

KNO-1104-4601

مطالعه‌ای روی سیستم‌های برق‌رسانی مترو

علیرضا محمودی فرد^{۱*}، alireza10.m10@gmail.comطاها غفوری^۲، Taha.Ghafouri.2005@gmail.com^۱مدرس مدعو دانشگاه ملی مهارت-دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران^۲دانشجوی کاردانی گرایش الکتروتکنیک، دانشگاه ملی مهارت-دانشکده فنی انقلاب اسلامی، تهران، ایران

چکیده:

این مقاله به بررسی سیستم‌های برق‌رسانی مورد استفاده در راه‌آهن مترو پرداخته و بر روش‌های مختلف تأمین انرژی و مکانیسم‌های عملیاتی آن‌ها تأکید دارد. سیستم‌های برق‌رسانی، شامل برق‌رسانی از طریق خطوط بالاسری (OLE)، سیستم ریل سوم و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد (OESS) می‌باشد. سیستم OLE که عمدتاً در شبکه‌های ریلی پرسرعت و فواصل طولانی استفاده می‌شود، دارای بازده انرژی بالاتر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های نگهداری کمتر است. سیستم ریل سوم که برای خدمات مترو شهری مناسب است، زیرساخت فشرده‌تری دارد، اما با محدودیت‌های ایمنی و ولتاژ روبروست. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد مانند باتری‌های پیشرفته و ابرخازن‌ها، با امکان بازیابی انرژی ترمز، بهره‌وری انرژی را افزایش داده و حرکت در بخش‌های غیربرقی را ممکن می‌سازند. سیستم‌های برق‌رسانی هیبریدی با ترکیب منابع مختلف انرژی، هزینه‌ها و مصرف انرژی را بهینه می‌کنند. این مقاله، مزایا و محدودیت‌های هر سیستم را بررسی کرده و بر نقش آن‌ها در توسعه حمل‌ونقل پایدار تأکید دارد؛ همچنین، مقایسه‌ای میان سیستم‌های جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) ارائه شده و تکامل فناوری‌های کشش برقی مورد بحث قرار گرفته است؛ در نهایت، مقاله اهمیت پیشرفت‌های فناورانه را در دستیابی به سیستم‌های ریلی کارآمد و سازگار با محیط‌زیست برجسته می‌کند.

کلمات کلیدی:

مترو، مگلو، برق‌رسانی، سیستم، تأمین انرژی



۱- مقدمه:

سیستم برق‌رسانی راه‌آهن (مترو و قطارشهری) مجموعه‌ای از روش‌ها است که برای تأمین انرژی الکتریکی قطارها (لوکوموتیو برقی یا واحدهای چندگانه برقی) استفاده می‌شود [۱]، تا بتوانند بدون نیاز به یک محرک اولیه داخلی (مانند موتورهای احتراق داخلی یا درون‌سوز) عمل کنند. برق‌رسانی راه‌آهن مزایای متعددی دارد، اما برای نصب آن به سرمایه‌گذاری قابل توجهی نیاز است. انواع مختلفی از سیستم‌های برق‌رسانی در سراسر جهان مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲]. قطارها با جریان متناوب با ولتاژ متوسط (MV) یا جریان مستقیم با ولتاژ پایین (LV) تغذیه می‌شوند [۱].

۲. متن اصلی

2.1. تعریف برقی‌سازی و برق‌رسانی راه‌آهن‌ها (قطارها)

برقی‌سازی راه‌آهن، به فرآیند تأمین انرژی قطارها از طریق برق ارائه‌شده توسط زیرساخت‌های ویژه اشاره دارد که جایگزین سیستم‌های سنتی مبتنی بر سوخت‌های فسیلی مانند لوکوموتیوهای دیزلی یا بخاری می‌شود؛ این فرآیند شامل پیاده‌سازی سیستم‌های الکتریکی است که برق را به سیستم رانش قطار از طریق خطوط هوایی، ریل سوم یا راه‌حل‌های ذخیره انرژی درون‌برد منتقل می‌کنند. برقی‌سازی، بهره‌وری عملیاتی را افزایش می‌دهد، تأثیرات زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد و از توسعه پایدار در حمل و نقل پشتیبانی می‌کند [3].

۲.۲. روش‌های برق‌رسانی راه‌آهن (از نظر ساختار)

2.2.1 (OLE) Overhead Line Electrification

• تاریخچه

سیستم تجهیزات خط بالاسری (OLE) که برای برقی‌سازی راه‌آهن‌ها استفاده می‌شود، از زمان آغازش در اواخر قرن نوزدهم تغییرات زیادی داشته است. آزمایش‌های اولیه برقی‌سازی، مانند تراموای برلین در سال ۱۸۷۹، سیستم کاتنری را معرفی کرد که به‌عنوان جایگزینی عملی برای سیستم سومین ریل تبدیل شد. در اوایل قرن بیستم، کشورهایی مانند سوئیس و آلمان از سیستم OLE برای خطوط اصلی راه‌آهن استفاده کردند و ولتاژهای DC و AC به‌کار گرفته شد. این سیستم پس از جنگ جهانی دوم گسترش یافت، به‌ویژه در اروپا و آمریکای شمالی، با استانداردسازی ولتاژها و طراحی‌های پانتوگراف برای سفرهای طولانی‌تر و کارآمدتر [3-8]. در نیمه دوم قرن بیستم، ظهور راه‌آهن‌های سریع‌السیر در کشورهایی مانند ژاپن، فرانسه و آلمان منجر به استفاده گسترده از سیستم ۲۵ کیلوولت AC شد که به‌دلیل توانایی خود در انتقال مقادیر زیادی برق در فواصل طولانی ترجیح داده شد. نوآوری‌ها در طراحی پانتوگراف‌ها و فناوری‌های دیجیتال برای نظارت و نگهداری همچنان به بهبود کارایی و قابلیت اعتماد سیستم کمک کرده‌اند. امروزه، سیستم‌های OLE جزو بخش‌های اساسی حمل‌ونقل پایدار ریلی هستند و پیشرفت‌های مداومی برای بهبود عملکرد، کاهش تأثیرات زیست‌محیطی و ادغام منابع انرژی جدید مانند انرژی‌های تجدیدپذیر در حال انجام است [9].

• معرفی

برق‌رسانی از طریق خطوط هوایی (OLE) سیستمی حیاتی در زیرساخت‌های ریلی است که برق را از طریق شبکه‌ای از سیم‌های بالاسری (هوایی) به قطارها ارائه می‌دهد. این روش امکان استفاده از سیستم‌های الکتریکی جهت کشش قطارها را فراهم می‌کند که در مقایسه با قطارهای دیزلی، کارآمدتر، سازگارتر با محیط‌زیست، و از نظر هزینه مؤثرتر هستند. سیستم‌های OLE مفهوم و ساختار بنیادین شبکه‌های ریلی پرسرعت و شهری در سراسر جهان هستند [10].

2.2.1.1 مزایا و فواید اجرای سیستم برق‌رسانی با خطوط هوایی (OLE)

• بهبود بهره‌وری انرژی و مزایای زیست‌محیطی



سیستم‌های برقی‌سازی با خطوط بالاسری (OLE) بهره‌وری انرژی را به‌طور قابل توجهی در مقایسه با گزینه‌های مبتنی بر دیزل افزایش می‌دهند. قطارهای برقی انرژی الکتریکی را مستقیماً به انرژی مکانیکی با بارده بالا تبدیل می‌کنند و تلفات انرژی را به حداقل می‌رسانند. این امر مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد و سیستم‌های OLE را به یک رکن اصلی حمل‌ونقل پایدار ریلی تبدیل می‌کند. بر اساس تحقیقات، سیستم‌های ریلی برقی می‌توانند تا ۳۰ درصد صرفه‌جویی انرژی نسبت به همتایان دیزلی خود داشته باشند و به‌طور همزمان از یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر در شبکه‌های حمل‌ونقل پشتیبانی کنند [11].

• عملکرد و ظرفیت برتر

سیستم‌های OLE امکان شتاب‌گیری و کاهش سرعت سریع‌تر قطارها را نسبت به لوکوموتیوهای دیزلی فراهم می‌کنند، که این امر ظرفیت کلی شبکه را افزایش داده و زمان سفر را کاهش می‌دهد. این موضوع ناشی از تأمین مداوم و پایدار برق از طریق خطوط بالاسری است که محدودیت‌های قدرت موتورهای دیزلی را از بین می‌برد. تأکید می‌کنند که دسترسی بیشتر به توان از سیستم‌های OLE امکان جابه‌جایی قطارهای سنگین‌تر و سریع‌تر را فراهم می‌کند که این امر برای خدمات باربری و مسافری با سرعت بالا ضروری است [12].

• کاهش هزینه‌های نگهداری

لوکوموتیوهای دیزلی به دلیل قطعات متحرک و سیستم‌های احتراق به تعمیر و نگهداری مکرر و پیچیده نیاز دارند؛ در مقابل، قطارهای برقی که با سیستم‌های OLE کار می‌کنند دارای قطعات مکانیکی کمتری هستند که منجر به کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که هزینه‌های نگهداری وسایل نقلیه ریلی برقی معمولاً ۲۰ تا ۲۵ درصد کمتر از معادل‌های دیزلی است، که به صرفه‌جویی عملیاتی بلندمدت کمک می‌کند [13].

• بهبود راحتی و تجربه مسافران

قطارهای برقی آرام‌تر بوده و ارتعاش کمتری نسبت به قطارهای دیزلی تولید می‌کنند که این امر راحتی مسافران را افزایش می‌دهد. این مزیت مخصوصاً برای خدمات ریلی شهری و حومه‌ای مفید است، جایی که کاهش آلودگی صوتی کیفیت زندگی ساکنان نزدیک خطوط ریلی را بهبود می‌بخشد. تأکید می‌کنند که کاهش سطح صدا در سیستم‌های ریلی برقی نقش مهمی در پذیرش عمومی و ترویج استفاده بیشتر از حمل‌ونقل عمومی دارد [14].

مزایای اقتصادی و اجتماعی

برقی‌سازی خطوط ریلی از رشد اقتصادی با امکان حمل‌ونقل کارآمد و پرظرفیت کالاها و مسافران حمایت می‌کند. شبکه‌های برقی شده می‌توانند وابستگی به سوخت‌های فسیلی وارداتی را کاهش داده و امنیت انرژی را بهبود بخشند؛ علاوه بر این، پروژه‌های OLE فرصت‌های شغلی قابل توجهی در مراحل ساخت و بهره‌برداری ایجاد می‌کنند و اقتصادهای محلی را تقویت می‌کنند. استدلال می‌کنند که مزایای اقتصادی بلندمدت سیستم‌های OLE هزینه‌های اولیه سرمایه‌گذاری آن‌ها را با توسعه منطقه‌ای و بهبود کارایی زنجیره تأمین جبران می‌کند [15].

2.2.1.2. اجزای سیستم برق‌رسانی (OLE)

2.2.1.2.1. سیم تماس (Contact Wire)

سیم تماس، اصلی‌ترین مجرای انتقال انرژی الکتریکی به پانتوگراف (Pantograph) قطار است. این سیم معمولاً از مس یا آلیاژهای آن ساخته می‌شود تا بین هدایت الکتریکی و دوام مکانیکی تعادل برقرار کند [16].

2.2.1.2.2. پانتوگراف (Pantograph)

پانتوگراف یک جزء حیاتی در سیستم‌های برق‌رسانی خطوط هوایی (OLE) است که به‌عنوان رابط بین قطار و منبع تغذیه برق بالاسری عمل می‌کند. عملکرد اصلی پانتوگراف، جمع‌آوری انرژی الکتریکی از تماس با سیم هوایی و انتقال آن به سیستم‌های الکتریکی قطار است. پانتوگراف‌ها



طوری طراحی شده‌اند که در سرعت‌های مختلف و شرایط عملیاتی پایدار، تماس مداوم با سیم تماس را حفظ کنند و انتقال انرژی را با حداقل فرسایش تضمین نمایند [17].

عملکرد پانتوگراف‌ها در سه بخش اصلی خلاصه می‌شوند:

بخش اول که مربوط به جمع‌آوری جریان است، که پانتوگراف با فشار دادن نوار تماس خود به سیم تماس شبکه هوایی، انتقال پایدار و قابل‌اعتماد انرژی الکتریکی را تضمین می‌کند. این تماس باید پایدار باقی بماند تا از قطع جریان برق و قوس الکتریکی (آرک الکتریکی) جلوگیری شود [18].

بخش دوم که مربوط به انطباق‌پذیری با تغییرات است، سیم تماس بالاسری به دلیل عوامل محیطی یا محدودیت‌های طراحی کاملاً خطی نیست. پانتوگراف با استفاده از مکانیزم بارگذاری شده با فنر یا پنوماتیک، این تغییرات را جبران کرده و فشار ثابت رو به بالا را اعمال می‌کند [19].

بخش سوم که مربوط به انتقال انرژی است، انرژی الکتریکی جمع‌آوری شده را به تجهیزات الکتریکی قطار، از جمله ترانسفورماتورها و مبدل‌ها هدایت می‌کند تا سیستم پیشران و خدمات جانبی تغذیه شود [20].

2.2.1.2.3. سیم حامل (Catenary/Messenger Wire)

این سیم با استحکام بالا، سیم تماس را پشتیبانی کرده و حفظ ارتفاع و تنش صحیح آن را تضمین می‌کند. طراحی سیم حامل، افتادگی را کاهش داده و ارتباط مداوم با پانتوگراف را تضمین می‌کند [21].

2.2.1.2.4. آویزها (Droppers)

اتصالات عمودی هستند که تراز سیم تماس را حفظ می‌کنند. آنها ارتفاع ثابت سیم را در طول مسیر تضمین می‌کنند [22].

2.2.1.2.5. کلیدها و مقره‌های جداساز (Switches and Section Insulators)

سیستم OLE به‌منظور انعطاف‌پذیری در عملیات‌های مختلف روی سیستم و تعمیر و نگهداری، می‌بایست بخش‌بندی شود که این کار توسط دو بخش زیر انجام می‌شود:

- **مقره‌های جداساز**، بخش‌های مختلف سیم هوایی را از لحاظ الکتریکی جدا می‌کنند، بدون اینکه پیوستگی مکانیکی سیم تماس قطع شود. این امر اجازه می‌دهد تا بخش‌های مختلف به‌صورت مستقل نگهداری یا بهره‌برداری شوند.
- **کلیدها یا هم‌پوشانی قسمت‌های مختلف (Overlap Sections)**، امکان انتقال روان برق بین بخش‌ها را فراهم می‌کنند. مناطق هم‌پوشانی (Overlap Zones) که توسط این بخش فراهم می‌شود، هنگام انتقال قطار از یک بخش به بخش دیگر، پیوستگی برق‌رسانی را تضمین می‌نمایند.

طراحی مناسب این اجزا، عملکرد روان قطارها را تضمین کرده و خطر جرقه‌زنی (Arc) یا وقفه‌های برق‌رسانی را کاهش می‌دهد [23].

2.2.1.2.6. پست‌های برق و ایستگاه‌های تغذیه (Substations and Feeder Stations)

پست‌های برق، ولتاژ بالای برق شبکه را به ولتاژ مناسب برای سیستم OLE، معمولاً ۲۵ کیلوولت AC یا ۱.۵/۳ کیلوولت DC، تبدیل می‌کنند. اجزای اصلی این بخش شامل موارد زیر است:

- **ترانسفورماتورها**: ولتاژ برق شبکه را به سطح مورد نیاز برای سیستم کاهش می‌دهند.
- **کلیدهای قطع‌کننده و تابلوهای برق (Switchgear)**: از سیستم OLE در برابر شرایط جریان بیش از حد مجاز محافظت کرده و امکان ایزوله کردن خطاها (Trips) را فراهم می‌کنند.



- **ایستگاه‌های تغذیه (Feeder Stations):** برق را از طریق کابل‌های تغذیه به سیستم Catenary (سیم کاتنری و سیم تماس)، تأمین می‌کنند و اغلب به صورت افزونه‌ای (Redundant) تنظیم و چینش می‌شوند تا قابلیت اطمینان را افزایش دهند.
- پست‌های برق نقش اصلی و حیاتی در حفظ تأمین پایدار و قابل اعتماد برق برای سیستم OLE ایفا می‌کنند [24].

2.2.1.2.7. سیستم‌های پایش: ساییدگی، ناهم‌راستایی یا جرقه‌زنی بین سیم تماس و پانتوگراف را شناسایی می‌کنند. داده‌های آنی این سیستم‌ها به حفظ استاندارد های بالای عملیاتی و کاهش زمان خرابی کمک می‌کنند. بهینه‌سازی تعامل پانتوگراف و کاتنری، تلفات انرژی و سایش را به حداقل می‌رساند و طول عمر اجزا را افزایش می‌دهد [25].

2.2.1.2.8. دستگاه‌های کششی (Tensioning Devices)

برای حفظ کشش ثابت در سیستم کاتنری، به‌ویژه در مناطقی که تغییرات دما وجود دارد، از دستگاه‌های کششی مانند وزنه‌ها و قرقره‌ها استفاده می‌شود. سیستم‌های کشش خودکار (Auto-Tensioning Systems) از وزنه‌ها یا دستگاه‌های هیدرولیکی برای تنظیم خودکار کشش سیم‌ها استفاده می‌کنند و انقباض یا انبساط ناشی از تغییرات دما را جبران می‌نمایند. این کار باعث می‌شود که تعامل بهینه با پانتوگراف حفظ شود. این سیستم‌ها در مناطقی که تغییرات اقلیمی قابل توجه است، بسیار مهم هستند. در صورت عدم کشش صحیح، سیم تماس، ممکن است افتادگی پیدا کند یا بیش از حد کشیده شود که منجر به خرابی عملکرد خواهد شد [26].

2.2.1.2.9. سیستم‌های ارت و همبندی

ایمینی در سیستم های OLE از طریق سیستم‌های ارت و همبندی برای مدیریت جریان‌های خطا و محافظت از پرسنل و زیرساخت تقویت می‌شود که شامل بخش‌هایی است:

- **رساناهای ارت (Earthing Conductors):** جریان‌های خطا و نشتی را با ایمینی به زمین هدایت می‌کنند.
- **همبندی (Bonding):** اجزای فلزی مختلف راه‌آهن را از لحاظ الکتریکی به هم متصل می‌کند تا پتانسیل یکسانی ایجاد شود و خطر شوک الکتریکی و برق‌گرفتگی کاهش یابد.

این سیستم‌ها برای رعایت استانداردها و مقررات ایمنی حیاتی هستند [27].

2.2.1.2.10. سازه‌های پشتیبانی و مقره‌ها (Support Structures and Insulators)

سازه‌های پشتیبانی، مانند دکل‌ها و پایه‌ها (تیرها)، سیم‌های کاتنری را در ارتفاع و هم‌راستایی مناسب نگه می‌دارند. این سازه‌ها با فاصله‌های استراتژیک قرار می‌گیرند تا یکپارچگی هندسی سیستم OLE حفظ شود. برخی از این اجزا عبارتند از:

- **دکل‌ها (Masts):** ستون‌های عمودی نصب‌شده در طول خط آهن، معمولاً از جنس فولاد یا بتن، که تکیه‌گاه پایه‌ها هستند.
- **پایه‌ها (Cantilevers):** بازوهای افقی یا مایل که از دکل بیرون زده و سیم‌های کاتنری را در جای خود نگه می‌دارند.
- **مقره‌ها (Insulators):** قطعاتی ساخته‌شده از موادی مانند پرسیلان یا پلیمرهای ترکیبی که اجزای برق‌دار را از سازه‌های زمین‌شده عایق کرده و ایمنی را تضمین می‌کنند [28].

2.2.1.3. کاربرد سیستم OLE

سیستم OLE پرکاربردترین روش است که در شبکه‌های ریلی سریع‌السیر در سراسر جهان استفاده می‌شود؛ به‌عنوان مثال، شبکه ریلی سریع‌السیر اروپا، از جمله شبکه ریلی TGV فرانسه یا AVE اسپانیا عمدتاً از سیستم‌های OLE استفاده می‌کنند [29].

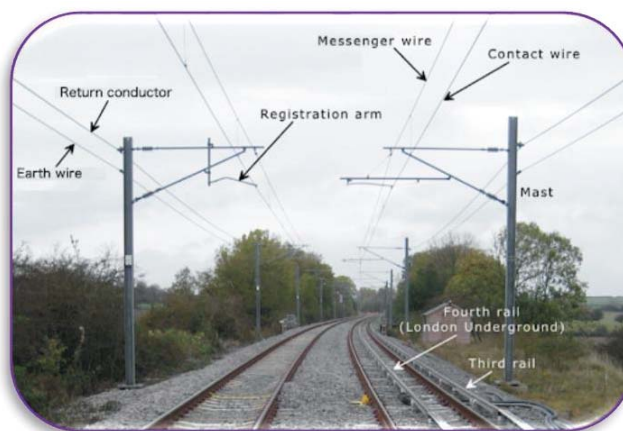


Figure 1. The Main OLE Components

شکل ۱: استفاده از سیستم‌های OLE

Third Rail Electrification 2.2.2

• تاریخچه:

این سیستم در اواخر قرن نوزدهم معرفی شد و نخستین بار به‌طور موفقیت‌آمیز در خط راه‌آهن شهر و جنوب لندن (که اکنون بخشی از متروی لندن است) در سال ۱۸۹۰ به کار گرفته شد. استفاده اولیه از سیستم ریل سوم به دلیل نیاز به حذف لوکوموتیوهای احتراقی در محیط‌های شهری بود، جایی که دود و آلودگی مشکلات قابل توجهی ایجاد می‌کرد. پیشرفت‌های قابل توجه در این فناوری به کمک مهندسانی همچون فرانک اسپرگ به دست آمد، که نقش کلیدی در توسعه سیستم‌های کشش برقی داشت [30].

• معرفی

سیستم برق‌رسانی ریل سوم، یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تأمین انرژی برق قطارها است، به‌ویژه در شبکه‌های ریلی شهری و حومه‌ای. برخلاف سیستم‌های برق‌رسانی سیم هوایی که از سیم‌های بالای قطار استفاده می‌کنند، سیستم ریل سوم از ریل اضافی در کنار ریل اصلی برای تأمین برق استفاده می‌کند. این ریل معمولاً در سطح زمین و کنار یا بین ریل‌های اصلی نصب می‌شود و برق لازم برای حرکت قطار را تأمین می‌کند. این سیستم بیشتر برای خطوط ریلی سنگین مانند متروها و برخی خطوط قطار حومه‌ای استفاده می‌شود [31].

2.2.2.1. مزایا و منافع پیاده‌سازی سیستم الکتریکی ریل سوم

• زیرساخت فشرده و کاهش تأثیرات بصری

سیستم‌های ریل سوم از یک ریل رسانا در سطح زمین در کنار مسیر استفاده می‌کنند، که نیاز به سازه‌های بالاسری خطوط کاتتری را حذف می‌کند. این طراحی فشرده به کاهش ازدحام بصری کمک می‌کند و به‌ویژه برای مناطق شهری و حومه‌ای با محدودیت‌های شدید زیبایی‌شناسی یا



فضایی مناسب است؛ علاوه بر این، این طراحی کم ارتفاع چالش های مهندسی سازه مرتبط با پل ها، تونل ها و دیگر زیرساخت های عمرانی را کاهش می دهد [32].

• نصب و نگهداری مقرون به صرفه

در مقایسه با سیستم های بالاسری، الکتریکی سازی ریل سوم به طور کلی هزینه های نصب کمتری دارد، به ویژه در محیط های ساخته شده ای که استفاده از تجهیزات خطوط بالاسری ممکن است پیچیده یا غیرممکن باشد. الزامات نگهداری نیز ساده تر هستند، زیرا قطعات متحرک کمتری وجود دارد و سیم های معلق برای مدیریت لازم نیست، که باعث کاهش هزینه های عملیاتی در طولانی مدت می شود [33].

• ایمنی بهبود یافته در محیط های کنترل شده

اگرچه ایمنی اغلب به عنوان نگرانی در سیستم های سوم ریل به دلیل وجود ریل های برقرار بدون پوشش مطرح می شود، این سیستم ها برای محیط هایی با دسترسی کنترل شده مانند متروها یا شبکه های راه آهن شهری با مسیرهای اختصاصی مناسب هستند. پوشش های حفاظتی و پروتکل های ایمنی سختگیرانه، شامل پوشش های محافظ بر روی ریل برقرار، خطرات را کاهش داده و قابلیت اطمینان و ایمنی عمومی را تضمین می کنند [34].

• بهره وری انرژی و انتقال نیروی قابل اطمینان

سیستم های ریل سوم در بهره وری انرژی برای راه آهن های کوتاه تا متوسط با توقف های مکرر، مانند متروهای شهری یا شبکه های راه آهن سبک، برتری دارند. نزدیکی منبع انرژی به قطارها باعث کاهش تلفات الکتریکی می شود و انتقال نیروی قابل اطمینانی را ارائه می دهد. این منبع انرژی پایدار، عملکرد دقیق شتاب گیری و ترمزگیری را که برای الگوهای خدمات با فرکانس بالا حیاتی است، ممکن می سازد [35].

• اختلالات حداقلی در خدمات حین پیاده سازی

تجهیز مجدد یا به روزرسانی سیستم های راه آهن برای ادغام الکتریکی سازی ریل سوم اغلب می تواند با حداقل اختلال در خدمات جاری انجام شود، به ویژه در مقایسه با انتقال به سیستم های بالاسری که ممکن است نیاز به تعطیلی گسترده خطوط یا تغییر مسیرها داشته باشد. این انعطاف پذیری از پیاده سازی مرحله ای در شبکه های عملیاتی پشتیبانی می کند [36].

• سازگاری با سیستم های حمل و نقل شهری

الکتریکی سازی ریل سوم به طور یکپارچه با سیستم های حمل و نقل شهری که در آن قطارها اغلب فضای مشترکی با ترافیک جاده ای و عابران پیاده دارند، ادغام می شود. نیازهای کم ارتفاع آن، برای وسایل نقلیه ریلی و سکوهای فشرده ایده آل است، که از توسعه های مبتنی بر حمل و نقل حمایت کرده و دسترسی را بهبود می بخشد [37].

2.2.2.2. تجهیزات سیستم ریل سوم

2.2.2.2.1 ریل سوم (Third Rail)

ریل سوم اصلی ترین جزء سیستم برقی سازی است که برق را به قطارها تأمین می کند. این ریل معمولاً یک ریل فلزی است که معمولاً از فولاد یا آلومینیوم ساخته می شود و در کنار خط راه آهن نصب می شود. ریل سوم با ولتاژ مستقیم DC (جریان مستقیم) برق دار می شود که معمولاً بین ۶۰۰ تا ۷۵۰ ولت است. این ولتاژ نسبت به سیستم های برقی با سیم بالاسری (کاتنری) که ولتاژ بالاتری دارند، کمتر است و به همین دلیل سیستم های ریل سوم برای محیط هایی با ساختارهای کم ارتفاع مانند تونل ها یا مناطق شهری مناسب تر هستند (فری، ۱۹۹۶). خود ریل معمولاً روی ساختارهای عایق نصب می شود تا از تماس آن با زمین یا مواد هادی جلوگیری کند و ایمنی مسافران و پرسنل نگهداری را تضمین کند [38].

2.2.2.2.2 جمع کننده های جریان (کفش ها)



جمع کننده جریان که به طور معمول به آن "کفش" گفته می شود، دستگاهی است که به زیر قطار متصل می شود و به طور مستقیم با ریل سوم تماس پیدا می کند. این کفش، انتقال برق از ریل سوم به سیستم برقی قطار را تضمین می کند. معمولاً این کفش شامل یک بازو یا برس فلزی است که روی ریل سوم می لغزد و نقطه تماس آن از مواد هادی مانند مس کربن یا فولاد برای کاهش مقاومت الکتریکی تشکیل شده است. کفش باید تماس پیوسته ای با ریل سوم در حین حرکت قطار حفظ کند تا تأمین برق ثابت شود. طراحی کفش بسیار مهم است، زیرا باید از سایش زیاد هم بر کفش و هم بر ریل جلوگیری کرده و از هرگونه جرقه یا اختلال در جریان برق جلوگیری کند [39]. جمع کننده های جریان بر اساس موقعیت ریل سوم و نیاز های عملیاتی در انواع مختلف طراحی می شوند:

۱. **کفش های تماس از بالا:** این نوع کفش ها برق را از سطح بالای ریل سوم جمع آوری می کنند و معمولاً در محیط هایی استفاده می شوند که آلودگی یا مشکلات مرتبط با شرایط جوی کمتر باشد.

۲. **کفش های تماس از کنار:** این نوع کفش ها با سطح کناری ریل تماس برقرار می کنند و در مکان هایی که تماس از بالا ممکن نیست، استفاده می شوند.

۳. **کفش های تماس از زیر:** این کفش ها با سطح زیرین ریل سوم تماس دارند و در سیستم هایی به کار می روند که خطر تماس تصادفی یا آلودگی زیاد است [40].

نمونه ای از فناوری جدید به کار رفته در این کفش های جمع کننده جریان، استفاده از مواد مرکب در ساختار قسمت تماس با ریل است که سایش را کاهش داده و عملکرد آن ها را تحت بارهای سنگین بهبود می بخشد [41].

2.2.2.3. ساختارهای عایق و پشتیبانی

ریل سوم توسط مجموعه ای از اجزای عایق و مکانیکی پشتیبانی می شود تا از قرار گرفتن صحیح آن و عایق شدن الکتریکی آن از محیط اطراف اطمینان حاصل شود. این اجزا شامل عایق ها هستند که مانع از اتصال ریل سوم به زمین یا ایجاد اتصال کوتاه می شوند و همچنین پشتیبانی های مکانیکی که ریل را در جای خود نگه می دارند. مواد عایق معمولاً شامل پلاستیک ها یا لاستیک های مقاوم به فشار و با خواص الکتریکی بالا هستند. فاصله فیزیکی ریل سوم نیز بسیار مهم است تا از تماس تصادفی با چرخ های قطار یا سایر اجزا جلوگیری شود [42].

2.2.2.4. تجهیزات منبع تغذیه مجاور

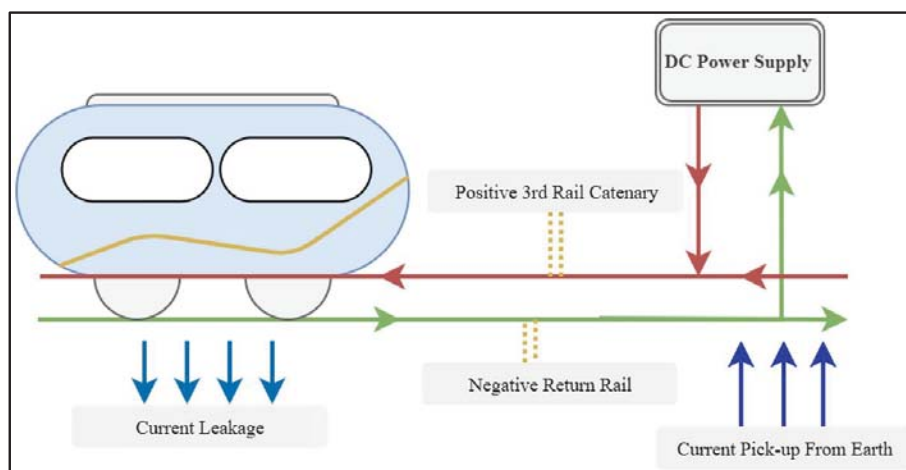
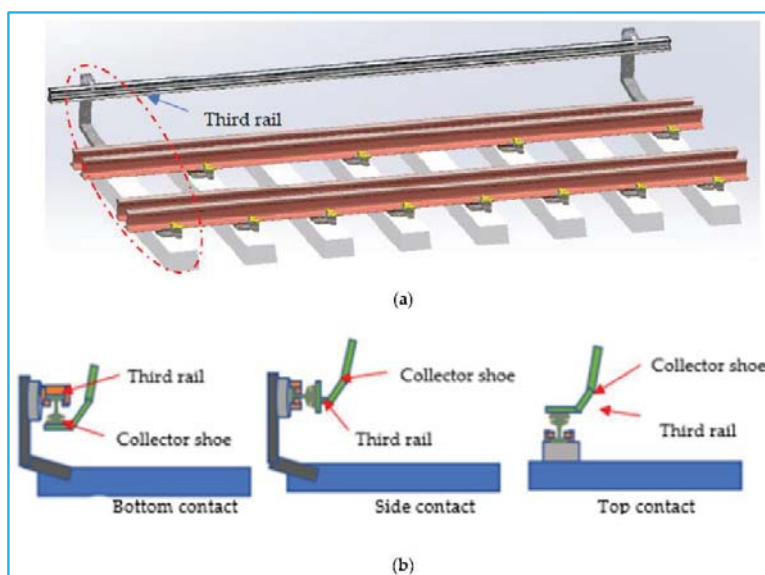
برق رسانی به ریل سوم از طریق تجهیزات مختلف در کنار خط، از جمله ایستگاه های برق، ترانسفورماتورها و کلیدها انجام می شود. ایستگاه های برق ولتاژ AC (جریان متناوب) با ولتاژ بالا را از شبکه به DC با ولتاژ پایین تر که برای ریل سوم لازم است، تبدیل می کنند. ترانسفورماتورها ولتاژ شبکه را به سطح مناسب برای سیستم برقی کاهش می دهند، در حالی که قطع کننده ها (کلیدها) از سیستم در برابر خطاها و بار های اضافی محافظت می کنند. این اجزا به طور استراتژیک در طول خط راه آهن قرار می گیرند تا تأمین برق ثابت را تضمین کرده و فاصله ای که برق باید طی کند را به حداقل برسانند تا از تلفات جلوگیری شود [43].

2.2.2.5. مسیر بازگشت جریان ریل

مسیر بازگشت جریان در سیستم های ریل سوم معمولاً از طریق ریل های خط انجام می شود. جریان از ریل سوم وارد جمع کننده های جریان قطار می شود، سپس از طریق سیستم های الکتریکی قطار عبور کرده و در نهایت از طریق ریل های حرکت کننده به ریل باز می گردد. یکپارچگی مسیر بازگشت ریل برای کارایی و ایمنی سیستم بسیار حیاتی است و هرگونه مشکلی مانند اتصالات ضعیف ریل یا خرابی خط می تواند منجر به قطع برق یا سایش اضافی شود [44].

2.2.2.6. سیستم های سیگنال دهی و حفاظت

سیستم‌های برقی ریل سوم به سیستم‌های سیگنال‌دهی و حفاظتی پیشرفته نیاز دارند تا عملیات ایمن و کارآمد را تضمین کنند. این سیستم‌ها شامل سیگنال‌دهی کنار خط هستند که با قطارها برای کنترل سرعت و حرکت ارتباط برقرار می‌کنند. مکانیزم‌های حفاظتی، مانند سیستم‌های تشخیص خطای زمین، برای جلوگیری از موقعیت‌های خطرناک مانند اتصال کوتاه یا خرابی در تأمین برق به کار می‌روند. این سیستم‌ها با سیستم‌های ایمنی موجود در قطار یکپارچه شده‌اند تا در صورت بروز مشکلات به طور خودکار برق را قطع کنند. تعامل بین سیستم‌های تأمین برق و سیگنال‌دهی بخش حیاتی عملکرد شبکه‌های راه‌آهن مدرن است و این اطمینان را می‌دهد که سیستم هم از نظر کارایی و هم ایمنی عملکرد مناسبی داشته باشد [45].



شکل ۲: سیستم‌های سیگنال‌دهی و حفاظت

2.2.3 (OESS) Onboard Energy Storage System

• تاریخچه

سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد (OESS) به دلیل نیاز روزافزون به سیستم‌های ریلی کارآمدتر، پایدارتر و انعطاف‌پذیرتر ظهور کردند. این مفهوم به اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم بازمی‌گردد، زمانی که ذخیره‌سازی انرژی اولیه مانند چرخ‌طیارها به صورت محدود استفاده می‌شد.



با این حال، پیشرفت در فناوری باتری در اواسط قرن بیستم، به‌ویژه توسعه باتری‌های اسید-سربی و بعدتر باتری‌های لیتیم-یونی، ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد را برای وسایل نقلیه ریلی عملی ساخت. معرفی ترمز احیاکننده در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی را سرعت بخشید و امکان بازیابی و استفاده مجدد از انرژی ترمز را فراهم کرد. توسعه‌های مدرن مانند ابرخازن‌ها و باتری‌های حالت جامد، پتانسیل OESS را در کاربردهای ریلی مجدداً احیا کردند [46].

روند تکامل این سیستم‌ها را می‌توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱- مرحله اولیه: ظهور ایده ذخیره‌سازی انرژی در سیستم‌های حمل‌ونقل (قرن ۱۹)

در اواخر قرن نوزدهم، با ظهور لوکوموتیوهای الکتریکی اولیه و کاربردهای ابتدایی فناوری برق در حمل‌ونقل، ایده ذخیره‌سازی انرژی مطرح شد. استفاده از چرخ‌طیارها به‌عنوان وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی انرژی جنبشی اولین گام در این مسیر بود. این فناوری‌ها در آن زمان بسیار محدود بودند و عمدتاً به صنایع خاص یا آزمایش‌های ابتدایی اختصاص داشتند [47].

۲- پیشرفت در باتری‌ها و آغاز استفاده عملیاتی (اوایل قرن ۲۰)

پیشرفت فناوری باتری در اوایل قرن بیستم، به‌ویژه توسعه باتری‌های اسید-سربی، امکان ذخیره‌سازی انرژی در وسایل نقلیه ریلی را فراهم کرد. این باتری‌ها چگالی انرژی کافی برای تامین نیازهای سیستم‌های ریلی سبک را داشتند و در حمل‌ونقل عمومی کوچک یا واگن‌های سبک به‌کار گرفته شدند. با این حال، محدودیت‌های دوام و وزن زیاد این باتری‌ها استفاده گسترده آن‌ها را محدود کرد [48].

۳- معرفی ترمز احیاکننده و تحول در ذخیره‌سازی انرژی (دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰)

در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، با پیشرفت‌های چشم‌گیر در مهندسی الکترونیک قدرت، فناوری ترمز احیاکننده معرفی شد. این فناوری امکان بازیابی انرژی جنبشی در حین ترمزگیری را فراهم می‌کرد و انرژی بازیافتی می‌توانست در سیستم ذخیره‌سازی داخلی یا شبکه بازگردانده شود. این تحول پایه‌گذار استفاده گسترده‌تر از ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد بود و منجر به طراحی سیستم‌هایی شد که می‌توانستند انرژی بازیافتی را برای استفاده مجدد ذخیره کنند [49].

۴- دوران مدرن: فناوری پیشرفته باتری و ابرخازن‌ها (دهه ۲۰۰۰ به بعد)

در دو دهه اخیر، ظهور فناوری‌های پیشرفته‌تر مانند باتری‌های لیتیم-یونی و ابرخازن‌ها، امکانات جدیدی را در زمینه ذخیره‌سازی انرژی فراهم کرده است. باتری‌های لیتیم-یونی با چگالی انرژی بالا و وزن کم، به یک گزینه استاندارد تبدیل شده‌اند؛ همچنین، ابرخازن‌ها که توانایی ارائه توان فوری و طول عمر بالا دارند، به‌ویژه در کاربردهای قطارهای سبک شهری مورد توجه قرار گرفته‌اند. ترکیب این دو فناوری در سیستم‌های هیبریدی، مزایای هر دو را ارائه می‌دهد؛ علاوه‌براین، توسعه باتری‌های حالت جامد و تلاش برای کاهش هزینه‌ها و افزایش عمر مفید این فناوری‌ها، آینده روشنی را برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی نوید می‌دهد [50].

• معرفی

برق‌رسانی ریلی به‌طور سنتی به تأمین پیوسته انرژی از طریق خطوط بالاسری یا سیستم‌های ریل سوم متکی بوده است. با این حال، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی درون‌برد (Onboard Energy Storage Systems) یا (OESS) به‌عنوان فناوری‌هایی تحول‌آفرین ظهور کرده‌اند که چالش‌های اساسی در شبکه‌های ریلی، علی‌الخصوص در کریدورهای نیمه‌برق‌دار یا غیربرق‌دار، را برطرف می‌کنند. این سیستم‌ها انرژی الکتریکی را درون قطار ذخیره کرده و امکان حرکت مستقل قطار بدون وابستگی به منابع برق خارجی را در بخش‌هایی از مسیر فراهم می‌کنند. این قابلیت به‌ویژه برای پر کردن شکاف‌های زیرساختی در برق‌رسانی، که به برق‌رسانی ناپیوسته معروف است، حیاتی است، زیرا در برخی موارد نصب خطوط بالاسری از نظر اقتصادی، فنی یا زیست‌محیطی مقرون‌به‌صرفه نیست [21].

2.2.3.1. مزایای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی



ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های ریلی، مزایای متعددی را به همراه دارد. اول، این سیستم‌ها وابستگی به زیرساخت‌های گسترده و پرهزینه برق‌رسانی را کاهش می‌دهند و سرمایه‌گذاری‌های اولیه را به حداقل می‌رسانند، در حالی که پیوستگی عملیات در محیط‌های پیچیده را تضمین می‌کنند. دوم، این فناوری با بازیابی انرژی حاصل از ترمز احیایی، کارایی انرژی را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی و انتشار کربن را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. سوم، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با کاهش نیاز به موتورهای دیزلی، انتشار آلودگی صوتی و زیست‌محیطی را کاهش داده و با اهداف جهانی توسعه پایدار همسو می‌شوند [22]؛ علاوه بر این، OEES قابلیت اطمینان و مقاومت شبکه ریلی را با تأمین انرژی پشتیبان در زمان قطعی برق یا افت ولتاژ افزایش می‌دهند [51].

2.2.3.2. اجزای سیستم برق‌رسانی OEES

2.2.3.2.1. واحد ذخیره‌سازی انرژی (ESUs) Energy Storage Units

جزء اصلی OEES، دستگاه ذخیره‌سازی انرژی است که معمولاً شامل باتری (مانند باتری لیتیوم-یون یا نیکل-متال هیدرید)، ابرخازن یا ترکیبی از هر دو است. این دستگاه وظیفه ذخیره و تأمین انرژی الکتریکی برای نیروی محرکه و سیستم‌های کمکی قطار را بر عهده دارد. باتری‌های لیتیوم-یون به دلیل چگالی انرژی بالا ترجیح داده می‌شوند، در حالی که ابرخازن‌ها در تأمین نیروی سریع در هنگام شتاب‌گیری و ترمز احیاگر بسیار مؤثر هستند. سیستم هیبریدی از نقاط قوت هر دو فناوری برای دستیابی به عملکرد بهینه استفاده می‌کند [52]. این واحدهای ذخیره‌سازی به قطار امکان عملکرد در مناطق بدون خطوط برق و کمک به ترمز احیاکننده را می‌دهند.

در بررسی دقیق‌تر، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- **باتری‌های لیتیوم-یون** دارای چگالی انرژی بالا بوده و برای عملیات طولانی مدت مناسب هستند.
- **ابرخازن‌ها** چرخه‌های شارژ و تخلیه سریع را ارائه می‌دهند که برای بازیابی انرژی در هنگام ترمز مناسب است.
- **چرخ‌های طیار** انرژی جنبشی را ذخیره کرده و برای کاربردهای کوتاه‌مدت با توان بالا مناسب هستند [53].

2.2.3.2.2. سیستم مدیریت انرژی (EMS)

سیستم مدیریت انرژی (EMS) به عنوان مغز OEES عمل کرده و جریان‌های انرژی در داخل قطار را پایش و کنترل می‌کند. این سیستم با هماهنگی دستگاه ذخیره‌سازی، مبدل‌های توان و سیستم محرکه، مصرف انرژی را بهینه می‌کند؛ EMS همچنین ایمنی سیستم را با نظارت بر پارامترهایی مانند دما، ولتاژ و جریان تضمین می‌کند و از شارژ یا گرمای بیش از حد جلوگیری می‌کند؛ علاوه بر این، این سیستم انرژی بازیافتی در طی ترمز احیاگر را مدیریت کرده و کارایی ذخیره‌سازی را به حداکثر می‌رساند [54].

EMS واحد محاسباتی است که توزیع و استفاده از انرژی را در داخل قطار کنترل می‌کند. این سیستم شارژ و تخلیه بهینه واحدهای ذخیره‌سازی انرژی، تعادل مصرف برق بین سیستم‌های پیش‌ران و جانبی، و ادغام با سیستم‌های ترمز احیاکننده برای به حداکثر رساندن بازیابی انرژی را تضمین می‌کند [55].

2.2.3.2.3. سیستم تبدیل توان / الکترونیک قدرت

سیستم تبدیل توان، شامل اینورترها و مبدل‌ها، نقش حیاتی در تطبیق انرژی ذخیره‌شده با نیازهای عملیاتی قطار ایفا می‌کند. اینورتر جریان مستقیم (DC) دستگاه ذخیره‌سازی انرژی را به جریان متناوب (AC) برای موتورهای تبدیل می‌کند؛ علاوه بر این، مبدل‌های DC-DC سطح ولتاژ را تنظیم کرده و تأمین انرژی پایدار و حفاظت از تجهیزات حساس را تضمین می‌کنند. این سیستم‌ها باید جریان انرژی دوطرفه را به‌طور کارآمد مدیریت کنند، هم در مرحله شارژ و هم در مرحله تخلیه [56].

این بخش که به بخش الکترونیک قدرت نیز معروف است، شامل اینورترها، مبدل‌ها و یکسوکننده‌ها نقش اساسی در یکپارچه‌سازی OEES ایفا می‌کند. این دستگاه‌ها انرژی DC از واحدهای ذخیره‌سازی را به AC برای موتورهای کششی تبدیل می‌کنند یا برعکس در هنگام ترمز احیاکننده؛ علاوه بر این، ولتاژ و فرکانس را مطابق نیازهای عملیاتی تنظیم می‌کنند [57].



2.2.3.2.4. موتور های محرکه (Traction Motors)

موتور های محرکه اصلی ترین مصرف کنندگان انرژی ذخیره شده در OESS هستند. این موتورها انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل کرده و چرخ های قطار را به حرکت درمی آورند. موتورهای پیشرفته غیرهمزمان یا همزمان به دلیل بهره وری بالا، مقاومت و سازگاری با سیستم های ترمز احیاگر ترجیح داده می شوند. در طی ترمز احیاگر، موتورهای محرکه به صورت معکوس عمل کرده، انرژی جنبشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند و آن را برای ذخیره سازی به OESS بازمی گردانند [58].

موتورهای کششی اغلب با EMS یکپارچه هستند؛ سیستم های مدرن از موتورهای AC به دلیل کارایی، استحکام و سازگاری با درایوهای فرکانس متغیر استفاده می کنند [59].

2.2.3.2.5. سیستم های خنک کننده و مدیریت حرارتی

مدیریت حرارتی مؤثر برای قابلیت اطمینان و طول عمر دستگاه ذخیره سازی انرژی و تجهیزات الکترونیکی قدرت ضروری است. سیستم های خنک کننده که از مکانیزم های مایع یا هوا استفاده می کنند، دماهای عملیاتی بهینه را حفظ کرده و از افت عملکرد یا خطرات حرارتی جلوگیری می کنند. این سیستم ها برای اتلاف مؤثر گرما طراحی شده اند و در عین حال مصرف انرژی را به حداقل می رسانند [60].

2.2.3.2.6. رابط های کنترل و ارتباطات

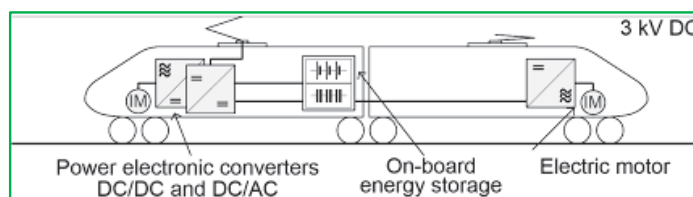
رابط های کنترل و ارتباطات یکپارچگی بدون درز OESS با سیستم های کلی قطار و زیرساخت راه آهن را تضمین می کنند. این رابط ها تبادل داده در زمان واقعی را امکان پذیر کرده و نظارت از راه دور و تشخیص خطا را تسهیل می کنند و همچنین از استراتژی های نگهداری پیش بینی کننده پشتیبانی می کنند [61].

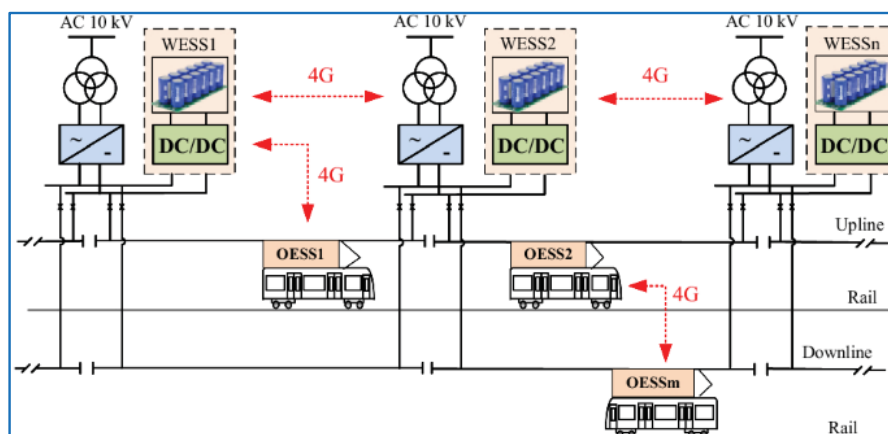
2.2.3.2.7. سیستم های توان کمکی

علاوه بر نیروی محرکه، OESS انرژی مورد نیاز برای سیستم های کمکی مانند روشنایی، HVAC (سیستم های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع) و تجهیزات الکترونیکی درون قطار را تأمین می کند. این امر نیازمند مبدل ها و شبکه های توزیع اضافی است که متناسب با نیازهای ولتاژ و توان این زیرسیستم ها طراحی شده اند [62].

2.2.3.2.8. سیستم های شارژ

زیرساخت شارژ بخش مهمی از عملکرد OESS است که امکان تجدید انرژی را در حین حرکت (از طریق ترمز احیاگر یا ایستگاه های شارژ) یا در پایانه ها فراهم می کند. سیستم های شارژ پیشرفته، انتقال سریع انرژی را پشتیبانی می کنند و در عین حال سازگاری با فناوری های مختلف ذخیره سازی انرژی را تضمین می کنند [63].





شکل ۳: سیستم‌های شارژ

2.2.4 Hybrid Railway Electrification Systems

• تاریخچه

تاریخچه سیستم‌های هیبریدی راه‌آهن به توسعه لوکوموتیوهای دوگانه‌سوز در میانه قرن بیستم بازمی‌گردد. تلاش‌های اولیه بر ترکیب موتورهای دیزلی با سیستم‌های کشش برقی متمرکز بود تا عملیات در بخش‌های برقی و غیر برقی امکان‌پذیر شود؛ به‌عنوان مثال، در دهه ۱۹۵۰، لوکوموتیوهای مانند FL9 که توسط بخش Electro-Motive Division ساخته شده بودند، از قدرت دیزل و ریل سوم استفاده می‌کردند که نقطه عطف مهمی در این زمینه بود.

با پیشرفت‌های فناوری، ترکیب باتری‌ها و سلول‌های سوختی به واقعیت در قرن بیست و یکم تبدیل شد. پروژه‌های پیشگامانه‌ای مانند قطار باتری‌دار Bombardier Talent 3 و قطار هیدروژنی Coradia iLint از آلستوم نمونه‌هایی از تغییر به‌سوی راه‌حل‌های سبزتر و کارآمدتر هیبریدی هستند [64].

• معرفی

سیستم‌های برقی‌سازی هیبریدی راه‌آهن، یک راه‌حل پیشرفته هستند که شبکه‌های برقی‌سازی سنتی راه‌آهن را با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی داخلی (OESS) یا واحدهای توان کمکی ترکیب می‌کنند. این سیستم‌ها به‌منظور ارتقاء انعطاف‌پذیری عملیاتی، کاهش انتشار گازهای کربنی و بهبود بهره‌وری انرژی طراحی شده‌اند. سیستم‌های هیبریدی به قطارها این امکان را می‌دهند که به‌طور یکپارچه در مسیرهای برقی و غیر برقی حرکت کنند، بدون نیاز مداوم به سیستم‌های کاتنری هوایی (OLE) یا منابع قدرت ریل سوم.

قطارهای هیبریدی مدرن معمولاً از باتری‌ها، سلول‌های سوختی هیدروژنی یا سایر مکانیزم‌های ذخیره‌سازی انرژی همراه با منابع قدرت سنتی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها به‌عنوان جایگزینی دوستدار محیط‌زیست برای لوکوموتیوهای دیزلی ظهور کرده‌اند و به حل دوگانه چالش‌های برقی‌سازی محدود و فوریت دستیابی به اهداف اقلیمی پرداخته‌اند [65].

2.2.4.1 مزایا و منافع پیاده‌سازی سیستم‌های الکتریکی هیبریدی

• مقرون به صرفه بودن و بهینه‌سازی زیرساخت‌ها

سیستم‌های ترکیبی نیاز به برقی‌سازی گسترده هوایی (OLE) را، به‌ویژه در مسیرهای کم‌تردد یا دورافتاده که برقی‌سازی کامل از نظر اقتصادی قابل توجیه نیست، کاهش می‌دهند. با استفاده از ترکیب منابع انرژی، راه‌آهن می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های توسعه زیرساخت و نگهداری سیستم‌های کاتنری پیوسته داشته باشد؛ به‌عنوان مثال، بخش‌هایی از مسیر می‌توانند با انرژی باتری یا هیدروژن عمل کنند [66].



• پایداری زیست محیطی

جایگزینی قطارهای دیزلی با سیستم‌های هیبریدی به‌طور قابل توجهی به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود کیفیت هوا کمک می‌کند. فناوری‌های باتری و سلول‌های سوختی هیدروژنی منابع انرژی پاک‌تری ارائه می‌دهند که با اهداف جهانی کاهش کربن همسو هستند. استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای شارژ باتری‌ها یا تولید هیدروژن، اعتبار زیست‌محیطی این سیستم را افزایش می‌دهد. کاهش انتشار کربن در سیستم‌های هیبریدی در مقایسه با عملیات دیزلی سنتی به‌خوبی مستند شده است [67].

• انعطاف‌پذیری عملیاتی

سیستم‌های ترکیبی امکان عملیات یکپارچه در بخش‌های برقی و غیر برقی شبکه راه‌آهن را فراهم می‌کنند. این انعطاف‌پذیری برای خدمات منطقه‌ای و بین‌شهری که زیرساخت‌های مختلط را طی می‌کنند، بسیار ارزشمند است. قطارهای با نیروی باتری می‌توانند بدون کاهش عملکرد، در بخش‌های بدون کاتنری عمل کنند و سیستم‌های هیدروژنی می‌توانند برد عملیاتی را در جایی که فناوری باتری ممکن است محدود باشد، گسترش دهند. مطالعات موردی در عملیات راه‌آهن این مزیت انعطاف‌پذیری را تأیید کرده‌اند [68].

• کاهش زمان توقف و افزایش قابلیت اطمینان

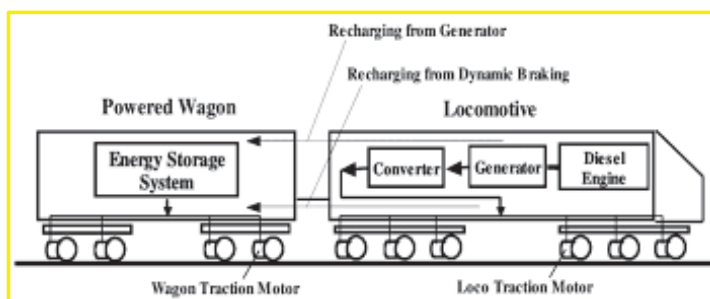
سیستم‌های ترکیبی با ارائه گزینه‌های متعدد انرژی، قابلیت اطمینان عملیاتی را افزایش می‌دهند. در صورت خرابی زیرساخت یا نگهداری در بخش‌های برقی هوایی، قطارها می‌توانند به منابع انرژی جایگزین تغییر حالت دهند و خدمات بدون وقفه را تضمین کنند. این انعطاف‌پذیری زمان توقف را کاهش داده و رضایت مشتری را افزایش می‌دهد. شواهد تجربی از مطالعات عملیات راه‌آهن بر مزایای قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت متنوع تأکید دارند [69].

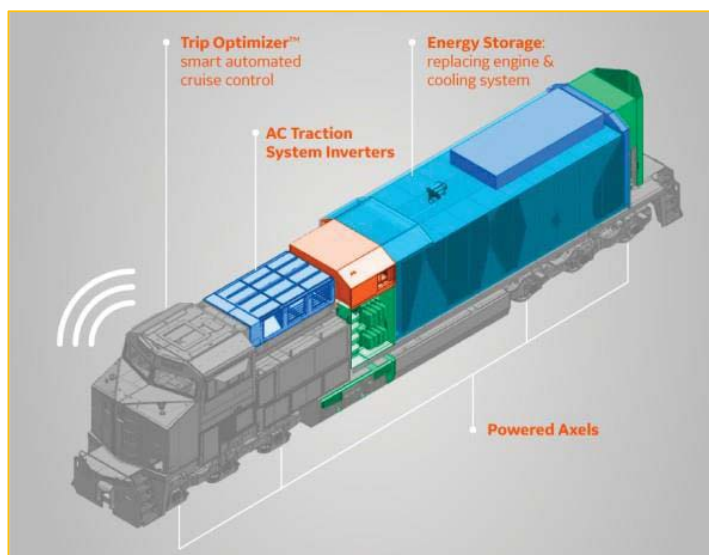
• تسهیل برقی‌سازی تدریجی شبکه

برای راه‌آهن‌هایی که از دیزل به سمت برقی‌سازی حرکت می‌کنند، سیستم‌های هیبریدی یک مسیر تدریجی ارائه می‌دهند و امکان ارتقاء زیرساخت به‌طور پیوسته را فراهم می‌کنند. ماهیت ماژولار سیستم‌های هیبریدی از استقرار مرحله‌ای فناوری‌های برقی‌سازی بدون نیاز به سرمایه‌گذاری بزرگ و آنی حمایت می‌کند. این رویکرد شتاب‌دهنده پذیرش فناوری‌های پاک‌تر است و در عین حال تداوم خدمات را حفظ می‌کند [70].

• پیشرفت فناوری

سیستم‌های ترکیبی راه‌آهن به‌عنوان بستری برای ادغام فناوری‌های پیشرفته مانند سیستم‌های بازیابی انرژی و بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی عمل می‌کنند. این پیشرفت‌ها بهره‌وری انرژی را افزایش داده و راه را برای راه‌حل‌های مقیاس‌پذیر که با تقاضای آینده قابل انطباق هستند، هموار می‌سازند [71].





شکل ۴: پیشرفت در فناوری حمل و نقل ریلی

2.3. انواع سیستم از نظر نوع جریان

2.3.1. سیستم‌های برق‌رسانی جریان مستقیم (DC)

سیستم‌های DC در ولتاژهای پایین‌تر، معمولاً ۶۰۰ تا ۳۰۰۰ ولت، عمل می‌کنند. این سیستم‌ها به‌طور گسترده در شبکه‌های حمل‌ونقل شهری، شامل متروها و سیستم‌های قطار سبک استفاده می‌شوند. مزیت اصلی سیستم‌های DC، تطابق آن‌ها با توقف‌های مکرر و شروع دوباره است که با الگوی عملیاتی حمل‌ونقل شهری هماهنگ است.

- **DC ولتاژ پایین (۷۵۰-۶۰۰ ولت):** عمدتاً در ترامواها و سیستم‌های تrolley استفاده می‌شود. این محدوده ولتاژ از طریق سیم‌های هوایی (OLE) یا ریل سوم (Third Line) تأمین می‌شود. سادگی زیرساخت و سازگاری با سیستم‌های ترمز احیاکننده آن را برای مناطق شهری و متراکم مقرون‌به‌صرفه می‌کند.
- **DC ولتاژ بالا (۳۰۰۰-۱۵۰۰ ولت):** در مناطقی با شبکه‌های گسترده حومه‌ای و بین‌شهری مانند ژاپن و بخش‌هایی از اروپا (مانند هلند) یافت می‌شود. این ولتاژ از نظر سرعت و مسافت نسبت به سیستم‌های DC ولتاژ پایین، عملکرد بهتری دارد [72].

2.3.2. سیستم‌های برق‌رسانی جریان متناوب (AC)

سیستم‌های AC، مخصوصاً سیستم‌های تک‌فاز، برای کاربردهای سنگین ریلی ایده‌آل هستند؛ زیرا توانایی انتقال انرژی در مسافت‌های طولانی با حداقل افت را دارند. این سیستم‌ها از ولتاژهای بالاتر (۱۵ کیلوولت تا ۲۵ کیلوولت) و فرکانس‌هایی استفاده می‌کنند که متناسب با نیازهای منطقه‌ای تنظیم شده‌اند.

- **۱۵ کیلوولت، ۱۶٫۷ هرتز (بیشتر ۱۶ کیلوولت ۲/۳ هرتز):** این سیستم عمدتاً در آلمان، اتریش، سوئیس و کشورهای اسکاندیناوی استفاده می‌شود. فرکانس پایین‌تر آن، راکتانس را در سیم‌های بالاسری (OLE) کاهش می‌دهد و عملکرد بهتری برای موتورهای فراهم می‌کند.
- **۲۵ کیلوولت، ۵۰ هرتز:** این سیستم، گسترده‌ترین سیستم مورد استفاده در سراسر جهان است و برای راه‌آهن‌های سریع‌السیر و کریدورهای مدرن باربری ترجیح داده می‌شود. ولتاژ بالا، افت انرژی را به حداقل می‌رساند، در حالی که سازگاری با منبع تغذیه صنعتی



استاندارد در ۵۰ هرتز، زیرساخت را ساده‌تر می‌کند. کشورهایی مانند فرانسه (TGV)، چین و هند از این سیستم به‌طور گسترده استفاده می‌کنند.

- **۲۵ کیلوولت، ۶۰ هرتز:** در آمریکای شمالی و بخش‌هایی از شرق آسیا استفاده می‌شود. این سیستم ۶۰ هرتزی برای مناطقی طراحی شده که فرکانس برق تجاری آن ۶۰ هرتز است و یکپارچگی با شبکه ملی را تضمین می‌کند [73].

2.3.3. سیستم‌های دوگانه و چندگانه

برخی سیستم‌های ریلی برای فعالیت در زیر استانداردهای مختلف برق‌رسانی، به‌دلیل خدمات بین‌مرزی یا سیستم‌های قدیمی، باید چندگانه باشند. لوکوموتیوهای دو ولتاژ یا چند سیستمی می‌توانند بین حالت‌های مختلف برق‌رسانی تغییر کنند و قابلیت همکاری را ممکن می‌سازند.

- برای مثال، یورواستار بین بریتانیا، فرانسه و بلژیک عمل می‌کند و بین ۲۵ کیلوولت AC و ۳ کیلوولت DC جابه‌جا می‌شود. چنین سیستم‌هایی عملیات کارآمد را بدون نیاز به تعویض لوکوموتیو تضمین می‌کند [74].

جدول ۱: بررسی سیستم‌های مختلف در انواع سطح ولتاژها و کاربردهای آن‌ها

Feature	DC Systems	AC Systems
Voltage Levels	600V–3kV	15kV (16.7 Hz), 25kV (50/60 Hz)
Transmission Losses	High over long distances	Low due to high voltage
Infrastructure Costs	Higher (frequent substations)	Lower (fewer substations needed)
Traction Equipment	Simpler	More complex and heavier
Applications	Urban transit, tunnels	High-speed, long-distance, freight

جدول ۲: بررسی ویژگی‌های سیستم‌های AC و DC

System	Current Type	Voltage Levels	Common Applications
Overhead Line Electrification (OLE)	AC (25 kV, 15 kV) / DC (1.5 kV, 3 kV)	25 kV AC, 15 kV AC, 1.5 kV DC, 3 kV DC	High-speed rail, heavy passenger/freight, urban/suburban rail
Third Rail Electrification	DC	600 V DC, 750 V DC	Metro, light rail, urban systems
Hybrid (Diesel-Electric)	AC/DC (combined)	Varies (typically 25 kV AC, 1.5 kV DC)	Mixed route systems (electrified + non-electrified)
Onboard Energy Storage System (OESS)	DC	600 V DC - 1500 V DC	Short non-electrified sections, urban/suburban, battery-powered systems

2.2.4. کاربردهای منطقه‌ای

- **اروپا:** عمدتاً از سیستم‌های ۲۵ کیلوولت AC و ۱۵ کیلوولت AC برای خطوط بین‌شهری و پرسرعت استفاده می‌کند. سیستم‌های قدیمی DC (۳۰۰-۱۵۰۰ ولت) در کشورهایی مانند ایتالیا و هلند برای خطوط حومه‌ای همچنان به‌کار می‌روند.
- **آسیا:** عمدتاً ۲۵ کیلوولت AC برای خطوط پرسرعت استفاده می‌شود و سیستم‌های DC در ژاپن برای شبکه‌های شهری رایج است.



- **آمریکای شمالی:** از ۲۵ کیلوولت AC برای ابتکارات جدید پرسرعت (مانند کریدور شمال شرق آمریکا) و ۱۱ کیلوولت یا ۱۲ کیلوولت AC برای سیستم‌های قدیمی استفاده می‌شود.
- **استرالیا و آفریقا:** از ۲۵ کیلوولت AC برای باربری و راه‌آهن پرسرعت استفاده می‌کنند، زیرا از نظر بهره‌وری در عملیات طولانی‌مدت موثر است [75].

2.4. انواع موتورهای الکتریکی مورد استفاده در سیستم برق‌رسانی مترو

2.4.1. موتورهای DC در برق‌رسانی راه‌آهن

موتورهای جریان مستقیم (DC) به‌طور تاریخی متداول‌ترین نوع موتور مورد استفاده در برق‌رسانی راه‌آهن بوده‌اند، به‌ویژه در سیستم‌های حمل و نقل جمعی شهری، مانند قطارهای برقی، ترامواها و طراحی‌های قدیمی لوکوموتیوها. کاربرد موتورهای DC در سیستم‌های سرعت پایین تا متوسط معمول است که نیاز به کنترل متغیر سرعت دارند.

2.4.1.1. انواع موتورهای DC

- **موتور DC سری:** این نوع موتور به‌دلیل گشتاور شروع بالای خود برای مقاصد کشش بسیار مناسب است. این موتور برای کاربردهایی که نیاز به سرعت و بار متغیر دارند، مانند قطارهای حومه‌ای یا لوکوموتیوها، مؤثر است.
- **موتور DC شنت:** این موتور ویژگی‌های سرعت ثابت دارد و بیشتر برای عملیات پایدار مناسب است، اغلب در سیستم‌هایی که کنترل سرعت آنچنان نیازمند نیست، استفاده می‌شود.

2.4.1.2. مزایا

- **گشتاور شروع بالا:** موتورهای DC گشتاور شروع عالی دارند که آن‌ها را برای کاربردهایی که نیاز به شتاب سریع از حالت سکون دارند، ایده‌آل می‌کند.
- **کنترل متغیر سرعت:** سرعت موتور DC می‌تواند به راحتی با تنظیم ولتاژ اعمال شده به موتور تغییر کند که این امر شتاب‌دهی و کاهش سرعت روان را فراهم می‌آورد.
- **کارایی در سرعت‌های پایین:** موتورهای DC در سرعت‌های پایین کارآمد هستند که برای سیستم‌های حمل و نقل شهری یا عملیات حمل و نقل بار با سرعت کم حیاتی است.

2.4.1.3. معایب

- **نیاز به نگهداری زیاد:** موتورهای DC نسبت به موتورهای AC نیاز به نگهداری بیشتری دارند، عمدتاً به‌دلیل سایش برس‌ها و کموتاتورها. این ویژگی آن‌ها را برای عملیات با سرعت بالا و سرویس مداوم نامناسب می‌کند.
- **کارایی محدود در سرعت‌های بالا:** موتورهای DC در سرعت‌های بالا کارایی کمتری دارند که کاربرد آن‌ها را در عملیات راه‌آهن‌های پرسرعت محدود می‌کند [76,77].

2.4.2. موتورهای AC در برق‌رسانی راه‌آهن

موتورهای AC به انتخاب ترجیحی در برق‌رسانی راه‌آهن‌های مدرن تبدیل شده‌اند، مخصوصاً در سیستم‌های راه‌آهن با سرعت بالا، حمل و نقل بار طولانی‌مدت، و قطارهای مسافری با عملکرد بالا. دو نوع اصلی موتور AC که در کشش راه‌آهن استفاده می‌شوند، موتورهای القایی آسنکرون (IM) و موتورهای سنکرون (SM) هستند.

2.4.2.1. انواع موتورهای AC



- **موتورهای القایی (موتورهای آسنکرون):** این موتورها رایج‌ترین نوع موتور در برق‌رسانی مدرن راه‌آهن هستند. موتورهای القایی بدون نیاز به کموتاتور کار می‌کنند و نسبت به موتورهای DC ساده‌تر و بادوام‌تر هستند. این موتورها به‌ویژه در قطارهای پرسرعت و لوکوموتیوهای برقی استفاده می‌شوند.
- **موتورهای سنکرون:** این موتورها به‌طور معمول در درایوهای کششی بزرگ استفاده می‌شوند که در آن‌ها نیاز به سرعت ثابت است. این موتورها اغلب با سیستم‌های کنترل پیشرفته ترکیب شده و در کاربردهای تخصصی به کار می‌روند.

2.4.2.2. مزایا

- **هزینه‌های نگهداری پایین‌تر:** بر خلاف موتورهای DC، موتورهای AC نیازی به برس یا کموتاتور ندارند که باعث کاهش سایش و پارگی و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود.
- **کارایی بالا در سرعت‌های بالا:** موتورهای AC در سرعت‌های بالا، کارایی بیشتری دارند که آن‌ها را برای قطارهای پرسرعت مدرن و کاربردهای حمل و نقل بار طولانی‌مدت مناسب می‌سازد.
- **عملکرد بهتر با درایوهای الکترونیکی قدرت:** موتورهای AC، به‌ویژه موتورهای القایی، با درایوهای الکترونیکی مدرن مانند درایوهای تغییر فرکانس (VFD) سازگاری بالایی دارند که به کنترل دقیق سرعت و بازایی انرژی کمک می‌کند.

2.4.2.3. معایب

- **پیچیدگی سیستم‌های کنترل:** موتورهای AC نیاز به سیستم‌های کنترل پیچیده‌ای برای تنظیم سرعت دارند، به‌ویژه در موتورهای القایی که برای این کار نیاز به درایوهای تغییر فرکانس (VFD) دارند.
- **گشتاور شروع کمتر:** موتورهای القایی معمولاً گشتاور شروع کمتری نسبت به موتورهای DC دارند، اگرچه این موضوع با استفاده از VFDها و تکنیک‌های پیشرفته استارت قابل حل است [78,79].

2.4.3. موتورهای مغناطیسی دائم (PMs) در برق‌رسانی راه‌آهن

موتورهای مغناطیسی دائم (PMs) به‌طور فزاینده‌ای در سیستم‌های کشش پیشرفته راه‌آهن استفاده می‌شوند، به‌ویژه در کاربردهایی که نیاز به عملکرد بالا و کارایی انرژی دارند. این موتورها از مغناطیس دائم برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می‌کنند و نیازی به تحریک خارجی ندارند.

2.4.3.1. انواع PMs

- **موتورهای سنکرون مغناطیسی دائم (PMSM):** این موتورها به‌طور فزاینده‌ای در طراحی قطارهای مدرن استفاده می‌شوند، به‌ویژه برای راه‌آهن‌های پرسرعت یا سیستم‌های راه‌آهن سبک به‌دلیل کارایی بالا و نسبت توان به وزن عالی.
- **موتورهای سنکرون مقاومتی مغناطیسی دائم (PMSRM):** این موتورها مزایای موتورهای مقاومتی سنکرون را با مغناطیس دائم ترکیب می‌کنند و در سیستم‌های کششی با کارایی انرژی بالا استفاده می‌شوند.

2.4.3.2. مزایا

- **کارایی بالا و چگالی توان:** PMs کارایی بالاتر و چگالی توان بیشتری نسبت به موتورهای معمولی دارند که آن‌ها را برای استفاده در قطارهای سبک و راه‌آهن‌های پرسرعت ایده‌آل می‌سازد.
- **حجم و وزن کم:** به‌دلیل استفاده از مغناطیس دائم، این موتورها می‌توانند جمع‌وجورتر و سبک‌تر باشند که طراحی کلی قطار را بهبود می‌بخشد و مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.
- **کاهش تلفات:** PMs تلفات کمتری ایجاد می‌کنند، به‌ویژه در روتور، که منجر به کاهش مصرف انرژی و مدیریت حرارتی بهتر می‌شود.



2.4.3.3. معایب

- **هزینه بالای آهنرباها:** استفاده از آهنرباهای نادر خاکی در PMMs می‌تواند هزینه این موتورها را افزایش دهد. با این حال، تحقیقات در حال انجام در زمینه جایگزین‌ها ممکن است هزینه‌ها را در آینده کاهش دهد.
- **پیچیدگی در کنترل:** مانند دیگر انواع موتورهای پیشرفته، PMMs نیاز به سیستم‌های کنترل پیچیده‌ای دارند، به‌ویژه هنگام عملکرد در سرعت‌ها و بارهای متغیر [80,81].

۳. نتیجه‌گیری

سیستم‌های برق‌رسانی مترو نقش حیاتی در تأمین انرژی الکتریکی قطارهای شهری دارند. این سیستم‌ها با استفاده از فناوری‌های مدرن مانند خطوط بالاسری (OLE)، ریل سوم و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی داخلی (OESS) موجب بهبود کارایی انرژی، کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی و افزایش قابلیت اطمینان در حمل‌ونقل ریلی می‌شوند. استفاده از سیستم‌های الکتریکی نه تنها باعث افزایش بهره‌وری انرژی شده، بلکه هزینه‌های نگهداری را نیز کاهش می‌دهد. قطارهای الکتریکی با توان بالاتر، شتاب‌گیری و ترمزگیری بهتری نسبت به دیزلی‌ها داشته و این امر منجر به افزایش ظرفیت و کاهش زمان سفر می‌شود.

سیستم‌های برق‌رسانی بر اساس نوع ولتاژ و کاربرد به جریان مستقیم (DC) و جریان متناوب (AC) تقسیم می‌شوند. سیستم‌های DC به دلیل ولتاژ پایین‌تر و ایمنی بیشتر در متروها و خطوط شهری استفاده می‌شوند، در حالی که سیستم‌های AC برای خطوط بین‌شهری و پرسرعت به کار می‌روند. سیستم‌های هیبریدی که ترکیبی از باتری‌ها و منابع انرژی جایگزین مانند سلول‌های سوختی هستند، برای مسیرهای نیمه‌برق‌دار مناسب‌اند. سیستم‌های OLE به عنوان رایج‌ترین روش برق‌رسانی، با انتقال انرژی از طریق سیم‌های بالاسری، بهره‌وری انرژی بالایی دارند. از سوی دیگر، سیستم‌های ریل سوم با کاهش نیاز به زیرساخت‌های حجیم و نصب ساده‌تر، برای محیط‌های شهری فشرده مناسب‌اند.

در نهایت، پیشرفت‌های اخیر در فناوری ذخیره‌سازی انرژی، مانند باتری‌های لیتیوم-یونی و ابرخازن‌ها، امکان استفاده از سیستم‌های ترکیبی و برق‌رسانی مستقل را فراهم کرده است. این فناوری‌ها با کاهش نیاز به زیرساخت‌های پیچیده و هزینه‌های سنگین، آینده‌ای روشن برای حمل‌ونقل ریلی پایدار فراهم می‌سازند.

۴. پیشنهادات

- استفاده از ریزخازن‌ها در سیستم‌های هیبریدی یا OESS
- توسعه استفاده از انرژی‌های پاک در سیستم‌های هیبریدی و OESS
- استفاده از باتری‌های هسته‌ای در سیستم برای بازدهی بیشتر و حجم کمتر

مراجع

- [1] QUELLEC, Nicolas. "Full Electrification Study". Canada: CREE Development Corporation, LA Grande Alliance & Systra Canada, 2022.
- [2] Frey, Sheilah. "Railway Electrification Systems and Engineering". First Edition. Delhi: White Word Publications, 2012.
- [3] W. Siemens, "Über die Verwendung von Drahtseilen zur elektrischen Eisenbahn," Siemens Historical Archives, Berlin, Germany, 1879.
- [4] M. J. Haynes, The History of Railway Electrification. New York, NY, USA: Wiley, 1976.
- [5] Swiss Federal Railways, Historical Development of Electrification in Switzerland. Zürich, Switzerland: SBB Archives, 1925.
- [6] Deutsche Reichsbahn, "The Evolution of Electrified Rail Systems in Germany," Journal of Railway Engineering, vol. 12, no. 3, pp. 205–214, 1930.
- [7] D. J. Paterson, "Electrification of Railways: A Worldwide Review," Railway Gazette International, vol. 25, no. 7, pp. 120–129, 1955.
- [8] International Union of Railways (UIC), Electrification Standards and Trends, Paris, France: UIC Publications, 1950.
- [9] Chat GPT.
- [10] Pachl, J. "Railway Operation and Control". Washington DC, USA: VTD Rail Publishing, 2018.



- [11] Smith, R., and Patterson, T., Sustainable Rail Transport: Energy Efficiency and Environmental Impacts. London, UK: Transport Research Publishing, 2018.
- [12] Taylor, J., and Fletcher, M., "Performance Optimization in Electrified Rail Systems," in International Journal of Railway Engineering, vol. 25, no. 3, pp. 110-120, 2019.
- [13] Johnson, L., Verma, R., and Chen, D., "Cost Analysis of Maintenance for Diesel and Electric Trains," in Railway Maintenance Studies, vol. 33, no. 2, pp. 78-87, 2020.
- [14] Green, A., and Porter, B., "Passenger Perceptions of Electric Rail Systems," in Urban Transit Review, vol. 12, no. 4, pp. 50-62, 2021.
- [15] Harrison, P., and Walker, J., "Economic Impacts of Railway Electrification Projects," in Journal of Infrastructure Economics, vol. 8, no. 1, pp. 24-35, 2017.
- [16] Armstrong, J. H. "The Railroad: What It Is, What It Does". New York, USA: Simmons-Boardman Publishing Corporation, 1994.
- [17] Steimel, A. "Electric Traction: Motive Power and Energy Supply". Berlin, Germany: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2012.
- [18] Gooch, G. E., & Garbutt, P. "Electric Railways". London, UK: Institution of Engineering and Technology (IET), 2004.
- [19] Szelag, A., & Gieras, J. F. "Modern Electric Traction". New Jersey, USA: Springer Publishing, 2000.
- [20] Schmid, F. "Overhead Contact Systems for Electric Railways". New Jersey, USA: Springer Publishing, 2011.
- [21] Lowenthal, J. "Electric Railway Engineering". New York, USA: McGraw-Hill, 1999.
- [22] Hughes, A. "Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications". Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2017.
- [23] Schmid, F. "Railway Traction Systems and Electrification". New Jersey, USA: Springer Publishing, 2010.
- [24] Pritchard, G. "Electric Railways: History, Development and Applications". United Kingdom: Ashgate Publishing, 2008.
- [25] Esveld, C. "Modern Railway Track". Netherlands: MRT Press, 2001.
- [26] Armstrong, J. "High-Speed Rail Electrification: Design and Implementation". New York, USA: McGraw-Hill Education, 2012.
- [27] Railway Safety and Standards Board (RSSB). "Railway Electrification Safety Manual". UK: RSSB, 2018.
- [28] Rees, N. "Railway Electrification Infrastructure and Systems". UK: Institution of Engineering and Technology (IET), 2016.
- [29] <https://www.thepwi.org>. "Overhead Line Electrification for Railways". 2020.
- [30] Horne, M. "The Electrification of Railways". Journal of Railway and Canal Historical Society, 2006.
- [31] R. L. George. "Railway Electrification" London: The Institution of Railway Signal Engineers, 2001.
- [32] Kemp, R., Electric Traction Handbook: A Comprehensive Guide to Rail Electrification. London, UK: Railway Press, 2007.
- [33] Preston, J., Railway Electrification: A Systems Approach. New York, NY: Transportation Publishing, 2003.
- [34] Wilson, G., Safety in Rail Traction Systems: Best Practices in Design and Maintenance. Chicago, IL: Rail Safety Institute, 2005.
- [35] Jones, P., and A. Smith, Power Systems in Urban Rail Transit. Cambridge, MA: Metro Transit Publications, 2010.
- [36] Hill, D., Electrification Strategies in Modern Rail Transport. Oxford, UK: Rail Engineering Books, 2009.
- [37] Marshall, L., Urban Transit Design and Infrastructure. San Francisco, CA: Urban Mobility Press, 2012.
- [38] Simmons-Boardman, J. "Electric Railways: A Guide to the Third Rail and Catenary Systems". New York, USA: Simmons-Boardman Publishing, 2015.
- [39] Yuen, W. C., & Yip, H. Y. "Railway Electrification and Power Supply Systems: An Engineering Guide". New Jersey, USA: Wiley, 2005.
- [40] Garg, V. K., & Dahiya, M. L. "Electric Traction: Drives and Control" Delhi, India: Khanna Publishers, 2015.
- [41] Turner, J. "Modern Railway Systems: Electrification and Control." New Jersey, USA: Springer Publishing, 2017.
- [42] Chisholm, E. "Modern Railway Engineering". USA: CRC Press, 2010.
- [43] Stanton, A. J., & Heffernan, A. "Electrical Power Systems for Railways: Design and Operation". Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2007.
- [44] Berger, G., & Böhm, E. "Railway Power Supply Systems: Design and Operation". New Jersey, USA: Springer, 2008.
- [45] Baker, R. "Railway Signaling: Principles and Applications". UK: Institution of Engineering and Technology (IET), 2013.
- [46] International Journal of Rail Transportation, 2018; IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020
- [47] X. Li and L. Zhou, "Energy-saving technologies for railway transportation: Review and prospects," International Journal of Rail Transportation, vol. 6, no. 3, pp. 160–182, 2018.
- [48] Z. Song and H. Hofmann, "Advances in battery technologies for railway electrification," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 6, no. 2, pp. 400–416, Jun. 2020.
- [49] Y. Morita and S. Kondo, "Regenerative braking systems for urban rail systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 5, pp. 540–548, Oct. 1995.
- [50] B. Dunn, H. Kamath, and J. M. Tarascon, "Energy storage in the railway sector: Challenges and opportunities," Nature Energy, vol. 6, no. 3, pp. 265–276, Mar. 2021.
- [51] A. Smith, K. Taylor, and P. Williams, Energy Systems for Transport Applications. New York, NY, USA: Springer, 2020.
- [52] A. Burke, "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles," Proceedings of the IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 806–820, Apr. 2007.
- [53] B. Tang, Q. Zhang, H. Zhao, and J. Wu, "Advances in Batteries for Medium and Large-Scale Energy Storage," Nature Energy, vol. 3, no. 4, pp. 276–285, Apr. 2018.
- [54] M. Rahimi and S. Abedi, Energy Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. Springer, 2018.



- [55] P. Leitão, J. Barbosa, R. Adam, and H. Herrmann, "Energy Management Strategies for Hybrid Electric Rail Vehicles," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 5, no. 1, pp. 1-14, Mar. 2019.
- [56] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. 3rd ed., Academic Press, 2017.
- [57] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications. 3rd ed. San Diego, CA, USA: Academic Press, 2017.
- [58] X. Wang and S. Li, Principles of Electric Machines and Power Electronics. 3rd ed., Wiley, 2015.
- [59] A. Hughes and B. Drury, Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types, and Applications. 5th ed. Oxford, UK: Elsevier, 2019.
- [60] Z. Rao and S. Wang, "A review of power battery thermal energy management," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, no. 9, pp. 4554-4571, Dec. 2011.
- [61] P. Hsu, Railway Technology Systems and Applications. CRC Press, 2018.
- [62] A. Ogunsola and A. Mariscotti, Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer, 2012.
- [63] J. Larminie and J. Lowry, Electric Vehicle Technology Explained. 2nd ed., Wiley, 2012.
- [64] R. S. Wilson, Railway Technology Today: Innovations in Power and Efficiency, Taylor & Francis, 2015.
- [65] A. Steimel, Electric Traction - Motive Power and Energy Supply, Oldenbourg Industrial Electronics, 2008.
- [66] C. Esveld, Modern Railway Track. MRT-Productions, 2001.
- [67] J. Andersson and M. Blinge, Life Cycle Assessment of Railways and Rail Systems. Springer, 2016.
- [68] UIC, Railway Sustainability and Flexibility. International Union of Railways, 2018.
- [69] D. Sperling, Two Billion Cars: Driving Toward Sustainability. Oxford University Press, 2009.
- [70] A. Smith, et al., Rail Electrification Systems: Costs and Benefits. Transport Research Board, 2014.
- [71] M. Givoni and D. Banister, Transport Research and Innovation: Technological Trends. Routledge, 2013.
- [72] Tey, L. S., Hill, R. J., and Grieve, R. J., "Analysis of DC railway systems," Journal of Transportation Engineering, vol. 136, no. 9, pp. 836-844, 2010.
- [73] Armstrong, J. R., Electrical Systems for Railways, London: IET, 2006.
- [74] Mieczkowski, Z., "Dual system electrification challenges and solutions," Railway Engineering Journal, vol. 45, no. 3, pp. 67-74, 2013.
- [75] Pachl, J., Railway Operation and Control, Hamburg: VTD Rail Publishing, 2004.
- [76] H. L. A. S. de Silva, "Electric Traction: A Technological and Economic Overview," IEE Power Engineering Journal, vol. 14, no. 4, pp. 220-230, Aug. 2000.
- [77] J. L. Stimpfig, "DC Motors and Their Applications," in Traction Systems in Railways, Springer, 1997, pp. 92-113.
- [78] F. S. H. Pal, "Electric Traction for Railways," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 18, no. 6, pp. 1553-1561, Nov. 2003.
- [79] S. K. Gupta, "AC Motors in Traction Systems," in Railway Traction Systems, CRC Press, 2012, pp. 57-76.
- [80] Z. Q. Zhu, "Permanent Magnet Synchronous Motors for Railway Traction," in Electric Machines and Drives, Elsevier, 2017, pp. 180-195.
- [81] H. R. N. S. Bhowmik, "Design and Application of Permanent Magnet Motors in Electric Railways," International Journal of Railway Technology, vol. 4, no. 3, pp. 112-125, Aug. 2018.