژی را به شبکه برق AC برگردانند که البته این مشکل شامل پستهای برق AC نمی‌گردد.

در جدول ۱ حالت‌های ممکن جهت استفاده از انرژی ترمز بازیاب نمایش داده شده است [۶].

⁵ Silicon Controlled Rectifier

⁶ Gate Turn-Off thyristor

جدول ۱- حالت‌های موجود جهت استفاده از ترمز بازیاب [۶].

قطار	مصرف	مقاومت‌های موجود در چاپر مخصوص ترمز
	ذخیره سازی	باطری، خازن‌های با ظرفیت بالا، flywheel
ایستگاه‌های زمینی	مصرف	مقاومت‌های موجود در چاپر مخصوص ترمز
	تبدیل	اینوتر ترمز بازیاب
	ذخیره سازی	باطری، خازن‌های با ظرفیت بالا، flywheel

۴- سیستم‌های ذخیره کننده انرژی ترمز بازیاب

سیستم‌های ذخیره کننده انرژی بطور کلی به دو دسته تقسیم می‌گردد [۹].

۱. تجهیزات ذخیره کننده انرژی کنار خط: استفاده از تجهیزات ذخیره کننده انرژی در کنار خط و در موقعیت‌های استراتژیک موجب می‌گردد تا اولاً وزن قطار به علت عدم حمل این دسته از تجهیزات کاهش یابد و ثانیاً تجهیزات ذخیره کننده انرژی بطور جداگانه نصب و میزان دما کنترل گردد.

اما در صورتی که سیستم انتقال توان الکتریکی در بخشی از مسیر به علت قطع circuit breaker و یا خطا دچار اختلال گردد در این صورت سیستم ذخیره کننده انرژی از آن بخش از سیستم تغذیه الکتریکی خارج می‌گردد [۹].

۲. تجهیزات داخل قطار: در صورت استفاده از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی در داخل قطار، قطار مجبور به حمل بار اضافه می‌گردد ولی در عین حال مجهز به یک منبع اضافی ذخیره انرژی می‌گردد که در صورت از دست دادن منبع تغذیه خارجی، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. به عبارت دیگر در صورت قطع تغذیه خارجی، قطار می‌تواند تا پست برق بعدی با استفاده از منبع ذخیره کننده انرژی داخلی حرکت کند. به عنوان مثال قطار Mannheim LRV می‌تواند با سرعت کمتر از 26Km/h برای ۵۰۰ m بدون اتصال به خط بالاسری حرکت کند. استفاده از سیستم‌های ذخیره کننده انرژی باعث می‌شود تا قطار بتواند به هنگام عبور از خیابان‌های درختدار و یا تونلها، بدون اتصال به خط بالاسری حرکت کند. همچنین از مزایای دیگر این سیستم می‌توان به انعطاف پذیری بیشتر در پست‌های برق از جهت محدودیت در افت سطح ولتاژ مجاز در خطوط بالاسری و یا ریل سوم و یا اتصال ضعیف پانتوگراف به خط بالاسری در مواردی مثل یخ زدگی خطوط بالاسری اشاره کرد [۹].

۴-۱- تکنولوژی تجهیزات ذخیره کننده انرژی:

بطور کلی تجهیزات ذخیره کننده انرژی در سیستم‌های ترمز بازیاب بطور خلاصه بصورت جدول ۲ دسته بندی می‌گردند [۹].

جدول ۲- طبقه بندی تجهیزات ذخیره کننده انرژی [۹].

رقابت	محدودیت	انرژی به وزن	نسبت توان ذخیره سازی به هزینه	طول عمر	سرعت شارژ/دشارژ	تجهیز
منحصربفرد	هزینه	6kWh/kg	بالا	بالا	زمان خیلی پایین شارژر	خازن‌های با ظرفیت بالا
تعداد محدود سازندگان ولی تکنولوژی اختصاصی	امنیت و عدم تکمیل شدن بحث تکنولوژی	4kWh/Kg	بالا	نامشخص	زمان پایین شارژر	ذخیره کننده Flywheel
رقابت بالا	وزن و نگهداری	30 - 60Wh/kg	بالا	نامشخص	زمان بالای شارژر	باطری

۱-۱-۴- خازنهای با ظرفیت بالا

خازنهای با ظرفیت بالا به علت استفاده از تکنولوژی خازنهای دو لایه‌ای، باعث افزایش ظرفیت در ولتاژهای کاری پایین می‌گردند. تعداد زیادی از این خازنها جهت تامین ولتاژ موردنیاز با یکدیگر به شکل سری متصل می‌گردند تا خازن معادل سری کاهش یابد و در ادامه این خازنهای سری شده با یکدیگر تشکیل بانک خازنی را می‌دهند تا ظرفیت مورد نیاز سیستم را تامین کنند. صنایع Maxwell ادعای تولید این بانک خازنی با ولتاژ کاری ۱۵۰۰ VDC را دارد. مزیت خازنهای با ظرفیت بالا شامل سرعت شارژ و دشارژ بالا می‌باشد. در نتیجه این خازنها می‌توانند به سرعت انرژی تولیدی از ترمز بازیاب را جذب کنند و همانند باطری های ذخیره کننده انرژی به سرعت سیستم را تغذیه کند. به علت پایین بودن مقاومت این سیستم، میزان اتلاف انرژی پایین و بهره انرژی تا ۹۵٪ می‌تواند افزایش یابد [۹].

شرکت ژاپنی CJRC و شرکت توشیبا، یک سیستم ذخیره کننده انرژی براساس خازنهای EDLC^۷ برای قطارهای EMU سری ۳۱۳ طراحی کرده‌اند (شکل ۴). مزایای این سیستم به شرح زیر می‌باشد [۱۱].

۱. پایداری ولتاژ خط بالاسری

۲. جلوگیری از اختلال در ترمز بازیاب

۳. ذخیره سازی انرژی

سیستم ذخیره انرژی EDLC، به سرعت شارژ و دشارژ می‌گردد و مزایایی مانند طول عمر بالا و همچنین نیاز به تعمیرات کمتری در مقایسه با استفاده از باطری های مثل باطری های lead-acid و Nickel-metal hydride دارد [۱۱]. در سیستم ترمز بازیاب قطار ۳۱۳ شرکت CJRC حدود ۵۰٪ از انرژی که موتور برای ترمز مکانیکی استفاده می‌کند، توسط این سیستم ذخیره می‌گردد [۱۱].



شکل ۴- قطار EMU سری ۳۱۳ شرکت ژاپنی CJRC [۱۱].

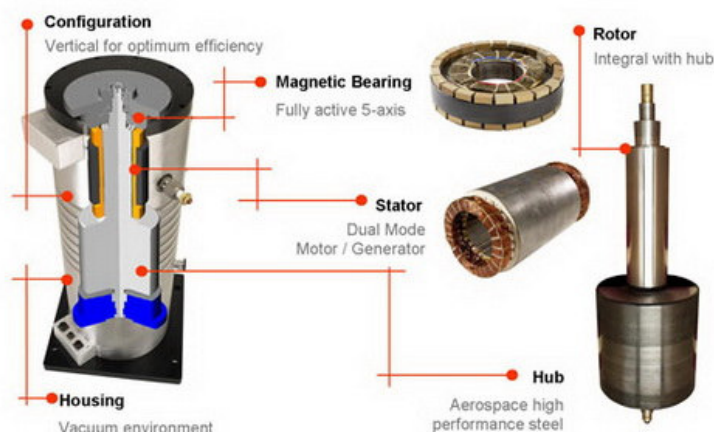
۲-۱-۴- ذخیره کننده Flywheel

در شکل ۵، یک سیستم Vycon Flywheel از گروه تکنولوژی Flywheel نشان داده شده است. این تجهیز شامل روتور و جرم^۸ می‌باشد که با استفاده از توان تولید شده ناشی از ترمز بازیاب در قطار می‌چرخد. در این سیستم، جرم در خلاء مجازی و bearing های مغناطیسی می‌چرخد که باعث حذف اتلاف اصطکاکی و همچنین چرخش نامحدود روتور می‌گردد (با این وجود یک کاهش تدریجی در

⁷ Electric double layer capacitor

⁸ Mass

سرعت چرخش با گذشت زمان وجود دارد). این سیستم به هنگام نیاز سایر قطارهای موجود در خط و یا قطع ارتباط با تغذیه خارجی، وظیفه تامین انرژی را برعهده دارد. از مزایای سیستم Flywheel، ویژگی متراکم بودن و همچنین توانای این سیستم از جهت نصب در داخل قطار و یا خارج قطار(کنار خط) و همچنین در نزدیکی پستهای برق قطار می باشد. از معایب نصب این سیستم در قطار، می توان به افزایش وزن و در نتیجه افزایش هزینه ها اشاره کرد. همچنین از لحاظ ایمنی مسافران نیز نصب یک سیستم مکانیکی با سرعت چرخش بالا در نزدیکی مسافرن، خطرات فراوانی را به دنبال دارد. از جمله معایب دیگر این سیستم وجود تاخیر اندکی به هنگام شارژ و در هنگام چرخش جرم می باشد که این موضوع باعث اتلاف توان تبدیلی می گردد [۹].



شکل ۵- سیستم ذخیره کننده انرژی Flywheel [۹].

۳-۱-۴- باتری

سیستم ذخیره کننده انرژی از نوع باتری یک تکنولوژی کامل تر نسبت به سایر تکنولوژی ها می باشد. از معایب عمده این تکنولوژی نسبت به سایر سیستمهای ذکر شده، تاثیر حرارت بر عملکرد باتری ها می باشد. به این ترتیب که با کاهش دما، ظرفیت باتری کاهش می یابد و افزایش دما می تواند منجر به خرابی و حتی در موارد شدیدتر منجر به آتش سوزی گردد. از مشکلات دیگر استفاده از باتری می توان به کاهش عمر باتری در نتیجه شارژ و دشارژ باتری اشاره کرد. از سایر معایب باتری ها می توان به بحث تعمیرات دوره ای و بازرسی های دوره ای اشاره داشت [۹].

۵- حفاظت و ایمنی به هنگام ترمز بازیاب در شبکه DC

بکارگیری ترمز بازیاب در خطوط DC مشکلاتی از جمله جریان بالا را به همراه دارد. این جریان بالا که می تواند تا $4000A$ در خطوط $750 VDC$ باشد، می تواند باعث ایجاد اختلال در تجهیزات حفاظتی تشخیص خطای اتصال به زمین شبکه در پستهای برق گردد [۱]. از جمله راه حل هایی که برای مشکل مذکور بیان شده است بکارگیری روش *inter-tripping* می باشد. در این روش سیستمهای حفاظتی در حومه پستهای برق به یکدیگر متصل می گردند. علاوه بر این در قطارهای پیشرفته با استفاده از سیستم کنترل الکترونیکی، حفاظتهای بیشتری در این خصوص صورت می گیرد [۱].

۶- نتیجه گیری

با توجه به نیاز به بهینه سازی مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل ریلی امروزه، استفاده از ترمز بازیابی در قطارهای برقی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. از ترمزهای بازیابی جهت بازگرداندن انرژی حاصل از ترمز به شبکه الکتریکی استفاده می گردد. جهت افزایش بهره سیستمهای ترمز بازیابی در شبکه های DC برخلاف سیستمهای قدیمی که مازاد انرژی بازیابی در بانکهای مقاومتی تلف می شود، در سیستمهای جدید از تجهیزات ذخیره کننده انرژی مانند خازنهای EDLC، باتری و یا Flywheel در داخل قطار و یا پستهای برق

استفاده می‌گردد. به این ترتیب علاوه بر بهینه سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف انرژی الکتریکی، قطار در شرایط از دست دادن ارتباط با خط بالاسری و یا ریل سوم می‌تواند تا رسیدن به پست برق بعدی و یا رفع شدن اختلال در تغذیه الکتریکی به حرکت خود ادامه دهد. همچنین با توجه به توضیحات ذکر شده در بخش تجهیزات ذخیره کننده انرژی، امروزه استفاده از خازن و باطری جهت ذخیره سازی انرژی ترمز بازیاب از اقبال بیشتری برخوردار می‌باشد.

مراجع

- [1]. R. Ford, "Regenerative braking boosts green credentials", Railway Gazette Magazine, 2007.
Available at:
www.railwaygazette.com/features_view/article/2007/07/7577/regenerative_braking_boosts_green_credentials.html
- [2]. R. G. Fletcher, "Regenerative equipment for railway rolling stock", IEEE POWER ENGINEERING JOURNAL, 1991.
- [3]. R. Nolte, "EVENT Evaluation of Energy Efficiency Technologies for Rolling Stock and Train Operation of Railways (Final Report)", Institute for Futures Studies and Technology Assessment, 2003.
- [4]. Available at:
http://www.railway-energy.org/static/Regenerative_braking_in_DC_systems_103.php
- [5]. H D Fuchs, P H Henning, H du T Mouton, "Development and Implementation of a 1.5MW Inverter and Active Power Filter for the Injection of Regenerated Energy in a Spoornet Substation", IEEE AFRICON Conference, 2004.
- [6]. C. Bae, D. Jang, Y. Kim, S. Chang, J. Mok, "Calculation of regenerative energy in DC 1500V electric railway substations", The 7th International Conference on Power Electronics, Korea, 2007.
- [7]. A. Horn, R.H. Wilkinson, T.H.R. Enslin, "Evaluation of Converter Topologies for Improved Power Quality in DC Traction Substations", 1996.
- [8]. J. Lee, H. Lee, J. Kwak, "A study for improvement performance of electric brake for electric train", International Conference on Control, Automation and Systems, 2008.
- [9]. LRT Technology Forum, 2009.
Available at: ottawa.ca/lrt-forum
- [10]. A. BREDENBERG, JR. , "Regenerative Braking for Direct-Current Locomotives", Transactions A. I. E. E..
- [11]. SCIENCE AND TECHNOLOGY HIGHLIGHTS 2008.
Available at :
<http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2008/high2008/high2008pdf/0807.pdf>
- [12]. H. Lee, G. Kim, C. Lee, "Analysis for EDLC Application on Electric Railway System", 2007.