

# کاربرد خازن های EDLC در ترمزهای دینامیک قطارهای برقی

نام محور مقاله: فناوری های نوین در ناوگان باری و مسافری (شهری و بین شهری)

ساسان ژاله پورا<sup>۱</sup>

محمد جعفری نسب<sup>۲</sup>

## چکیده

امروزه، با توجه به گسترش کاربرد ترمز دینامیک در صنعت ریلی، جهت استفاده بهینه انرژی و برگرداندن انرژی ترمزی به شبکه تغذیه الکتریکی، لزوم توجه به مقوله سیستم های ذخیره کننده انرژی در صورت عدم امکان جذب انرژی در شبکه تغذیه حائز اهمیت می باشد. همچنین مشکل هزینه بالا و پیچیدگی سیستم برگشت انرژی الکتریکی ترمز دینامیکی در شبکه DC نسبت به AC از دیگر مواردی است که موجب افزایش اهمیت سیستم ذخیره کننده انرژی الکتریکی ترمز دینامیک می گردد. ذخیره انرژی الکتریکی ترمز دینامیک نه تنها از پیچیدگی برگشت توان الکتریکی به شبکه توزیع جلوگیری می کند بلکه موجب کاهش توان الکتریکی مورد نیاز در شبکه می گردد. این کاهش تقاضا ناشی از تشکیل یک حلقه بسته از تولید انرژی الکتریکی به هنگام شتابگیری قطار و ذخیره انرژی در هنگام اعمال ترمز دینامیک می باشد. همچنین کاهش تلفات در خط بالاسری و یا ریل سوم به علت ذخیره انرژی و محدود کردن میزان افت ولتاژ باعث امکان افزایش فاصله پست های برق از یکدیگر می گردد. در میان المان های ذخیره کننده انرژی به منظور طراحی ماژول های ذخیره کننده انرژی در ترمز دینامیک، خازنهای با ظرفیت بالا از نوع EDLC<sup>۳</sup> نسبت به سایر ادوات نظیر باتری و Fly wheel بعلاوه دلایلی همانند طول عمر بالا در تعداد زیاد دفعات شارژ/دشارژ و مشکلات و استهلاک مکانیکی پایین تر، برتری محسوسی دارند. لذا امروزه استفاده از خازنهای EDLC جهت ساخت ماژول های ذخیره کننده انرژی الکتریکی در صنعت ریلی از اولویت بالایی برخوردار می باشد.

## کلمات کلیدی:

ترمز دینامیکی (regenerative)، قطار برقی، ادوات ذخیره کننده انرژی، خازن EDLC، باتری، Flywheel

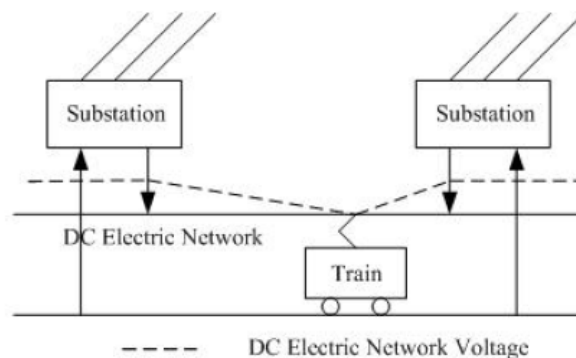
## مقدمه

امروزه، با در نظرگیری مشکل آلودگی ناشی از سوخت های فسیلی، صنعت ریلی، جهت افزایش ظرفیت حمل و نقل، توسعه بسیاری یافته است و در این میان با توجه به محدودیت منابع تامین انرژی و همچنین هزینه بالای تولید انرژی، بازیابی انرژی الکتریکی و جلوگیری از اتلاف توان در سیستم ترمز دینامیک مورد توجه گسترده ای قرار گرفته است. در سیستم های تغذیه DC مقدار بار قطار متغیر می باشد که این موضوع باعث نوسان ولتاژ خط می گردد. این مشکل در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. افت ولتاژ DC بشدت بازده توان محرکه را کاهش می دهد. بنابراین تثبیت ولتاژ خط در خطوط توزیع از فاکتورهای تاثیرگذار می باشد.

<sup>۱</sup> کارشناس برق - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو (ایریکو)

<sup>۲</sup> کارشناس مکانیک - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو (ایریکو)

<sup>۳</sup> Electric Double Layer Capacitor



شکل ۱ افت ولتاژ خط تغذیه DC مابین پست های برق [۱].

بدین منظور جهت تثبیت انرژی تا به امروز، سیستم های مختلفی متشکل از باتری، Flywheel و خازنهای با ظرفیت بالا پیشنهاد شده است. این تجهیزات به دو صورت کلی قابل پیاده سازی می باشند. روش اول عبارت است از استفاده از ماژول های ذخیره ساز انرژی قطار در داخل قطار و در روش دوم از ایستگاه های زمینی جهت ذخیره سازی انرژی ترمز دینامیک استفاده می شود. در این مقاله بر روی ذخیره سازی انرژی در داخل قطار و به طور عمده ماژول های متشکل از خازن EDCL پرداخته می شود [۲]. در ترمز دینامیک، انرژی جنبشی چرخ با استفاده از حالت ژنراتوری سیستم ترکشن به هنگام اعمال ترمز دینامیک به انرژی الکتریکی تبدیل می گردد. این انرژی تولیدی به شکل جریان به پستهای تغذیه الکتریکی و یا به سایر قطارهای موجود در خط انتقال می یابد. در قطارهای EMU و یا هیبرید می توان برای تامین انرژی در هنگام شتاب گیری و یا بالارفتن از سطوح شیبدار از توان تولیدی ناشی از تبدیل موتور به ژنراتور در هنگام استفاده از ترمز دینامیک در سایر قطارهای موجود در خط استفاده کرد [۳]. مزایای استفاده از ترمز دینامیک بطور خلاصه بشرح زیر می باشد [۲] و [۴].

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 دینامیک باعث افزایش وزن، قیمت و هزینه نگهداری تجهیزات می گردد.

امروزه ترمز دینامیک در هر دو نوع شبکه AC و DC قابل استفاده می باشد. ولی از آنجایی که نوع شبکه تاثیر بسزایی در سهولت بکارگیری این سیستم ترمزی دارد. در نتیجه بطور کلی می توان به این نکات اشاره کرد که هزینه تجهیزات ترمز دینامیک در شبکه DC نسبت به AC کمتر می باشد ولی با این وجود توانایی خطوط DC در پذیرش انرژی تولیدی از ترمز دینامیک در مقایسه با خطوط AC محدودتر است. شایان ذکر است که تجهیزات ترمز دینامیک در شبکه AC در مقایسه با شبکه DC پیچیده تر می باشد ولی خطوط AC قدرت پذیرش بیشتری برای انرژی تولیدی ترمز دینامیک دارند [۵].

به عبارت دیگر در شبکه‌های DC بازگرداندن انرژی الکتریکی ترمز دینامیک به پستهای برق با مشکلات بیشتر و به همین ترتیب، هزینه بالاتری همراه می‌باشد ولی اگر قطارهای دیگری در همان مسیر در حال تردد باشند که به این انرژی نیاز داشته باشند، انرژی دینامیک تولیدی می‌تواند به این قطارها برگردانده شود و در غیر اینصورت این انرژی به شکل گرما در بانکهای مقاومتی تلف می‌گردد [۶]. در خصوص امکان جذب انرژی ترمز دینامیکی توسط دیگر قطارهای موجود در خط نیز وجود پارامتری بنام متغیر قدرت پذیرش<sup>۴</sup>، عامل تعیین کننده می باشد. متغیر قدرت پذیرش براساس توانایی قطارهای دیگر موجود در همان مسیر برای پذیرش جریان حاصله از ترمز دینامیکی تعریف می گردد. متغیر قدرت پذیرش در بحث ترمز دینامیک وابسته به عواملی به شرح ذیل می‌باشد [۲].

۱. ولتاژ خط

۲. چگالی ترافیک خط

۳. موقعیت قطارها و فاصله نسبت به یکدیگر

از دیگر مشکلات سیستم ترمز دینامیک در خطوط DC می‌توان به مشکل عدم پذیرش<sup>۵</sup> اشاره داشت. در این مشکل خط بالاسری یا ریل سوم امکان پذیرش جریان تولیدی در حالت ترمز دینامیک را ندارد و در نتیجه باعث تولید امپدانس بالا در قطار می‌گردد. تغذیه برق در 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 دینامیک 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 بعلاوه اتصال مستقیم خط AC به پست برق AC کمتر می‌باشد و در نتیجه خطوط AC قدرت پذیرش بالاتری را دارد. حالت عدم پذیرش در تجهیزات ترمز دینامیک باعث بالارفتن ولتاژ می‌گردد که این افزایش ولتاژ باید به سرعت کنترل گردد.

جهت حل مشکل عدم پذیرش و جلوگیری از اتلاف انرژی در پستهای برق DC را می‌توان از راه حل‌های زیر استفاده کرد.

۱. استفاده از اینورتر ترایستوری (مانند SCR و GTO) در پست‌های برق، در صورت استفاده از این سیستم می‌توان انرژی ترمز دینامیک را به خط ۳ فاز پست برق برگرداند [۳].

۲. ذخیره سازی انرژی تا وقتی که توسط دیگر قطارها مورد استفاده قرار گیرد. این ذخیره سازی توسط نصب Flywheel، باتری‌ها با ظرفیت بالا و همچنین نصب خازن EDLC در پستهای برق DC و یا داخل قطار انجام می‌شود. روشهای ذکر شده، امروزه در حال بهبود بازدهی و کاهش هزینه‌ها می‌باشند [۲] 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.

در صورت عدم امکان جذب انرژی و از بین رفتن این انرژی به شکل گرما در بانک‌های مقاومتی باعث می‌گردد تا دما به صورت موضعی در پیرامون سیستم ترمز در قطار افزایش یابد و یا باعث تولید گرما وقتی که قطار در ایستگاه متوقف می‌باشد، گردد. این گرما اتلافی باعث افزایش غیرقابل کنترلی دما در داخل و یا پیرامون قطار می‌گردد که خود کاهش طول عمر تجهیزات قطار را به دنبال دارد. جهت مرتفع کردن این مشکل نیاز به سیستمهای خنک کننده اضافی برای سیستم ترمز هستیم که باعث افزایش

<sup>4</sup> Receptivity

<sup>5</sup> Non-Receptive

هزینه استفاده از قطار می‌گردد. همچنین 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 می‌گردد که خود افزایش مجدد هزینه‌ها را به شامل می‌گردد. لذا جهت جلوگیری از اتلاف انرژی ترمز دینامیک در بانکهای مقاومتی و کاهش هزینه‌های مربوطه، ذخیره سازی انرژی دینامیک در ادوات ذخیره کننده انرژی الکتریکی هستند، کاملاً محسوس می‌باشد [۶]

### سیستمهای ذخیره کننده انرژی به هنگام ترمز دینامیک

سیستم های ذخیره کننده انرژی بطور کلی به دو دسته تقسیم می‌گردد [۶].

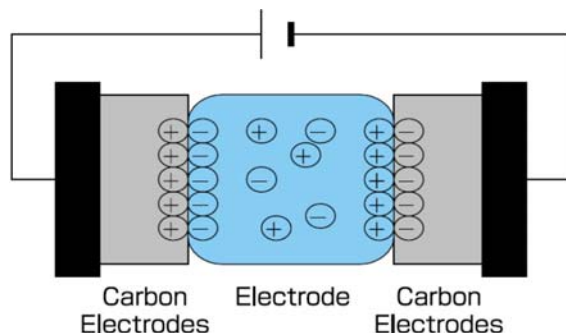
۱. تجهیزات ذخیره کننده انرژی کنار خط: استفاده از تجهیزات ذخیره کننده انرژی در کنار خط و در موقعیتهای استراتژیک موجب می‌گردد تا اولاً وزن قطار به علت عدم حمل این دسته از تجهیزات کاهش یابد و ثانیاً تجهیزات ذخیره کننده انرژی بطور جداگانه نصب و میزان دما کنترل گردد اما اگر سیستم انتقال توان الکتریکی در بخشی 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 [۶].

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 سیستم های ذخیره کننده انرژی باعث می‌شود تا قطار بتواند به هنگام عبور از خیابان های 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 [۶]. تجهیزات ذخیره کننده انرژی در داخل قطار به ۳ گروه تقسیم می‌شوند که عبارتند از خازن های EDLC با ظرفیت بالا، Flywheel و باتری. در این مقاله به بررسی استفاده از خازنهای با ظرفیت بالای EDLC پرداخته می‌شود.

### خازنهای با ظرفیت بالا از نوع EDLC

خازنهای با ظرفیت بالا که از تکنولوژی خازنهای دو لایه‌ای بهره می‌گیرند (دو لایه از کربن در هر طرف یک ماده دی الکتریک متخلخل که بین دو الکترود خارجی قرار گرفته است) باعث افزایش ظرفیت در ولتاژهای کاری پایین می‌گردد. در شکل ... ساختار خازن EDLC نشان داده شده است. این نوع خازن، یک خازن از نوع پسیو و استاتیک می‌باشد که جهت ذخیره سازی انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت این نوع خازن با خازن های قدیمی در مکانیزم ذخیره سازی انرژی می‌باشد. انرژی در خازن EDLC در لایه یونی که در حد فاصل هر الکترود و الکترولیت ایجاد می‌شود، ذخیره می‌گردد. چگالی انرژی ذخیره شده در خازن EDLC در حدود ۳۰۰ برابر بزرگترین خازن های قدیمی می‌باشد. ویژگی توان و چگالی انرژی بالا به همراه مقاومت سری

کوچک ESR، این نوع خازن ها را به عنوان یک تجهیز مناسب برای ذخیره سازی انرژی و استفاده به عنوان یک المان میانی به عنوان مثال باطری و خازن های قدیمی تبدیل کرده است [۷-۸]



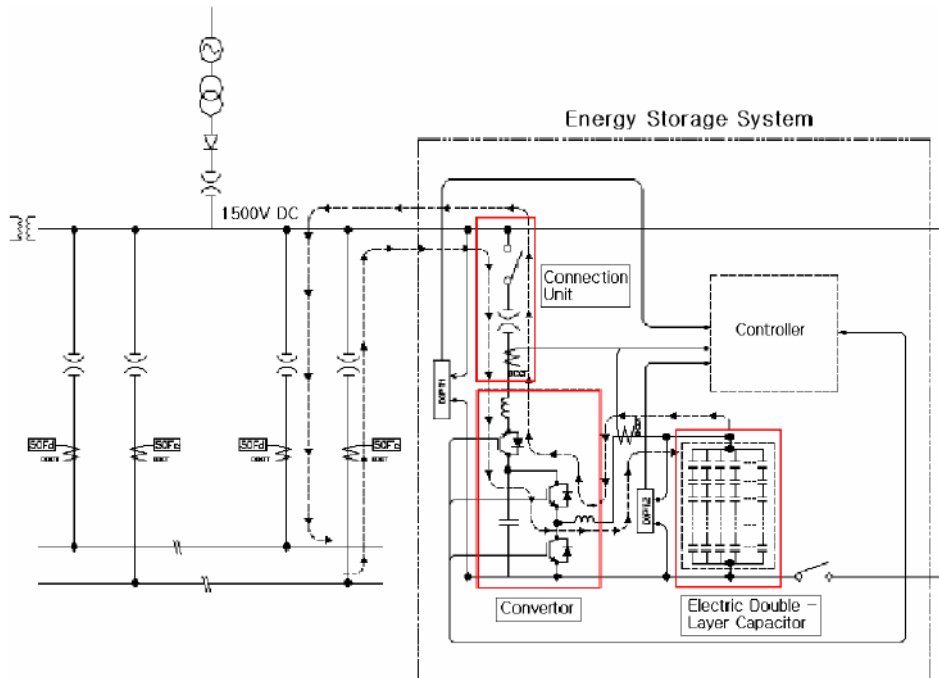
شکل ۲ ساختمان خازن های EDLC [۷۷۷۷۷۷۷-۸۸۸۸۸۸]

مزیت خازنهای با ظرفیت بالای EDLC شامل سرعت شارژ و دشارژ بالا می باشد. در نتیجه می تواند به سرعت انرژی تولیدی از ترمز دینامیک را جذب کند 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 می تواند افزایش یابد [۶]. ویژگی های خازن های با ظرفیت بالا در ترمز دینامیک به صورت زیر می باشد [۹].

۱. پایداری ولتاژ خط بالاسری یا ریل سوم
۲. جلوگیری از اختلال در ترمز دینامیک
۳. ذخیره سازی انرژی
۴. سرعت شارژ بالا
۵. طول عمر بالا نسبت به باطری
۶. نیاز به تعمیرات کمتر در مقایسه با استفاده از باطری هایی مثل باطری های lead-acid و Nickel-metal hydride و یا FlyWheel

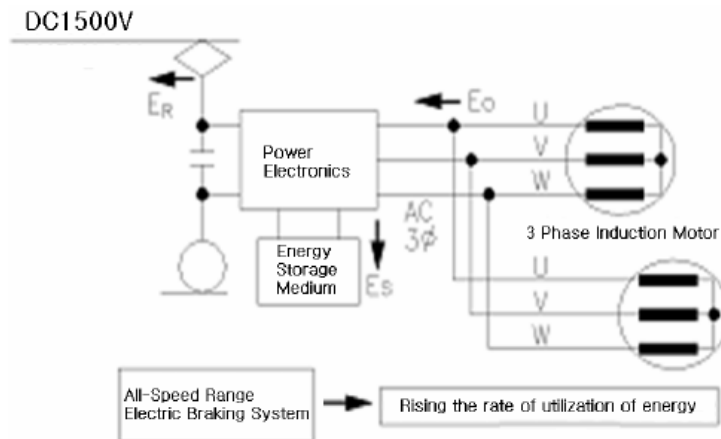
### طراحی سیستم ذخیره کننده انرژی:

سیستم های ذخیره کننده انرژی در استاندارد ریلی جهت اتصال تغذیه سیستم محرکه، کانورتر و بانک خازنی شامل خازن های EDLC می باشد. سیستم ذخیره کننده انرژی در دو حالت بکار گرفته می شود: در هنگام ترمز گیری که خازن های EDLC موجود در سیستم ذخیره کننده انرژی تا آن حد شارژ می گردد که به هنگام نیاز مانند شرایط شتاب گیری، این انرژی ذخیره شده، دوباره مورد استفاده قرار گیرد. حالت دوم به عنوان تثبیت کننده ولتاژ می باشد. در حالت تثبیت کننده، ولتاژ سیستم ذخیره کننده انرژی همیشه در بالاترین مقدار خود ثابت نگه داشته می شود تا در هنگام افت ولتاژ از یک حد مشخص استاندارد، خازن ها دشارژ گردند. این سیستم ذخیره کننده انرژی باید قابلیت سوئیچ خودکار بین هر دو حالت را داشته باشد تا با توجه به نیازهای موجود مورد استفاده قرار گیرند [۷].



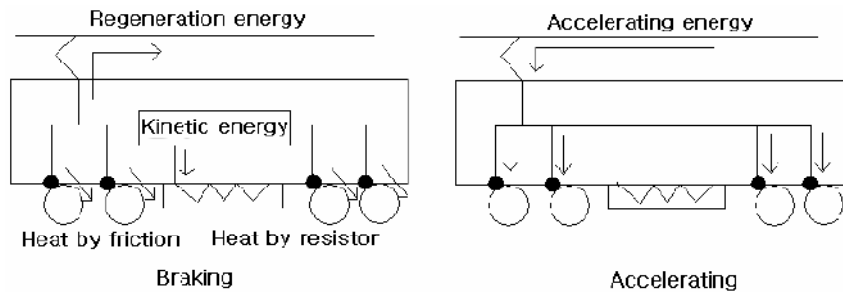
شکل ۳- مکانیزم طراحی سیستم ذخیره کننده انرژی [۷].

در صورت نصب سیستم ذخیره کننده انرژی بر مبنای EDLC در داخل قطار، با مشکل افزایش وزن قطار، همچنین کمبود فضا و همچنین افزایش مصرف انرژی مواجه می شویم لذا ظرفیت این سیستم ذخیره کننده انرژی باید افزایش داده شود. در شکل ... مدلی از نصب سیستم ذخیره کننده انرژی در داخل قطار با خط بالاسری ۱۵۰۰ VDC نشان داده شده است.

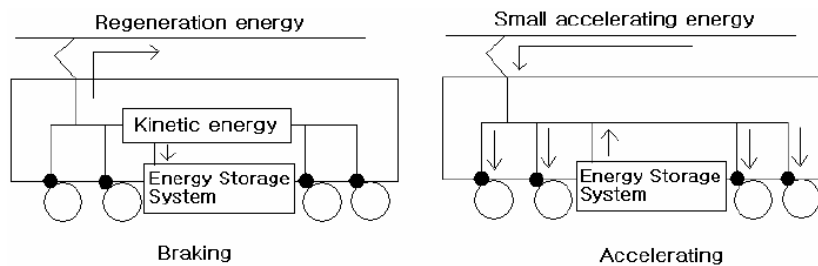


شکل ۴ بلوک دیاگرام سیستم ذخیره کننده انرژی در ولتاژ 1500VDC [۷].

انرژی تولیدی در سیستم محرکه، توسط تغذیه خط بالاسری و سیستم ذخیره کننده انرژی به همراه اینورتر تامین می شود. این انرژی ذخیره شده در هنگام ترمزگیری تامین و در هنگام شتاب گیری قطار مورد استفاده مجدد قرار می گیرد. در شکل ... مقایسه ای بین بلوک دیاگرام سیستم های سنتی و جدید ترمز دینامیک نمایش داده شده است.



شکل ۵ ترمز دینامیک بدون ذخیره کننده انرژی [۷].



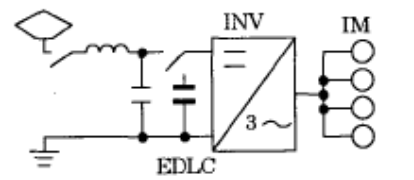
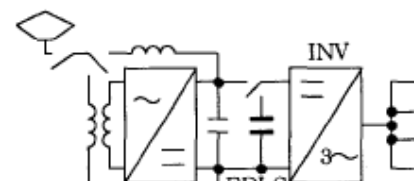
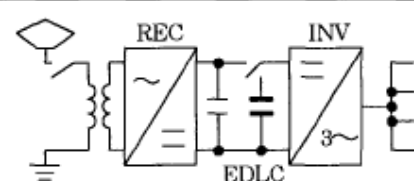
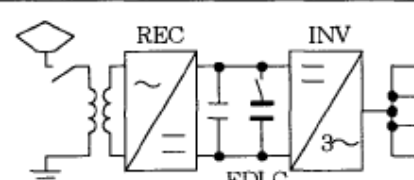
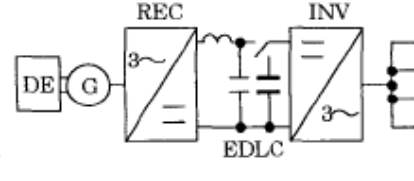
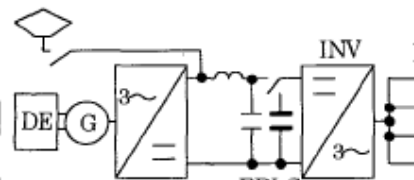
شکل ۶ ترمز دینامیک به همراه ذخیره کننده انرژی [۷].

همانگونه که جدول ۱ نشان داده شده است روشهای مختلفی جهت بکارگیری EDLC در مدار سیستم ترکشن قطار وجود دارد که عملکرد و مزایای هر روش بطور جداگانه در جدول فوق نمایش داده شده و به ترتیب در ادامه مطالب مورد بررسی قرار گرفته می شود [۱۰].

حالت (۱) در شبکه تغذیه DC دینامیکی انرژی جنبشی در هنگام ترمز دینامیک موجب افزایش بازده سیستم ترکشن در حین شتاب گیری و ترمز می گردد. با این وجود حتی با تکنولوژی های موجود نیز این جذب با بازده صد در صد صورت نمی گیرد ولی نصب به سیستم های قدیمی، جذب انرژی موجب افزایش بازده و کاهش تلفات خط می گردد. همچنین تعداد دفعات استفاده از ترمز مکانیکی و مشکلات پیرامون آن همانند استهلاك قطعات ترمزی، کاهش می یابد [۱۰].

حالت (۲) در شبکه تغذیه AC/DC همانند حالت ۱، حتی در صورت عدم وجود قطار در خط جهت جذب انرژی ترمز دینامیک، باز استفاده از خازنهای EDLC می توان از هدر رفتن این انرژی ترمز دینامیک جلوگیری کرد و در نتیجه تعداد دفعات استفاده از ترمز دینامیک بعلاوه امکان جذب انرژی افزایش می یابد و به همین ترتیب استهلاك مکانیکی تجهیزات کاهش نظیر کفشک ترمز کاهش می یابد [۱۰].

جدول ۱- روشهای مختلفی جهت بکارگیری EDLC در مدار سیستم ترکشن قطار [۱۰]

Power system	Traction block	Function	Advantages, etc.
(1) Dc power supply		The EDLCs are charged during braking. Discharged by acceleration for energy recycling.	Recycling of electric brake energy. Prevent the wearing of the mechanical brake shoes.
(2) Ac/dc power supply		The EDLCs are charged during braking. Discharged by acceleration for energy recycling.	Recycling of electric brake energy. Prevent the wearing of the mechanical brake shoes. During passing through the power interrupt section, regenerative brake energy can be absorbed by the capacitors.
(3) Ac power supply		The EDLCs are charged during braking. Discharged by accelerating for energy recycling.	Recycling electric brake energy. Prevent the wearing of the mechanical brake shoes. During passing through the power interrupt section, regenerative brake energy can be absorbed by the capacitors.
(4) Ac power supply (Shinkansen)		The EDLCs are connected to the dc link circuit at the power interrupt section. Discharged by acceleration for preparing comming section.	Power supplying for acceleration or absorbing for braking at the power interrupt section. Reduction of traction motor current beating by smoothing the dc link voltage.
(5) Diesel engine alternator		The EDLCs are connected to the dc link circuit for brake energy absorption. Discharged by acceleration for preparing brake.	Recycling of kinetic and electric energy. Prevent the wearing of the mechanical brake shoes.
(6) Hybrid power supply		The EDLCs are connected to the dc link circuit for brake energy absorption. Discharged by acceleration for preparing brake.	Recycling of kinetic and electric energy. Prevent the wearing of the mechanical brake shoes.

حالت ۳) در شبکه تغذیه AC که فاز ولتاژ AC بطور متناوب تغییر می کند، با استفاده از خازن های EDLC می توان حتی در هنگام تغییر فاز بین بخش های مختلف به راحتی از ترمز دینامیکی استفاده کرد و به این ترتیب بازده انرژی در مجموعه قطار و خط

افزایش یابد [۱۰]



حالت ۴) در شبکه تغذیه AC که شامل مسیر ولتاژ DC می باشد، جهت حذف اعوجاج ولتاژ از فیلترهایب خازنی استفاده می گردد. نوسان ولتاژ DC و انتقال این اعوجاج به اینوتر، موجب لرزش موتور و ایجاد نویز می شود. با استفاده از خازن با ظرفیت بالا مانند خازنهای EDLC، می توان به میزان زیادی این اعوجاج را کاهش داد و در نتیجه از لرزش و نویز موتورکاسته شود. از این نوع سیستم می توان در قطارهای پرسرعت Shinkansen اشاره داشت. تنها مورد بحث در این سیستم، سرعت پاسخ خازن EDLC می باشد [۱۰]

حالت ۵) استفاده از خازنهای EDLC حتی در سیستم های دیزل و یا هیبرید نیز قابل توسعه می باشد و باعث افزایش طول عمر قطعات ترمز مکانیکی می گردد [۱۰]

### کاربردهای خازن های ELDC در صنعت ریلی:

۱. در سال ۲۰۰۳، سیستم ذخیره کننده انرژی برمیبنای خازن های EDLC به نام MITRAC (محصول شرکت Bombardier) بر روی قطار LRV در شهر Mannheim آلمان با موفقیت تست گردید. این سیستم ذخیره انرژی که بر روی سقف قطار نصب گردیده بود از قابلیت اطمینان و بهره بالای برخوردار بود و این تست موفق منجر به استفاده از این سیستم در ۱۹ سری از قطارهای LRV شرکت RNV آلمان در سال ۲۰۰۹ گردید. استفاده از این سیستم منجر به کاهش ۳۰٪ مصرف انرژی و همچنین امکان حرکت قطار بدون تماس با خط بالاسری گردید [۱۱].



شکل ۷ قطار LRV در شهر Mannheim آلمان محصول شرکت Bombardier [۱۱].

<sup>6</sup> Rhein-Neckar-Verkehr GmbH



شکل ۸ سیستم ذخیره کننده انرژی بر مبنای خازن های EDLC به نام MITRAC (محصول شرکت Bombardier) [۱۲].

۲. شرکت ژاپنی CJRC و شرکت توشیبا، یک سیستم ذخیره کننده انرژی بر اساس خازنهای EDLC برای قطارهای EMU سری ۳۱۳ طراحی کرده اند (شکل 11). مزایای این سیستم به شرح زیر می باشد. در سیستم ترمز دینامیک قطار ۳۱۳ شرکت CJRC حدود ۵۰٪ از انرژی که موتور برای ترمز مکانیکی استفاده می کند، توسط این سیستم ذخیره می گردد [۹].



شکل ۹ قطار EMU سری ۳۱۳ شرکت ژاپنی CJRC [۹].

### نتیجه گیری

با توجه به نیاز به بهینه سازی مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل ریلی امروزه، استفاده از ترمز دینامیکی در قطارهای برقی از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. از ترمزهای دینامیکی جهت بازگرداندن انرژی حاصل از ترمز الکتریکی به شبکه توزیع استفاده می گردد. جهت افزایش بهره سیستمهای ترمز دینامیکی در شبکه های DC برخلاف سیستمهای قدیمی که مازاد انرژی دینامیکی 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 می گردد. 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. در میان تجهیزات ذخیره کننده انرژی در داخل قطار می‌توان به خازن های EDLC با توجه به مزایایی مانند طول عمر بالا نسبت به باتری، سرعت شارژ بالا و عدم وابستگی به تجهیزات مکانیکی برخلاف ذخیره کننده هایی مانند Flywheel اشاره کرد.

## مراجع

- [1]. W. Xuedi, Y. Zhongping, "A Study of Electric Double Layer Capacitors Improving Electric Network Voltage Fluctuation for Urban Railway Transit", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, China, 2008.
- [2]. 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](http://www.railwaygazette.com/features_view/article/2007/07/7577/regenerative_braking_boosts_green_credentials.html)
- [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]. A. BREDENBERG, JR., "Regenerative Braking for Direct-Current Locomotives".
- [5]. R. G. Fletcher, "Regenerative equipment for railway rolling stock", IEEE POWER ENGINEERING JOURNAL, 1991.
- [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]. H. Lee, G. Kim, C. Lee, "Analysis for EDLC Application on Electric Railway System", IEEE, 2007.
- [8]. A. Horn, R.H. Wilkinson, T.H.R. Enslin, "Evaluation of Converter Topologies for Improved Power Quality in DC Traction Substations", 1996.
- [9]. Available at:  
[www.toshiba.co.jp/tech/review/2008/high2008/high2008pdf/0807.pdf](http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2008/high2008/high2008pdf/0807.pdf)
- [10]. E. Takahara, T. Wakasa, J. Yamada, "A Study for Electric Double Layer Capacitor (EDLC) Application to Railway Traction Energy Saving including Change Over between Series and Parallel Modes", IEEE, 2002.
- [11]. German rail to implement Bombardier energy storage system  
Available at:  
[www.metro-magazine.com/News/Story/2009/12/German-rail-to-implement-Bombardier-MITRAC-Energy-Saver.aspx](http://www.metro-magazine.com/News/Story/2009/12/German-rail-to-implement-Bombardier-MITRAC-Energy-Saver.aspx)
- [12]. MITRAC Energy Saver  
Available at:  
[www.bombardier.com](http://www.bombardier.com)