دانشکده مهندسی راه آهن

مبانی راه‌آهن برقی

Fundamental Of Railway Electrification

سیامک فرشاد

فصل اول – مقدمه

در دنیای صنعتی امروز با پیشرفت سریع علم ارتباطات و گسترش تجارت بین‌المللی، تقاضای سفر و حمل بار به صورت داخلی و بین‌المللی رو به افزایش است؛ به گونه‌ای که سرمایه‌گذاری روی کانالهای حمل و نقل یکی از معیارهای سنجش پیشرفت اقتصادی کشورها به شمار می‌رود. با توجه به محدودیت منابع انرژی و وجود دیدگاههای خاص در سرمایه‌گذاری (مانند نرخ بازگشت سرمایه)، این دو معمولاً به عنوان معیارهای سنجش در اقتصادی بودن پروژه‌های حمل و نقل به شمار می‌روند. از دیگر معیارهای سرمایه‌گذاری در روشهای مختلف حمل و نقل میزان هزینه‌های بهره‌برداری و حجم بار و مسافر قابل حمل در روش حمل و نقل مورد نظر است. با توجه به تنوع روشهای حمل و نقل، معیارهای متعدد دیگری نیز در انتخاب روش حمل و نقل مورد نظر قرار می‌گیرد که در اینجا هدف بررسی این معیارها نیست.

براساس بعضی از این معیارها حمل و نقل ریلی در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است. در منابع و مآخذ مزایا و معایب متعددی برای حمل و نقل ریلی برشمرده می شود بعضی از محاسن حمل و نقل ریلی عبارتند از:

۱–حمل ونقل ریلی در حجم برابر بار و مسافر به میزان قابل توجهی در مصرف سوخت صرفه جوئی می نماید.

۲–حمل ونقل ریلی توانائی حمل بار و مسافر در حجم زیاد را داراست

۳–حمل ونقل ریلی توانائی حمل بارهای سنگین را داراست

٤–درحمل ونقل ریلی هزینه کلی سفر (از دیدگاه اقتصاد ملی) بسیار کمتر از هزینه سفر با سایر روشهاست

۵–حمل ونقل ریلی بسیار ایمنتر از سایر روشهای حمل و نقل است

٦–در جابجائی مسافر در حمل و نقل ریلی مسافر از آزادی و راحتی بیشتری برخوردار است

راه آهن به عنوان یک روش حمل و نقل سازگار با محیط و از نظر اقتصاد ملی مقرون به صرفه در بسیاری از کشورها مورد توجه قرار گرفته است.

در حال حاضر به علل مختلف انرژی مورد نیاز جهت چرخش چرخها توسط موتورهای الکتریکی (تراکشن موتور[1]) تامین می شود.

---

[1] Traction motor

راه آهن از نظر کاربرد به دو قسمت حمل باری و حمل مسافری تقسیم می شود . کشورهای مختلف بنابر ضرورت یا اولویتها، یکی از دو نوع را عمدتا" محور اصلی قرار داده و در سرمایه گذاری و برنامه ریزی های بلند مدت خود، آنرا مد نظر قرار می دهند. به عنوان مثال راه آهن کشورهایی مانند آمریکا، کانادا، استرالیا، افریقای جنوبی وهمچنین ایران دارای ساختاری برمبنای حمل بار می باشند، در صورتی که کشورهایی مانند ژاپن، فرانسه، آلمان و اغلب کشورهای اروپایی ساختاری برمبنای حمل مسافر دارند. هریک از راه آهن های باری و مسافری از ویژگیهای خاص خود برخوردارند و در طراحی خطوط و ظرفیت آنها باید این جهت گیری مهم مدنظر قرار گیرد.

در مورد راه آهن ایران و سیاست گذاری آینده آن، به نظر می رسد که هر دو جنبه باری و مسافری مد نظر می باشد.

در حال حاضر به علل مختلف انرژی مورد نیاز جهت چرخش چرخها توسط موتورهای الکتریکی (موتور تراکشن[1]) تأمین می‌شود. انرژی الکتریکی تراکشن موتورهای یک لکوموتیو به دو صورت ژنراتورهای هم محور با موتورهای احتراق داخلی (سیستم دیزل الکتریک) و شبکه الکتریکی تأمین می‌شود.

در سیستم دیزل الکتریک، موتور احتراق داخلی که معمولاً از نوع دیزل است به عنوان منبع انرژی در داخل لکوموتیو نصب می‌شود و ژنراتور را می‌چرخاند ومجموعاً نقش یک نیروگاه کوچک را در داخل لکوموتیو ایفا می‌کنند.

سیستم دیزل الکتریک نسبت به نوع برقی مستلزم سرمایه‌گذاری اولیه کمتری است. از معایب این سیستم استفاده از گازوئیل به عنوان سوخت، بالا بودن هزینه‌های بهره‌برداری و محدودیتهای فنی در شرایط مختلف جوی (به ازای تغییرات دما، فشار، ارتفاع و ....) است. همچنین در مناطق کوهستانی که چند لکوموتیو قطار را می‌کشند، در تونلها مسأله افت نیروی کشش به وجود خواهد آمد.

لکوموتیوهای برقی دارای هیچ نوع موتور احتراقی نبوده و انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را از طریق شبکه تغذیه[2] و ریل دریافت می کنند. مزایای مختلفی برای راه آهنهای برقی ذکر می شود که در نتیجه آنها استفاده از راه آهن برقی در خطوط با ترافیک سنگین و خطوط کوهستانی با شیب و فراز زیاد و تونلهای متعدد توصیه می شود. در راه آهنهای برقی اگر چه دیزل ژنراتور در داخل لکوموتیو حذف می شود، اما یک شبکه الکتریکی لازم خواهد بود که انرژی الکتریکی را به لکوموتیو منتقل سازد.

این سیستم به علت عدم تابعیت از شرایط جوی، در مناطق کوهستانی (به خصوص با شیب و فرازهای تند و تونلهای طویل) به شدت مورد توجه قرار می‌گیرد. از طرف دیگر زمینه به کارگیری قطارهای طویل باری و قطارهای سریع‌السیر مسافری را فراهم می‌سازد.

---

[1] Traction Motor
[2] Contact system

به طور کلی برقی کردن راه آهن زمینه ساز:

۱- جایگزینی سوخت گازوئیل لوکوموتیوهای دیزل توسط سوختهای ارزانتر (مانند مازوت) یا تمیزتر (مانند گاز طبیعی) که معمولا در نیروگاهها استفاده می شوند.

۲- افزایش بهره وری در مسیرهای کوهستانی با شیب و فرازهای تند و تونلهای طویل و شرایط جوی مختلف

۳- کاهش هزینه بهره برداری و در نتیجه کاهش بهای تمام شده حمل بار و مسافر (در قیمتهای واقعی از دیدگاه اقتصاد ملی)

٤- افزایش ضریب استفاده از سرمایه گذاری انجام شده (خصوصا لکوموتیوها) به علت نیاز به تعمیرات دوره ای کمتر

۵- کاهش آلودگیهای زیست محیطی در سطح کلان (به علت جایگزینی سوخت)

٦- عدم نیاز به گرم نگهداشتن موتورها در حالت توقف (در نتیجه مصرف کمتر سوخت و آلودگی کمتر)

۷- افزایش سرعت متوسط حرکت و افزایش ظرفیت خطوط راه آهن

فصل ۲ - تاریخچه

از ابتدای اختراع انرژی الکتریکی، ایده استفاده از این منبع انرژی برای جابجایی و حمل و نقل ذهن بشر را به خود مشغول نموده بود. این تفکر به علت سادگی تبدیل انرژی الکتریکی به انرژی مکانیکی بوجود آمد. عواملی از جمله بازدهی بالا، سهولت استفاده، خرابی کمتر قطعات، ثابت بودن میزان انرژی خروجی با تغییر شرایط محیطی، توجه به محیط زیست و آلودگی های صوتی و محیطی کمتر و سایر موارد باعث تسریع این روند شده است تا جایی که در عرصه های گوناگون صنعت حمل و نقل، انرژی الکتریکی به عنوان نیروی برتر شناخته شده است و استفاده های بسیار گوناگون و متنوعی از آن صورت می گیرد.

راه آهن برقی در طول تاریخ پیدایش خود مراحل بسیاری را پشت سر گذاشته است که در تکامل و کاربری آن تاثیر مهمی داشته است. کاربردهای متفاوت انرژی الکتریکی در صنایع حمل و نقل به سه دسته کلی تقسیم می شوند :

الف- سیستم های حمل و نقل درون شهری

ب-سیستم های حمل و نقل بین شهری

ج- سیستم های حمل و نقل خاص

در این قسمت سعی می شود روند تکاملی این صنعت بطور مختصر شرح داده شود و نحوه کار هر یک بطور اجمال بیان گردد.

تامین انرژی ماشین های برقی اولیه، بوسیله قراردادن باطریهای الکتریکی در داخل وسیله نقلیه نیز انجام می شد. با پیشرفت تکنولوژی ساخت موتورهای الکتریکی از لحاظ توان و سطح ولتاژ، استفاده از باطریها بشکل سنتی دیگر معقول به نظر نمی رسید.

تاریخ استفاده از تراکشن برقی به می ۱۸۷۹ بر می گردد، زمانی که اولین ماشین برقی برای حمل و نقل، جهت کارهای نمایشی در شهر برلین و توسط "ورنر ون زیمنس" براه افتاد.

در ۳۱ می ۱۸۷۹ اولین خط آهن برقی توسط یک لکوموتیو ۹۴۵ کیلوگرمی که با یک موتور دو قطبی با توان ۲/۲ KW و ولتاژ ۱۵۰ V-DC به حرکت در می آمد توسط ورنر ون زیمنس[1] در نمایشگاه صنعتی برلن به نمایش گذاشته شد. لکوموتیو سه واگن مسافری را با سرعت ۱۲ km/h روی یک خط بصورت

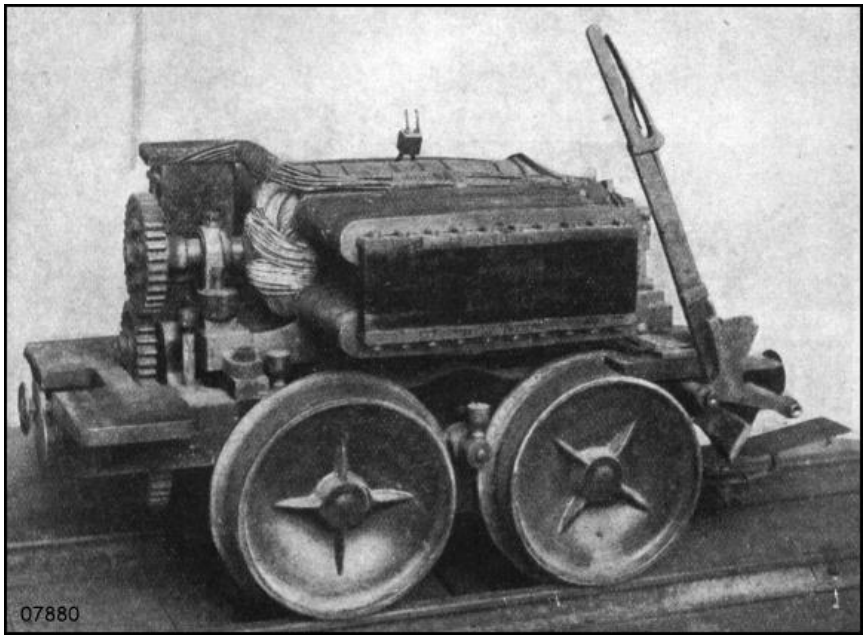
[1] Werner von Simense

دایره بسته و بطول ۳۰۰ متر حرکت می داد. فاصله دو ریل[1] این خط یک متر بود. تغذیه این خط برقی به روش ریل سوم انجام می شد.

در ابتدا، استفاده از انرژی الکتریکی در وسایل نقلیه به سیستم های زیر زمینی اختصاص داشت ولی بین سالهای ۱۸۹۰ تا ۱۹۱٤ استفاده از تراموا‌ها که در سطح خیابانها حرکت می کردند متداول شد. با افزایش جمعیت شهرها و اضافه شدن تقاضای استفاده از تراموا، فکر استفاده از سیستم های جدیدتر با قابلیت های بیشتر بوجود آمد که منجر به پیدایش سیستم راه آهن سبک شهری یا LRT گردید.

اولین خط برقی به شکل امروزی در سال ۱۸۸۱ توسط شرکت Siemens Halske درپاریس راه اندازی شد. این سیستم به صورت تراموا بود و توسط شبکه هوائی تغذیه می شد.

شکل ۲-۱ – اولین خط آهن برقی که توسط ورنر ون زیمنس درسال ۱۸۷۹به نمایش گذاشته شد.



شکل ۲-۲ – لکوموتیو اولین خط آهن برقی که توسط ورنر ون زیمنس ساخته شد

[1] gauge

در قرن نوزدهم تغذیه خطوط برقی با ولتاژ فشار کم DC بود و حمل ونقل برقی فقط برای حمل ونقل داخل شهر بکار می رفت و استفاده از آن در حمل ونقل بین شهری تنها بصورت ایده مطرح بود. در ابتدای قرن بیستم استفاده از حمل ونقل برقی درخطوط اصلی آغاز شد ولتاژ تغذیه این خطوط 150V DC، 750V DC، 1500V DC و3000V DC بود.

در سال ۱۹۰۳ یک نمونه یک فاز AC با فرکانس کم در حومه برلین آزمایش شد و سپس لکوموتیوهای با تراکشن موتور سه فاز مورد بهره برداری قرار گرفت. تغذیه این لکوموتیوها شبکه هوائی سه فاز بود.

در سال ۱۹۰۵ نمونه یک فاز AC با موتور انیورسال در سوئیس باموفقیت آزمایش شد، بعد ازآن نمونه های یک فاز AC در آلمان، سوئیس، سوئد و آمریکا توسعه یافت.

در سال ۱۹۱۰ در هشتمین کنگره بین المللی راه آهن بهترین سیستم راه آهن برقی مورد بحث قرار گرفت. در فرانسه جریان مستقیم، در ایتالیا جریان متناوب سه فاز و در آلمان، سوئیس و اتریش جریان متناوب یک فاز با فرکانس کم ترجیح داده شد.

بعد از جنگ جهانی اول کشورهای اروپای مرکزی و کشورهای اسکاندیناوی تصمیم به استفاده از ولتاژ kV ۱۵ یک فاز AC با فرکانس $\frac{۵۰}{۳}$ هرتز گرفتند. این انتخاب براساس نتایج مثبت بدست آمده در بعضی خطوط اصلی پر ترافیک در سوئد و سوئیس انجام شد.

انگلیس، کشورهای مشترک المنافع، فرانسه و هلند ولتاژ ۱۵۰۰ V DC و اسپانیا، ایتالیا، بلژیک و اتحاد جماهیر شوروی(سابق) ولتاژ ۳۰۰۰ V DC را ترجیح دادند.

در سال ۱۹۲۰ اولین سیستم AC یک فاز با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۱۶ kV در مجارستان معرفی شد و به دنبال آن آلمان شبکه سیستمAC یک فاز با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۲۰ kV را به کار برد. بعد از جنگ جهانی دوم در سال ۱۹۵۱ مهندسین فرانسوی این سیستم را در خطوط خود بکار بردند و به دنبال نتایج مثبت آن سیستمAC یک فاز با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۲۵ kV را معرفی نمودند. در سال ۱۹۵۴ اولین خط سیستمAC یک فاز با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ ۲۵ kV را در جنوب شرقی فرانسه مورد بهره برداری قرار گرفت.

از این تاریخ به بعد خطوط برقی با سرعت زیادی توسعه یافتند زیرا در طول جنگ جهانی دوم و بعد از آن کشورهای اروپائی شروع به مدرنیزه کردن حمل ونقل خود نمودند در این جهت لکوموتیوهای بخاری با لکوموتیوهای دیزل الکتریک و برقی جایگزین شدند.

در شانزدهمین کنگره بین المللی راه آهن آثار مثبت سیستم AC یک فاز با فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژ kV ۲۵ ارائه و این سیستم در بسیاری از کشورها به عنوان طرح خطوط آینده پذیرفته شد.

همانطورکه ملاحظه می شود در ابتدا به علت سهولت کنترل دور موتورهای جریان مستقیم، شبکه های جریان مستقیم توسعه بیشتری داشته اند. با توجه به منافع استفاده از شبکه های جریان متناوب و نیز امکان

استفاده از موتورهای انیورسال بتدریج سیستمهای جریان متناوب با فرکانس کم معرفی شدند وبالاخره به علت پیشرفت تکنولوژی ساخت نیمه هادی هادیها و ایجاد امکان ساخت سیستمهای یکسوساز با حجم قابل قبول در داخل لکوموتیو، زمینه استفاده از ولتاژ با فرکانس صنعتی مهیا گشت.

تا سال ۱۹۸۳ طول خطوط برقی آلمان ۱۱۵٤۵ کیلومتر (٪۳۷ کل خطوط) و ٪۸۰ حمل ونقل آلمان توسط خطوط برقی صورت می‌گیرد.

در فرانسه طول خطوط برقی ۱۰٦٦۳ کیلومتر که ۲۸/۸ درصد از کل خطوط است و ۷۷/۱ درصد حمل ونقل توسط خطوط برقی انجام می شود. خطوط اصلی برقی شده اند و انشعابات و خطوط فرعی با لکوموتیوهای دیزل الکتریک بهره‌برداری می شوند.

در ژاپن از سال ۱۸۹۵ کار روی حمل ونقل برقی را آغاز کرد تا سال ۱۹٤۵، ۱۱۰۲ کیلومتر و تا سال ۱۹۹۰، ۱۳۷٦۸ کیلومتر خط برقی احداث کرد..٪۷٦/۱ کل بار و ٪۲۹/۷ کل مسافر توسط شبکه برقی جابجا می‌شود.

شوروی در سال ۱۹۲٦ اولین راه آهن برقی خود را احداث کرد. در سال ۱۹۹۰، ٤٤۸۰۰ کیلومتر راه آهن برقی داشت که ۲۵۹٤۵ کیلومتر آن با شبکه DC و بقیه با شبکه AC تغذیه می شود. ۳۱/٤ درصد شبکه برقی است.

آمریکا در سال ۱۸۸٦ کار روی شبکه برقی را آغاز کرد و در سال ۱۹٤۵، ٤۵۰۰ کیلومتر خط برقی داشت.

در انگلیس درصد خطوط برقی در حال حاضر پایین است ولی طبق برنامه تا سال دوهزار ۵۰۰۰ کیلومتر خط برقی داشت و این رقم درحال افزایش است.

در چین کار ساخت اولین خط برقی در چین در سال ۱۹۵۸ در یک منطقه کوهستانی آغاز شد این خط در سال ۱۹٦۱ مورد بهره برداری قرار گرفت در پایان سال ۱۹۹۰ از ۸۱۰۰ کیلومتر خط برقی در چین بهره برداری می شد.

جدول ۲-۱- بعضی از خطوط برقی موجود (شامل متروها، قطارهای شهری و بین شهری) را نشان می دهد.

Volts	Hz	Conductors	
160	DC	third rail	Volk's Electric Railway - Brighton, England
180	DC	→	Siemens streetcar Berlin-Lichterfelde 1881-1891, current fed through the running rails!
500	DC		many tram systems
525	DC	overhead	Bergbahn Lauterbrunnen-Mürren
550	DC	overhead	Snaefell Mountain Railway, Isle of Man
600	DC	overhead	very common for older tram systems worldwide; still

			used in Boston, Melbourne, and Toronto
		third rail	was used for trams in central London - third rail accessed via a slot between the tracks Metro-North Railroad (Hudson & Harlem lines, southern part of New Haven line), the USA Southern Railway (some areas up to 1939) Subways of Glasgow and Toronto MBTA (Boston) Red Line and Orange Line subways, as well as part of the Blue Line subway.
			Most older US subways, PATH
630	DC	four-rail	London Underground
650	DC	third-rail	Southern Railway (standard)
725	50 Hz 3~	overhead two wire	Gornergratbahn
750	DC	overhead	most modern tram systems Albtalbahn, railway of the Upper Rhine, Rhein-Haardtbahn local lines of Stern & Hafferl in Austria Minneapolis/Saint Paul, Minnesota Metropolitan Transit light rail, Sydney Light Rail
		third rail	Undergrounds and metros in Russia, Prague, Berlin, Munich, Nuremberg, Hamburg, Vienna, Lisbon, Budapest, Bucharest, Copenhagen, Washington, DC and Montreal Long Island Rail Road (USA) Southern Railway (large areas) SMRT (Singapore)
		bottom contact third rail	Kolkata(India) - Third rail top collection
800	DC	third rail	Berlin S-Bahn
825	AC	third rail	Moscow Metro
850	DC		Local railway Vienna
		third rail	Southern Railway (original route of Eurostar, pre-CTRL, upgraded from 750V)
860	DC		Switzerland (Mobilization)
900	DC		Switzerland (GFM)
1000	DC		Switzerland (SZU) RhB St Moritz - Tirano
		third rail	Bay Area Rapid Transit, USA
1125	50 Hz 3~	overhead two wire	Jungfraubahn
1200	DC	overhead	to 1985 KBE, Cuba (FdeC), Spain (Sóller Railway) 900 mm gauge mining railways in the Lusatian brown coal district

		third rail	Hamburg S-Bahn Manchester to Bury line - obsolete
1350	DC		FART (Domodossola-Locarno)
1500	DC		The Netherlands, France, Slovenia, Czech Republic, Copenhagen S-Trains, India (Mumbai), DART (Dublin) Ireland, Japan, Switzerland (BOB, SPB, WAB), Spain (Catalan Railways, RENFE, Euskotren, FEVE), New Zealand (Wellington, and formerly Christchurch-Lyttelton, Arthur's Pass-Otira), Portugal (Cascais Line) Chicago: Metra Electric District Service (former Illinois Central Suburban Service) Manchester - Sheffield - Wath (via the Woodhead Tunnel) from 1954 to 1981 Tyne and Wear Metro Hong Kong: MTR
		overhead	Metropolitan lines in Australia (CityRail in Sydney, New South Wales and the Melbourne Suburban Network in Victoria) SBS Transit (North East Line) in Singapore
2400	DC		Work line of the Lausitzer brown coal AG
3000	DC		rural lines in Poland, Belgium, India (Kolkata) converted to 25 KV AC, Italy (except Sardinia) (changing to 25 kV AC), former Soviet Union, Brazil, Chile, North Korea, Slovakia, Spain (changing to 25 kV AC), South Africa, Czech Republic, Croatia (Rijeka-Moravice and Rijeka-Šapjane lines), Slovenia
3500	DC	overhead wire	Manchester - Bury (- Holcombe Brook) England. In 1918 converted to third rail (see above)
3600	50/3 Hz 3~	overhead 2 wire	from 1912 to 1976 in upper Italy
6000	DC		attempts in Russia
6250	50 Hz		Factory railway of Rheinbraun AG
6300	25 Hz		Mariazeller Bahn
11,000	50/3 Hz		Rhaetian Railway, Furka-Oberalp-Bahn
11,000	25 Hz		Amtrak Northeast (NEC) and Keystone corridors (Washington, DC and Harrisburg, PA to New York City), SEPTA, New Jersey Transit, USA
12,500	60 Hz		Amtrak NEC and Metro-North Railroad (Queens, New York to New Haven), USA
15,000	variable frequency up to 50 Hz 3~	overhead 3 wire	trial runs between Zossen and Marienfelde, 1901 to 1904

15,000	50/3 Hz		since 1912 standard system in Austria, Germany, Norway, Sweden and Switzerland
20,000	50 Hz		Höllentalbahn from 1933 to 1960 Japan(East area)
20,000	60 Hz		Japan(West area)
25,000	50 Hz		Great Britain, Slovakia, former Soviet Union, Germany, Hungary, Romania, Bulgaria, France, Greece, Turkey, Sardinia, Denmark, Australia (Queensland and Western Australia), China, Czech Republic, India, Iran, Italy (new installations), Japan (Tohoku-Joetsu-Nagano Shinkansen), Malaysia (KTM Komuter Service), South Korea, Portugal, Serbia and Montenegro, Slovakia, Croatia, Spain (new installations), Finland, South Africa, New Zealand, proposed Botswana to Namibia line, Rübelandbahn Harz (Germany)
25,000	60 Hz		Amtrak NEC (New Haven to Boston), New Jersey Transit (newer lines), USA, Japan (Tokaido-Sanyo Shinkansen), South Korea, Montreal (Deux-Montagnes line only)
50,000	50 Hz		Pit removal line South Africa, coal removal line at the Lake Powell, USA

جدول ۲-۱- بعضی از خطوط برقی موجود (شامل متروها، قطارهای شهری و بین شهری)

فصل ۳- مشخصات و اجزا شبکه تغذیه راه آهن برقی

۳-۱- مزایای راه آهن برقی

برای راه آهن برقی مزایا و معایب مختلفی برشمرده می شود که براساس مقایسه نتایج فنی و اقتصادی ناشی از این مزایا و معایب در یک خط امکان برقی کردن خط بررسی می شود. از جمله این مزایا و معایب عبارت است از:

- لکوموتیوهای برقی سریعترند- البته سرعت قطار در یک شبکه تابع عوامل دیگری نیز می باشد مانند

الف- توانائی لکوموتیو

ب- توانائی واگنها

ج- سیستم سیگنالینگ

د- وضعیت خط

و- توانائی لکوموتیوران

اما با توجه به اینکه هریک از عوامل بکار رفته در تولید، انتقال و کنترل نیروی محرکه قطار خود داری مشخصه های کاری هستند که در نقاط کاری قطار کلیه این عوامل باید در محدوده مشخصه کاری قابل قبول خود باشند، می توان انتظار داشت که لکوموتیوهای برقی به علت نداشتن دو عامل مکانیکی (موتور احتراقی و ژنراتور) که تاثیر محدود کننده بسیاری در نقاط کاری مختلف (خصوصا از نظر آب و هوا و ارتفاع) دارند بتوانند محدوده کاری بزرگتری را از نظر سرعت و قدرت پوشش دهند.

- راه آهن برقی نسبت به دیزل الکتریک راندمان بالاتری دارد- در لکوموتیو دیزل الکتریک، انرژی الکتریکی توسط یک واحد دیزل ژنراتور کوچک تولید می شود در حالیکه در لکوموتیو برقی انرژی الکتریکی توسط مجموعه نیروگاههای موجود در شبکه تولید می شود که با استفاده از محاسبات پخش بار اقتصادی می توان هزینه تولید آن را روی حداقل مقدار نگه داشت، از طرف دیگر به علت حضور دائمی بار راه آهن برقی، این بار بار پایه شبکه تلقی می گردد که باحداقل هزینه تولید می شود (و نباید آنرا با سایر انواع بار شبکه که فقط ساعاتی از روز در شبکه حضور دارند مقایسه شوند).
- راه آهن برقی نسبت به دیزل الکتریک آلودگی کمتری ایجاد می نماید- در کشش برقی الکتریسیته مورد نیاز در نیروگاهها تولید می شود، بنابراین باید آلودگی تولید در یک نیروگاه با آلودگی تولید در دیزل ژنراتور

یک لکوموتیو مقایسه شود. در نیروگاهها انرژی مکانیکی می تواند توسط سوخت اتمی، انرژی ذخیره شده در آب پشت سدها، یا سوختهای با آلودگی کمتر (مانند گاز طبیعی) یا سوختهای فسیلی پستتر (مانند مازوت) تامین می شود. بنابراین در قسمت عمده نیروگاهها انرژی الکتریکی از سوختهای با آلودگی بسیار کم (نسبت به گازوئیل) تامین می شود و تنها سوخت با آلودگی زیاد مازوت است که عمدتا نیروگاههای با سوخت مازوت در فواصل دور از شهرها و مراکز تجمع انسانی قرار دارند.

o انرژی حاصل از احتراق گازوئیل به علت قیمت بالای گازوئیل بسیار گرانقیمت است، در حالیکه در نیروگاهها از سوختهای پست و ارزان استفاده می شود.

o لکوموتیوهای برقی به علت قابلیت حمل قطارهای سنگینتر و بار بیشتری را دارند- البته توانائی حمل بار یک لکوموتیو به توانائی شروع به حرکت لکوموتیو زیر بار بستگی دارد که خود تابع

الف-بار محوری

ب- ضریب چسبندگی

است. باید در نظر داشت که در طول مسیر قطار شرایط کار ثابت و یکنواخت نیست و قدرت کشش قطار بر حسب شرایط کاری که در طول مسیر با آن مواجه می شود (از نظر شیب و فراز و تونلها و سایر عواملی که باعث افت قدرت کشش لکوموتیو می شود) انتخاب می گردد، بنابراین به علت محدودیتهای کمتر در مشخصه های کاری و عوامل کمتر (تقریبا صفر) که منجر به افت قدرت می شوند و نیز تحمل اضافه بار بیشتر می توان انتظار داشت که در شرایط کاری متنوع علیرغم قدرت کمتر لکوموتیو برقی بتواند قطارهایی سنگینتری را بکشد.

o لکو موتیوهای برقی به علت توان بیشتر نسبت به دیزل الکتریک کارکرد بیشتری دارند

کارکرد یک لکوموتیو تابع توان خروجی و تکنولوژی آن دارد و در خطوط مسافری بصورت تن کیلو متر ناخالص در هر روز برای هر لکوموتیو و در خطوط باری بصورت تن کیلو متر خالص در هر روز برای هر لکوموتیو بیان می شود. به علت نیاز کمتر لکوموتیوهای برقی و نیز کشوئی بودن بسیاری از قطعات که منجر به کاهش زمان توقف قطار هنگام تعمیرات می شود، می توان انتظار داشت که این لکوموتیوها کار کرد بیشتری در شبکه داشته باشند.

o به علت توان بیشتر لکوموتیوهای برقی تعداد لکوموتیو مورد نیاز کاهش می یابد- همانطور که در قسمت قبل آمد این لکوموتیوها به علت عوامل محدود کننده کمتر می توانند در محدوده های سرعتی یا قدرت بیشتر حرکت کنند بنابراین در مواردیکه در مسیری فقط بخاطر وجود یک تونل یا فراز باید لکوموتیو بیشتری بکار رود لکوموتیوهای برقی با پذیرش اضافه بار در محدوده زمانی مشخص می توانند بهره بردار را از استفاده از لکوموتیو اضافی بی نیاز سازند، از طرف دیگر خصوصا با استفاده از تکنولوژی تراکشن موتورهای AC امکان استفاده لکوموتیو در قطارهای باری و مسافری به طور همزمان ممکن گردیده است.

در نتیجه با کاهش تعدادلکوموتیوهای رزرو (برای گلوگاههای مشخص) و نیز امکـان اسـتفاده از لکوموتیـو رزرو مشترک برای قطارهای باری و مسافری، می توان انتظار داشت که مجموع لکوموتیوهای مورد نیـاز در شبکه کاهش یابد.

o عدم محدودیت توان – از جمله مسائل محدود کننده توان در لکوموتیوهای دیزل الکتریـک، محـدودیت در ساخت دیزل و ژنراتورهای با توان بالا و مناسب جهت نصب در لکوموتیو می باشـد . آخـرین پیشـرفتها در این زمینه در ساخت لکوموتیوهایی مانند SD90 متعلق به شرکت GM می باشد که قادر است توانهای در حدود HP ٦٠٠٠ را تولید نماید. لازم به ذکر است که تولید لکوموتیوهای DL با توانهـای بـالای HP ٣٠٠٠ عملا" در امریکا و کانادا انجام می شود و کمتر کشور اروپایی می توان یافـت کـه در ایـن محـدوده تـوانی، اقدام به ساخت دیزل – الکتریک کرده باشد. این در حالیست که از سالها پیش ساخت لکوموتیوهای برقی با توان HP ٥٠٠٠ و حتی بالاتر ممکن بوده و در این زمینه بسیاری از کشورها سابقه طولانی دارند و توانهـای در حد HP ٤٠٠٠ و بالاتر برای لکوموتیوهای برقی بسیار معمول می باشد. این امر باعث شده است تا بتوان از کشش بالاتری در لکوموتیوهای برقی برخوردار بود.

o نسبت توان به وزن بالا- وزن لکوموتیوهای برقی با توان حدود HP ٥٠٠٠ بسیار کمتر از وزن لکوموتیوهای دیزل – الکتریک با توان HP ٣٠٠٠ می باشد. لکوموتیوهای برقی معمولا" چهار محوره بوده و در اغلب موارد وزن آنها بین ٨٠ تا ١٠٠ تن می باشد. این در حالیست که در لکوموتیوهای دیزل – الکتریک با توان بالا وزن لکوموتیو بین ١٢٠ تا ١٨٠ تن می باشد. واضح است که بالا بودن وزن لکوموتیو باعث افزایش بسیاری از لطمات وارد شده به خط و لکوموتیو می گردد.

نسبت توان به وزن در لکوموتیوهای برقی در حدود (KW/ton ٥٠ تا ٥٥) می باشد و در لکوموتیوهای دیزل – الکتریک در حدود (KW/ton ٢٠ تا ٢٥) می باشد، یعنی نسبت توان به وزن در لکوموتیوهای برقی بیش از دو برابر لکوموتیوهای دیزل – الکتریک می باشد

o با برقی کردن کارکرد یک سکشن افزایش می یابد- بـا افـزایش سـرعت قطارهـای مسـافری و قـدرت قطارهای بار ناشی از برقی کردن تعداد و طول قطارهـای روی سکشـن و در نتیجـه کـارکرد یـک سکشـن افزایش می یابد اما باید در نظر داشت که در خطوط برقی ارتفاع شـبکه بالاسـری و محـدودیت جریـان آن توان حمل بار را کاهش می دهد.

o راه آهن برقی نسبت به دیزل الکتریک ضریب اطمینان بیشتری دارد- البته باید ضریب اطمینـان براسـاس حوادثی که برای لکوموتیو و شبکه بالاسری پیش می آید مقایسه شود. زیرا در شرایط بد آب و هوائی خود شبکه بالا سری می تواند باعث حادثه شود اما در مقابل مشکلات ایجاد شده در دیزل ژنراتور خود می تواند منجر به کاهش ضریب االطینان لکوموتیوهای دیزل الکتریک شود.

o راه آهن برقی نسبت به دیزل الکتریک هزینه بهره برداری کمتری دارد- به علت راندمان و کارائی بیشتر لکوموتیوهای برقی و نیاز کمتر آنها به تعمیرات هزینه بهره برداری راه آهن برقی کمتر از دیزل الکتریک خواهد بود.

o راه آهن برقی نسبت به دیزل الکتریک از نظر اقتصاد ملی به صرفه تر است- در ایران وکشورهائی که حمل و نقل اعم از مسافر و بار توسط دولت یا با حمایت دولت اداره می شود، استفاده از راه آهن باعث کاهش هزینه حمل و نقل از دیدگاه اقتصاد ملی خواهد شد و در بسیاری از خطوط استفاده از راه آهن برقی باعث کاهش بیشتر هزینه حمل و نقل از دیدگاه اقتصاد ملی خواهد شد.

o کشش برقی می تواند باعث تقویت پول ملی شود- در مقایسه راه آهن با نیروی کشش برقی و دیزل اگر یکی از آنها نیاز به منابع ارزی کمتری داشته باشد و تجهیزات مورد نیاز از منابع داخلی تامین گردد استفاده از آن می تواند منجر به تقویت پول ملی شود.

در ایران و کشورهائی که لکوموتیو از هر نوع باید از خارج وارد شود، هر سیستمی که نیاز به مجموع نیروی کشش کمتری داشته باشد و از نیروی کشش بهره برداری بهتری انجام دهد از نظر اقتصاد ملی به صرفه تر بوده و به علت ارزبری کمتر منجر به تقویت پول ملی خواهد شد. اکنون در کشور صنایع مختلفی وجود دارند که تجهیزات مشابه تجهیزات به کار رفته در خطوط برقی (مانند ترانسفورماتور، مقره، تیر،.....) را تولید می نمایند. در صورت ارائه مشخصات فنی مورد نیاز می توان در جهت کاهش هزینه ها از توانائی این صنایع در تولید تجهیزات استفاده نمود.

o کشش برقی با قابلیت ترمز ژنراتوری امکان تغذیه شبکه ملی برق را داراست- در لکوموتیوهای دیزل نیز می توان از ترمز ژنراتوری برای مصارف داخلی استفاده نمود، اما باید بخاطر داشت که انرژی الکتریکی حاصل از ترمز ژنراتوری از نظر سطح ولتاژ و فرکانس از کیفیت مطلوبی برخوردار نیست و حتی در راه آهن های برقی سعی می شود این انرژی در خود شبکه راه آهن برقی و توسط سایر قطارها مصرف شود، از طرف دیگر بار مصرفی داخل قطار در مقابل انرژی حاصل از ترمز چندان بزرگ نیست و این انرژی می تواند نوسانات ولتاژ در بار ایجاد نماید، در حالیکه در راه آهن برقی بار موجود در شبکه می تواند بسیار بزرگتر از انرژی حاصل از ترمز باشد بنابراین نمی توان انتظار داشت کیفیت ترمز ژنراتوری در لکوموتیو دیزل مشابه کیفیت این نوع ترمز در لکوموتیو برقی باشد.

o قطارهای سریع السیر حومه شهری با نیروی کشش برقی کارائی بیشتری دارند- با توجه به قابلیتهای ترمز و شتابگیری لکوموتیوهای دیزل جدید و امکان استفاده از کشش دیزل در ترن ستها اکنون سرویسهای حومه شهری با کشش دیزل نیز وجود دارند اما به هرحال از کارآئی کمتری نسبت به نوع کشش برقی برخوردارند.

o ترن ستها فقط به وسیله نیروی کشش برقی قابل بهره برداری هستند- البته امروزه ترن ستهای دیزل الکتریک بسیاری را می توان دید اما به هرحال به علت مشخصات خاص دیزلهای مورد استفاده در ترن ستها، نوع الکتریکی ترن ستها از کارآئی بیشتری برخوردارند

o کشش برقی نگهداری کمتری نسبت به کشش دیزل نیاز دارد- در لکوموتیوهای دیزل الکتریک عمده هزینه های تعمیر و نگهداری مربوط به سیستم های مکانیکی و در حال حرکت می باشد. ازجمله این سیستمها می توان به دیزل، توربوشارژر و ژنراتورها اشاره کرد. خرابی این سیستمها علاوه بر تحمیل هزینه های بسیار زیاد به علت بالا بودن تکنولوژی ساخت بالای آنها، باعث کاهش آماده بکاری لکوموتیوها نیز می شود زیرا تهیه قطعات مناسب براحتی امکان پذیر نمی باشد.

لکوموتیو برقی به علت داشتن اجزا مکانیکی کمتر، دارای استهلاک کمتراست. این امر نیاز لکوموتیو را به تعمیرات دوره ای کمتر ساخته و در نتیجه هزینه نگهداری آن کمتر است (حدود یک سوم هزینه تعمیر و نگهداری لکوموتیوهای دیزل – الکتریک). علاوه براین کاهش زمان و تعداد تعمیرات دوره ای منجر به کاهش زمانهای توقف قطار گشته که میزان بهره برداری از سرمایه را افزایش می دهد.

به طور خلاصه برقی کردن راه‌آهن زمینه‌ساز شرایط زیر است:

۱-جایگزینی سوخت گازوئیل لکوموتیوهای دیزلی توسط سوخت ارزانتر (مانند مازوت) یا تمیزتر (مانند گاز طبیعی) که معمولا در نیروگاه‌ها استفاده می‌شود.

۲-افزایش بهره‌وری در مسیرهای کوهستانی، شیب و فرازهای تند و تونلهای طویل و شرایط مختلف جوی.

۳-کاهش هزینه بهره‌برداری و در نتیجه کاهش بهای تمام شده حمل بار و مسافر.

٤-افزایش ضریب استفاده از سرمایه‌گذاری انجام شده (خصوصاً لکوموتیوها) به علت نیاز به تعمیرات دوره‌ای کمتر.

٥-کاهش آلودگیهای زیست محیطی در سطح کلان (به علت جایگزینی سوخت).

٦-عدم نیاز به گرم نگه‌داشتن موتورها در حالت توقف.

۷-افزایش سرعت متوسط حرکت و افزایش ظرفیت خطوط راه‌آهن.

۸-بهره اقتصادی بیشتر.

۹- ...

با توجه به آنچه گفته شد راه آهن برقی دارای هزینه بهره برداری کمتر و قابلیت کار در کلیه شرایط جوی سخت خصوصا محیطهای کوهستانی با شیب و فرازهای زیاد و تونلهای طویل است. در مقابل به علت نیاز به تاسیسات اضافی از قبیل شبکه بالاسری و پستهای کشش، جداساز و ....، این سیستم نیاز به سرمایه

گذاری اولیه بیشتری دارد. قسمتی از این سرمایه گذاری با کاهش تعداد نیروی کشش مورد نیاز جبـران مـی شود.

بنابراین در انتخاب نیروی کشش باید با در نظرگرفتن ترافیک مسیر، باید مجموع هزینه های اولیـه و هزینـه های بهره برداری محاسبه و با هم مقایسه گردند، علاوه بر این مشخصات مسیر و شرایط جوی حاکم بـر آن و تاثیر این شرایط بر عملکرد سیستم نیز باید مد نظر قرار گیرد.

۳-۲- ساختار قطارهای برقی

انواع سیستمهای برقی عبارتند از: لوکوموتیو[1] ، ریل کار[2]، تراموا[3] و اتوبوس برقی[4]

۱- سیستم لوکوموتیو در راه آهن برقی شامل لکوموتیو برقی و واگنهاست که در آن یک لوکوموتیو تعدادی واگن را که فاقد قوای محرکه هستند را به دنبال خود می کشد. در این سیستم کل نیروی محرکه در لوکوموتیو متمرکز شده است.

۲- هر ریل کار دارای یک سیستم کنترل، تراکشن موتور و کابین راننده است و از ترکیب چند ریل کار یک قطار بوجود می آید که معمولاً در مترو کاربرد دارد.

۳- تراموا یک واگن مستقل است که می تواند با نیروی محرکه خود روی ریل حرکت کند

٤- اتوبوس برقی- اتوبوس برقی مشابه اتوبوسهای معمولی عمل می کند اما نیروی کشش آن به جای موتور دیزل از طریق موتور الکتریکی تامین می شود. معمولا برق مورد نیاز اتوبوس برقی توسط شبکه بالا سری تامین می شود.

سوال – چرا ترکیب لکوموتیو و واگن در مترو بکار نمی‌رود.

سوال – چرا railcar در حمل ونقل بین شهری بکار نمی رود.

دو روش برای قرار دادن نیرو ی کشش در قطار وجود دارد

۱- نیروی کشش متمرکز- در این حالت فقط یک ریل کار نیروی کشش را تامین می کند و واگنهای بعدی دارای نیروی کشش نیستند (مشابه سیستم لوکوموتیو و واگن)

Rail car + several carriage

۲-نیروی کشش غیر متمرکز- در این حالت نیروی کشش بین ریل کارهای مختلف در قطار توزیع می شود در اینصورت قطار از ریل کارهای متعددی تشکیل می شود که هریک نیروی کشش مورد نیاز خود را تامین می کند.

---

[1] Locomotive
[2] Railcar
[3] Tramway
[4] Trollybus

در این سیستم دو نوع آرایش ممکن است بکار رود

الف- آرایش ثابت- که در آن دو ریل کار در ابتدا و انتهای قطار دارای کابین راننده است و کابینهای وسط فاقد کابین راننده هستند

2 rail car with drivers cabire +4 railcar without drivers cabine

ب- آرایش قابل تغییر که همه ریل کارها دارای کابین راننده هستند. این سیستم از نظر آرایش قطار ساده تر و قابل انعطافتر است اما ریل کارها گرانتر خواهند بود.

بنابراین سوال بالا را می توان به صورت زیر اصلاح نمود

چرا در متروها از نیروی کشش متمرکز استفاده نمی شود؟

بنابراین علت توزیع نیروی کشش در مترو عبارت است از:

۱- در مترو به به علت فاصله کم ایستگاهها به صورت متوالی ترمز گرفته می شود

۲- به علت محدودیت ابعاد تونلها ارتفاع آلات ناقله با محدودیت مواجه است بنابراین ابعاد تراکشن موتور نیز محدود است

جدول ۳-۱ مزایا و معایب دوسیستم کشش متمرکز و غیر متمرکز را نشان می دهد

۳-۳- ساختارکلی سیستم قدرت الکتریکی

یک شبکه الکتریکی دارای چهار قسمت عمده شامل نیروگاه[۱]، شبکه انتقال[۲]، شبکه توزیع[۳] و بار[۴] می باشد. انرژی الکتریکی تولید شده در نیروگاهها توسط شبکه انتقال به نزدیکی محل مصرف منتقل می شود. به علت مزایای انتقال انرژی با ولتاژهای بالا معمولا ولتاژ انرژی تولید شده، توسط ترانسفورماتورهائی که در پست نیروگاه بلافاصله پس از ژنراتور نصب شده است تا حد امکان افزایش می یابد، مقدار این ولتاژ معمولاً تابع مقدار انرژی و مسافتی است که این مقدار انرژی باید منتقل شود. در نزدیکی محل مصرف انرژی الکتریکی تحویل شبکه توزیع شده و این ولتاژ توسط ترانسفورماتورهای توزیع طی یک یا چند مرحله کاهش می یابد. در مراحل مختلف ممکن است بار های متفاوت تغذیه گردند. شکل ۳-۱ یک شبکه الکتریکی ساده را نشان می دهد.

معمولاً یک شبکه ساده مطابق شکل ۳-۱ جوابگوی بسیاری از نیازها نبوده و استفاده از آن مشکلات بسیاری را برای مصرف کننده به همراه دارد. از جمله تداوم جریان انرژی به سمت بار فقط وابسته به یک ژنراتور،

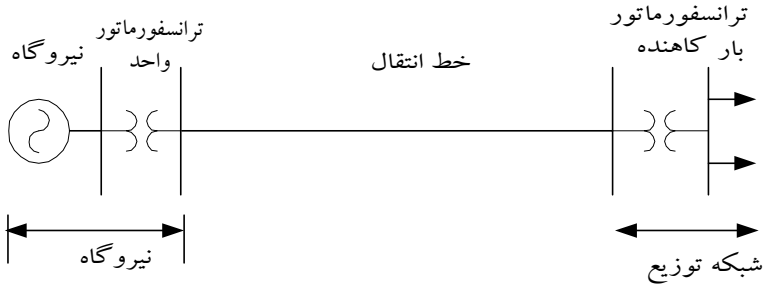
---

[1] Power plant
[2] Transmission System
[3] Distribution system
[4] Load

یک ترانسفورماتور در محل نیروگاه، یک خط انتقال و یک سیسم توزیع است و در صورت وقوع کوچکترین مشکل برای هر یک از این اعضا جریان انرژی از نیروگاه به سمت بار قطع خواهد شد.

جدول ۳-۱ مزایا و معایب دوسیستم کشش متمرکز و غیر متمرکز

مشخصه	نیروی کشش غیر متمرکز	نیروی کشش متمرکز
قیمت	زیاد (نیاز به قطعات متعدد با قدرت کم دارد)	کم (فقط نیاز به تعداد کمی قطعات با قدرت زیاد دارد)
تاثیر روی ریل	کم (به علت بار کم محور)	زیاد (به علت بار بزرگ محور)
تاثیر روی زمین	کم (به علت بار کم محور)	زیاد (به علت بار بزرگ محور)
تاثیر روی نیروی کشش (هنگام بروز خطا)	کم (هنگام بروز خطا روی یک تراکشن موتور فقط قسمت کمی از نیروی کشش از دست می رود)	زیاد
ترمز	مناسب برای سرعت زیاد و ترمزهای متعدد	نا مناسب برای ترمزهای متعدد
تراکشن موتور	ترکشن موتور کوچک	ترکشن موتور بزرگ
آثار داخل کابین	نویز و ارتعاشات زیاد در داخل کابین مسافر	نویز و ارتعاشات کم در داخل کابین مسافر



شکل۳-۱- مدار ساده شده یک شبکه الکتریکی

بنابراین یک شبکه الکتریکی معمولاً بسیار پیچیده تر از مداری است که در شکل ۱-۱ آمده است. یک شبکه الکتریکی واقعی معمولاً تشکیل شده است از چندین نیروگاه که بطور همزمان یک شبکه انتقال به هم پیوسته با ولتاژ بالا را تغذیه می نمایند. شبکه انتقال خود از چندین محل یک یا چند شبکه توزیع را که متصل به بارهای شبکه هستند تغذیه می نماید.

اتصال قسمتهای مختلف یک شبکه انتقال با یکدیگر و با شبکه توزیع و نیز تبدیل سطح ولتاژ در شبکه انتقال و شبکه توزیع در محلی به نام پست الکتریکی صورت می گیرد.
در این جزوه هدف آموزش اجزا شبکه تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی نیست و صرفا به بحثهای مرتبط با راه آهنهای برقی می پردازد.

راه آهنهای برقی خود نوعی بار الکتریکی هستند که به علت استفاده از ولتاژ بالا، انرژی الکتریکی مورد نیاز آنها مستقیماً توسط شبکه انتقال یا شبکه فوق توزیع (که در مواردی رابط بین شبکه های انتقال و توزیع بوده و دارای سطح ولتاژی بین ولتاژ این دو شبکه است) تغذیه می شوند. انرژی الکتریکی در محلی که پست کشش[1] نامیده می شود به سیستم راه آهن برقی تحویل می گردد. به علت اهمیت بالای بار پستهای کشش، این پستها از نظر اهمیت در دسته بارهای درجه اول شبکه های الکتریکی دسته بندی می شوند. در جهت حفظ تداوم انرژی در پستهای کشش و افزایش ضریب اطمینان آنها، این پستها توسط دو خط انتقال مستقل یا یک شبکه به هم پیوسته تغذیه می شود. استقلال دو خط تغذیه باعث افزایش ضریب اطمینان سیستم خواهد شد و در مواردیکه نتوان دو خط انتقال را از دو محل متفاوت تغذیه نمود، این دو خط حداقل باید توسط دو باسبار[2] مختلف از پست اصلی تغذیه شوند. در حالت عادی کار شبکه یکی از خطوط به عنوان خط اصلی در مدار بوده و خط دیگر به صورت آماده کار[3] خواهد بود. در صورت بروز خطا در مدار اصلی یا هر ضرورت دیگر این خط از مدار خارج شده و خط دیگر در مدار قرار می گیرد و به این ترتیب بار همیشه برقدار خواهد بود. از آنجا که در سیستم تغذیه راه آهنهای برقی تداوم انرژی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، لازم است کلیه اعمال کلیدزنی و حفاظت با دقت تمام و هماهنگ با قسمتهای دیگر انجام شود.

۳-٤- انواع ولتاژ تغذیه

یک شبکه راه‌آهن برقی با ولتاژ نامی و نوع جریان (مستقیم یا متناوب) شناخته می‌شود. این مشخصات بر حسب نوع سیستم و میزان ترافیک پیش‌بینی شده در سیستم انتخاب می‌شود. فاصله بین پستهای کشش و سطح مقطع هادی تماس نیز بر اساس این مشخصات تعیین می‌گردد.

مهمترین مشخصه‌های الکتریکی شبکه قدرت، ولتاژ و جریان هستند. سطح ولتاژ بیشتر منجر به جریان کمتر در شبکه می‌شود که این خود استفاده از شبکه بالاسری سبکتر و فاصله بیشتر پستهای کشش را ممکن می‌سازد، از طرف دیگر افزایش سطح ولتاژ استفاده از عایق‌بندی قوی‌تر را ضروری می‌سازد.[1]

---

[1] Traction substation
[2] Busbar
[3] Stand by

از دیدگاه فنی بهترین انتخاب استفاده از ولتاژ فشارقوی در شبکه است، اما به علت محدودیت دامنه ولتاژ قابل استفاده در داخل لکوموتیو، افزایش سطح ولتاژ در ولتاژ مستقیم با محدودیتهائی مواجه است در مقابل افزایش سطح ولتاژ در ولتاژ متناوب براحتی قابل استفاده است.

از دیدگاه اقتصادی افزایش سطح ولتاژ در شبکه تا جائی معقول است که مجموع هزینه ها (شامل مجموع صرفه جوئی در هزینه شبکه بالاسری و پستهای کشش و افزایش هزینه های عایقبندی سیستم) حداقل گردد. (عمومی ترین سیستم متناوب که در جهان مورد استفاده قرار گرفته kV ۲۵ است و ولتاژ مستقیم در حال حاضر به kV ۳ محدود شده است).

راه آهنهای برقی ار نظر نوع ولتاژ (DC یا AC) به چهار دستهDC، AC یک فاز با فرکانس کم، AC یک فاز با فرکانس صنعتی و AC سه فاز تقسیم می شوند. هریک از این انواع دارای سطوح مختلف ولتاژ هستند، اما آنچه که امروزه در راه آهنهای برقی بین شهری متداول گشته، استفاده از ولتاژ kV ۲۵ AC با فرکانس صنعتی (در ایران ۵۰ هرتز) است، در اینصورت وظیفه اصلی پست کشش کاهش ولتاژ شبکه انتقال تا مقدار kV ۲۵ خواهد بود.

ولتاژ DC بیشتر در راه‌آهنهای شهری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ابعاد جهانی، بیشتر از نیمی از همه سیستمهای کشش الکتریکی هنوز از جریان مستقیم استفاده می‌کنند. ولتاژ پایین مورد استفاده در سیستمهای کشش جریان مستقیم یکی از مشخصه‌های نامناسب این سیستم است که باعث افزایش جریان در شبکه تغذیه می‌گردد. هرگاه از ولتاژ DC در تغذیه قطار استفاده شود در محل پست کشش عمل یکسوسازی نیز صورت می‌گیرد.

در اوایل قرن بیستم، در جهت استفاده همزمان از مزایای سیستم متناوب و کشش موتور سری موتورهای اونیورسال به عنوان تراکشن موتور با شبکه تغذیه متناوب مورد استفاده قرار گرفت. اما در جهت کاهش آثار کموتاسیون در این موتور در قدرتهای بالا، فرکانس شبکه به یک سوم کاهش داده شد.

ازمشکلات این سیستم:

- خوردگی زیاد کموتاتور موتور سری
- تداخل امواج القایی در کارکرد کابلهای موازی سیستم کشش الکتریکی.
- مقادیر بالای غیر قابل قبول برای ولتاژ نامتقارن در تغذیه شبکه سه فاز Hz۵۰ که توسط تغذیه تکفاز نیروی کشش ایجاد می‌شود.

امروزه سیستم AC یک فاز با فرکانس کم به علت ضرورت نصب مبدل فرکانس یا ژنراتور با فرکانس کم در محل پست ترکشن کمتر مورد استفاده قرار می گیرد.

سیستم AC سه فاز نیز به علت ضرورت استفاده از دو هادی تماس[1] و دو پانتوگراف[1] و مشکلات

[1] Contact Wire

اقتصادی و فنی ناشی از آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

اگرچه نوع و سطح ولتاژ باید براساس موقعیت و مشخصات خط مسیر و امکانات موجود انتخاب شود ولی امروزه اکثر کشورهادر جهت کاهش تنوع، نوع و سطح ولتاژهای خاصی را بکار می برند به عنوان مثال موسسه مهندسین راه آهن آمریکا[2] مقادیر ولتاژ مطابق جدول ۳-۲ را برای خطوط جدید پیشنهاد می نماید.

ولتاژ راه‌آهن‌های برقی اروپایی بر طبق استاندارد EN50163 مطابق جدول ۳-۳ است. موسسه IEC[3] طی استاندارد IEC850 مقادیر سطح ولتاژ را مطابق جدول ۳-٤ پیشنهاد می نماید.

در عین حال در حال حاضر طیف وسیعی از انواع شبکه ها در کشورهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته است، جدول ۳-۵ توزیع انواع سیستمها را در کشورهای مختلف نشان می دهد.

شکل ۳-۲ سیستمهای نیروی کشش مورد استفاده برای خطوط اصلی راه‌آهن‌های اروپا را نشان می‌دهد. در اواخر سال ۱۹۹۷، وضعیت استفاده از ولتاژ تغذیه در ۱۸۲۰۰۰ کیلومتر خط برقی دنیا به صورت زیر بوده است.

- ۱/۵KV DC، در حدود ۲۰۰۰۰ کیلومتر، ٪۱۱ از کل.
- ۳KV DC، در حدود ۷۰۰۰۰ کیلومتر، ٪۳۸ از کل.
- ۱۵KV AC و ۱٦/۷Hz در حدود ۳۳۰۰۰ کیلومتر، ٪۱۸ از کل.
- ۲۵KV AC و ۵۰Hz در حدود ٦۰۰۰۰ کیلومتر، ٪۳۳ از کل.

برای تجهیزات حمل و نقل عمده شهری عمدتاً ٦۰۰v DC، ۷۵۰v، ۱۲۰۰v یا ۱۵۰۰v استفاده می‌شوند.[1]

در جدول ۳-٦ نوع تغذیه در خطوط مختلف متروی تهران آورده شده است. (خطوطی که تا کنون به بهره برداری رسیده: تهران-کرج, خط۱ و خط۲)

---

[1] Pantograph
[2] American railway engineering association
[3] International Electrotechnical Commission

جدول ۳-۲- مقادیر ولتاژ پیشنهادی موسسه مهندسین راه آهن آمریکا

ولتاژ نامی (kV)	نوع*	حداکثر ولتاژ مجـاز در حالت کار عادی** (kV)	حداقل ولتاژ مجاز در حالت کار عادی*** (kV)	حداقل ولتاژ مجاز در حالت اضطراری**** (kV)
۰/٦٥۰	DC	۰/۷۲۰	۰/٥۲۰	۰/٤۰۰
۱/٥	DC	۱/۸	۱/۲	۱/۰
۳/۰	DC	۳/٦	۲/٤	۲/۰
۱۲/٥	AC	۱۳/۷٥	۱۰/۰	۸/۷
۲٥/۰	AC	۲۷/٥	۲۰/۰	۱۷/٥
٥۰/۰	AC	٥٥/۰	٤۰/۰	۳٥/۰

* کلیه ولتاژهای ACبا فرکانس صنعتی (٥۰ یا ٦۰ هرتز) هستند

** حداکثر ولتاژ مجاز در حالت کار عادی ۱/۱ برابر ولتاژ نامی است

*** حداقل ولتاژ مجاز در حالت کار عادی ۰/۸ برابر ولتاژ نامی است

**** حداقل ولتاژ مجاز در حالت اضطراری ۰/۷ برابر ولتاژ نامی است

جدول ۳-۳- سیستمهای ولتاژ اروپایی راه‌آهن‌های برقی بر طبق استاندارد EN50163

U_n ولت	نوع ولتاژ	U_{min2} ولت	U_{min1} ولت	U_{max1} ولت	U_{max2} ولت	U_{max3} ولت
٦۰۰	DC		٤۰۰	۷۲۰	۷۷۰	۱۰۱٥
۷٥۰	DC		٥۰۰	۹۰۰	۹٥۰	۱۲٦۹
۱٥۰۰	DC		۱۰۰۰	۱۸۰۰	۱۹٥۰	۲٥۳۸
۳۰۰۰	DC		۲۰۰۰	۳٦۰۰	۳۹۰۰	٥۰۷٥
۱٥۰۰۰	AC ۱٦/۷Hz	۱۱۰۰۰	۱۲۰۰۰	۱۷۲٥۰	۱۸۰۰۰	۲٤۳۱۱
۲٥۰۰۰	AC ٥۰Hz	۱۷٥۰۰	۱۹۰۰۰	۲۷٥۰۰	۲۹۰۰۰	۳۸۷٤٦

U_n: ولتاژ نامی

U_{min1}: حد پایین ولتاژ دائمی

U_{min2}: حد پایین ولتاژ غیر داوم، برای حداکثر ۱۰ دقیقه

U_{max1}: حد بالای ولتاژ دائمی

U_{max2} :حد بالای غیر دائم، برای حداکثر ۵ دقیقه

U_{max3} :اضافه ولتاژ کوتاه مدت برای مدت بیشتر از ۲۰ میلی ثانیه

جدول ۳-٤- مقادیر ولتاژ پیشنهادی IEC850

ولتاژ نامی (kV)	نوع*	حداکثر ولتاژ مجاز در حالت کار عادی (kV)	حداقل ولتاژ مجاز در حالت کار عادی (kV)	حداقل ولتاژ مجاز به صورت لحظه ای (kV)
۰/٦۰۰**	DC	۰/۷۲۰	۰/٤۰۰	
۰/۷۵۰	DC	۰/۹۰۰	۰/۵۰۰	
۱/۵	DC	۱/۸	۱/۰	
۳/۰	DC	۳/٦	۲/۰	
٦/۲۵***	AC	٦/۹۰۰	٤/۷۵۰	٤/۵۰۰
۱۵/۰	AC	۱۷/۲۵۰	۱۲/۰۰۰	۱۱/۰۰۰
۲۵/۰	AC	۲۷/۵۰۰	۱۹/۰۰۰	۱۷/۵۰۰
۵۰/۰	AC	۵۵/۰۰۰	۳۸/۰۰۰	۳۵/۰۰۰

* کلیه ولتاژهای ACبا فرکانس صنعتی (۵۰ یا ٦۰ هرتز) هستند فقط ولتاژهای ۱۵ و ٦/۲۵ کیلو ولت می توانند $\frac{۵۰}{۳}$ هرتز هم باشند.

** برای خطوط تراموا و خطوط حومه شهری جدید پیشنهاد می شود از این ولتاژ استفاده نشود.

*** برای خطوط جدید پیشنهاد می شود از ولتاژ ٦/۲۵ کیلوولت زمانی استفاده شود که به هر علت نتوان از سایر ولتاژها استفاده نمود.

**** در بعضی از کشورهای اروپائی این ولتاژ می تواند به ٤ کیلو ولت برسد، در این صورت کلیه تجهیزات باید به مدت ۵ دقیقه تحمل کارکرد در این ولتاژ را داشته باشند.

***** فرکانس در ولتاژ متناوب می تواند دارای محدوده تعییرات زیر باشد

سیستم $\frac{۵۰}{۳}$ هرتز بین $۱۶\frac{۱}{۶}$ الی ۱۷ هرتز

سیستم ۵۰ هرتز بین ٤۹ الی ۵۱ هرتز

سیستم ٦۰ هرتز بین ۵۹ الی ٦۱ هرتز

جدول ۳-۵- توزیع انواع سیستمها در کشورهای مختلف

(a) اتوترانسفورماتور (b) بوستر ترانسفورماتور

ولتاژ و فرکانس	کشور
۱۲۰۰ و۷۵۰ و۶۳۰ ولت DC	بریتانیا
۱۵۰۰ V DC	استرالیا، چکسلواکی، دانمارک، فرانسه، بریتانیا، هلند، هند، ژاپن، نیوزلند، پرتقال، اسپانیا، امریکا
۳۰۰۰ V DC	الجزایر، بلژیک، برزیل، شیلی، چکسلواکی، ایتالیا، لوکزامبورگ، موروکو، مجارستان، اسپانیا، امریکا، اتحاد جماهیر شوروی، یوگسلاوی
۱۱ kV AC ، $\frac{۵۰}{۳}$ Hz	سوئیس
۱۵ kV AC ، $\frac{۵۰}{۳}$ Hz	اتریش، آلمان، نروژ(b)، سوئد(b)، سوئیس
۶/۵ kV AC ، ۲۵ Hz	اتریش
۱۱ kV AC ، ۹۵ Hz	آمریکا
۲۰ kV AC ، ۵۰ Hz	ژاپن (b)
۲۵ kV AC ، ۵۰ Hz	بلغارستان، چین، چکسلواکی، دانمارک(b)، فنلاند(b)، فرانسه(a)، آلمان،بریتانیا(b)، مجارستان، هند(b)، ژاپن(b)، لوکزامبورگ، پاکستان، پرتقال، رمانی، آفریقای جنوبی، ترکیه، اتحاد جماهیر شوروی، زئیر
۵۰ kV AC ، ۵۰ Hz	آفریقای جنوبی
۲۰ kV AC ، ۶۰ Hz	ژاپن (b)
۲۵ kV AC ، ۶۰ Hz	ژاپن(a) (b)، کره جنوبی(a) (b)
۵۰ kV AC ، ۶۰ Hz	آمریکا، کانادا

جدول ۳-٦ نوع تغذیه در خطوط مختلف متروی تهران (خطوطی که تا کنون به بهره برداری رسیده: تهران-کرج, خط۱ و خط۲)

Tehran Urban & Suburban Railway Co. (Metro)

Final Equipment Specifications

	Feeding Voltage	Mode of Current Collection	High Voltage Network	Nominal Capacity of Sub-stations	Rectifiers	Signalling & Control	Telecomm. System	Number of Lifts	Number of Escalators
Line 1	750 V DC	Third Rail	5 Convertor Sub-Stations (63 to 20 KV) Connected to Tehran Power Network in the form of Ring	150 MVA	16 Convertor Sub-Stations (20 KV to 750 V)	ATS & ATP	Wireless & Optical Fiber	58	75
Line 2	750 V DC	Third Rail	5 Convertor Sub-Stations (63 to 20 KV) Connected to Tehran Power Network in the form of Ring	150 MVA	14 Convertor Sub-Stations (20 KV to 750 V)	ATS & ATP	Wireless & Optical Fiber	61	95
Line 5	25 KV AC	Catenary	230 KV Power Line from Montazer Ghaem power plant to 230 KV Ronyad Rang Sub-Station	60 MVA	-	ATS & ATP	Wireless & Optical Fiber	27	19

شکل ۳-۲- سیستمهای نیروی کشش برای راه‌آهن‌های اصلی اروپا

۳-٤-۱- شبکه‌های کشش جریان مستقیم

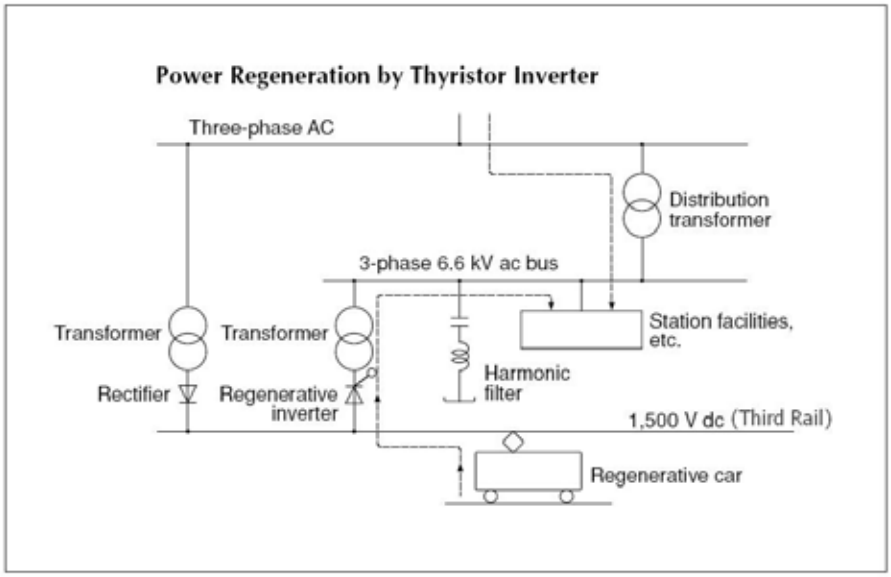
امروزه در مقیاس جهانی بیش از نیمی از همه راه‌آهنهای برقی از کشش جریان مستقیم استفاده می‌کنند. به علت سرعت و قدرت کم در حمل و نقل شهری و متروها، سیستم تغذیه مستقیم کاربرد زیادی در این سیستمها پیدا کرده است. برای سیستم توزیع انرژی این نوع تغذیه معمولاً از ریل سوم استفاده می شود.در سیستمهای حمل و نقل انبوه به خاطر خطرات پتانسیل با ولتاژهای بالاتر، حداکثر ولتاژ نامی به میزان ۱۵۰۰ ولت استفاده می‌شود. بیشترین ولتاژهای معمول ۷۵۰ ولت و ٦۰۰ ولت است. فاصله بین پستها از ۱/۵ کیلومتر تا ٦ کیلومتر می‌باشد. در برخی فواصل زیاد در راه‌آهنهای ۱۵۰۰ ولت DC و ۳۰۰۰ ولت DC فاصله پستها می‌تواند تا حدود ۲۰ کیلومتر باشد.

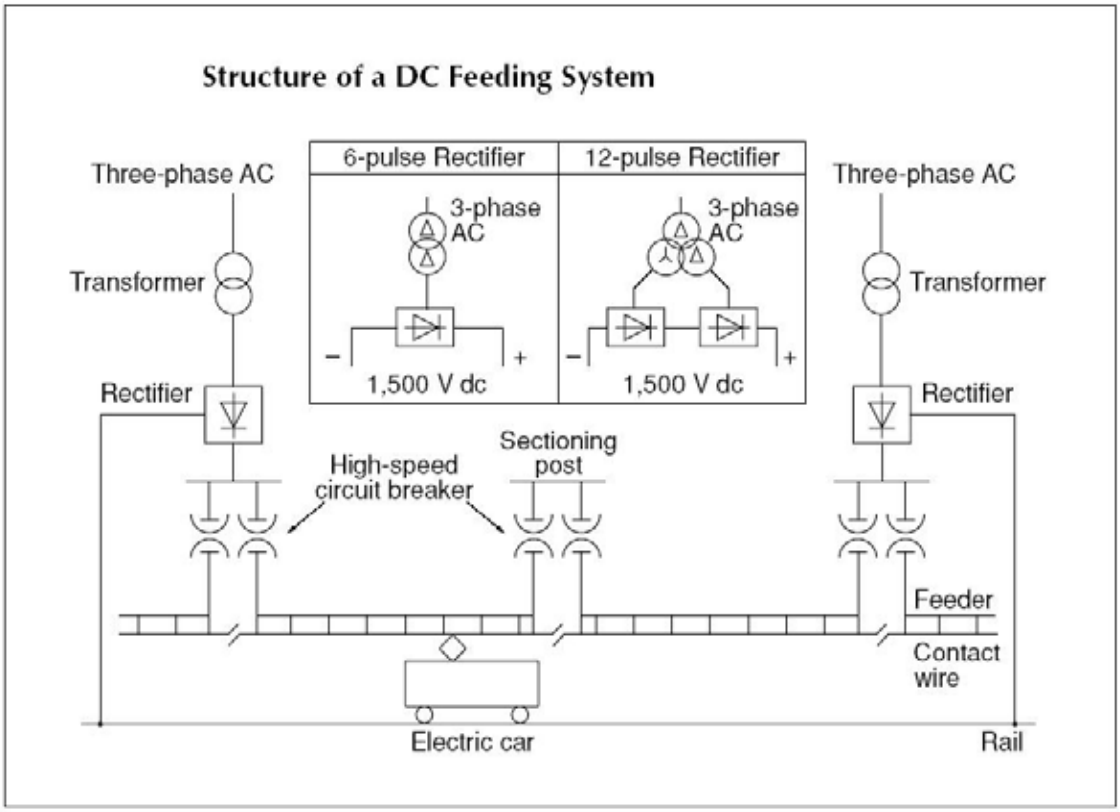
۳۰۰۰ ولت در بسیاری از کشورهای اروپایی مانند هلند, ایتالیا, اسپانیااستفاده می شود. ۱۵۰۰ ولت در ژاپن و جنوب فرانسه استفاده می شود و ٦۰۰, ۷۵۰ و ۱۲۰۰ ولت در اکثر متروها و خطوط شهری استفاده می گردد.توان نامی پستهای جریان مستقیم از ۱ تا ۲ مگاولت آمپر برای تراموا‌ها و به میزان ۱۰ مگاولت آمپر در سیستمهای حمل و نقل انبوه و خط اصلی است.

ولتاژ سه فاز تغذیه ٦ الی ۱۵ کیلو ولت سه فاز نتوسط شبکه سراسری در پستهای یکسوساز دیودی به جریان مستقیم در ولتاژ نامی شبکه تماس تبدیل می‌شود. قبلاً در سیستم یکسوساز از یکسوسازهای ٦ پالسه استفاده می‌شد. این نوع یکسو ساز باعث ایجاد اعوجاج و هارمونیهای مرتبه کم در موج جریان و ولتاژ سمت AC می شود. امّا امروزه برای کاهش هارمونیهلی ناشی از یکسوسازی عمدتاً از یکسوسازهای ۱۲ پالسه استفاده می‌شود. یکسو ساز ۱۲ پابس در واقع دو یکسوساز ٦ پالس با اختلاف زاویه ۳۰ درجه است که بصورت سری یا موازی به هم متصل هستند به هرحال یکسوسازی در پست موجب تولید هارمونی هایی می شود که با نصب فیلتر بایستی حذف گردند تا بتوان از آلودگی هارمونیکی شبکه جلوگیری کرد. در شکل زیر نمونه ای از شماتیک پست کشش DC را مشاهده میکنید.

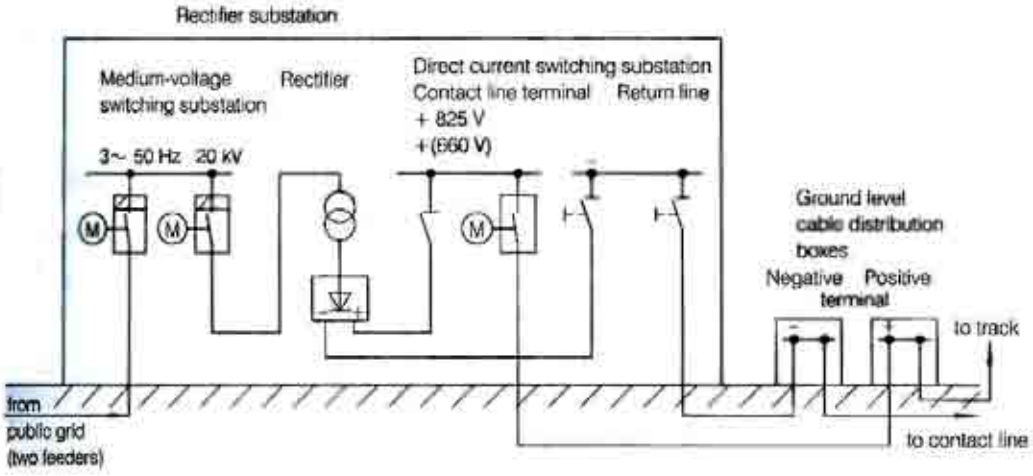
شکل ۳-۳ مدار الکتریکی یک شبکه جریان مستقیم نشان می دهد. مدار یکسوسازهای ٦ و ۱۲ پالسه که می توان در این پست بکار برد و پست جداساز بین پستهای کشش نیز در این شکل نشان داده شده است

تجهیزات کلیدزنی در پستهای یکسوساز واحدهای جامعی هستند که معمولاً برای بار کلاس VI بر طبق استاندارد EN60146-1-3 طراحی شده‌اند. شکل ۳-٤ طراحی اصلی یک تغذیه کشش جریان مستقیم برای یک تراموا را نشان می‌دهد. در طراحی عملکرد راه‌آهن‌های جریان مستقیم باید برای حداقل کردن خطر جریان نشتی توجهات خاصی به مسائل برگشت جریان کشش می شود.[1]





شکل ۳-۳ مدار پست یک شبکه جریان مستقیم به همراه پست جداساز و مدار یکسوسازهای ٦ و ۱۲ پالسه



شکل ۳-٤- سیستم تغذیه نیروی کشش جریان مستقیم یک تراموا

۳-٤-۲- شبکه‌های کشش AC تکفاز ۱٦/۷ Hz

استفاده از ولتاژ AC با فرکانس کم جهت کاهش اثر کموتاسیون متداول گشت. با توجه به تفاوت این فرکانس با فرکانس شبکه های صنعتی لازم است انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه راه آهن برقی به روشهای خاص تامین شود.

۳-٤-۲-۱- تولید نیروی کشش

انرژی الکتریکی AC تکفاز با فرکانس ۱٦/۷Hz با مدارهای تکفاز خاص تولید می‌شود. با مقایسه مدارهای ۵۰Hz و ۱٦/۷Hz برای وسا یل نقلیه با قدرت مشابه، مشاهده می شود در ۱٦/۷Hz گشتاور سه برابر بزرگتر نیاز است. گشتاور سه برابر یعنی تراکشن موتور با ابعاد سه برابر. از طرف دیگر مولدهای شبکه سراسری مولدهای سه فاز هستند اما مولدهای مورد استفاده در تغذیه نیروی کشش با فرکانس ۱٦/۷Hz مولدهای تکفاز هستند. بعلت فقدان دو سیم پیچی، حجم هسته متورق استاتور در ۱٦/۷Hz با ضریب $\sqrt{3}$ افزایش می یابد. یک مولد تکفاز ۱٦/۷Hz اساساً $3\sqrt{3} \approx 5.2$ بار بزرگتر از یک مولد سه فاز ۵۰Hz در قدرت مشابه است. مقادیر عملی حدود ٤/۵ برابر است. به عنوان مثال مولد تکفاز ۱٦/۷Hz توان نامی ۱۸۷/۵MVA دارای ابعاد و وزن یکسان با یک ژنراتور ۸۵۰MVA در شبکه ۵۰Hz سه فاز سراسری است.

اگر مولدهای تکفاز ۱٦/۷Hz توسط موتورهای الکتریکی سه فاز ۵۰ هرتز تغذیه شوند؛ به مبدل دوار تبدیل می‌شوند.

با استفاده از سیستمهای کنترل دور مبتنی برتغییر فرکانس می توان دور موتور آسنکرون سه فاز و در نتیجه دور و فرکانس مولد را کنترل کرد در اینصورت می توان این مبدل دوار را به موازات سیستمهای دیگر

بکار برد. مبدلهای دوار برای پوشش حداکثر بار در شبکه‌های تغذیه مرکزی راه‌آهن آلمان استفاد می‌شوند. توان مبدلهای دوار بین ۱۰/۷MVA تا ۵۰MVA است.

در قسمت شبکه غیر متمرکز راه‌آهن آلمان، توان تکفاز با فرکانس ۱۶/۷Hz در پستهای مبدل دوار غیر متمرکز (DRCS)[1] تولید می‌شوند و توان نامی آنها از ۱۰MVA شروع می‌شود.[1]

۳-٤-۲-۲- انواع شبکه‌های نیروی کشش ۱۶/۷ هرتز

۲ نوع تغذیه قدرت تکفاز ۱۶/۷Hz در اروپا وجود دارد.

۱- تغذیه نیروی کشش مرکزی

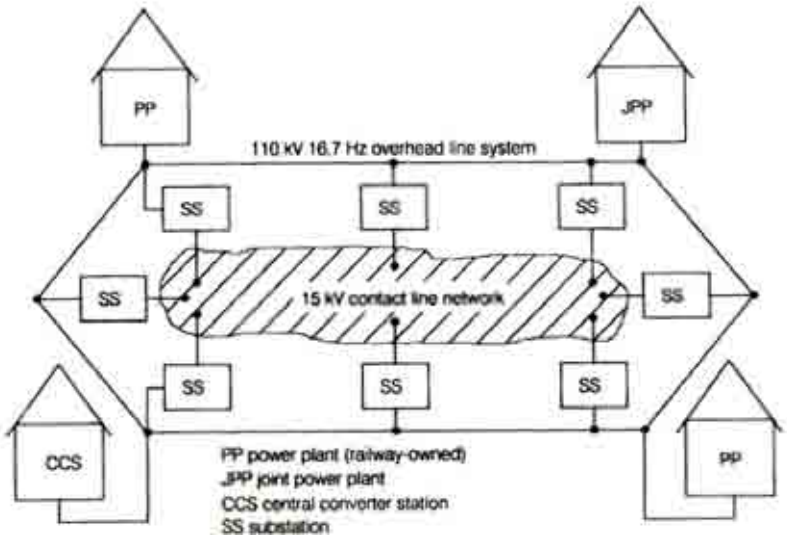
۲- تغذیه نیروی کشش غیر متمرکز

* تغذیه نیروی کشش مرکزی- در این سیستم یک شبکه یک فاز سراسری (به هم پیوسته) وظیفه تغذیه پستهای راه آهن برق را بر عهده دارند (شکل ۳-۵)

این سیستم که در آلمان، اتریش و سوئیس از سال ۱۹۱۳ وپس از آن در نروژ مورد استفاده قرار گرفت؛ دارای اجزای زیر است:

مولد - برای تولید انرژی الکتریکی از مولدهای ۱۶/۷Hz استفاده می‌شود که در نیروگاه‌های هیدروالکتریک، حرارتی و هسته‌ای نصب شده‌اند و محرک اولیه آنها توربین آبی یا بخار است. این وسایل تولید انرژی الکتریکی بعنوان تولید انرژی اولیه شناخته می‌شوند.

شبکه انتقال - بوسیله یک شبکه هوائی تکفاز ۱۱۰ یا ۱۳۲ کیلوولت با فرکانس نامی ۱۶/۷Hz انتقال انرژی الکتریکی از نیروگاه‌ها به پستها انجام می شود. این شبکه تکفاز معمولا بصورت دو مداره است و دارای دو هادی رفت و برگشت در هر مدار است.



شکل ۳-۵- ساختار اساسی تغذیه نیروی کشش مرکزی

[1] Decentralised Rotating Converter Stations

پستهای کشش- جهت توزیع انرژی الکتریکی تکفاز در راه‌آهن، در پستهای کشش ولتاژ از ۱۱۰ کیلوولت یا ۱۳۲ کیلوولت به ولتاژ نامی تجهیزات خط تماس ۱۵ کیلوولت تبدیل می‌شود.

مدار داخلی پست-تغذیه بارهای خط تماس ۱۵ کیلوولت، ۱۶/۷Hz تکفاز از طریق واحد مدار شکن‌ها در پست‌های کشش انجام می شود.

* تغذیه نیروی کشش غیر متمرکز- در این سیستم انرژی الکتریکی مورد نیاز راه آهن برقی در محل پستهای کشش با تبدیل برق صنعتی سه فاز ۵۰ هرتز به ۱۶/۷ هرتز یک فازانجام می شود (شکل ۳-۶). بنابراین شبکه اصلی تغذیه کننده پست کشش، شبکه سراسری ۵۰ هرتز است.

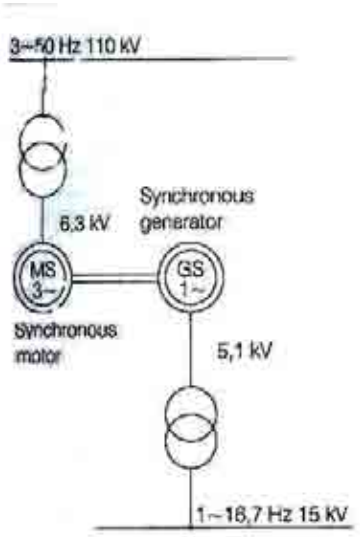
این سیستم از سال ۱۹۲۶ در سوئیس و از سال ۱۹۶۸ در یک قسمت از شبکه آلمان شرقی سابق و از سال ۱۹۹۳ در راه‌آهن آلمان (DB) کاربرد داشته است. قسمت اصلی این مدار، پستهای مبدل دوار غیر متمرکز (DRCS) است.[1]

پستهای مبدل دوار غیر متمرکز دو وظیفه برعهده دارد:

-تبدیل ولتاژ ۵۰ هرتز به ولتاژ تکفاز با فرکانس نامی ۱۶/۷Hz

-تغذیه انرژی تکفاز ۱۶/۷Hz از طریق مدار شکن‌ها در پست‌ها به واحدهای تغذیه منحصر بفرد تجهیزات خط تماس.

دو نوع شبکه نیروی کشش ۱۶/۷Hz تکفاز ذکر شده پارامترهای متفاوتی دارند که در جدول۳-۶ مقایسه شده‌اند. یک خلاصه کلی نشان می‌دهد که هر دو نوع تغذیه نیروی کشش متمرکز و غیر متمرکز می‌توانند قطارها را ایمن، قابل اعتماد و با پارامترهای کیفیت خواسته شده، تغذیه کنند.



شکل ۳-۶- طراحی پست مبدل‌دوار غیر متمرکز با مبدلهای آسنکرون-سنکرون، (مبدلهای صلب)

جدول ۳-٦- مقایسه بین تغذیه نیروی کشش مرکزی و غیر متمرکز

	تغذیه غیر متمرکز	تغذیه مرکزی (متمرکز)
اتصالات سیستم خط تماس بالاسری	عملکرد موازی پستهای مبدل مجاور	عملکرد موازی پستهای مجاور
پایداری ولتاژ شین‌های پست	ولتاژ شین در همه بارها ثابت	افت ولتاژ تا ۰/۸ بار ولتاژ نامی در بار نامی دوبل
فضاهای پست	بزرگتر از نوع متمرکز به دلیل ولتاژ ثابت شین	کوچکتر از نوع غیرمتمرکز به دلیل افت ولتاژ شین
قوانین اضافی	پیکهای بار بزرگ، افزایش قیمت انرژی، عملکرد مبدل تکی تنها با تعویض خواص مبدل امکان پذیر است.	جبران پیکهای بار از طریق شبکه ۱۱۰ کیلوولت، عملکرد یک ترانسفورماتور ممکن است.
قدرت نصب شده	تفاوتی نمی‌کند.	تفاوتی نمی‌کند.
واحدهای رزرو	غیرمتمرکز در پست مبدل	مرکزی
راندمان	۰/۹۱	۰/۹۱
جریان‌های اتصال کوتاه در شبکه خط تماس بالاسری	بیش از ۲۵ کیلوآمپر	بیش از ٤٥ کیلوآمپر
دسترس پذیری	تفاوتی نمی‌کند	تفاوتی نمی‌کند
توان راکتیو مورد نیاز در شبکه کشش	کوچکتر به دلیل فقدان خطوط قدرت بالاسری ۱۱۰ کیلوولت	بزرگتر
طول خط شبکه کشش ۱۱۰ کیلوولت	در حدود ۰/۰۵ فضای پست مبدل	در حدود ۱/۳ بار بزرگتر از فضای پست
تلفات توان در شبکه ۱۱۰ کیلوولت		دوبرابر به بزرگی خطوط سه فاز در توان انتقالی برابر
تولید نیرو	در واحدهای کوچک با راندمان کمتر نسبت به تولید نیرو در حالت متمرکز	در واحدهای بزرگ با راندمان بالا

بیش از ۸۰ سال حمل و نقل کشش الکتریکی بر روی ۲۰۰۰۰ کیلومتر از خطوط کشش تغذیه شده مرکزی (متمرکز) و بیش از ۷۰ سال کشش الکتریکی بر روی ۱۳۰۰۰ کیلومتر از خطوط تغذیه، با نیروی الکتریکی ۱۶/۷Hz از تجهیزات غیر متمرکز قابلیت اعتماد هر دو نوع تغذیه قدرت ۱۶/۷Hz را ثابت می‌کند. به دلایل بالا در آلمان برای پاسخگوئی کوتاه مدت به انرژی از مبدلهای فرکانس استفاده می شود، در نتیجه برای تغذیه پستهای مبدل فرکانس نیاز به استفاده از شبکه AC سه فاز ۵۰ هرتز خواهد بود. در مقابل جهت تولید و انتقال انرژی ۱۶/۷Hz در شبکه ۱۱۰ کیلوولت نیاز به برنامه‌ریزی برای توسعه شبکه تغذیه مرکزی در راه‌آهن آلمان خواهد بود.[1]

۳-٤-۳- شبکه کشش AC تکفاز ۵۰Hz

برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز شبکه‌های کشش AC تکفاز ۵۰Hz از طریق یک (یا دو) فاز از شبکه سه فاز ۵۰Hz ورودی شبکه سراسری استفاده می‌شود. این بارگیری تکفاز از شبکه باعث عدم تعادل در جریان و ولتاژ شبکه سه فاز می‌شود. عدم تعادل جریان در ژنراتورها باعث ایجاد یک میدان دوار که خلاف جهت میدان دوار اصلی می چرخد می شود. در حالیکه عدم تعادل ولتاژ تاثیرات خطرناکی برای مصرف کننده‌ها دارد.

عدم تعادل ولتاژ u_u با توان اتصال کوتاه S_K شبکه سه فاز نسبت عکس دارد. اگر توان کشش که توسط یک فاز از سه فاز شبکه کشیده می‌شود S_e باشد؛ عدم تعادل ولتاژ در شبکه سه فاز در نقطه تغذیه با دقت کافی توسط رابطه ۳-۱ بدست می‌آید.

$$u_u \approx S_e / S_K \qquad ۱-۳$$

با توجه به رنج توان اتصال کوتاه (بین ۷۰۰MVA و ۳۰۰۰MVA) در شبکه سه فاز ۱۱۰ کیلوولت و توان‌های پستهای کشش (در حد ٤۰MVA)، مقادیر بالای عدم تعادل ولتاژ را می‌توان پیش‌بینی کرد.

عدم تعادل ولتاژ باعث کاهش کارآئی موتورهای آسنکرون و سایر بارهای سه فاز در شبکه می‌شود. برای حداقل کردن تاثیرات نامساعد عدم تعادل ولتاژ، محدوده مجاز برای u_u تعیین می‌شود. بر طبق استاندارد EN 60 034-1، موتورهای سه فاز فقط در یک سیستم تغذیه الکتریکی که عدم تعادل ماندگار ولتاژ حداکثر تا ٪۱ و در نامتعادلی کوتاه مدت (فقط برای چند دقیقه) حداکثر تا ٪۱/۵ باشد کارآئی مناسب دارند. برای تطبیق با این شرایط دقیق و محدود، لازم است که عدم تعادل محدود و یا جبران شود.[1]

شکل ۳-۷ روشهای مختلف تغذیه بار یک فاز پست کشش توسط سیستم سه فاز و از طریق انواع مختلف ترانسفورماتورها را نشان می دهد.

در شکل ۳–۷–a تمامی پستها توسط یک فاز (بین دو فاز) از شبکه تغذیه می شوند. در اینصورت کل توان مورد نیاز راه آهن توسط همین فازها تامین می شود که خود منجر به عدم تعادل شدید در شبکه خواهد شد.

در عمل همانطور که در شکل ۳–۷–b نشان داده شده است، قدرت تکفاز معمولاً به حالت تعویض چرخشی به شبکه سه فاز متصل می‌شود. به هر حال این نوع تغذیه منجر به یک تعادل در شبکه تکفاز با رعایت عملکرد بهینه می‌شود که این اتصال در شکل ۳–۷–b نشان داده شده است. به علت اینکه قسمتهای مختلف خطوط توسط فازهای مختلف تغذیه می‌شوند، جداسازی فاز برای اینکه اجازه تغذیه به تمام خطوط فقط از یک طرف داده شود لازم است. از آنجاکه در جداسازی فازها ولتاژ به کار رفته یک شیفت فاز ۱۲۰° دارد، اختلاف ولتاژ در محل جدا سازی فاز $\sqrt{3} \times 25KV \cong 43.3KV$ است. تغذیه شعاعی افت ولتاژ بیشتر در شبکه بالاسری و در نتیجه لزوم افزایش ولتاژ در محل پست کشش را باعث خواهد شد.

راه آهن فرانسه SNCF مدار الکتریکی مطابق شکل ۳–۷–b را برای شبکه خود بکار می برد. در سال ۱۹۹۳ حدود ۸۲۳۷ Km از خطوط کشش الکتریکی دنیا از مدار شکل ۳–۷–b استفاده می‌کردند.

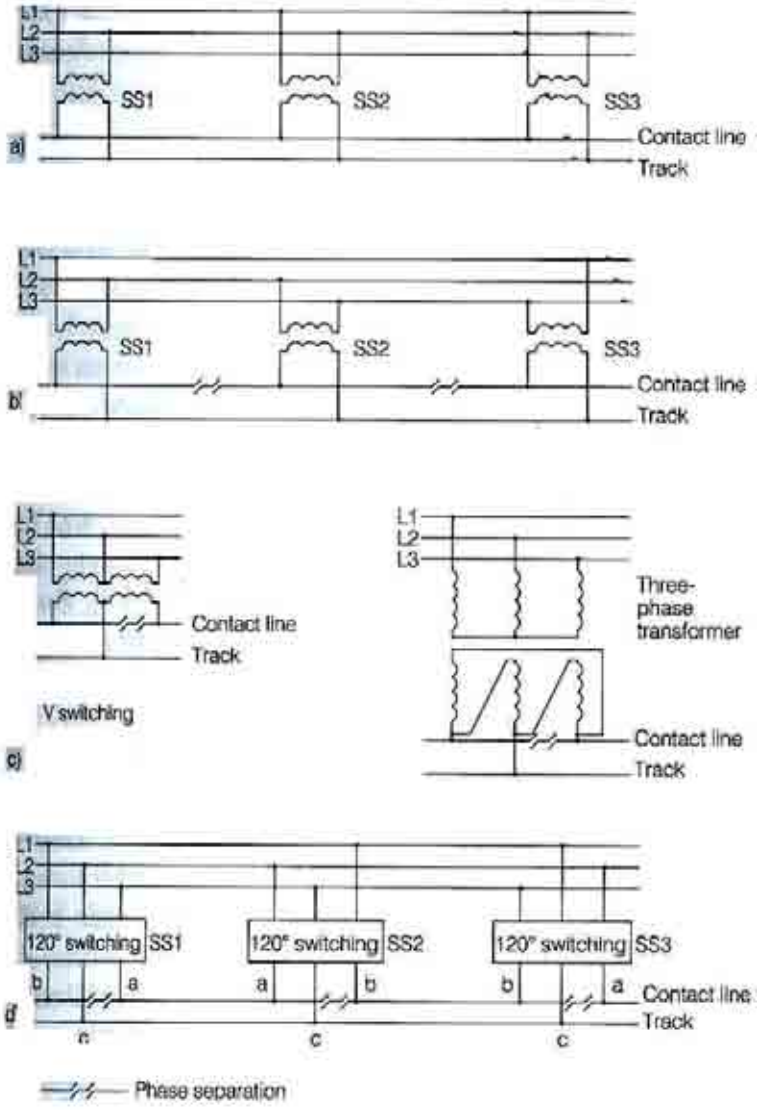
این نوع تغذیه در خط سریع‌السیر مادرید–سویل[1] نیز استفاده می‌شود. در این خط اتصالات خاص در ترانسفورماتورهای پستهای کشش، اختلاف زاویه ۶۰° را باعث شده‌اند. با این چنین روشی که اختلافات ولتاژ در فازهای جدا شده با ولتاژ نامی ۲۵KV برابر است.

در روسیه که بیش از ۲۱۵۰۰ کیلومتر (۱۹۹۹) از خطوط با سیستم یکفاز برقی شده‌اند، برای کاهش اثر عدم تقارن از مدارهای شکل ۳–۷–c استفاده شده است. برای اصلاح بهتر وضعیت می توان از ترکیب شکل ۳–۷–d استفاده نمود.

برای اصلاح ویژگی‌های انتقال، سیستم ۲×۲۵KV برای سیستمهای با ترافیک زیاد در فرانسه، ژاپن و روسیه در راه‌آهن‌های تکفاز AC، ۵۰Hz و ۲۵ کیلوولت استفاده می‌شود. این نوع تغذیه بوسیله اتو ترانسفورماتورهای اضافی و خط برگشت با پتانسیل ۲۵ کیلوولت انجام می‌شود. این خط برگشت معمولاً بعنوان فیدر منفی معرفی می‌شود. به این دلیل، وسیله اتصال دو قطب در شبکه خط بالاسری مورد نیاز است. طراح اصلی این نوع از تغذیه را می‌توان در شکل ۳–۸ مشاهده نمود.

شبکه بالاسری توسط یک ترانسفورماتور با سر وسط تغذیه می‌شود. سر وسط به ریل متصل می‌شود ولتاژ بین فیدر منفی و ریل‌ها و نیز بین خط تماس بالاسری و ریل‌ها هر کدام ۲۵ کیلوولت است. اختلاف پتانسیل بین خط تماس بالاسری و فیدر منفی در حدود ۵۰KV می‌باشد.

[1] Madrid-Seville



شکل ۳-۷- انواع پیشنهادها برای اتصال پستهای نیروی کشش تکفاز ۵۰Hz به شبکه سه فاز

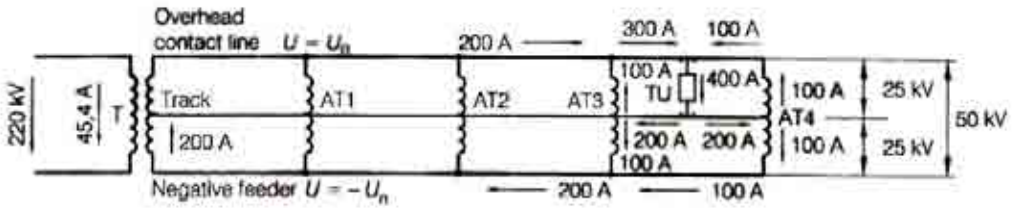
a) اتصال بدون جبران عدم تعادل

b) اتصال با چرخش دورهای و بدین وسیله جبران غیر مستقیم عدم تعادل

c) اتصال ۱۲۰° برای جبران مستقیم عدم تعادل

d) اتصال با چرخش دوره‌ای پستهای عمل کننده موازی با جبران مستقیم توسط کلیدزنی ۱۲۰° (سیستمهای کشش راه‌آهن روسیه)

انتقال توان بین پست و نزدیکترین اتو ترانسفورماتوربه بار توسط هادی شبکه بالاسری و فیدر منفی انجام می شود، یعنی انتقال توان از طریق شبکه ۵۰KV اتفاق می‌افتد. جریان‌های کم این مدار (نسبت به شبکه ۲۵ کیلو ولت) افت ولتاژ کمی را در مدار شبکه بالاسری را ایجاد می کند. در قسمت بین پست کشش و نزدیکترین اتو ترانسفورماتور به بار، به دلیل جریان‌های با دامنه بزرگ و مساوی و اختلاف فاز تقریباً ۱۸۰° درجه در خط تماس بالاسری و فیدر منفی، جریان جاری در ریلها کم است، بنابراین تداخل با خطوط مجاور خیلی کم است. دراین مدار بار توسط ۲ اتو ترانسفورماتور در طرفین خود تغذیه می شود، یعنی، بارها از هر دو انتها تغذیه می‌شوند، در این ناحیه ریلها همانند هادی‌های برگشت جریان مدار هستند. در این مدار تداخل بین خطوط مجاور نسبت به تغذیه یکطرفه بدون اتو ترانسفورماتور کمتر است.[1]



شکل ۳-۸ طراح اصلی سیستم تغذیه ۲×۲۵ KV و S_n=۱۰MVA

T ترانسفورماتور پست کشش

AT اتو ترانسفورماتور

Tu بار کششی

۳-٤-٤- مقایسه شبکه های AC و DC

تبدیل سطح ولتاژ در سیستم AC راحتتر از سیستم DC بنابراین به علت وجود امکان استفاده از ولتاژهای بالا، در سیستم AC می توان قدرت بیشتری را تا مسافتهای دورتر منتقل نمود. یکی از محدودیتهای سیستم AC لزوم یکسوسازی آن در داخل قطار برای تغذیه تراکشن موتورهای جریان مستقیم بود (تا دهه ۱۹٦۰)..

از طرف دیگر سیستم DC در مسیرهای کوتاه و مسیرهای درون شهری کاملا مناسب بود. این سیستم به علت سیستم ساده کنترل تراکشن موتورهای جریان مستقیم و اجزا کوچکتر در داخل قطار (که به معنی کوچکتر و سبکتر شدن قطار خواهد بود) در بعضی از کشورها بخصوص در اروپا بکار رفته است. در مقابل در این سیستم به علت ولتاژ کمتر باید از ریل سوم یا شبکه هوایی با سیم با سطح مقطع بزرگتر استفاده نمود. فاصله پستهای کش در این سیستم ۲ تا ۳ کیلومتر (برای ولتاژ ۷۵۰ ولت) است که هزینه احداث را افزایش می دهد.

۳-۵- مشخصات بار راه آهن برقی

بار الکتریکی راه‌آهن برقی از نظر رفتار دینامیک و استاتیک با بارهای صنعتی تفاوتهای بسیاری دارد از جمله:

أ) مقدار بار با زمان تغییر می‌کند.- (برای کمتر از ۳۰ ثانیه هم ثابت نمی ماند) تغییر بار باعث یک اختلال تغییر ولتاژ برای سیستم تغذیه می‌شود. تغییر بار نیز با سطح خطا در نقطه تغذیه نسبت عکس دارد بنابراین داشتن توان با سطح خطای کافی مطلوب است. [2]

ب) محل بار با زمان تغییر می‌کند

ت) یکفاز است (حضور مولفه توالی منفی)- با وجود یک بار تکفاز، یک عدم تعادل ولتاژ در سیستم تغذیه سه فاز اتفاق می‌افتد.

میزان عدم تعادل با توجه به نوع اتصالات ترانسفورماتورها (اتصال تکفاز، اتصال V یا اسکات) تغییر می‌کند. عدم تعادل، یک نسبت عکس از سطح خطا در نقطه تغذیه است، لازم است که توان با سطح خطای کافی محفوظ نگه داشته شود و بنابراین عدم تعادل کمتر از مقدار مجاز می‌شود.

ث) بار یکسو شده (غیر خطی) بزرگی است (حضور هارمونی بالا).- هارمونیک ایجاد شده توسط بار باعث یک اعوجاج ولتاژ در سیستم تغذیه می‌شود. حداکثر مقدار اعوجاج به علت هارمونیک و اعوجاج نهایی هارمونیک در نقطه تغذیه باید مورد توجه قرار گیرد. مقدار آن نیز نسبت معکوس با سطح خطا دارد. وقتی سطح خطا کوچکتر باشد، اعوجاج بزرگتر می‌شود. برای کاهش اعوجاج، یک فیلتر باید در پست نصب شود، اما هزینه ساختمان تأسیسات کاهش می‌یابد. [2]

ج) دارای ضریب قدرت کم است.

ح) ضریب استفاده کوچک برای کلیه تجهیزات.

بنابراین در طراحی شبکه الکتریکی راه‌آهن برقی باید شرایط خاص سیستم در نظر گرفته شود از جمله:

- وجود مولفه توالی منفی جریان و نیاز به جبران آن.
- وجود هارمونی در جریان و ولتاژ و نیاز به جبران آن.
- تغذیه سیستم با ضریب اطمینان بالا (بدون هیچگونه قطعی در تغذیه بار)
- تحویل انرژی با حداکثر کیفیت ممکن. (از نظر سطح ولتاژ، حداقل تلفات، حداقل هارمونی، حداقل جریان توالی منفی و حداکثر ضریب قدرت)
- حداقل تداخل با سیستمهای مخابراتی و سیگنالینگ.
- حداقل سرمایه‌گذاری

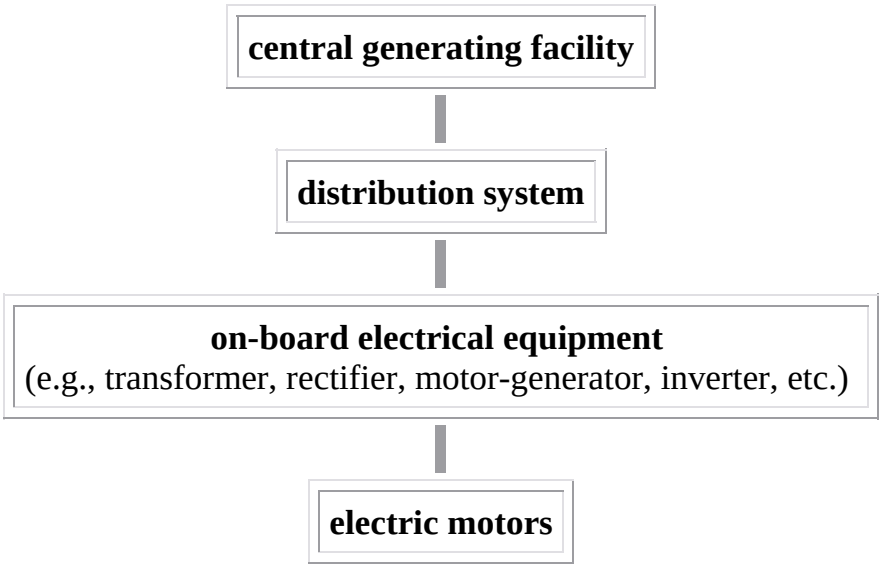
فصل ٤- اجزای لکوموتیو برقی

لکوموتیوهای برقی در طول حضور خود در صنعت ریلی تحولات بسیاری را پشت سر گذاشته اند و از نظر ساختمان تغییرات بسیار داشته اند. شکل٤-١ بلوک دیاگرام لکوموتیو های برقی را نشان می دهد. عملیات برق رسانی به لکوموتیو را در راه آهن برقی می توان به چهار بخش مهم تقسیم کرد:

١. پستهای الکتریکی که انرژی الکتریکی را از شبکه سراسری دریافت و به ولتاژ مناسب برای تغذیه قطار تبدیل می کنند، این پستها پست کشش نامیده می شوند. برحسب قدرت، سطح ولتاژ و نوع ولتاژ بکار رفته در شبکه ساختار این پستها متفاوت خواهد بود.

٢. سیستم برق رسانی- برق رسانی از پست کشش به لکوموتیو در طول مسیر توسط شبکه هوائی یا ریل سوم انجام می شود. ساختار این شبکه نیز با برحسب قدرت، سطح ولتاژ، نوع ولتاژ و سرعت قطار طراحی می شود.

٣. سیستم جمع آوری جریان برق و انتقال آن به لکوموتیو و سپس به تراکشن موتورها- به منظور در یافت انرژی الکتریکی از ریل سوم یا شبکه بالاسری از تجهیزاتی به نام پانتوگراف استفاده می شود. بقیه مسیر انرژی متناسب با نوع ولتاژ شبکه و تراکشن موتور لکوموتیو است.



شکل٤-١ بلوک دیاگرام لکوموتیو های برقی

٤. مسیر برگشت جریان برق- در راه آهن برقی عموما از ریل به عنوان مسیر برگشت جریـان اسـتفاده می شود.

شکل٤-٢ اجزای دو لکوموتیو AC با تراکشن موتورهای به ترتیب DC و AC را نشان می دهد.

با توجه به شکل ٤-٢زیر سیستمهای یک لکوموتیو برقی عبارتند از

الف- مدار اصلی- مدار اصلی دارای ولتاژ زیاد، جریان زیاد و توان زیاد است که شامل برقگیر ها، بریکر خلا، ترانسفورماتور اصلی، یکسوساز، مدار میانی با ولتاژ مستقیم و اینورتر کنترل دور، تراکشن موتور و ... است.

ب- مدار کمکی[1]- تجهیزات کمکی شامل موتورها و کنتاکتورهای مختلفی که درداخل لکوموتیو قرار دارند، مبدل یک فاز به سه فاز، موتورهای سیستم خنک کننده و دمنده ها (برای تراکشن موتورها و مبدلها) موتور کمپرسور، موتور پمپ روغن، موتور پمپ هوای ترمز و ..... هستند. معمولا اجزا این سیستم قدرتهای از ۱ کیلووات تا چند ده کیلو وات دارند.

ج- مدار کنترل – مدار کنترل لکوموتیو معمولا انواع مختلفی دارد از جمله

۱- کنترل کنتاکتوری

۲- کنترل دیجیتالی

۳- کنترل کامپیوتری

....

و در محدوده های مختلف ار جمله

۱- کنترل کلیه اجزا داخل لکوموتیو

۲- کنترل کلیه اجزا داخل واگنها

۳- کنترل کلیه اجزا داخل قطار

د – سیستمهای مکانیکی- سیستمهای مکانیکی اجزا مختلفی دارند که مهمترین آنها عبارت است از سیستم تعلیق تراکشن موتور[2]است. نیروی وارد بر ریل متناسب با نیروی وزنی است که مستقیما روی محور قرار گرفته است. با انتقال نیروی وزن از طریق فنرها به چرخ می توان از مقدار این نیروها کاست. این امر خصوصا در سرعتهای بالا ضروری است.

ه- سیستم ترمز پنوماتیک[3]- این سیستم شامل لوله های توزیع هوا و شیرها[4] است.

---

[1] Auxiliary system

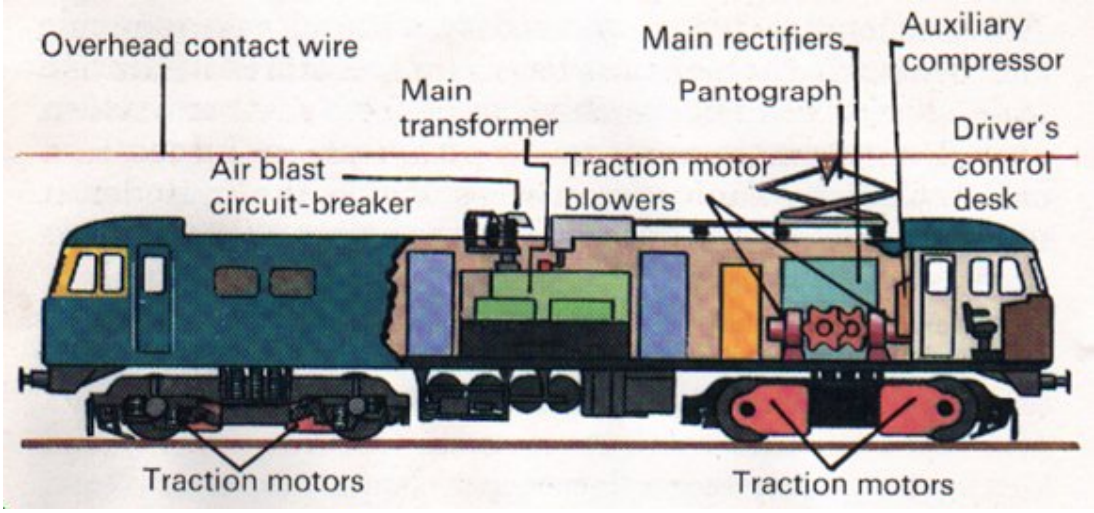
[2] traction motor suspension

[3] Pneumatic braking system

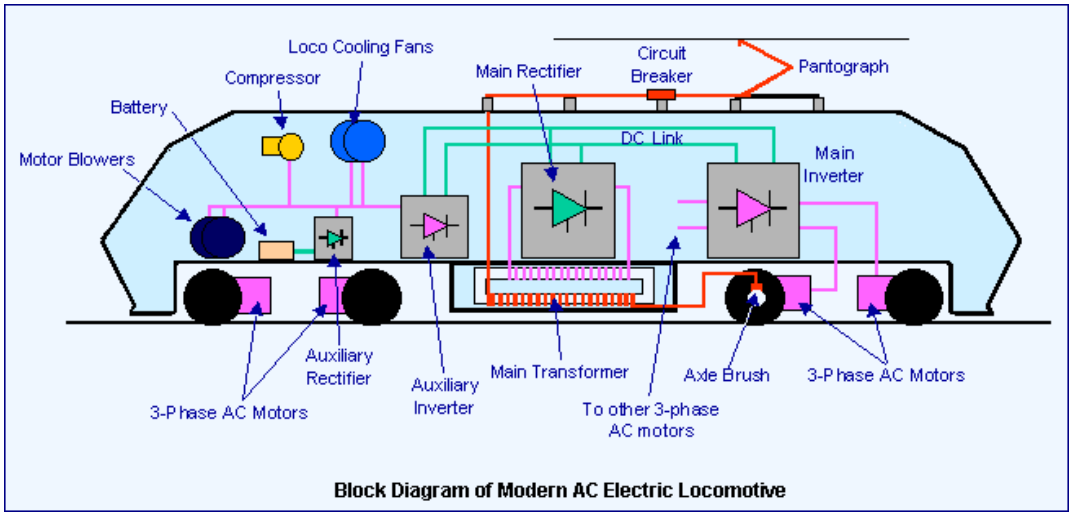
[4] valves

و- سیستم تهویه[1]- در لکوموتیو برقی تلفات بسیاری وجود دارد که تبدیل به حرارت می شود جهت حفظ دمای داخل لکوموتیو در محدوده قابل قبول و استفاده از قدرت نامی لکوموتیو لازم است حرارت بوجود آمده به خارج از لکوموتیو منتقل شود این امر به عهده سیستم تهویه است.

ز- سیستم روغن- در لکوموتیو برقی ممکن است ترانسفورماتور، یکسوساز و اینورتر توسط روغن خنک شوند



الف- با تراکشن موتورهای DC



ب- با تراکشن موتورهای AC

شکل ٤-٢- بلوک دیاگرام دو لکوموتیو AC

[1] Ventilation system

اجزا اصلی این سیستمها عبارتند از

٤-١- پانتوگراف

پانتوگراف نامی است که به بازوهای جمع کننده جریان از شبکه بالا سری داده شده است (ریل سوم در سیستم ریل سوم از وسیله ای به نام جاروبک یا کفشک استفاده می شود)..این اصطلاح با دستگاه هایی که شکلی مشابه با این نوع هستند برای کپی کردن نقشه، نوشته واشکال که دارای بازو های لولایی هستند، گرفته شده است.

قطارهای برقی و یا واگن های موتور دار و اتوبوس برقی و یا تراموا‌ها همگی دارای پانتوگراف می باشند. انرژی الکتریکی بوسیله پانتوگراف از شبکه بالاسری دریافت و به مصرف تراکشن موتورها می رسد. کیفیت حرکت پانتوگراف در زیر شبکه بالاسری به ساختمان و نوع پانتوگراف و سیستم شبکه بالاسری بستگی دارد.

برحسب اینکه تغذیه از طریق شبکه بالاسری یا ریل انجام شود ساختمان و محل نصب پانتوگراف متفاوت است. شکل٤-٣ پانتوگراف در شبکه بالاسری و در ریل سوم نشان می دهد.

معمولا در سیستم با ولتاژ مستقیم کم از ریل سوم استفاده می شود و از شبکه بالاسری در سیستمهای متناوب و مستقیم با ولتاژ زیاد استفاده می شود.

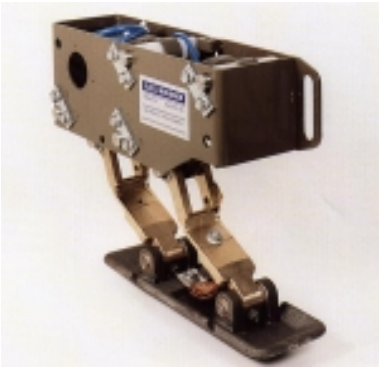
٤-١-١- اجزاء پانتوگراف در شبکه بالاسری

پانتوگراف از چهار قسمت اساسی تشکیل شده است :

١- ساختمان اصلی پانتوگراف که در روی چهار مقره روی سقف قرار دارد.
٢- سیستم محرکه پانتوگراف که از آلیاژ سبک تهیه می شود
٣- بلبرینگ و بازوهای متحرک و سیستم تغذیه پانتوگراف
٤- جاروبک پانتوگراف که از یک یا دو صفحه گرافیتی یا آلیاژهای خاص تشکیل شده است که به وسیله سیم های افشان به سیستم تغذیه اتصال می گردد.

٤-١-١-١-جاروبک

جاروبک از جنسهای گوناگونی تهیه می شود که عبارتند از : مس، طلا، پلاتین، ذغال. جاروبکهای مسی و پلاتینی دارای مقاومت الکتریکی کمتری هستند و فقط در محل کنتاکت (محل تماس) با سیستم شبکه بالا سری ایجاد سوختگی می کنند ولی جاروبک ذغالی یا گرافیتی به علت مقاومت بیشتر نمی توانند به راحتی جریان مورد نیاز قطار را از خود عبور بدهد و باعث تولید حرارت شده و سوختگی در سیم تماس به وجود می آید. بدین جهت از این جاروبک ها در خطوطی که دارای جریان کمتری است استفاده می شود و در شبکه های با جریان متناوب نیز از این نوع جاروبک استفاده می شود ولی در شبکه های با جریان مستقیم که دارای جریانی ببیشتر از ١٥٠٠ آمپر می باشد استفاده از این جاروبک ها غیر منطقی است.



الف- در شبکه بالاسری ب- در ریل سوم

شکل٤-٣- پانتوگراف

جاروبک ذغالی از کربن یا از پودر گرافیت و یا از قیر پیوندی (ضخیم و سفت) تهیه می شود، در بعضی موارد پودر کربن نیز به آن اضافه می شود. جاروبک ذغالی معمولا از سه پهلو به فشنگ (قاب فلزی) بسته می شود و تشک جاروبک ذغالی با فلزات حامل جریانی آبکاری می شود و برای تشک و آبکاری آن معمولا از آلومنیوم استفاده می شود که نرمتر از سیم شبکه می باشد تا در موقع تماس هادی تماس با این تشک (قاب فلزی) به راحتی ساییده شود و تخریبی در هادی تماس به وجود نیاید. شکل٤-٤ جاروبک ذغالی پانتوگراف را نشان می دهد.

شکل٤-٤- جاروبک ذغالی پانتوگراف

تماس بین شبکه بالاسری و پانتوگراف باید بدون وقفه برقرار باشد، زیرا فاصله هوائی موجب ایجاد یک قوس الکتریکی در میان شبکه بالاسری و پانتوگراف شده و ایجاد نقطه جوش در سیم تماس می شود و این نقطه جوش ها مانع لغزش پانتوگراف روی هادی تماس می شود. این امر سطح تماس جاروبک و هادی تماس را کم و بر نوسانات و فواصل هوائی در طول حرکت می افزاید. در اثر ایجاد قوس الکتریکی مداوم مابین هادی تماس و پانتوگراف هر دو گرم شده و هادی تماس در اثر گرم شدن شکل خود را از دست می دهد.

٤-١-١-٢- فنر پانتوگراف

از آنجاکه پانتوگراف باید در سطح یکنواخت از ریل قرار گرفته باشد تا با نیروی ثابت در تماس دائم با شبکه برق بالاسری باشد، استفاده از فنر های با صلبیت یکنواخت اهمیت پیدا می کند . مدول صلبیت فنر پانتوگراف و صلبیت خمشی آن باید برای تمام بازوها یکسان باشد. شکل٤-٥ فنر پانتوگراف را نشان می دهد.

شکل٤-٥- فنر پانتوگراف

٤-١-٢- ویژگی های پانتوگراف :

١. در تماس دائم با شبکه بالاسری باید باشد تا انرژی الکتریکی مورد نیاز لکوموتیو را به صورت یکنواخت تامین کند.
٢. باید کمترین ارتعاش را در حرکت داشته باشد
٣. نباید سیم تماس را خراش دهد و همچنین نباید سایش بیش از حد ایجاد کند.
٤. باید مقاومت آیرودینامیکی پایینی داشته باشد.

باید پانتوگراف مطابق با سرعت حرکت قطار انتخاب شود تا کیفیت مورد نیاز جهت جمع آوری جریان را از شبکه بالاسری تامین کند.

۵. باید در ارتفاع یکنواخت از سطح ریل قرار بگیرد. برای بهینه کردن در جمع آوری جریان و کیفیت قدرت آن باید مدول صلبیت فنر پانتوگراف و صلبیت خمشی آن باید برای تمام بازوها یکسان باشد.

٦. باید مقاوم به حرارت، خوردگی و ارتعاش را به همراه اینکه قابلیت اعتماد و عمر عملیات مناسبی را داشته باشند، را حفظ کنند.

شکل ٤- ٦ موقعیت پانتوگراف نسبت به هادی تماس را نشان می دهد

٤-١-٣- انواع سازه پانتوگراف از لحاظ شکل ظاهری :

أ- تک بازویی[1]

ب- دو بازویی[2]

ت- بالی شکل[3]

٤-١-٣-١- پانتوگراف تک بازویی

پانتوگراف تک بازویی مطابق شکل ٤-٧ دارای یک بازو است که با خم شدن آن تیغه پانتوگراف پایین و با باز شدن آن تیغه بالا می رود. این نوع پانتوگراف به صورت سنتی در اروپا استفاده می شود و در ژاپن به صورت افزاینده ای در حال استفاده است و بیشتر در شبکه برق رسانی AC کاربرد دارد. چون توانایی کشیدن جریان الکتریکی کمی را دارد و استفاده آن در شبکه DC از نظر تکنیکی درست نیست.

آن چه موجب استفاده گسترده از پانتوگراف تک بازویی می شود، نیروی کم مورد نیاز برای برای بلند شدن پانتوگراف است. در صورت خرابی پانتوگراف جلویی از پانتوگراف عقبی استفاده می شود.

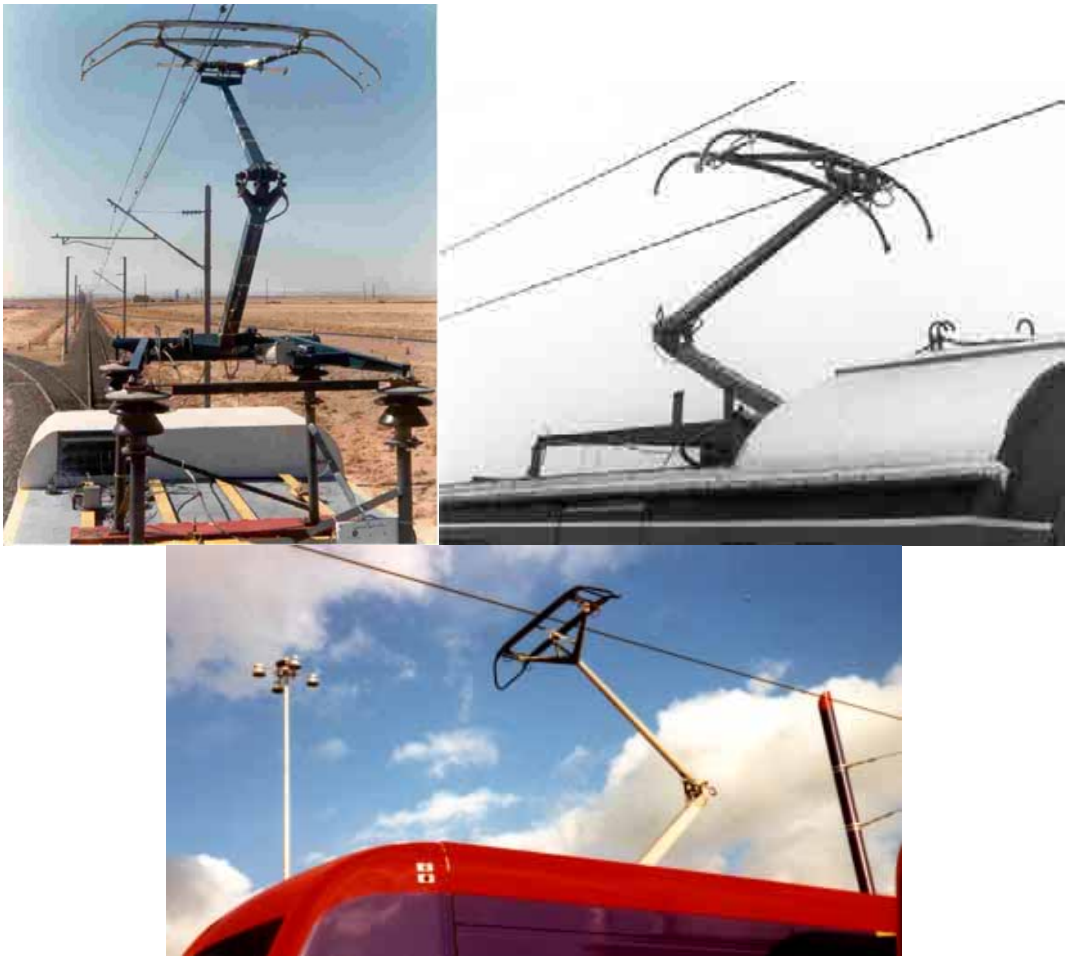
٤-١-٣-٢- دو بازویی (<>)

پانتوگراف دو بازویی مطابق شکل ٤-٨ دارای دو بازوی مقابل هم است که بصورت آکاردئونی باز و بسته می شود.

این نوع پانتوگراف بصورت گسترده در راه آهن ژاپن استفاده می شود. Strip (نواری که در تماس با شبکه بالاسری است و بر روی پایه ای به نام Collecter Shoe تثبیت شده است.) در هنگامی که تحت سایش قرار می گیرد قابل تعویض است. این پانتوگراف معمولا در شبکه برق رسانی DC بیشتر استفاده می شود.

---

[1] Single – arm
[2] Diamond
[3] Wing



شکل ٤- ٦ – موقعیت پانتوگراف نسبت به هادی تماس

٤-١-٣-٣- بالی شکل

این نوع پانتوگراف برای کاهش سر و صداهای تولید شده در قطار های پر سرعت است که در حال حاضر در قطار های شینکاسن استفاده می شود. شکل ٤-٩ پانتوگراف بالی شکل را نشان می دهد.

آنچه که موجب تفاوت در سیستم مکانیکی این مدل با مدل تک بازویی است، وجود دو سیلندر به همراه سیستم فنر بندی دو تایی است.

پانتوگراف دایموند به دلیل وجود دو فنر و افزایش سختی, سیستم می تواند نیروی بیشتری اعمال کند.

و از آنجاکه پانتوگراف دایموند شکل دارای دو بازو می باشد نیروی لازم برای بلند کردن پانتوگراف بین دو بازو تقسیم و در واقع بین دو سیلندر که نیرو را وارد میکنند تقسیم می شود.

به طور کلی ایجاد سر و صدا[1] در قطار های پرسرعت ناشی از دو عامل است :

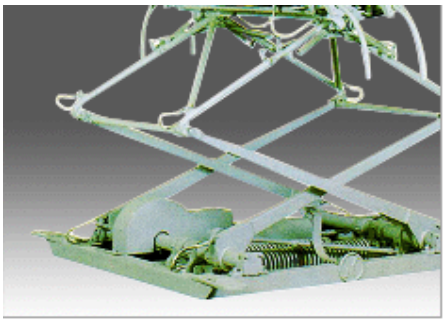
[1] Noise

۱. سرو صدای ناشی از غلتش[1] -که در این نوع شدت نویز با توان دو سرعت نسبت مستقیم دارد. این مشکل بیشتر در هنگامی که قطار وارد تونل می شود بیشتر آشکار می شود. این نوع از نویز با تصحیح شکل آیرودینامیکی قطار تا حدودی بهبود یافته است به صورتی که سطح تماس برخورد جریان هوا را با قطار را کاهش داده اند.

۲. سرو صدای ناشی ازبرخورد هوا با پانتوگراف- که در این نوع نیز شدت نویز با افزایش سرعت نسبت افزایش می یابد

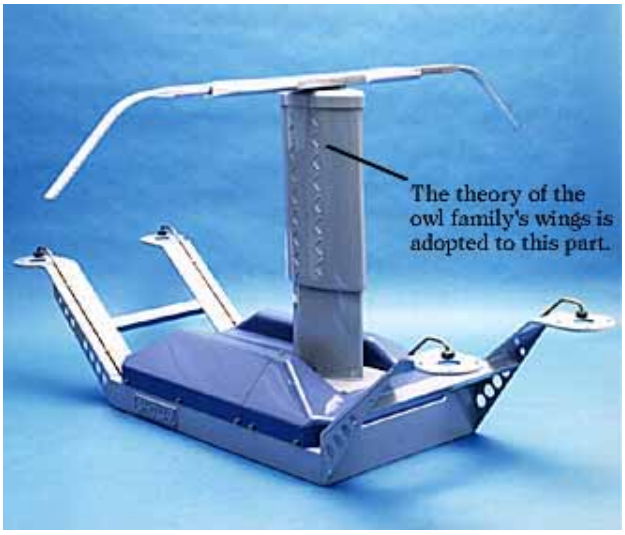
برای جلوگیری از این پدیده از تکنیک بکار رفته در بال عقاب استفاده شد. این پرنده هنگام پرواز سر و صدای کمتری نسبت به دیگر پرندگان تولید می کند. با بررسی به شکل بال عقاب دلیل این موضوع را کاهش جریان های گردابی هوا در اطراف بال پرنده توجیه کردند و سعی نمودند با تغییر در شکل پانتوگراف و با گذاشتن مستطیل های نازک و موازی مشابه با شکل بال عقاب در رو به روی هم موجب کاهش سر و صدا شوند.

شکل ٤-٧- پانتوگراف تک بازویی Single – arm (>)

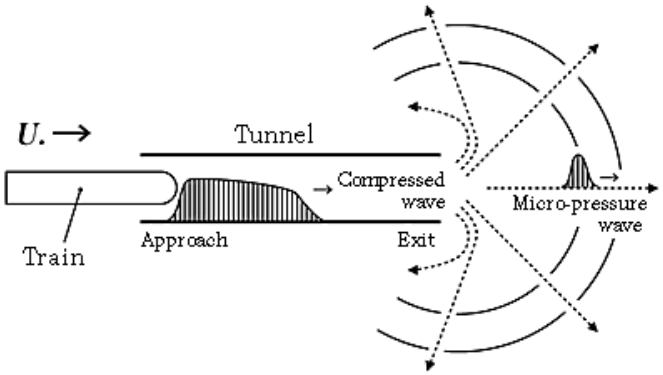


شکل ٤-٨ - پانتوگراف دو بازویی Diamond (<>)

[1] Rolling Noise



شکل ٤-٩- پانتوگراف بالی شکل



شکل٤-١٠- مقاومت هوا در تونل با تاثیر آیرودینامیکی قطار

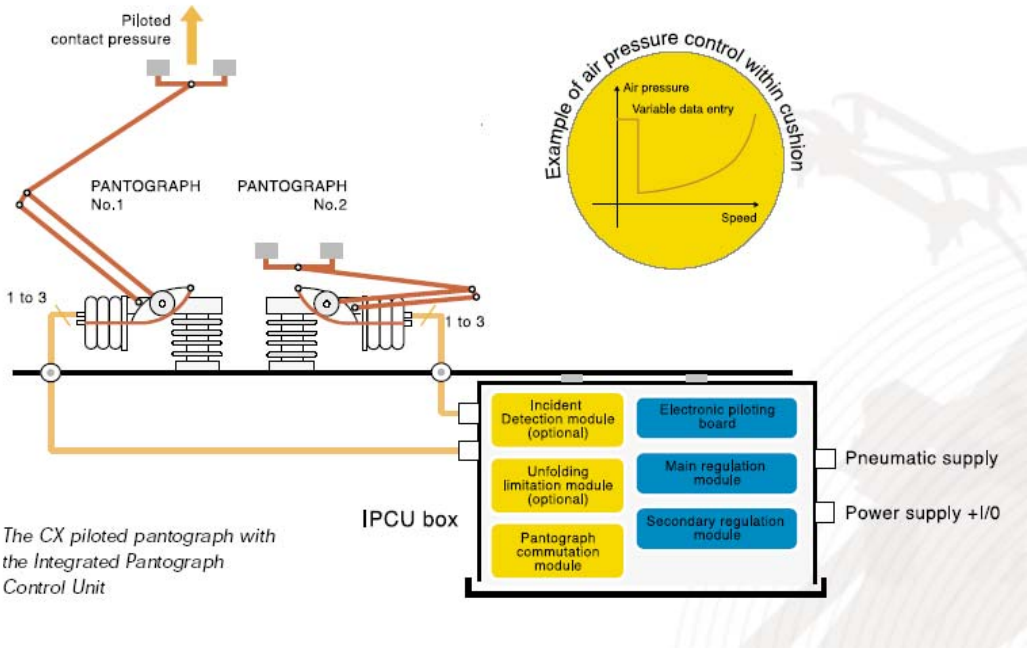
٤-١-٤- مشخصات چند نوع پانتوگراف

٤-١-٤-١- سیستم پانتوگراف هدایت شده[1] مدلCX

پانتوگراف باید با چندین متغیر عملیاتی (سرعت قطار، نوع سیستم برق رسانی، وضعیت پانتوگراف بر روی وسیله نقلیه ریلی وجهت حرکت وسیله ریلی و...) کنترل شود. لذا سیستم پانتوگراف کنترل شونده برای بهبود عملکرد شبکه پیشنهاد شده است. این سیستم رنج وسیعی از وسایل نقلیه ریلی را پوشش می دهد. به عنوان مثال می توان EMU های با سرعت 250 km/h و حتی سرعت های بالاتر را پوشش می دهد. شکل ٤-١١ ساختمان ظاهری و شکل ٤-١٢ بلوک دیاگرام مدار این نوع پانتوگراف را نشان می دهد

[1] The piloted pantograph system

شکل ٤-١١ ساختمان ظاهری پانتوگراف CX

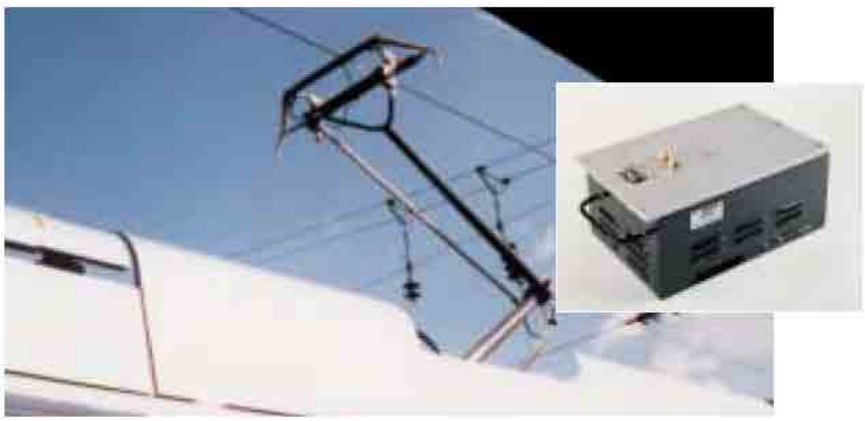


The CX piloted pantograph with the Integrated Pantograph Control Unit

شکل٤-١٢- بلوک دیاگرام پانتوگراف مدولار CX

در این مدل فعال کننده نیوماتیکی پانتوگراف به یک کنترل کننده (IPCU) متصل شده است که روی سقف لکوموتیو نزدیک پانتوگرافی که هدایت می شود قرار گرفته است. سیستم IPCU برای هـدایت بـیش از دو پانتوگراف مستقل (البته نه به صورت هم زمان) طراحی شده است و همچنین شامل یک مدول تنظیم کننـده دیجیتالی اصلی و یک مدول مخابراتی پانتوگراف است.

وقتی دستور مبنی بر بالا بردن پانتوگراف دریافت شد، مدار نیوماتیکی فشار وارد می کند و پانتوگراف مـورد نظر توسط رگلاتور فشار فعال شده بالا برده می شود. و در زمانیکه فرمان بالا بردن قطع شود، پانتوگراف به صورت اتوماتیک پایین می آید. IPCU می تواند میزان نیـروی بـین هـادی تمـاس و پـانتوگراف را کنتـرل نماید. شکل ٤-١٣ IPCU این پانتوگراف را نشان می دهد.



The ergonomic IPCU block is housed under the roof near the pantograph

شکل ٤-١٣- IPCU پانتوگراف CX

٤-١-٤-٢- پانتوگراف مدل-LX

این سیستم هم مشابه با سیستم CX می باشد. این سیستم هم مدولار می باشد و تک بازویی است. سازه آن فولادی است و جنس نوار جاروبک آن کـربن و مـس مـی باشـد. و همچنـین قابلیـت جمـع آوری جریـان الکتریکی تا سرعت سیر 160 km/h را دارد. شکل ٤- ١٤ این نوع پانتوگراف را نشان می دهد

٤-١-٤-٣- پانتوگراف لکوموتیو های TM1 (خط تهران کرج)

لکوموتیو های TM1 مجهز به پانتوگراف تک بازویی می باشند. این دستگاه که از یک جک هوایی، فنـر و آلات مکانیکی تشکیل شده است، به وسیله فشار هوا و نیروی فنر با شبکه بالاسری تمـاس برقـرار کـرده و جریان مورد نیاز لکوموتیو را از شبکه جمع آوری می کند. با فعال نمودن کلیـد پیـانویی پـانتوگراف هـوای فشرده به جک مربوط به فنر پانتوگراف راه یافته و باعث آزاد شدن فنر می شـود و بـه وسـیله نیـروی فنـر، پانتوگراف به شبکه برق بالا سری متصل می شود و در هنگام قطع کلید پانتوگراف و مسـدود نمـودن مسـیر

هوای فشرده، فنر جمع شده و به وسیله جک پانتوگراف از شبکه برق بالاسری جدا می شود. پـانتوگراف بـا ایزولاتوری بالای لکوموتیو نصب شده است و حداقل فشار هوای لازم برای بـالابردن آن جهـت اتصـال بـه شبکه برق بالا سری 400 Kpa می باشد. جدول ٤-١ مشخصات فنی این پانتوگراف را نشان می دهد.

شکل ٤-١٤ - پانتوگراف LX در دو حالت بالا و پایین

جدول ٤-١: مشخصات فنی پانتوگراف لکوموتیو های TM1

ولتاژ عملکردی	25 kv
جریان عملکردی	630 A
فشار تماس با شبکه	90 +/- 10 N
فشار هوا	700 kpa
ارتفاع کاری	500 – 2250 mm
ماکزیمم ارتفاع (بالا رفتن کامل)	2600 mm
ارتفاع تا شده	228 mm
طول کل پانتوگراف	2085 mm
طول لغزنده پانتوگراف (ذغال ها)	1250 mm
زمان بالا رفتن پانتوگراف از ۰ تا 1.8m	6 – 8 s
زمان پایین آمدن پانتوگراف از 1.8 m تا ۰	5 – 7 s

٤-١-٤-٤- پانتوگراف مدل EL-YP200G

شکل ٤-١٥ نمای ظاهری و جدول ٤-٢ مشخصات این نوع پانتوگراف را نشان می دهند.

شکل ٤-١٥ نمای ظاهری پانتوگراف مدل EL-YP200G (٢٠٠ km/hr)

جدول ٤-٢ مشخصات پانتوگراف مدل EL-YP200G (٢٠٠ km/hr)

Model		EL-YP200G
Catenary method		Simple catenary line , rigid body wire
Catenary current		AC 25,000V
Rated voltage		700A
Operating method		Single Arm type. ascending air, self weight descending
Operating air pressure		5.0 ~ 8.0kgf/cm² (standard 5.5kgf/cm²)
Uplift force		.0 ± 0.5kgf (standard value : 7.0kgf)
Pantograph Height	Folded height	555 ± 10mm
	Minimum height	185mm
	Standard height	2400mm
	Maximum height	2500 ± 50mm
Weight		Approximately 120 ± 10kg
Ambient Temperature		-25 ~ 40
Operating speed		200km/hr

٤-١-٤-٥- یک نمونه پانتوگراف خطوط سریع السیر

شکل ٤-١٦ نمای ظاهری و جدول ٤-٣ مشخصات این نوع پانتوگراف را نشان می دهند.

شکل ٤-١٦ نمای ظاهری پانتوگراف قطار سریع السیر(٣٥٠ km/hr)

جدول ٤-٣ مشخصات پانتوگراف قطار سریع السیر(٣٥٠ km/hr)

Catenary method		Simple catenary line
Catenary voltage		AC 25,000V
Rated current		500A (Peak : 1000A)
Operating method		Single Arm type. ascending air, descending spring
Operating air pressure		4.5 ~ 6.5kgf/cm² (standard 5.5kgf/cm²)
Uplift force		7.0 ± 0.5kgf (standard value: 7.0kgf)
Pantograph Height	Folded height	0mm
	Minimum height	100mm
	Standard height	2500mm
	Maximum height	2700mm
Weight		Approximately 120 ± 10kg
Ambient Temperature		-25 ~ 40
Operating speed		350km/hr

٤-٢- ترانسفورماتور اصلی

در شبکه های با ولتاژ متناوب معمولا ولتاژ شبکه بسیار بیش از مقادیر قابل استفاده برای تراکشن موتورها و سیستم کنترل آنها است. ترانسفورماتور اصلی وظیفه کاهش سطح ولتاژ شبکه به مقادیر قابل استفاده در مدار کنترل تراکشن موتور را بر عهده دارد.

سیم پیچ اولیه این ترانسفورماتور بین شبکه بالاسری (از طریق پانتوگراف) و مسیر برگشت جریان (از طریق بوژی، چرخ و ریل) قرار می گیرد بنا براین ولتاژ نامی اولیه برابر ولتاژ شبکه بالاسری است. این ترانسفورماتور معمولا بیش از یک خروجی دارد. با توجه به اینکه ممکن است هر تراکشن موتورها دارای سیستم کنترل خود باشد می توان بر حسب طرح بکار رفته کلیه مدارهای کنترل را با هم سری یا موازی نمود و مجموعا توسط یک سیم پیچ خروجی ترانسفورماتور تغذیه نمود. در طرح دیگر ممکن است مدارهای کنترل به دو یا بیشتر دسته تقسیم و توسط سیم پیچهای خروجی مستقل از ترانسفورماتور اصلی تغذیه شوند. در اینصورت ممکن است تعداد خروجیها تا تعداد تراکشن موتورها افزایش یابد.

علاوه بر خروجیهای مورد نیاز برای مدار کنترل تراکشن موتورها، ترانسفورماتور اصلی دارای یک یا چند خروجی برای تغذیه مدارهای سیستمهای کمکی است.

٤-٣- سیستمهای کمکی

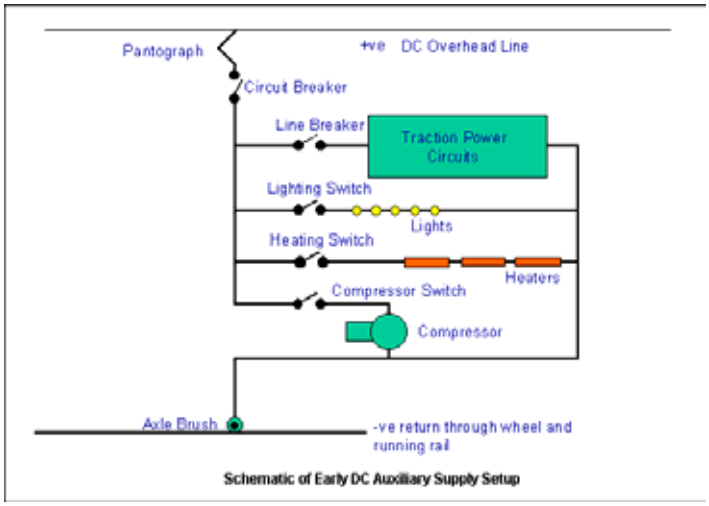
در قطارهای مسافری جهت رفاه و ایمنی مسافران باید خدمات و امکانات زیادی باید مهیا گردد که تقریبا تمام آنها احتیاج به انرژی الکتریکی دارند.

برای تامین انرژی الکتریکی در یک قطار دو سطح ولتاژ فشار قوی (HV) و فشار ضعیف (LV) بکار می رود. ولتاژ فشارقوی برای تامین نیروی کشش و نیز انرژی ورودی سیستم کمکی بکار می رود. ولتاژ فشار ضعیف برای تغذیه مدارهای کمکی مانند سیستم روشنایی، هواساز، شارژر باتریها، مدار کنترل و ... بکار می رود. استفاده از یک سطح ولتاژ مشترک برای سیستم کمکی و کشش غیر ضروری است و منجر به افزایش هزینه ها و کاهش ایمنی می گردد.

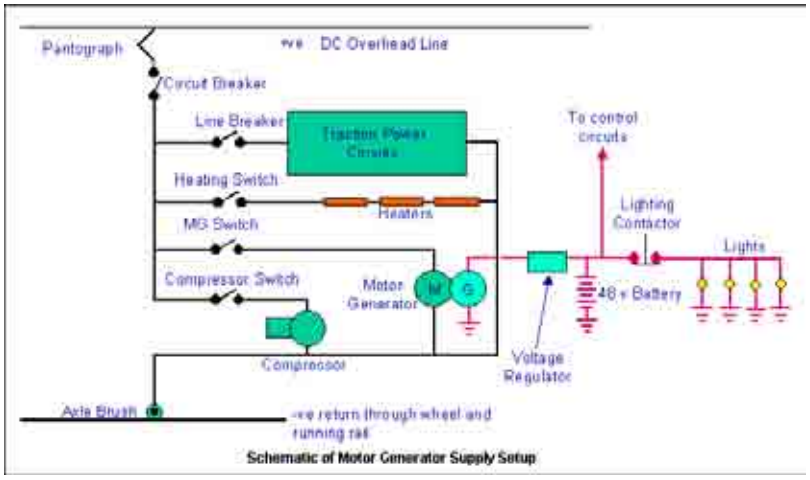
در گذشته برای تامین انرژی الکتریکی مدار کمکی در قطارهای برقی از ولتاژ تغذیه قطار استفاده می شد و برای کاهش سطح ولتاژ بارهای یکسان در مدار کمکی با هم سری می شدند. شکل ٤-١٧ مدار الکتریکی چنین سیستمی را با ولتاژ مستقیم نشان می دهد.

در اواسط دهه ٣٠ ژنراتورهای جریان مستقیم در قطارهای برقی بکار گرفته شد. که استفاده از ولتاژ کمتر و در نتیجه سیم کشی سبکتر و نیز حذف سیم کشی سری را ممکن ساخت. معمولا مطابق شکل ٦-١٨ ژنراتور توسط یک موتور الکتریکی به حرکت در می آمد. در دهه ٦٠ ژنراتورهای جریان متناوب جایگزین ژنراتورهای جریان مستقیم شدند

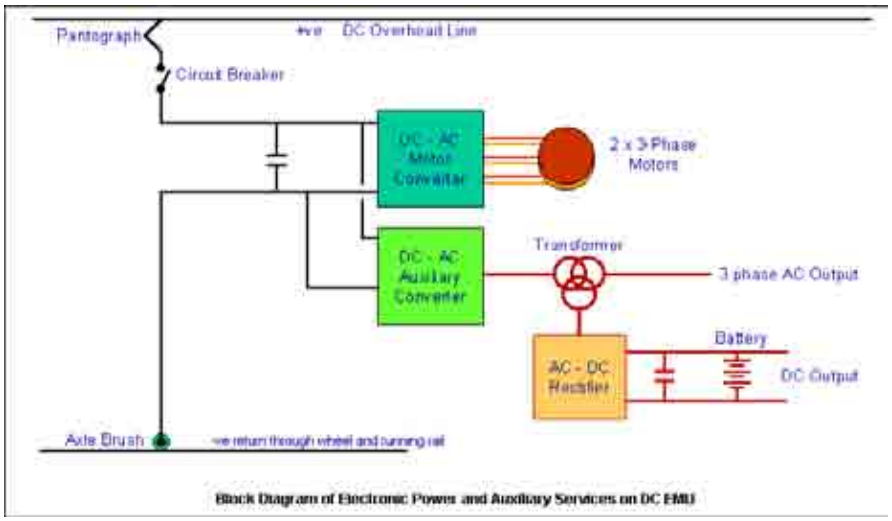
با پیشرفت تکنولوژی نیمه هادی ها، در لکوموتیوهای امروزی از مبدلهای الکترونیکی مطابق شکلهای ٦-١٩ و ٦-٢٠ برای تامین ولتاژ مدارهای کمکی استفاده می شود. شکل ٦-١٩ مدار مبدل الکترونیکی را در ولتاژ تغذیه مستقیم و شکل ٦-٢٠ مدار مبدل الکترونیکی را در ولتاژ تغذیه متناوب نشان می دهند.



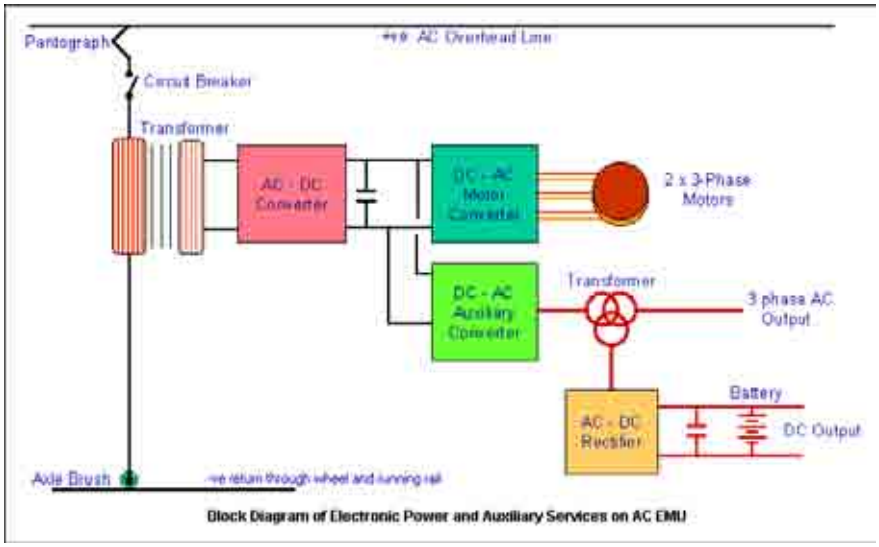
شکل ٤–١٧ مدار الکتریکی تغذیه مدارکمی با استفاده از تغذیه اصلی با ولتاژ مستقیم



شکل ٤–١٨ – سیستم موتور و ژنراتور جریان مستقیم برای تغذیه مدار کمکی



شکل ٤–١٩ – سیستم تغذیه مدار کمکی با استفاده از مبدل الکترونیکی در تغذیه مستقیم



شکل ٤-٢٠ – سیستم تغذیه مدار کمکی با استفاده از مبدل الکترونیکی در تغذیه متناوب

٤-٤- تراکشن موتور

یکی از مهمترین قسمتهای لکوموتیو تراکشن موتور است. در گذشته به علت سهولت کنترل دور موتورهای جریان مستقیم و گشتاور بالای موتورهای جریان مستقیم سری از این نوع موتورها به عنوان تراکشن موتور برای تامین نیروی کشش قطار استفاده می شد. پیشرفت های اخیر در الکترونیک قدرت امکان کنترل بهینه موتور های AC و بهبود چسبندگی و نیروی کشش را می دهد. این امر بوسیله کنترل میکروپروسسوری انجام می گیرد. در این روش تمامی جزئیات عملکرد لکوموتیو شامل لغزش چرخ ها ، نمایش عملکرد موتور و رفع عیوب کاملا کنترل می گردد.

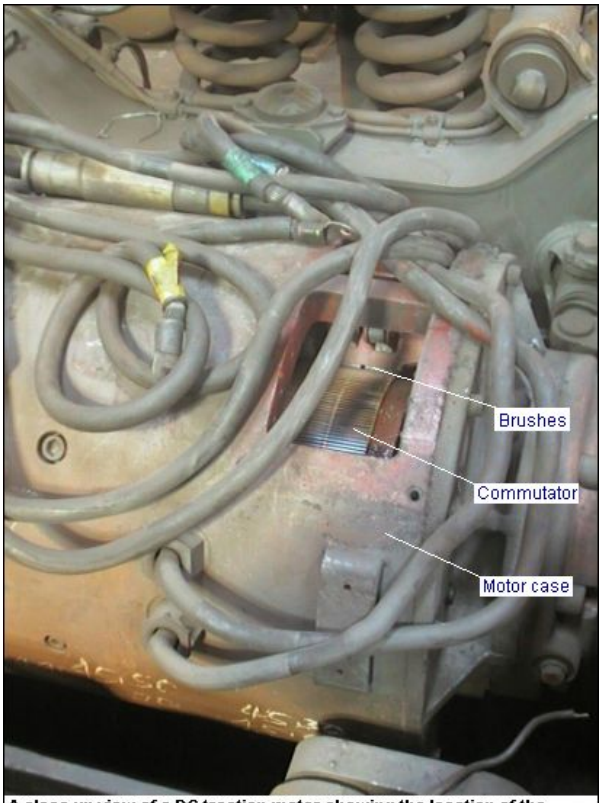
تراکشن موتورهای AC و DC از جهات زیر با هم متفاوتند

الف- قدرت: از نظر ساختمان چون روتور ماشین های آسنکرون از نوع قفس سنجابی بوده و موتور های سری سیم پیچی هستند لذا نوع القائی تحمل جریان بالاتری را دارد و نسبت توان بر وزن موتور القائی نیز بیشتر می باشد.

ب- ساختمان : موتور های AC ساخت ساده تری دارند و فاقد جاروبک یا هر ارتباط الکتریکی دیگر بین رتور و استاتور هستند، به علاوه در یک موتور AC آرمیچر می تواند به جای سیم پیچ های حجیم از ورقه های فولادی ساخته شود. در نتیجه این موتور ها در قدرت برابر، دارای ساختمان ساده تر و سبک تر از نوع DC خواهند بود.

ج- تعمیر و نگهداری: به علت نداشتن کموتاتور و جاروبک و ذغال در موتور AC بر خلاف موتور DC نیاز چندانی به سرویس مرتب در موتور القائی نمی باشد و با توجه به پوشش مناسب نفوذ گرد و خاک به

سختی وارد آن می شود و چون سیم پیچی یکپارچه می باشد لذا گسستگی سیم پیچی هم رخ نخواهد داد.
تعمیرات موتور های AC بسیار راحت تر است و این موتور ها عموما عمر بالاتری نیز دارند.



A close up view of a DC traction motor showing the location of the commutator and brushes.

شکل ٤-٢١- تراکشن موتور جریان مستقیم

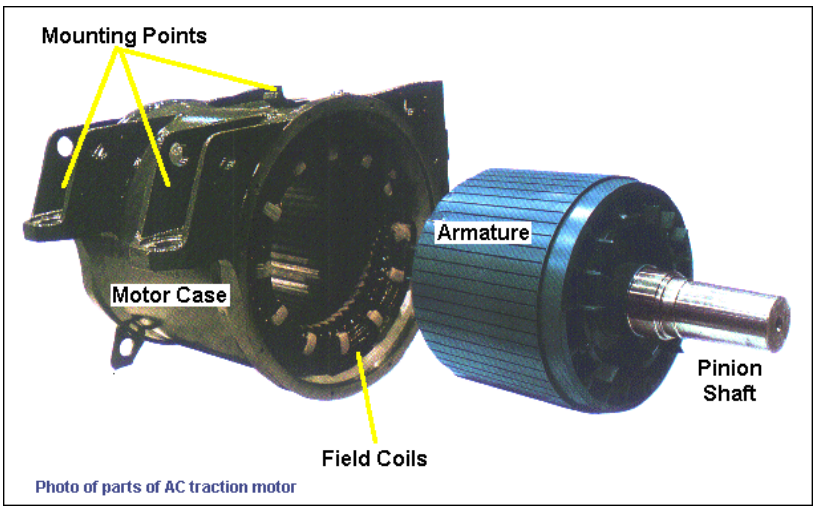


Photo of parts of AC traction motor

شکل ٤-٢٢- تراکشن موتور آسنکرون سه فاز

د- کنترل سرعت : کنترل سرعت در موتور های DC ارزانتر از موتور های القائی می باشد با قرار دادن رئوستا این امکان به راحتی وجود خواهد داشت. ولی به علت استفاده ار سوئیچینگ و مدارات الکترونیکی کنترل سرعت سریع تر بوده و جلوگیری از تلفات انرژی را هم در بر خواهد داشت.

ه- کنترل ضریب چسبندگی و لغزش : چنانچه برای هر یک از موتور های القائی یک اینورتر مستقل اختصاص دهیم در این صورت سرعت موتور وگشتاور و ولتاژ روی آن به طور پیوسته برای هریک از موتور ها قابل کنترل بوده و به راحتی و به سرعت با مقایسه سرعت هریک از موتور ها با سرعت خطی قطار، از طریق رادار و پدیده دوپلر قابل اندازه گیری است. هم چنین می توان با کنترل زوایای سوئیچینگ المان های نیمه هادی ها سرعت و گشتاور و ضریب چسبندگی را کنترل نمود این امر باعث شده تا ضریب چسبندگی در وسائط نقلیه با تراکشنAC نسبت به نوع DCهمواره بیشتر باشد. در موتور DC کنترل لغزش عمدتا از طریق الکترو مگنتیکی انجام می شود و از آنجا که سیستم های مکانیکی دارای تاخیر زمانی بیشتری هستند بنابر این حتی بهترین کنترل در آنها نیز با تاخیر همراه خواهد بود و اثرات آن کاهش پیدا خواهد کرد.

از سوی دیگر در این موتور ها در حالت وجود لغزش در یک یا چند محور، بسته به مقدار لغزش ، توان کل سیستم برای ممانعت از عمل لغزش کاهش پیدا می کند . در حالیکه در سیستمهای AC فقط توان در محوری که لغزش می کند کنترل می شود و حتی در صورت کاهش توان در یک محور ، توان دیگر محور ها به همان مقدار افزایش پیدا می کند تا مانع از کاهش توان گردد و این راندمان کلی لکوموتیو را افزایش می دهد.

لازم به ذکر است علاوه بر موارد فوق چون موتور AC قابلیت تحمل جریان های بالاتری را دارد لذا امکان راه اندازی با جریان های بالاتر نیز برایش ممکن بوده و عملا در حالت راه اندازی ضریب چسبندگی بیشتری را تامین خواهد کرد.

و- ترمز دینامیکی: ترمز دینامیکی در موتور های DC در سرعت های پایین کم اثر بوده و فقط تا یک محدوده خاصی از سرعت مفید و موثر می باشد. در حالیکه در موتور های AC این محدوده عملا وجود نداشته و می توان حتی با ترمز دینامیکی در شیب به حالت توقف کامل رسید. زیرا طبق منحنی گشتاور – سرعت موتور القائی ، حتی در سرعت های نزدیک صفر نیز روی محور روتور گشتاور نسبتا زیادی می توان وارد کرد. این امر در مورد فراز نیز صادق است و میتوان به راحتی بدون استفاده از ترمز معمولی قطار را نیز به حالت توقف کامل در آورد و از فرار احتمالی قطار در صورت بروز ایراد در سیستم ترمز جلوگیری کرد.

از طرفی ترمز دینامیکی در یک محدوده ای از سرعت در بیشترین مقدار خود بوده کاهش نمی یابد و پس از آن محدوده شروع به کاهش می کند، در حالیکه در موتور های DC فقط در یک سرعت خاص حداکثر مقدار ترمز قابل دسترسی بوده و پس از آن قدرت ترمز کاهش می یابد.

در حالت DC برای تبدیل از حالت عادی به حالت ترمز دینامیکی نیاز به مدارات قدرت (توان بالا) می باشد، ولی این امر در سیستم AC به کمک مدارات کنترل فشار ضعیف به راحتی امکان پذیر است.

ز- تغییر جهت موتور: در حالت DC باید از کنتاکتور در مسیر جریان اصلی که جریان بسیار زیادی است برای تعویض جهت جریان میدان یا روتور استفاده کرد که نیاز به تعمیر و نگهداری دارد. در حالی که در حالت AC به کمک مدارات کنترل می توان تغییر جهت داد و نیازی به مدار قدرت نمی باشد.

ح- بازده: در سرعت های پایین راندمان موتور DC کمتر از AC است و با افزایش سرعت این اختلاف کاهش می یابد. ولی در مجموع به علت امکان کنترل های بهینه تر روی لکوموتیو های با کشش AC از لحاظ راندمان کلی و همچنین مصرف سوخت ، این نوع نسبت به نوع با کششDC ارجحیت زیادی دارد.

ط- هزینه: از نظر سرمایه گذاری اولیه و پایه هزینه سیستم AC و مدارات آن بیشتر از سیستم DC می باشد ولی از نظر هزینه جاری و کلی ، هزینه سیستم AC در طول عمر وسیله نقلیه کمتر از سیستم DC بوده و در مجموع بازدهی بیشتری دارد. این امر در قطار های برقی به نحو جالبی تغییر می کند. بدین ترتیب که در حالت با تراکشن AC قیمت تمام شده ۳۰درصد کمتر از نوع با کششDCمی باشد.

ی- مصرف شن: با توجه به سیستم های پیشرفته کنترل لغزش در حالت AC لزوم استفاده از شن کاهش یافته و این مقدار حتی به کمتر از ۲۰درصد مصرف شن در حالت DC میرسد یعنی ۸۰ درصد صرفه جویی.

ک- مصرف سوخت: با توجه به استفاده بهینه تر از سوخت و همچنین جلوگیری از اتلاف آن با استفاده از سیستم های کنترل جدید، مصرف سوخت برای هر دو نوع کاهش یافته است. اما به علت آن که در حالت AC کنترل بیشتری بر روی ترکشن ها امکان پذیر است، مصرف سوخت کاهش بیشتری را نشان می دهد.

ل- **تکنولوژی جدید:** با توجه به این که موتورAC وابستگی کاملی به تکنولوژی ساخت عناصر نیمه هادی و مبدل های استاتیک دارد و این تکنولوژی نیز روز به روز در حال پیشرفت می باشد، لذا کاربرد موتور AC با علم روز به جلو حرکت می کند و پیوسته بر کارایی آن افزوده شده ، از حجم متعلقات آن کاسته می شود.

م- استفاده از انرژی ترمز دینامیکی برای مصرف داخلی : در لکوموتیو های دیزل الکتریک با کشش AC، با استفاده از تکنولوژی GTO و اینورتر های مناسب می توان انرژی تولید شده در حالت ترمز دینامیکی را به مصارف داخلی رساند و اگر این انرژی زیادتر از حد مورد نیاز باشد با یک کلید مقاومت دینامیکی را نیز

وارد مدار کرد. البته این امر در مورد تراکشن های DC هم امکان پذیر است ولی نیاز به مدارات کنترلی جداگانه ای دارد.

ن- توان و نیروی کشش : به علت امکان کنترل پیوسته جریان ، ولتاژ و فرکانس در اینورتر ها ، عملا برای دو سیستم DC, AC با توان مشابه، کشش حالت AC بیشتر خواهد بود.

س- خوردگی چرخ ها: نتایج عملی نشان می دهد که خوردگی چرخ ها در سیستم AC نسبت به سیستم DC کمتر می باشد.

ف- صدمه به محور و چرخ: با توجه به این که وزن موتور DC نسبت به موتور AC معادل بیشتر می باشد، بنابراین در هنگام نوسانات عمودی لکوموتیو، ضربات وارده از طرف موتور به محور حامل آن و همچنین به خط زیاد بوده و عمر مفید محور و خط را کاهش خواهد داد

به طور خلاصه در موتور های AC :

- به علت حذف کلکتور و جاروبک عمر موتور بیشتر است
- جاروبک و نگهدارنده آن و کموتاتور که نیاز به بازدید ، تعمیر ، تنظیم یا تعویض داشته باشند. لذا هزینه بهره برداری و نگهداری کمتر است.
- تلفات حرارتی حاصل از مقاومت سیم پیچ ها پایین تراست
- وزن دوار کمتر است
- برای خنک کردن آن به تجهیزات کمتر نیاز است.

در واقع اولین مشکل تراکشن های DC هزینه ی بالای آنهاست که به علت ساخت و تعمیرات کموتاتور ایجاد می شود.

٤-٥ – تقسیم بندی لکوموتیوهای برقی

لکوموتیوهای برقی را می توان به صورتهای مختلف تقسیم بندی کرد، بر حسب تراکشن موتور بکار رفته در لکوموتیو می توان آنها را به دو دسته AC **و** DC تقسیم بندی کرد. همچنین برحسب ولتاژ تغذیه لکوموتیوها به دو دسته AC **و** DC تقسیم بندی می شوند.

در اینصورت لکوموتیوها به چهار گروه تقسیم می شوند

DC -DC- شبکه تغذیه DC تراکشن موتور DC

AC-DC- شبکه تغذیه AC تراکشن موتور DC

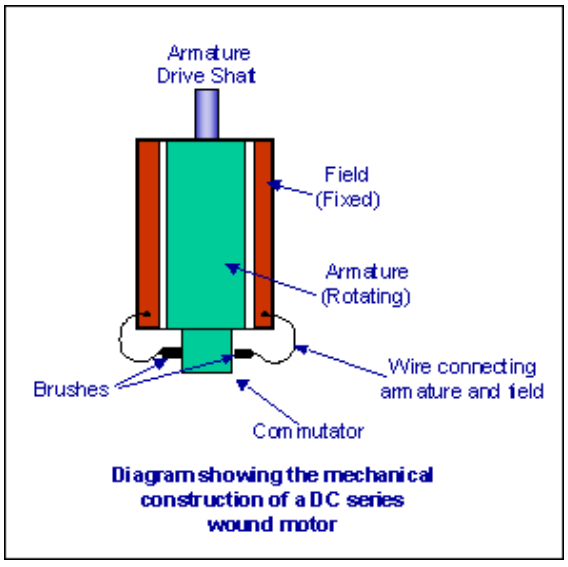
DC-AC- شبکه تغذیه DC تراکشن موتور AC

AC-DC-AC - شبکه تغذیه AC تراکشن موتور AC

٤-٥-١-لکوموتیو DC- DC –(شبکه تغذیه DC تراکشن موتور DC)

در این سیستم ولتاژ تغذیه DC و معمولا دارای سطح ولتاژ پایین (٥٠٠- ٧٥٠ ولت) است. سالیان درازی است که تراکشن موتور DC در لکوموتیوهای برقی و دیزل الکتریک بکار می رود. در لکوموتیوهای DC- DC نیز تراکشن موتور از نوع DC است. معمولا تراکشن موتورها دارای تحریک سری هستند. این اتصال در بعضی از حالات به شنت یا تحریک مستقل تبدیل می شود که بعدا به آن پرداخته خواهد شد. شکل ٤-٢٣ ساختمان ساده شده این موتور را با تحریک سری نشان می دهد.

این موتور در زمان راه اندازی گشتاور زیادی ایجاد می کند که می تواند منجر به لغزش گردد، از طرف دیگر جریان زیاد راه اندازی می تواند منجر به صدمه دیدن هادیها و تجهیزات در مسیر جریان منجر شود. جهت کنترل جریان و گشتاور در هنگام راه اندازی می توان از مقاومت سری استفاده نمود. همچنین با استفاده از مقاومت سری می توان ولتاژ موتور و در نتیجه دور موتور را کنترل نمود. روشهای دیگری نیز جهت کنترل ولتاژ و دور تراکشن موتور بکار می رود که عبارتند از:



شکل ٤-٢٣ ساختمان ساده شده تراکشن موتور جریان مستقیم با تحریک سری

٤-٥-١-١- مقاومت راه انداز

در هنگام شروع حرکت به علت عدم وجود نیروی ضد محرکه در تراکشن موتورها جریان راه اندازی بسیار بالا است. به علت این جریان زیاد گشتاور زیادی بوجود می آید که می تواند منجر به بروز لغزش گردد. جهت کاهش جریان راه اندازی می توان از مقاومتهای سری مطابق شکل ٤-٢٤ استفاده نمود. در این مدار هنگام راه اندازی همه کنتاکتها باز هستند. لذا با افزایش مقاومت سری مدار جریان راه اندازی کاهش می یابد. با دور گرفتن موتور جریان کاهش می یابد و می توان با بستن کنتاکتها این مقاومتها را اتصال کوتاه و در نتیجه مقاومت مدار را کاهش داد. تا در نهایت همه مقاومتها اتصال کوتاه شوند.

.

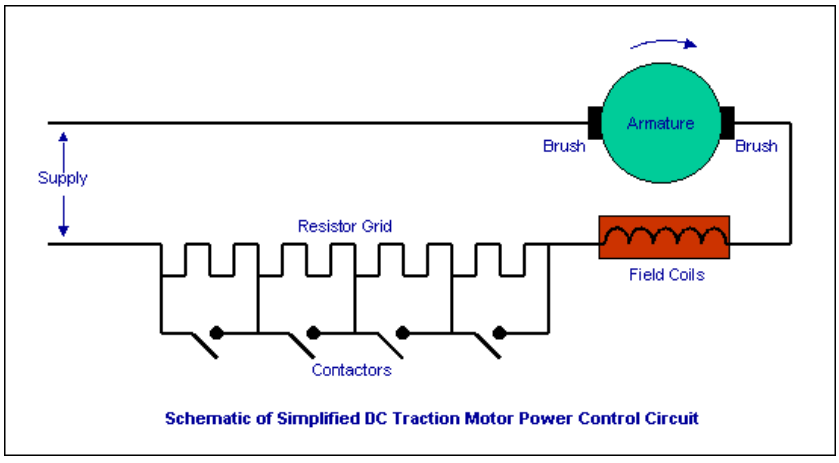
اصول محاسبه این مقاومتها مشابه روش محاسبه آهنها در موتورهای جریان مستقیم معمولی است با این تفاوت که در اینجا باید رفتار بار تراکشنی (لکوموتیو) در تغییرات جریان در نظر گرفته شود.

در گذشته مقاومتها بصورت دستی و توسط راننده اتصال کوتاه می شد اما در لکوموتیوهای جدید این کار توسط رله شتاب دهنده[1] انجام می شود.

٤-٥-١-٢- کنترل و حفاظت تراکشن موتور

همانطور که گفته شد مقاومتها توسط رله شتاب دهنده کنترل می شوند علاوه بر این رله، رله های دیگری برای حفاظت[2] تراکشن موتور استفاده می شوند.

از جمله رله هایی که در مدار تراکشن موتور بکار می رود رله اضافه بار است. این رله هر نوع اضافه بار را که بیش از بار قابل تحمل موتور باد شناسائی و مدار را توسط مدار شکن[3] قطع می کند.



شکل ٤-٢٤- مقاومتهای سری جهت کاهش جریان راه اندازی

[1] accelerating relay (often called a "notching relay")

[2] protection

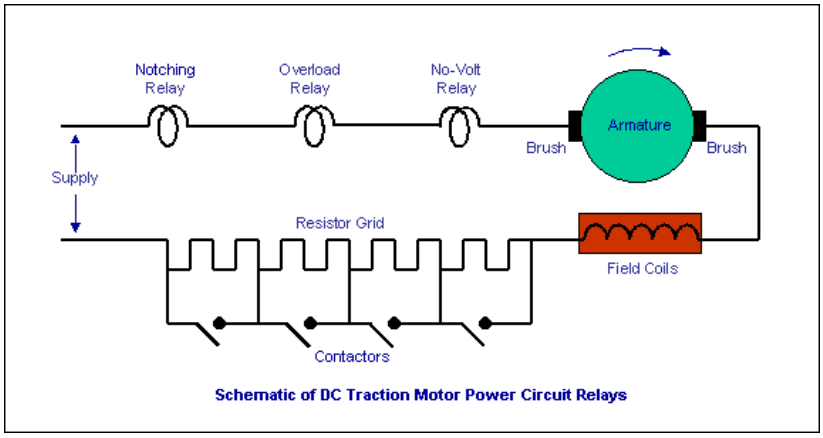
[3] circuit breaker

رله دیگری که در مدار تراکشن موتور بکار می زود رله قطع ولتاژ است. این رله در صورت قطع ولتاژ آن را تشخیص و مدار را قطع و همه مدار را دوباره در حالت راه اندازی قرار می دهد تا در صورت صدور دستور راه اندازی همه تجهیزات در حالت مناسب برای راه اندازی قرار داشته باشند. شکل ٤-٢٥ موقعیت رله ها را نسبت به موتور و مقاومتهای سری نشان می دهد.

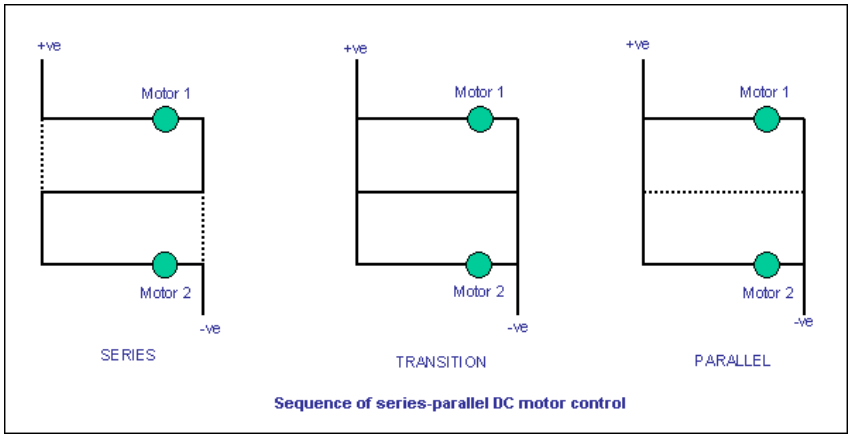
٤-٥-١-٣- کنترل سری موازی تراکشن موتورها

در این ترکیب بجای قرار دادن مقاومتهای سری جهت کاهش دور و ایجاد تلفات اضافی در مدار، مشابه آنچه در لکوموتیوهای دیزل الکتریک گفته شد می توان تراکشن موتورهای یک بوژی یا بوژی های مختلف را با هم سری یا موازی کرد. در هنگام راه اندازی تراکشن موتورها با هم سری شده و باعث کاهش جریان راه اندازی می شوند و پس از شتاب گیری موتورها بصورت اتوماتیک موازی می شوند. تغییر اتصال همچنین ممکن است با هدف کنترل دور و ولتاژ صورت گیرد. شکل ٤-٢٦ اتصال دو تراکشن موتور را در دو حالت سری و موازی و نیز حالت گذرا، هنگام انتقال از اتصال سری به موازی نشان می دهد. در هنگام تغییر وضعیت از سری به موازی جهت حفظ تداوم جریان، ابتدا تراکشن موتورها اتصال کوتاه شده و سپس تغییر اتصال می دهند. در تعداد زیادتر تراکشن موتور باز هم این سیستم مشابه شکل ٤-٢٦ قابل استفاده خواهد بود. شکل ٤-٢٧ مدار کامل کنترل لکوموتیو با استفاده از مقاومت و تغییر اتصال تراکشن موتورها را نشان می دهد.

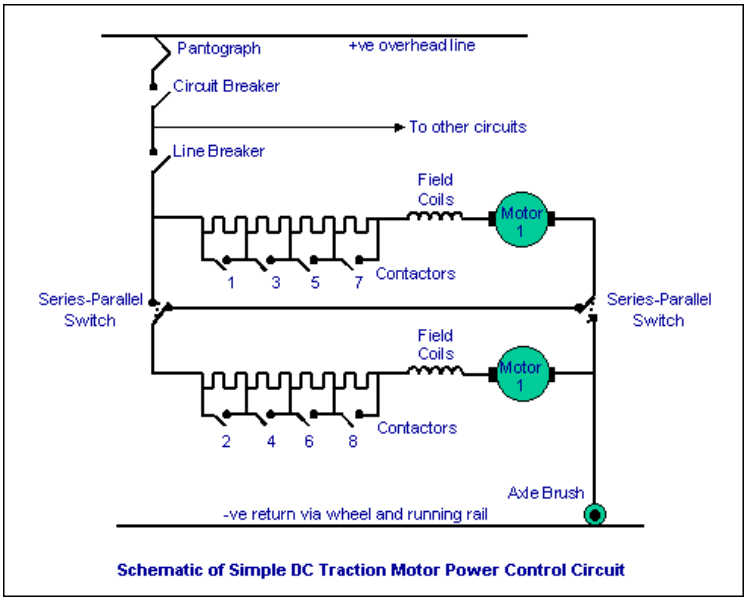
در این شکل هنگام راه اندازی همه تراکشن موتورها سری و کلید مقاومتها باز است در طی شتاب گیری لکوموتیو ابتدا مقاومتها بتدریج از مدار خارج می شوند (اتصال کوتاه می شوند) سپس تغییر اتصال تراکشن موتورها از سری به موازی رخ می دهد. جهت کنترل جریان در این مرحله کلیه مقاومتها به مدار بر می گردند (کلیدها باز می شوند) با شتاب گیری قطار بعد از تغییر وضعیت موتورها مجددا جریان کاهش یافته و مجددا مقاومتها از مدار خارج می شوند.



شکل ٤-٢٥ موقعیت رله ها را نسبت به موتور و مقاومتهای سری



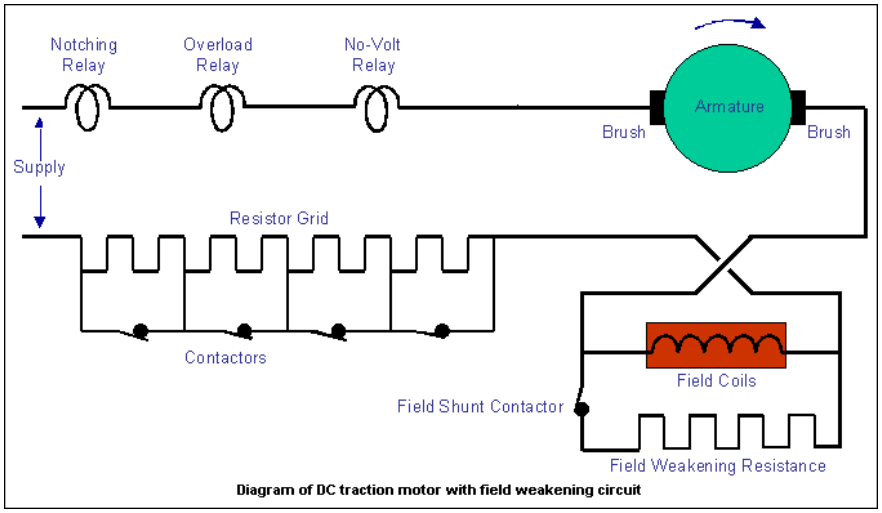
شکل ٤-٢٦- اتصال دو تراکشن موتور در دو حالت سری و موازی و هنگام انتقال از اتصال سری به موازی



شکل ٤-٢٧ مدار کامل کنترل لکوموتیو با استفاده از مقاومت و تغییر اتصال تراکشن موتورها

٤-٥-١-٤-تضعیف میدان

تراکشن موتور به گونه ای طراحی می شود که بتواند با سرعتی بیش از سرعت در زمان اتصال موازی و بدون مقاومت در مدار خود حرکت کند. برای این منظور از مقاومت شنت برای مدار تحریک استفاده می شود. با استفاده ار مقاومت شنت، قسمتی از جریان آرمیچر از این مقاومت گذشته و جریان تحریک کاهش و دور افزایش می یابد. شکل ٤-٢٨ مدار مقاومت شنت در یک تراکشن موتور سری را نشان می دهد.



شکل ٤-٢٨ مدار مقاومت شنت در یک تراکشن موتور سری

جهت کنترل دور در محدوده گسترده و نیز یکنواخت می توان عمل تضعیف میدان را طی مراحل متعدد انجام داد.

٤-٥-١-٥- چاپر جریان مستقیم[1]

در روش سنتی کنترل دور با استفاده از مقاومت سری انرژی زیادی در مقاومتها تلف می شداز طرف دیگر کنترل دور پیوسته نبود.. با پیشرفت الکترونیک صنعتی و عرضه تریستور[2] و GTO امکان استفاده از کلیدهای استاتیک در کنترل تراکشن موتورها مهیا شد. شکل ٤-٢٩ مدار الکتریکی یک لکوموتیو با چاپر تریستوری را نشان می دهد. در این شکل تریستور اصلی[3] نقش قطع و وصل کننده جریان را دارد و تریستور مدار کموتاسیون[4] به خاموش شدن آن کمک می کند.

این مدار با قطع و وصل ولتاژ DC فقط قسمتهایی برش خورده از ولتاژ تغذیه را روی موتور قرار می دهد. در نتیجه ولتاژ متوسط کاهش خواهد یافت. با افزایش زمان وصل تریستور در یک پریود مشخص سطح ولتاژ DC روی موتور افزایش می یابد. شکل ٤-٣٠ شکل موج ولتاژ روی تراکشن موتور را نشان می دهد.

هنگامیکه تریستور اصلی به حالت قطع می رود دیود هرز گرد[5] به علت اندوکتانس موتور و در نتیجه لزوم تداوم جریان در آن، برای گردش جریان در روتور یک مسیر جریانی ایجاد می کند. این دیود باعث حفظ

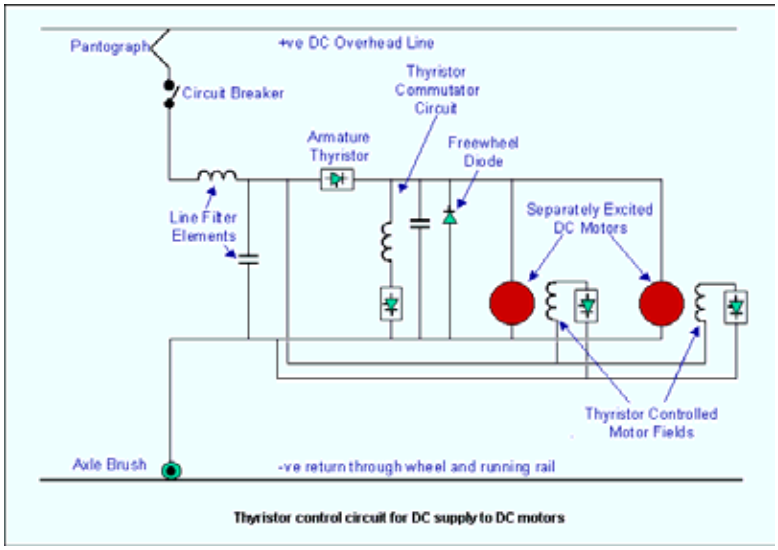
---

[1] DC Chopper
[2] thyristor
[3] Armature thyristor
[4] Commutation circuit thyristor
[5] Free wheel diode

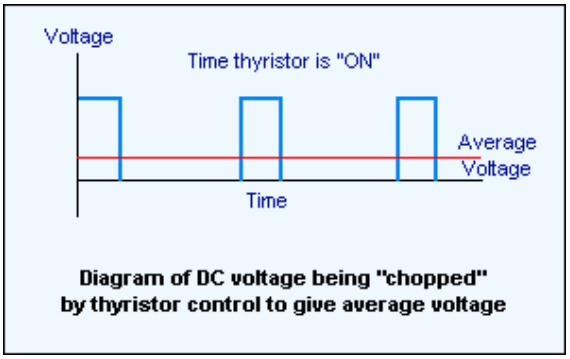
پیوستگی جریان در رتور می شود. از طرف دیگر استفاده از چاپر امکان کنترل دور با استفاده از سیستم های کنترل مدار بسته (فیدبک کنترل) را ممکن می سازد.

در صورتیکه شکل موج جریان موتور مشابه شکل موج ولتاژ شکل ٤-٣٠ باشد، هارمونی های حاصل باعث تداخل مغناطیسی با سایر تجهیزات مجاور چاپر و مدار الکتریکی حامل جریان موتور خواهد شد. جهت رفع این مشکل یک فیلتر[1] در مدار جریان قرار داده می شود.

مجموعه حاصل می تواند ولتاژ تراکشن موتورها را بخوبی و بطور پیوسته کنترل کند. در زمان راه اندازی با کاهش زمان وصل تریستور اصلی ولتاژ متوسط کاهش می یابد. با افزایش سرعت و کاهش جریان راه اندازی، زمان وصل تریستورها افزایش می یابد و باعث افزایش سرعت می گردد. کنترل پیوسته دور (بدون تغییرات پله ای) موجب افزایش ضریب چسبندگی می گردد.



شکل ٤-٢٩ مدار الکتریکی یک لکوموتیو با چاپر تریستوری



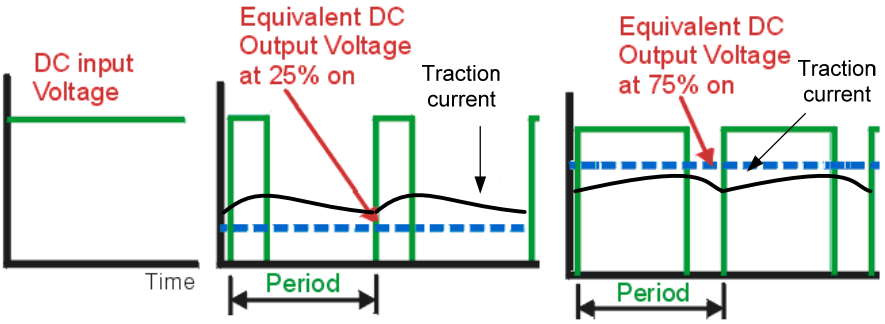
شکل ٤-٣٠ شکل موج ولتاژ روی تراکشن موتور

[1] line filter

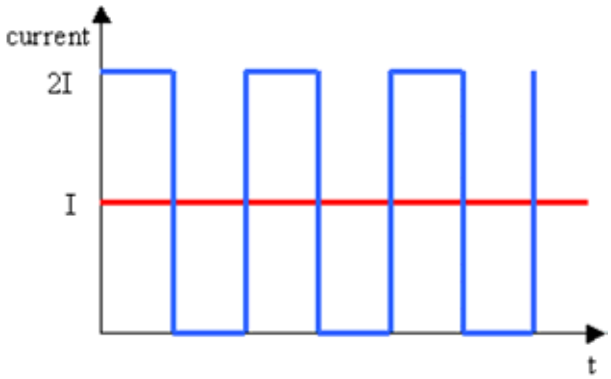
شکل ٤-٣١ تاثیر تغییر زمان وصل تریستور بر مقدار متوسط ولتاژ و تاثیر فیلتر بر شکل موج جریان نشان داده شده است. افزایش فرکانس سوئیچینگ و اندوکتانس فیلتر باعث خواهد شد شکل موج جریان مطابق شکل ٤-٣٢ به سمت خط صاف میل کند.

با پیشرفت تکنولوژی ساخت نیمه هادیها المانهای جدید الکترونیک قدرت مانند GTO یا IGBT[1] جایگزین تریستور می شود. در اینصورت مدار الکتریکی به صورت شکل ٤- ٣٣ ساده می شود.

اندازه و چگونگی افت و افزایش سرعت وابسته به اینرسی روتور و اصطکاک یاتاقانها است. شکل ٤-٣٤ تغییرات سرعت را بر حسب زمان و ولتاژ نشان می دهد. مسلما چنین تغییرات دوری مطلوب نیست و لازم است محدوده تغییرات دور کوچک باشد. لذا بهتر است از سیستم سوئیچینگ (باز و بسته کردن مدار) به صورت سریع انجام شود. هرچه عمل سوئیچینگ سریعتر انجام شود، آثار سو کمتری خواهد داشت. جرم بزرگ قطار نیز به کنترل محدوده تغییرات دور کمک می کند.

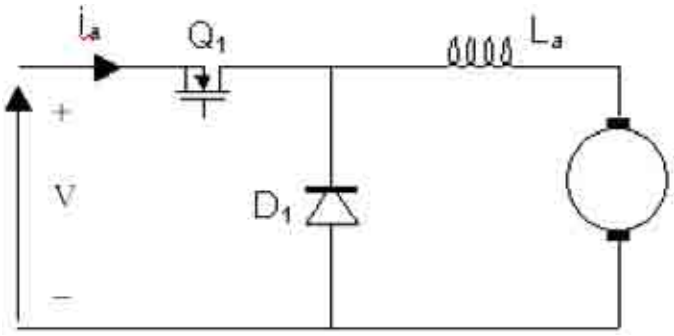


شکل ٤-٣١ شکل موج ولتاژ و جریان در حضور فیلتر با زمانهای وصل مختلف

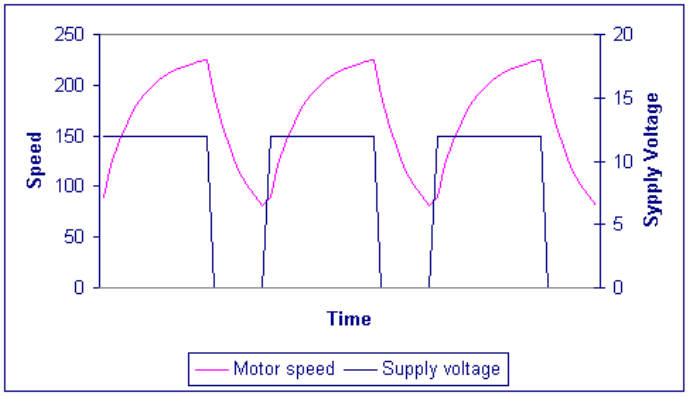


شکل ٤-٣٢- شکل موج جریان در حضور اندوکتانس بزرگ در فیلتر

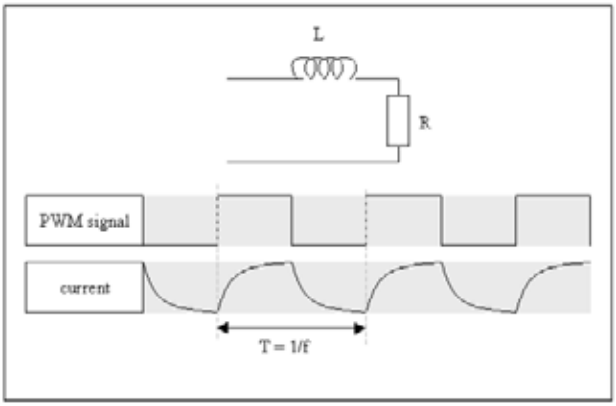
[1] Insulated Gate Bipolar Transistor



شکل ٤-٣٣- مدار چاپر با نیمه هادیهای جدید



شکل ٤-٣٤ تغییرات سرعت را بر حسب زمان و ولتاژ



شکل ٤-٣٥ مدار موتور و سیگنال کنترل و جریان ورودی موتور

الف- انتخاب فرکانس سوئیچینگ

یکی از راههای انتخاب فرکانس پایه تعیین آن بر اساس انتخاب در صد مشخصی از نوسانات دامنه جریان(p) است. شکل ٤-٣٥ مدار موتور و سیگنال کنترل و جریان ورودی موتور را نشان می دهد. در این شکل در یک پریود زمان قطع و وصل برابر فرض شده اند.

هرگاه

L اندوکتانس سری کل مدار

R مقاومت سری کل مدار

P درصد تغییرات مجاز جریان

i_1 ماکزیمم دامنه جریان

i_o مینیمم دامنه جریان

Q نسبت ماکزیمم دامنه جریان به مینیمم دامنه جریان

V ولتاژ مدار جریان مستقیم

E نیروی ضد محرکه موتور

A نسبت زمان وصل به زمان تناوب باشد

باشند

یعنی

$P = \frac{i_۱ - i_o}{i_۱} \times ۱۰۰\%$ و $Q = \frac{i_o}{i_۱} = ۱ - \frac{P}{۱۰۰}$ باشند $\alpha = \frac{t_{on}}{T} = ۱ - \frac{P}{۱۰۰}$

برای محاسبه فرکانس سوئیچینگ می توان نوشت

در لحظه وصل سوئیچ معادله جریان در مدار برابر است با

$$i = \left(i_o - \frac{V-E}{R} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{V-E}{R}$$

در لحظه صفر جریان برابر مینیمم مقدار یعنی i_o خواهد بود. هرگاه در پایان زمان وصل کلید قطع گردد جریان برابر ماکزیمم مقدار خود یعنی i_1 خواهد بود در اینصورت

$$i_۱ = \left(i_o - \frac{V-E}{R} \right) e^{-\frac{t_{on}}{\tau}} + \frac{V-E}{R}$$

در زمان قطع معادله جریان برابر است با (در اینجا از مقاومت و اندوکتانس مدار تغذیه صرف نظر شده است)

$$i = i_۱ e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}} = i_۱ e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}}$$

با توجه به لزوم پیوستگی جریلن در حالت ماندگار در پایان زمان قطع (یا در واقع پایان یک تناوب کامل) جریان مجددا برابر i_o خواهد بود یعنی

$$i_o = i_۱ e^{-\frac{T-t_{on}}{\tau}} = i_۱ e^{-\frac{T(۱-\alpha)}{\tau}}$$

در اینصورت

$$Q = \frac{i_o}{i_۱} = e^{-\frac{T(۱-\alpha)}{\tau}}$$

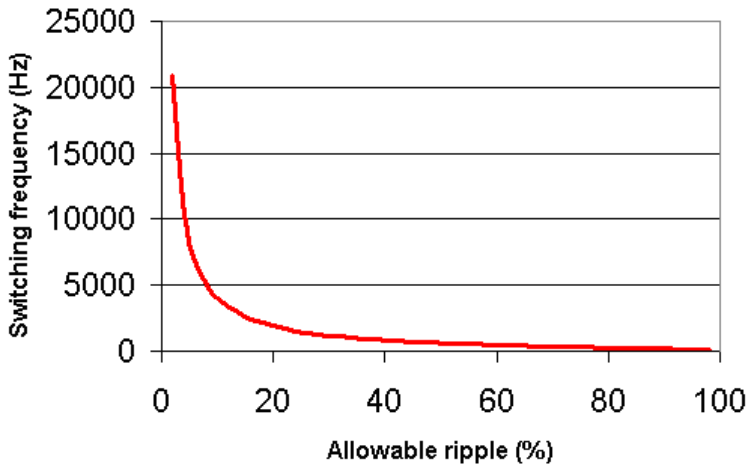
بنابراین زمان تناوب برابر خواهد بود با

$$T = -\frac{\tau}{1-\alpha}\ln Q = -\frac{L}{R}\frac{1}{1-\alpha}\ln Q$$

در نتیجه فرکانس سوئیچینگ برابر خواهد بود با

$$f = \frac{1}{T} = -\frac{R}{L}(1-\alpha)\frac{1}{\ln Q}$$

در اینجا مقاومت اهمی المانهای سویچینگ نیز اهمیت دارند و باید در محاسبات منظور شوند. شکل ٤-٣٦ منحنی تغییرات فرکانس سویچینگ بر حسب درصد تغییرات مجاز جریان بر اساس شبیه سازی های انجام شده در یک مدار واقعی نشان می دهد.



شکل ٤-٣٦ منحنی تغییرات فرکانس سویچینگ بر حسب درصد تغییرات مجاز جریان بر اساس شبیه سازی های انجام شده در یک مدار واقعی

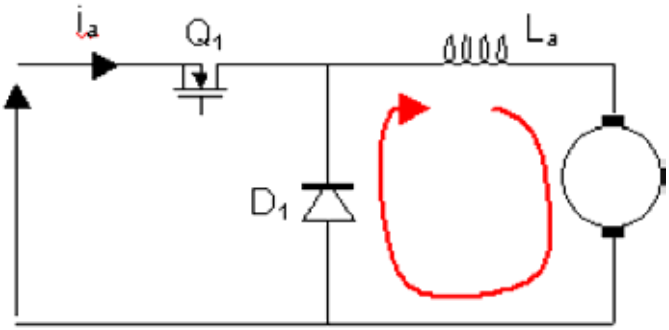
ب- عملکرد مدار کنترل سرعت

در این قسمت عملکرد مدار الکتریکی شکل ٤-٣٣ بررسی می شود. وقتی سوئیچ الکترونیک قدرت Q_1 روشن است جریان از آن می گذرد و موتور شروع به گردش می کند. وقتی Q_1 خاموش شود جریان موجود در اندوکتانس مدار نمی تواند سریعا صفر شود در نتیجه مسیر جریان مطابق شکل ٤-٣٧ از طریق دیود D_1 بسته می شود. در صورت عدم وجود دیود D_1 ولتاژ زیادی در Q_1 ایجاد می شود که ممکن است آن را بسوزاند. این مدار در زمان قطع و وصل جریانی مطابق شکل ٤-٣١ را در مدار ایجاد خواهد نمود.

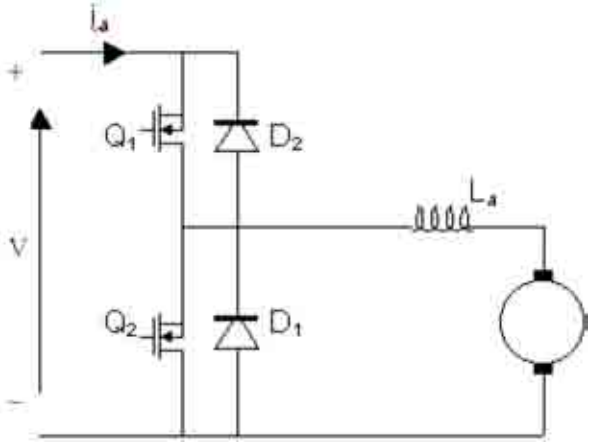
ترمز دینامیک[1]

[1] Dynamic Braking

در جهت بهبود رفتار ترمزی قطار از ترمز دینامیک استفاده می شود. در این روش تراکشن موتور به حالت ژنراتوری تغییر وضعیت داده و انرژی جنبشی ذخیره شده در قطار در تراکشن موتورها تبدیل به انرژی الکتریکی می شود. انرژی الکتریکی حاصل یا در مقاومتهایی داخل قطار (معمولا روس سقف) تلف می شود (ترمز مقاومتی[1]) یا به شبکه برگردانده می شود که به آن ترمز ژنراتوری[2] (یا با باز یافت انرژی) گویند.
مدار الکتریکی مطابق شکل ٤-٣٣ قادر به ایجاد مدار ترمز دینامیک نخواهد بود، زیرا در این مدار جریان اجازه حرکت در جهت مخالف را ندارد، لذا مدار بصورت شکل ٤-٣٨ اصلاح می شود.
در این شکل عملکرد Q_1 و D_1 مشابه شکل ٤-٣٣ است. در این شکل Q_2 و D_2 برای مدار ترمز ژنراتوری به کار می روند. در حالت ترمزی وقتی که Q_2 روشن است انرژی به سمت شبکه باز می گردد.
شکل ٤-٣٩ مسیر جریان در حالت ترمزی را نشان می دهد.

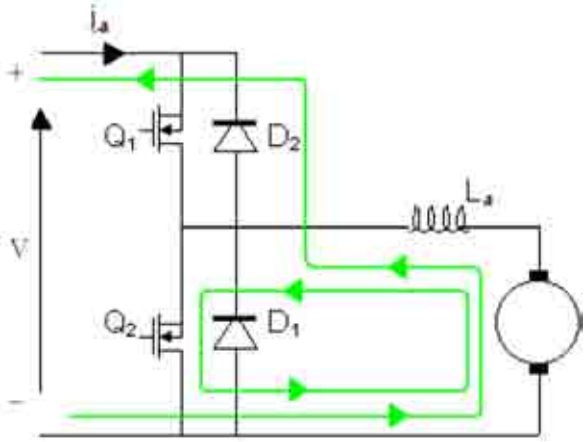


شکل ٤-٣٧ – عملکرد دیود هرزگرد



شکل ٤-٣٨- اصلاح مدار شکل ٤-٢٧ در جهت ایجاد مسیر جریان ترمزی

[1] rheostatic braking
[2] regenerative braking



شکل ٤-٣٩ مسیر جریان در حالت ترمزی

در این شکل با فزایش دور موتور یا افزایش جریان تحریک نیروی محرکه ماشین از ولتاژ شبکه بیشتر خواهد شد، در اینصورت جریان از طریق دیود D_2 به سمت شبکه جاری خواهد شد. جهت کنترل جریان ترمز Q_2 در می تواند هدایت کند در اینصورت در لحظاتی که Q_2 هدایت می کند جریان در سیکل بسته ای که توسط Q_2 و ماشین بوجود می آید چرخش خواهد کرد. شکل جریان موتور در حالتهای متوالی کشش و ترمز در شکل ٤-٤٠ نشان داده شده است.

ج- تغییر جهت حرکت موتور

تغییر جهت گردش موتور با تغییر جهت جریان تحریک با تغییر پلاریته ولتاژ آرمیچر ممکن است. با توجه به سهولت تغییر جهت میدان معمولا از مدار الکتریکی مشابه شکل ٤-٤١ برای تغییر جهت دور استفاده می شود. در این شکل با تغییر وضعیت سوئیچ جهت جریان در سیم پیچ تحریک تغییر و در نتیجه جهت دور تغییر می کند.

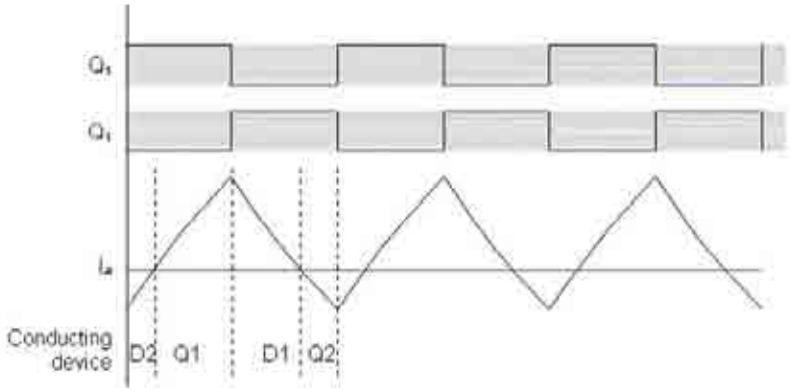
٤-٥-١-٦- کنترل سرعت موتور DC به روش PWM

اصول کار روش PWM کاملا شبیه سیستم چاپر است. تنها تفاوت این سیستم با سیستم چاپر آن است که در سیستم چاپر جریان فقط می تواند در یک جهت حرکت کند در نتیجه برای تغییر جهت گردش و استفاده از ترمز دینامیک یا باز یافت انرژی ترمز حتما نیاز به مدارهای کمکی خواهد بود.

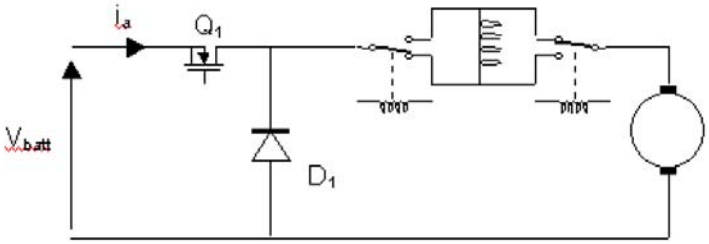
اما در سیستم PWM جریان می تواند در هر دو جهت حرکت کند، ضمن اینکه تغییر پلاریته ولتاژ آرمیچر براحتی ممکن خواهد بود (تغییر پلاریته ولتاژ در سیستم چاپر به هیچ وجه ممکن نبود) . در نتیجه در هر دو مود کشش و ترمز در هر دو جهت حرکت (حرکت به عقب و جلو) از یک مدار قدرت و فرمان استفاده می شود.

با توجه به یکپارچه بودن مدار قدرت و فرمان برای همه حالات کاری، مدار کنترل سرعت در این حالت ساده تر خواهد بود. هدف از کنترل سرعت موتورهای DC بکار گیری بکار گیری سیگنالی است که

سرعت خواسته شده را ایجاد کند و موتور را در آن سرعت نگه دارد. کنترل کننده سرعت ممکن است سرعت خروجی را اندازه گرفته و عنوان فیدبک با مقدار مرجع مقایسه و مقادیر کنترلی را اصلاح نماید، در اینصورت این مدار کنترل حلقه بسته[1] خواهد بود در غیر اینصورت مدار کنترل حلقه باز[2] خواهد بود.



شکل ٤-٤٠ - شکل جریان موتور در حالتهای متوالی کشش و ترمز



شکل ٤-٤١ – مدار تغییر جهت میدان و دور

کنترل کننده ها انواع مختلف دارند ولی در اینجا بحث روی کنترل کننده هایی است که با کنترل ولتاژ موتور سرعت موتور را تنظیم می کنند. در شکل ٤-٤٢ بلوک دیاگرام ساده کنترل سرعت تراکشن موتور سری نشان داده شده است.

مدار کنتر ل سرعت به صورت شکل ٤-٤٣ قادر به انجام کنترل سرعت، باز تولید و تغییر جهت گردش موتور میباشد.

در حالت چرخش در جهت اولیه Q_1 و Q_4 روشن و دیود متصل به آنها در حالت خاموش است. شکل ٤-٤٤ مدار الکتریکی این حالت کاری را نشان می دهد.

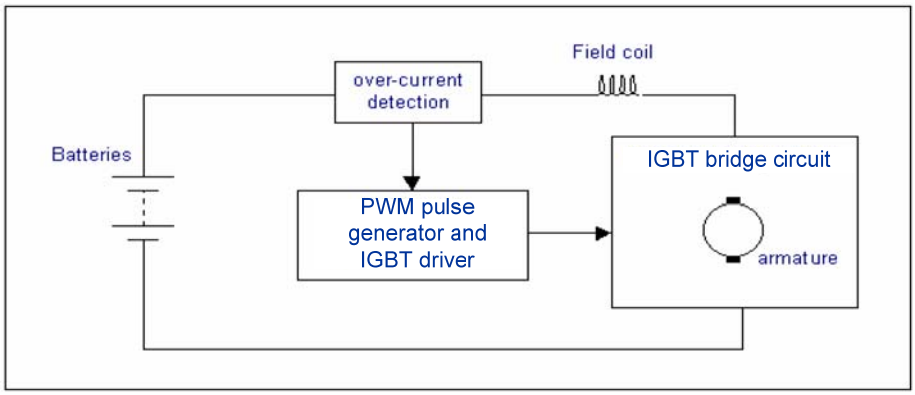
در حالت چرخش در جهت اولیه برای قطع انرژی ورودی به موتور Q_1 خاموش و Q_4 همچنان روشن خواهد بود در اینصورت مسیر جریان مطابق شکل ٤-٤٥ از طریق Q_4 و دیود متصل به Q_3 بسته خواهد

[1] Close loop
[2] Open loop

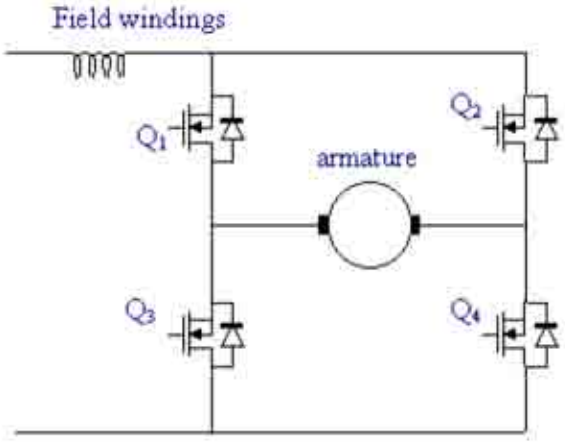
شد.

در حالت چرخش در جهت معکوس Q_2 و Q_3 روشن و دیود متصل به آنها در حالت خاموش است. شکل ٤-٤٦ مدار الکتریکی این حالت کاری را نشان می دهد.

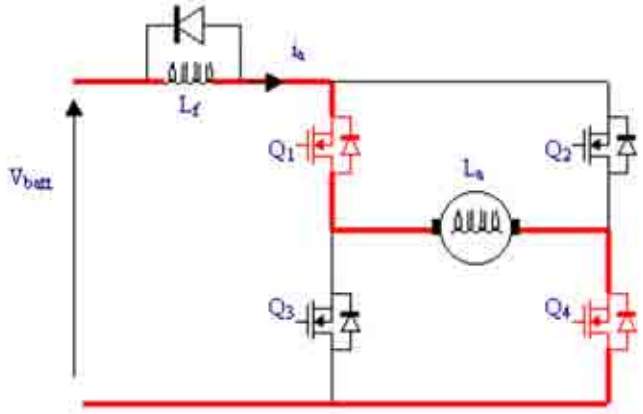
در حالت چرخش در جهت معکوس برای قطع انرژی ورودی به موتور Q_2 خاموش و Q_3 همچنان روشن خواهد بود در اینصورت مسیر جریان مطابق شکل ٤-٤٧ از طریق Q_3 و دیود متصل به Q_4 بسته خواهد شد.



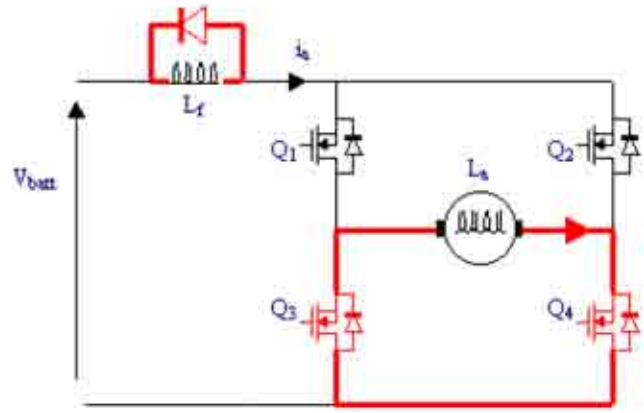
شکل ٤-٤٢ بلوک دیاگرام ساده کنترل سرعت تراکشن موتور سری



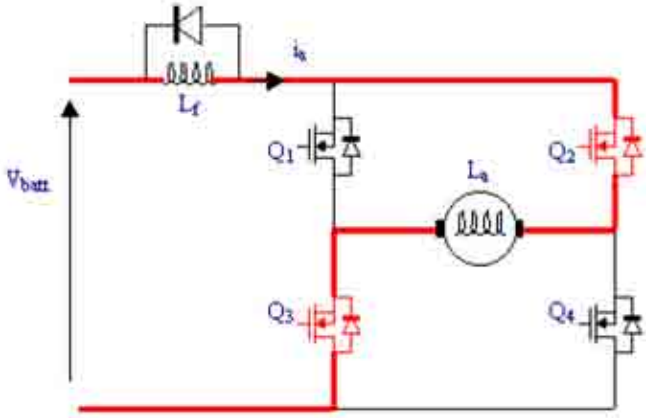
شکل ٤-٤٣ بلوک دیاگرام ساده کنترل سرعت تراکشن موتور



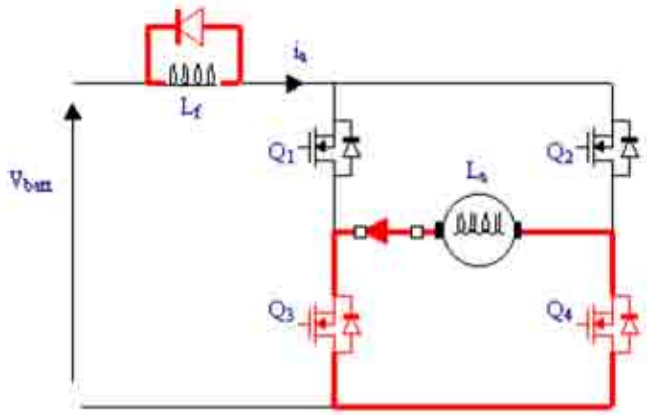
شکل ٤-٤٤ -Q_1 و Q_4 روشن و دیود متصل به آنها در حالت خاموش موتور حالت چرخش در جهت اولیه



شکل ٤- ٤٥ - Q_1 خاموش و Q_4 روشن مسیر جریان از طریق Q_4 و دیود متصل به Q_3 بسته شده، موتور در حالت چرخش در جهت اولیه



شکل ٤-٤٦ - Q_2 و Q_3 روشن و دیود متصل به آنها در حالت خاموش، موتور در حالت چرخش در جهت معکوس

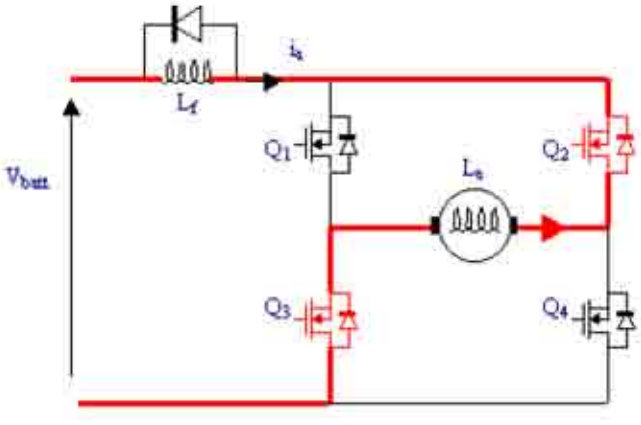


شکل ٤-٤٧ – Q_2 خاموش و Q_3 روشن موتور در حالت چرخش در جهت معکوس، مسیر جریان از طریق Q_3 و دیود متصل به Q_4 بسته شده

در حالت ترمز ژنراتوری جهت جریان معکوس می گردد. این امر باعث تغییر جهت جریان در مدار تحریک و در نتیجه تغییر پلاریته نیروی ضد محرکه می گردد.

در حالت حرکت به سمت جلو اگر در حالت ترمزی همچنان تحریک بصورت سری باقی بماند (معمولا در لکوموتیوها در حالت ترمزی اتصال تحریک تبدیل به تحریک مستقل می شود) مطابق شکل ٤-٤٨ دیودهای متصل به Q_2 و Q_3 روشن هستند و جریان را به سمت شبکه بر می گردانند. (در صورتیکه تحریک مستقل شده باشد دیودهای متصل به Q_1 و Q_4 هدایت خواهند کرد)

در حالت حرکت معکوس دیودهای متصل به Q_1 و Q_4 روشن هستند و جریان را به سمت شبکه بر می گردانند. (در صورتیکه تحریک مستقل شده باشد دیودهای متصل به Q_2 و Q_3 هدایت خواهند کرد)

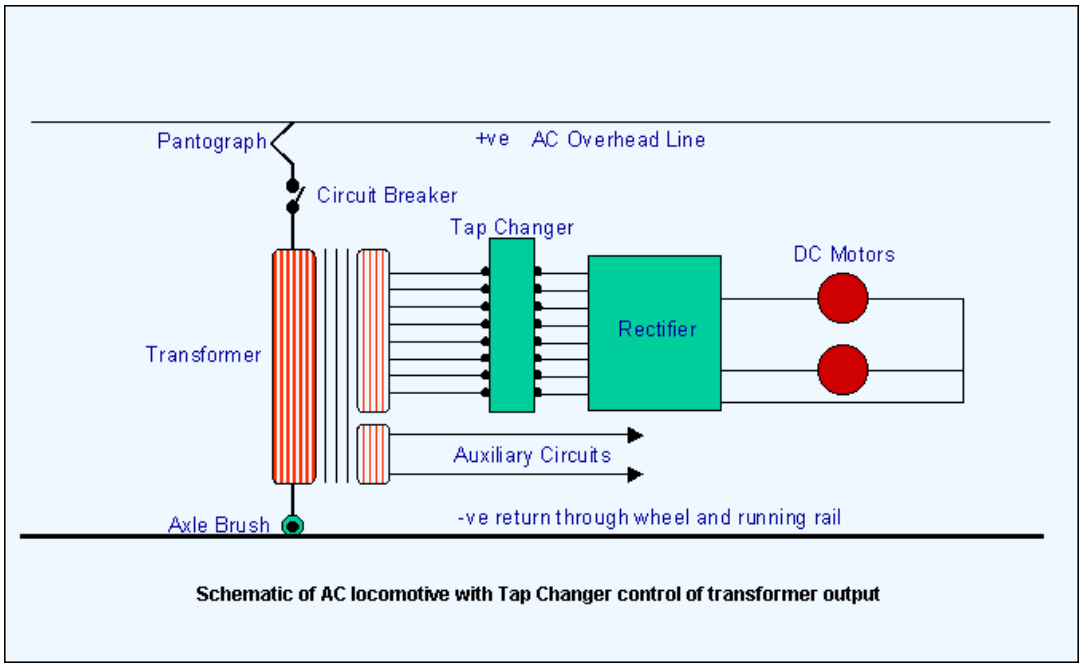


شکل ٤-٤٨ مدار ترمز ژنراتوری در حرکت به جلو

٤-٥-٢-لکوموتیوAC-DC - شبکه تغذیه AC تراکشن موتور DC

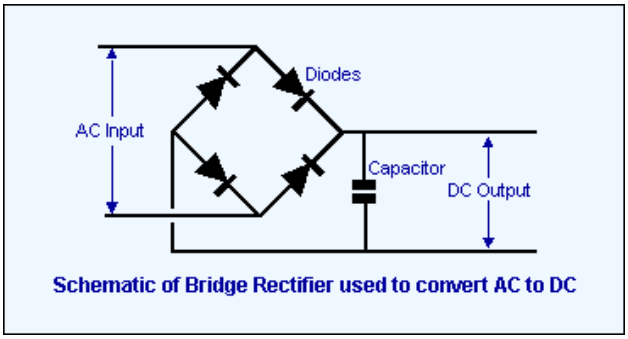
در این نوع لکوموتیو شبکه تغذیه AC تراکشن موتور DC است. معمولا ولتاژ شبکه به قدری بالا است که هم یکسو سازی آن مشکل و هم مقدار آن برای تراکشن موتورها زیاد است. لذا ولتاژ ورودی بلافاصله توسط ترانسفورماتور کاهش می یابد. یکی از راههای کنترل ولتاژ در این لکوموتیوها استفاده از تپ چنجر[1] در ترانسفورماتور است. ولتاژ خروجی ترانسفورماتور و تپ چنجر توسط یک یکسوساز دیودی یکسو شده و تحویل تراکشن موتورها می شود. شکل ٤-٤٩ مدار الکتریکی این نوع لکوموتیو را نشان می دهد. در سمت جریان مستقیم کلیه روشهای اعمال شده برای تراکشن موتورها در لکوموتیوهای DC-DC قابل استفاده است. علاوه براین در یکسو ساز می توان از روشهای کنترل ولتاژ استفاده نمود.

ساده ترین یکسوساز که در لکوموتیوها بکار رفته، پل یکسوساز دیودی مشابه شکل ٤-٥٠ است که شکل موج یکسو شده بصورت نشانداده شده در شکل ٤-٥١ را ایجاد خواهد نمود. به علت غیر قابل کنترل بودن یکسوساز استفاده از تپ چنجر در این مدار ضروری است. در اینصورت کنترل دور بصورت پله ای انجام خواهد شد. استفاده از خازن در خروجی پل یکسوساز منجر به اصلاح شکل موج ولتاژ و صافتر شدن آن می گردد. شکل ٤-٥٢ موج ولتاژ خروجی پس از عبور از فیلتر خازنی را نشان می دهد.

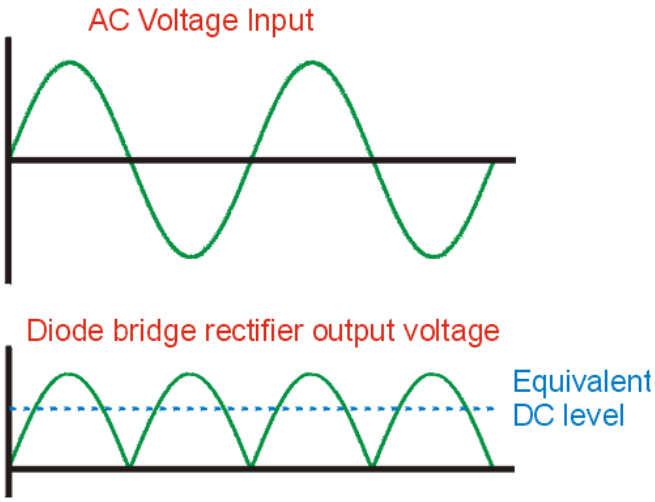


شکل ٤-٤٩ – مدار الکتریکی لکوموتیوAC-DC

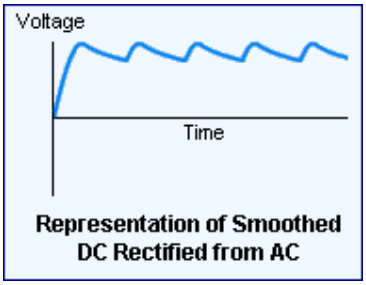
[1] Tap changer



شکل ٤-٥٠ - پل یکسوساز دیودی



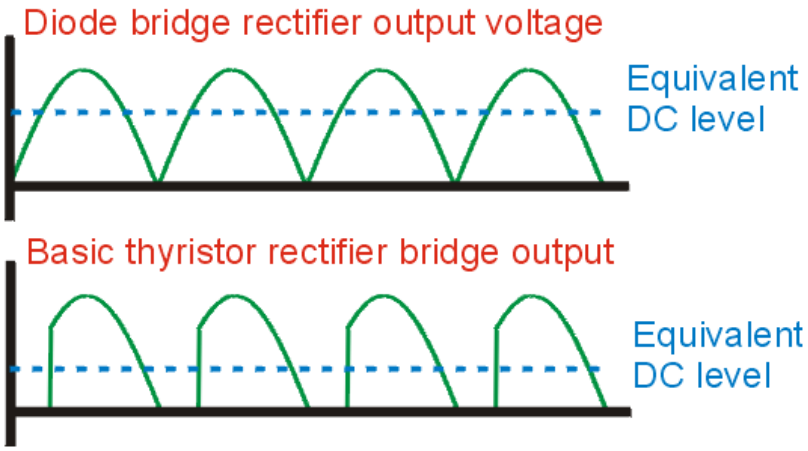
شکل ٤- ٥١ - شکل موج یکسو شده توسط پل دیودی



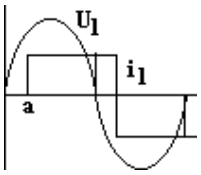
شکل ٤-٥٢ موج ولتاژ خروجی پس از عبور از فیلتر خازنی

با ظهور تریستور استفاده از یکسوساز های کنترل شده و نیمه کنترل شده در لکوموتیوها متداول گشت. با تغییر زاویه آتش تریستور، قسمتی از موج ولتاژ خروجی بریده و از مقدار متوسط آن کاسته خواهد شد. شکل ٤-٥٣ شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز تمام موج تمام تریستوری (با کنترل کامل) را نشان می دهد. شکل ٤-٥٤ شکل موج ولتاژ و جریان ورودی یکسوساز را نشان می دهد

در این سیستم به علت استفاده از یکسوساز تریستوری دیگر نیازی به تپ چنجر نیست، علاوه بر این تغییرات ولتاژ و در نتیجه کنترل دور بصورت پیوسته انجام می شود که باعث افزایش ضریب چسبندگی می گردد. از معایب این سیستم اعوجاج در شکل جریان ورودی و در نتیجه حضور هارمونی در آن و ضریب قدرت کوچک خصوصا در زمان راه اندازی و مقادیر کوچک زاویه آتش است. در ساده ترین حالت پل یک طبقه مشابه شکل ٤-٥٠ در مدار استفاده می شود و فقط بجای دیود از تریستور در مدار استفاده می شود. در حالت کشش جهت بهبود ضریب قدرت و کاهش هارمونیها این پل بصورت نیمه کنترل شده و در حالت ترمز ژنراتوری بصورت تمام کنترل شده استفاده می شود.



شکل ٤-٥٣ شکل موج ولتاژ خروجی یکسوساز تمام موج تمام تریستوری (با کنترل کامل)



شکل ٤-٥٤ شکل موج ولتاژ و جریان ورودی یکسوساز

در مدار یکسوساز می توان برای ولتاژ مدار جریان مستقیم از پل تریستوری استفاده نمود، در اینصورت به علت هارمونیهای بالای این مدار استفاده از فیلتر هارمونی ضروری است. فیلتر ممکن است در داخل لکوموتیو یا در پست کشش نصب شود.

در صورت نصب فیلتر در داخل لکوموتیو در خروجی ترانسفورماتور اصلی

١- هارمونیها در محل بار جبران می شوند (هارمونیها در شبکه حرکت نمی کنند)

٢- فیلتر برای هارمونی اول نقش جبران کننده خازنی را خواهد اشت

٣- در صورت عدم استفاده از لکوموتیو فیلتر هم بدون برق خواهد بود (طول عمر بیشتر)

در صورت نصب فیلتر در داخل پست کشش

۱- از فیلتر همیشه استفاده می شود (استفاده از یک فیلتر بزرگ مشترک برای بارهای متعدد)

۲- هارمونیهای ناشی از اشباع هسته ترانسفورماتورهای پستهای کشش نیز جبران می شود.

برای بهبود ضریب قدرت و کاهش هارمونیها می توان از پلهای چند طبقه مانند شکل ٤-٥٥ در مدار استفاده نمود. این مدار در دامنه جریان برابر دارای ضریب قدرت بهتر و هارمونی کمتر نسبت به پلهای یک طبقه است.

جهت کاهش قیمت پلهای چند طبقه می توان مانند شکل ٤-٥٦ همه پلها به غیر از یکی را به صورت نیمه کنترل شده قرار داد. در این سیستم سیم پیچهای ترانسفورماتور به ترتیب ۲۵، ۲۵ و ۵۰ درصد از کل ولتاژ را دارند. این مدار با حداقل هزینه ممکن ضریب قدرت و هارمونی های سیستم را اصلاح می کند.

کنترل این پل مطابق شکل ٤-٥٧ در چهار مرحله انجام می شود.

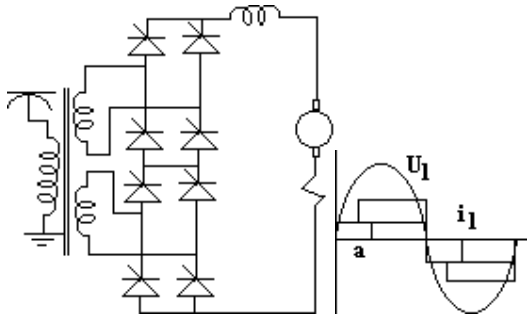
در این پل وقتی T_3 و T_4 آتش می شوند T_1 و T_2 به صورت طبیعی خاموش می شوند.

در نسل بعدی لکوموتیوها با تراکشن موتور DC بجای استفاده از تراکشن موتورهای سری معمولی از تراکشن موتور تحریک مستقل مانند شکل ٤-٥٨ استفاده شد که در آن مدار آرمیچر و مدار تحریک دارای منبع تغذیه تریستوری جداگانه هستند. در این مدار راه اندازی مشابه راه اندازی موتور تحریک مستقل خواهد بود. به علت استفاده از تحریک مستقل در مدار کنترل، کنترل لغزش بسیار ساده تر خواهد بود. این مدار به اختصار SEPEX نامیده شد.

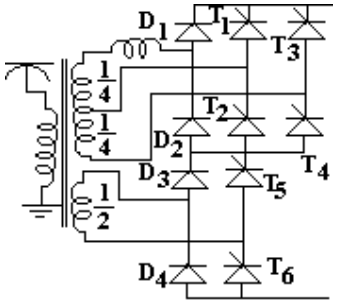
شکل ٤-٥٩ مشخصه گشتاور سرعت دو موتور سری و تحریک مستقل (که مشابه مشخصه موتور شنت است) را نشان می دهد. مقایسه دو مشخصه نشان می دهد موتور سری برای کشش مشخصه بهتری دارد زیرا:

۱- این موتور مشخصه ای شبیه مشخصه توان ثابت دارد

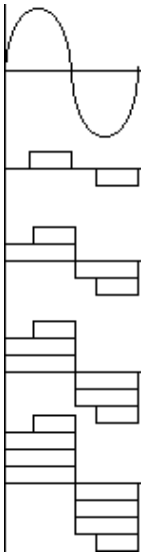
۲- در اتصال موازی موتورها تقسیم بار بهتر انجام می شود.



شکل ٤-٥٥- پل یکسوساز تمام کنترل شده دو طبقه



شکل ٤-٥٦- پل یکسوساز دو طبقه اقتصادی



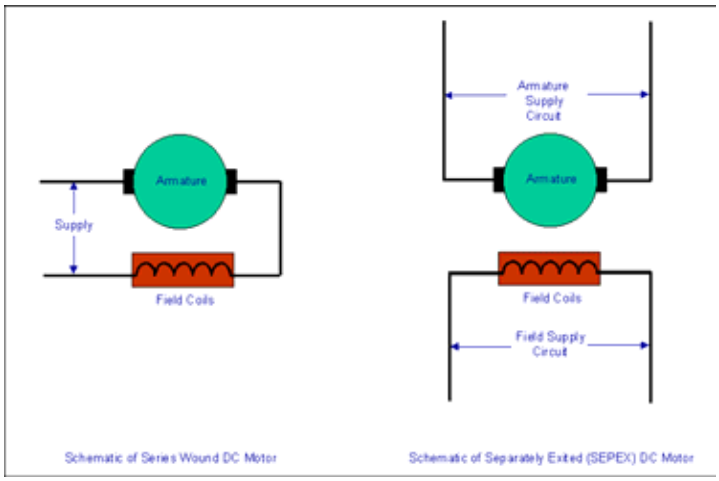
مرحله اول **D_1, D_2, T_1, T_2 (D3, D_4)**

مرحله دوم **$D_1, D_2, T_1, T_2, T_3, T_4$ (D3, D_4)**

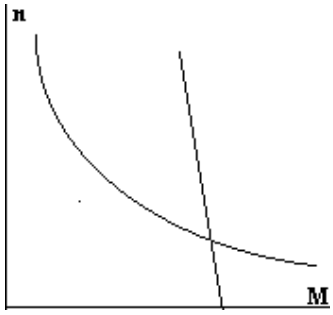
مرحله سوم **$D_3, D_4, T_5, T_6 + D_1, D_2, T_1, T_2$**

مرحله چهارم **$D_3, D_4, T_5, T_6 + D_1, D_2, T_1, T_2, T_3, T_4$**

شکل ٤-٥٧ - عملکرد پل چند طبقه



شکل ٤-٥٨- تراکشن موتور DC تحریک مستقل SEPEX



شکل ٤-٥٩ مشخصه گشتاور سرعت دو موتور سری و تحریک مستقل

موتور سری در مقابل تفاوت قطر چرخها (که در عمل به علت تفاوت اصطکاک در مسیر چرخها ممکن است رخ دهد) و تفاوت در مشخصه های گشتاور دور (که بر اثر تفاوت فاصله هوایی یا مشخصه مغناطیسی هسته موتورها ممکن است رخ دهد) عملکرد بهتری نسبت به موتور شنت و تحریک مستقل دارد.

اما موتور سری عیب بسیار بزرگی نسبت به موتور تحریک مستقل دارد. موتور سری پایداری در مقابل لغزش بسیار ضعیف است و در صورت بروز لغزش کنترل آن بسیار مشکل است.

در ولتاژ ثابت هرگاه لغزش رخ دهد، دور افزایش و جریان کاهش می یابد. کاهش جریان (در تحریک) مجددا باعث افزایش دور می شود.

در صورتیکه تراکشن موتور ها بصورت سری متصل شوند و توسط یک مدار کنترل مشترک تغذیه شوند، جریان موتورها برابر خواهد بود اما اگر قطر چرخها برابر نباشد، ولتاژ دو سر موتورها و در نتیجه قدرت آنها برابر نخواهد بود خصوصا هنگامیکه یک یا چند موتور دچار لغزش شوند. موتور تحریک مستقل به هنگام لغزش به علت تحریک ثابت مشکلات کمتری خواهد داشت.

سیستم کنترل این موتور عملکردی دوگانه برای آن بوجود می آورد

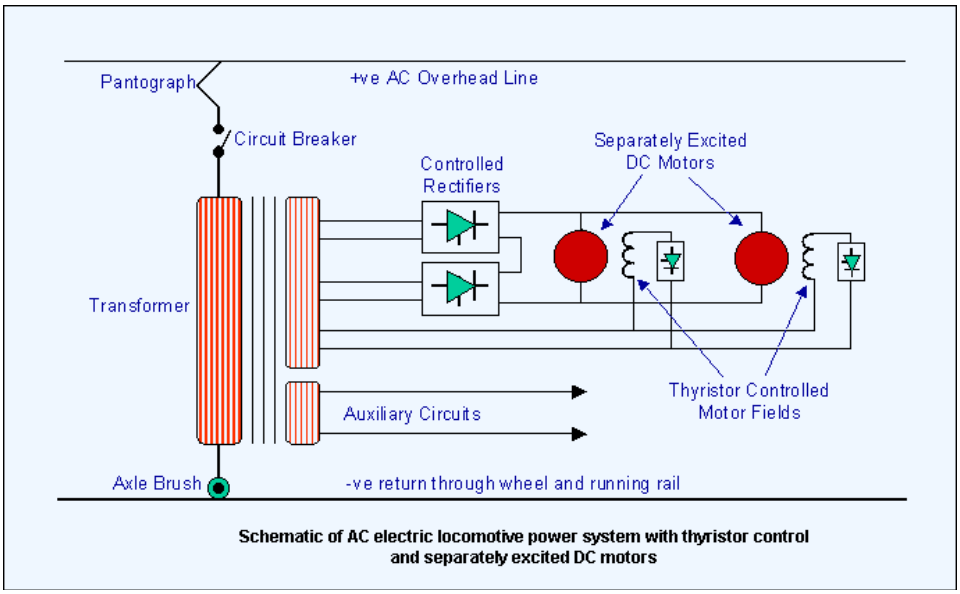
١- در حالت کشش موتور مانند یک موتور سری عمل می کند یعنی سیستم کنترل با تنظیم ولتاژ تحریک، جریان تحریک را به گونه ای تنظیم می کند که برابر جریان آرمیچر باشد.

٢- در صورت بروز لغزش موتور مانند یک موتور شنت عمل می کند یعنی سیستم کنترل جریان تحریک را ثابت نگه می دارد. کنترل لغزش با کنترل دور و مشتقات اول و دوم دور نسبت به زمان انجام می شود.

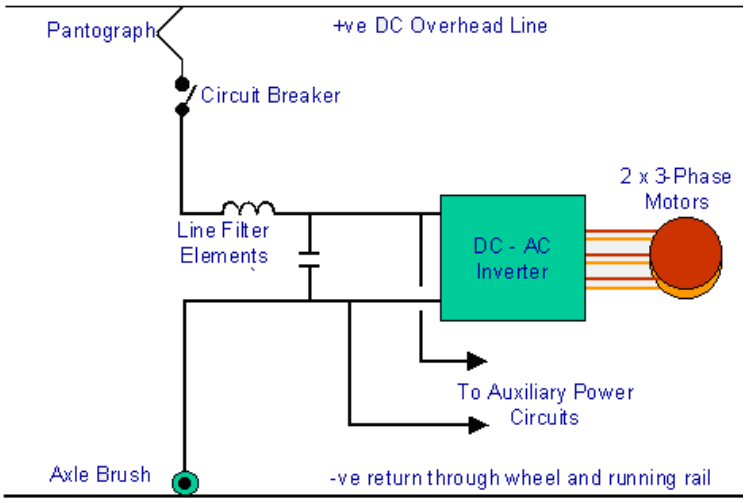
شکل ٤-٦٠ مدار الکتریکی یک لکوموتیو با پل تریستوری با تغذیه تراکشن موتورها بصورت تحریک مستقل را نشان می دهد. در این سیستم در صورت استفاده از مدار تغذیه مشترک برای چند موتور، موتورها بصورت موازی متصل می شوند.

٤-٥-٣- لکوموتیوDC-AC- شبکه تغذیه DC تراکشن موتور AC

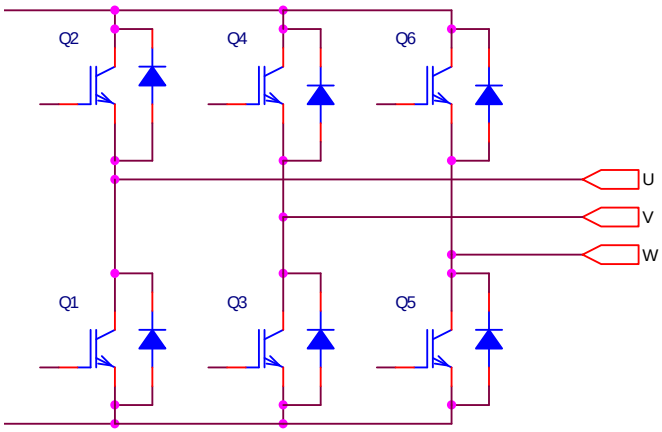
در این لکوموتیوها تراکشن موتور AC توسط شبکه DC تغذیه می شود. شکل ٤-٦١ ساختار این نوع لکوموتیو را نشان می دهد. در این شکل مدار اینورتر می تواند انواع مختلفی داشته باشد اما امروزه اینورتر PWM مشابه شکل ٤-٦٢ کاربرد فراوانی پیدا کرده است. در این نوع اینورتر با ایجاد برشهائی در شکل موج ولتاژ DC سطح آن کنترل می شود. مدار کنترل این اینورتر با تغییر پهنای پالسهای متوالی در یک سیکل به گونه ای عمل می کند که هارمونی اول موج در فرکانس خواسته شده بزرگترین مقدار ممکن و سایر هارمونیها در حداقل مقدار ممکن باشند، در نتیجه شکل موج جریان موتور به سینوس بسیار نزدیک خواهد بود.



شکل ٤-٦٠ مدار الکتریکی یک لکوموتیو با پل تریستوری



شکل ٤-٦١ – ساختار لکوموتیوDC-AC



شکل ٤-٦٢ - اینورتر

شکل ٤-٦٣ شکل موج ولتاژ و جریان یک فاز از خروجی این اینورتر را نشان می دهد. در این مدار ولتاژ و فرکانس به طور همزمان قابل کنترل هستند از اینجهت این نوع اینورتر را VVVF[1] گویند.

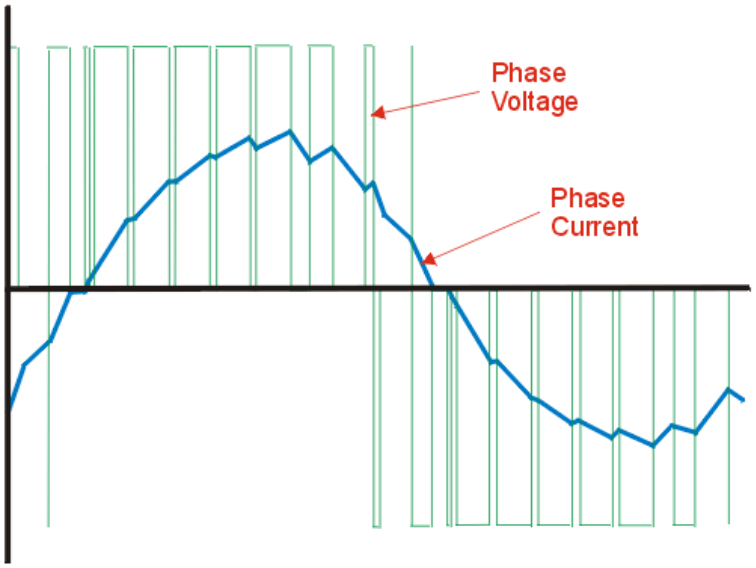
تراکشن موتور بکار رفته در لکوموتیو می تواند از نوع سنکرون یا آسنکرون باشد. تراکشن موتورهای سنکرون دارای مزیت بازیافت انرژی سهلتر و قابلیت کنترل ولتاژ و توان راکتیو هستند. در مقابل موتورهای آسنکرون به علت ساختمان ساده تر، قیمت و هزینه نگهداری کمتر کاربرد وسیعتری دارند.

موتور آسنکرونی که به عنوان تراکشن موتور استفاده مسی شود نسبت به موتور آسنکرون صنعتی تفاوتهایی دارد از جمله این تفاوتها مقدار بیشتر مقاومت رتور و در نتیجه فرکانس بیشتر در رتور است. مقاومت بیشتر رتور باعث تلفات بیشتر در رتور و در نتیجه راندمان کمتر موتور می گردد. معمولا هادی های رتور در موتورهای تراکش از جنس مس هستند.

٤-٥-٤-لکوموتیو AC-DC-AC

در این لکوموتیوها تراکشن موتور AC توسط شبکه AC تغذیه می شود. در لکوموتیوهای جدید برای تغییر فرکانس ابتدا ولتاژ AC شبکه پس از کاهش توسط ترانسفورماتور(تا ولتاژ حدود ۲۰۰۰ ولت)، توسط یکسوساز یکسو می شود (با ولتاژ مستقیم ۲۸۰۰ ولت). سپس ولتاژ DC توسط اینورتر مشابه شکل ٤-٦٢ به ولتاژ متناوب با ولتاژ و فرکانس خواسته شده تبدیل می شود. در نتیجه مدار این لکوموتیو از قسمت DC به بعد کاملا مشابه لکوموتیوهای DC-AC است. شکل ٤-٦٤ ساختار این نوع لکوموتیو را نشان می دهد.

[1] Variable Voltage Variable Frequency



شکل ٤-٦٣ شکل موج ولتاژ و جریان یک فاز از خروجی اینورتر PWM

در این مدار معمولا جهت کاهش دامنه جریان اتصال کوتاه و بهبود رفتار یکسوسازی، از ترانسفورماتور با پراکندگی زیاد و در صورت نیاز از یک سلف سری در مدار استفاده می شود.

در این شکل مدار اینورتر می تواند انواع مختلفی داشته باشد اما امروزه اینورتر PWM مشابه شکل ٤-٦٢ کاربرد فراوانی پیدا کرده است. شکل ٤-٦٥ مدار مجموع یکسوساز و اینورتر را بصورت یکپارچه نشان می دهد.

در مدار یکسوساز می توان برای ولتاژ مدار جریان مستقیم از پل تریستوری استفاده نمود، در اینصورت به علت هارمونیهای بالای این مدار مانند لکوموتیوهای AC-DC استفاده از فیلتر هارمونی در خروجی ترانسفورماتور اصلی یا در پست کشش ضروری است.

همچنین برای یکسوسازی می توان از مدارات PWM مشابه آنچه که در مدار اینورتر بکار رفته استفاده نمود. از مزایای این سیستم عبارتند از:

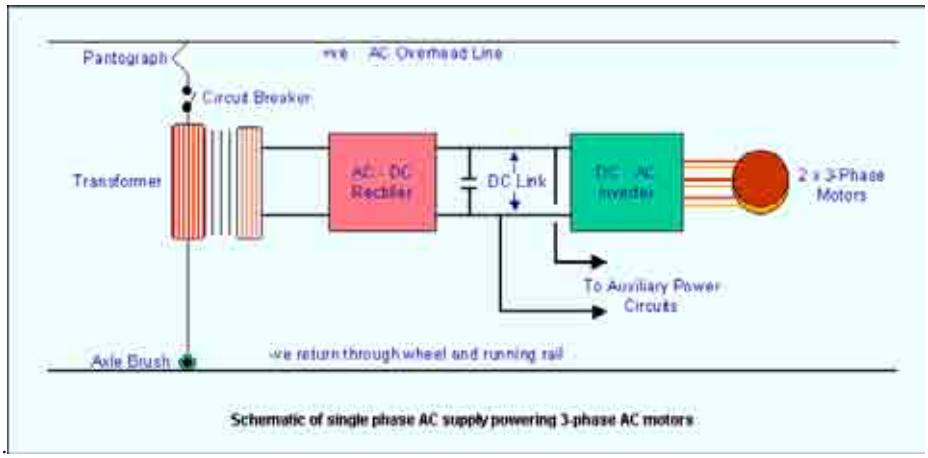
١- ضریب قدرت قابل قبول (نزدیک به یک)

٢- قابلیت کنترل و کاهش هارمونیها

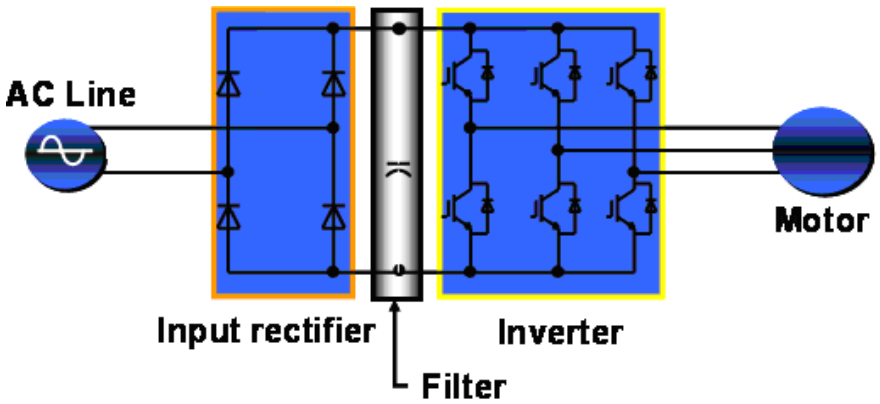
٣- کارآیی بهتر هنگام استفاده از ترمز ژنراتوری

مقدار خازن در مدار جریان مستقیم بسیار اهمیت دارد و بر اساس مقدار ریپل ولتاژ قابل قبول در مدار جریان مستقیم انتخاب می شود. مقادیر کوچک در مدار جریان مستقیم منجر به ریپل زیاد در مدار جریان مستقیم می شود. افزایش دامنه ریپل ولتاژ باعث می شود هارمونیهای مدار جریان متناوب در دو طرف مدار جریان مستقیم بر روی هم تاثیر بیشتری داشته باشند. در واقع خازن وظیفه ایزوله کردن سیستم دوطرف از نظر هارمونی را برعهده دارد و نباید اجازه دهد هارمونی یک سمت به سمت دیگر رفته یا بر آن تاثیر

بگذارد.اینورتر بکار رفته در این سیستم می تواند مشابه اینورتر لکوموتیوهای DC-AC باشد.سیستم کنترل این لکوموتیوها از نوع مدار بسته است.



شکل ٤-٦٤ ساختار لکوموتیو AC-DC-AC



شکل ٤-٦٥ – مدار مجموع یکسوساز و اینورتر بصورت یکپارچه

٤-٦- ترمز

به تعبیری سیستم ترمز مهمترین قسمت یک لکوموتیو است شاید بسیار مهمتر از سیستم کشش!!!! لکوموتیوهای برقی می توانند به انواع مختلفی از ترمز مجهز باشند.

٤-٦-١- ترمز پنوماتیک- ترمز مکانیکی است که در حضور چسبندگی قابل استفاده است و با از دست رفتن چسبندگی کارآیی خود را از دست می دهد. این تر مز در سرعتهای کم (٠ تا ١٠٠ کیلومتر بر ساعت) قابل استفاده است و می تواند توقف کامل را ایجاد نماید.

٤-٦-٢- ترمز الکتریکی-

ترمز الکتریکی انواع مختلفی دارد

٤-٦-٢-١-ترمز مقاومتی (رئوستایی)- در اینحالت تراکشن موتور وارد ناحیه ژنراتوری می شود. در تراکشن موتورهای جریان مستقیم تحریک به مستقل تبدیل می شود و با کنترل ولتاژ و جریان تحریک شدت ترمز کنترل می شود. انرژی ورودی سیستم از تبدیل انرژی جنبشی ذخیره شده در لکوموتیو در حال حرکت بدست می آید. انرژی الکتریکی حاصل در ترمینالهای تراکشن موتور روی مقاومتهایی قرار گرفته و در آنها تبدیل به حرارت می شود، بنابراین با تبدیل انرژی جنبشی لکوموتیو به حرارت از انرژی جنبشی و در نتیجه سرعت قطار کاسته می شود.

در صورتیکه مشخصه گشتاور سرعت در ناحیه ترمزی مطابق شکل ٤-٦٦ باشد، و بین حدود مجاز ترمزی منحنیهای ٤،٣،٢،١ و ٥ باشند در

حد ١ – در این حد $I_f = I_{fmax}$ =Const است و گشتاور ترمزی M_b با سرعت رابطه خطی دارد. در واقع منحنی ١ حد جریان تحریک ماکزیمم را نشان می دهد.

حد ٢- منحنی ٢ حد ماکزیمم صزیب چسبندگی را نشان می دهد. یعنی گشتاور بیش از این موجب لغزش می شود.

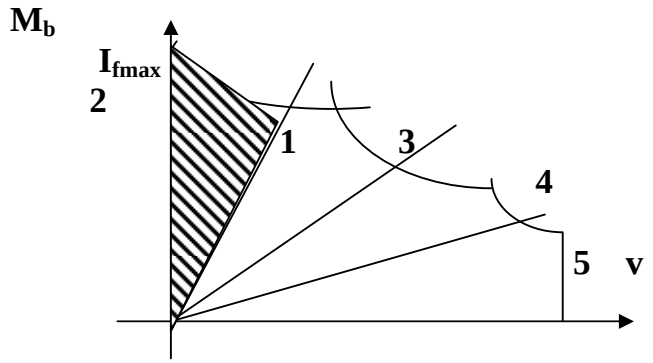
حد ٣- وقتی جریان مقاومت ترمز I_b ثابت باشد رابطه بین گشتاور ترمزی M_b و سرعت از مرتبه سوم خواهد بود. منحنی ٣ حد ماکزیمم جریان مقاومت ترمز I_b (جریان مجاز این مقاومت) را نشان می دهد.

حد ٤- منحنی ٤ حد کموتاسیون را نشان می دهد. از طرفی در سرعت زیاد موتور نمی تواند در گشتاور ثابت کار کند.

حد ٥- خط ٥ حد سرعت را نشان می دهد.

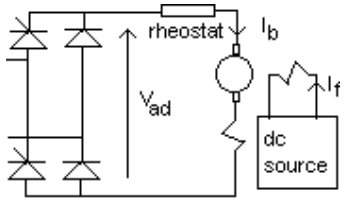
بنابراین ناحیه کارکرد ترمز در محدوده بین این حدود خواهد بود.

ترمز مقاومتی ساده و مطمئن است اما انرژی حاصل از ترمز استفاده نمی شود و تلف می گردد.



شکل ٤-٦٦ مشخصه گشتاور سرعت در ناحیه ترمزی

٤-٦-٢-٢- ترمز پشتیبان[1]- از آنجا که ترمز مقاومتی در سرعتهای کم نیروی ترمز کمی ایجاد می کند، می توان به عنوان ترمز پشتیبان در سرعتهای نزدیک صفر با قرار دادن ولتاژ در مدار ترمز بر نیروی ترمز افزود. شکل ٤-٦٧ مدار الکتریکی این ترمز را نشان می دهد. اشکال این مدار آن است که علاوه بر انرژی ترمزی، قسمتی از انرژی شبکه در مقاومت تلف می شود لذا باید برحسب سرعت مقدار ولتاژ V_{ad} و مقاومت کنترل شوند.



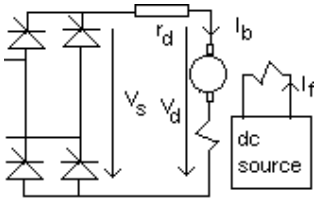
شکل ٤-٦٧ مدار الکتریکی ترمز پشتیبان

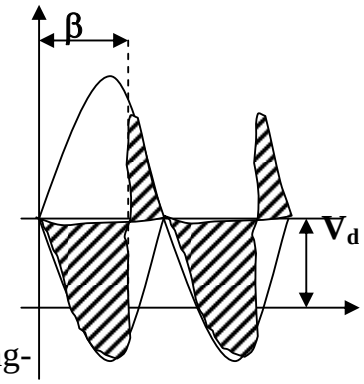
٤-٦-٢-٣- ترمز ژنراتوری[2]- در این نوع ترمز، انرژی جنبشی بصورت انرژی الکتریکی تخلیه می شود و بجای تلف شدن به شبکه برگردانده می شود.

الف- لکوموتیو AC-DC – در این لکوموتیو در حالت ژنراتوری یکسوساز حتما باید تمام کنترل شده باشد و به هنگام تر مز مدار الکتریکی به صورت شکل ٤-٦٨ تبدیل می شود. با کنترل زاویه آتش β نیروی ترمز تنظیم می شود.

در β=۹۰ به علت وجود مقاومت r_d، این مدار مشابه ترمز مقاومتی عمل می کند.

در β>۹۰ این مدار با قراردادن ولتاژ منفی روی تراکشن موتورمانند ترمز پشتیبان عمل می کند.





[1] Back up Braking
[2] Regeneration braking-

شکل ٤-٦٨- ترمز ژنراتوری

جریان این مدار از معادله زیر محاسبه می شود

$$I_b = \frac{V_s - V_d}{z}$$

وجود این مقاومت در مدار بسیار ضروری است زیرا به علت امپدانس بسیار کم بقیه مدار با کوچکترین تغییر در زاویه آتش β تغییرات جریان بسیار شدید خواهد بود. در ترمز ژنراتوری بدون مقاومت r_d، با از دست رفتن ولتاژ جریان بسیار بزرگ خواهد شد. در واقع مقاومت باعث می شود ترمز نرمتری داشته باشیم. در این مدار باید زاویه کموتاسیون را نیز در نظر گرفت. از معایب این مدار آن است که این مدار نمی تواند از قدرت کامل خود استفاده کند و دارای ضریب قدرت کم و ریپل ولتاژ زیاد خواهد بود.

ب- لکوموتیو AC-DC-AC- در موتور آسنکرون لغزش عبارت است از

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

که در آن

N_sسرعت چرخش میدان دوار استاتور

N_rسرعت چرخش رتور

هستند. هرگاه

۰<S<۱ تراکشن موتور در ناحیه کشش (با موتوری) خواهد بود

S >۱ تراکشن موتور در ناحیه ترمز ژنراتوری خواهد بود. در ناحیه ترمز ژنراتوری اینورتر PWM تبدیب به یکسو ساز می شود و یکسوساز تبدیل به اینورتر DC-AC در اینصورت در صورت استفاده از ترمز ژنراتوری یکسوساز نیز باید قابلیت تبدیل به اینئرتر را داشته باشدو مثلا می توان از یک مدار PWM مشابه اینورتر کنترل سرعت تراکشن موتور استفاده نمود با این تفاوت که فرکانس سمت AC آن ثابت است.

می توان از ترمز مقاومتی نیز در سمت DC این مدار استفاده نمود.

٤-٦-٢-٤- ترمز فوکو[1]- در سرعتهای بیش از ۲۰۰ km/h استفاده از ترمز فوکو مفید خواهد بود. در این سیستم یک الکترومغناطیس جریانهای فوکو را در ریل یا رتور یک سیستم ترمز فوکو القا می کند. در حالت اول فاصله هوایی بین ریل و مغناطیس ثابت نخواهد بود و در حالت دوم تجهیزات اضافی مورد نیاز خواهد بود. نیروی ترمز F_b با کنترل میدان الکترومغناطیس و با استفاده از کنترل جریان آن I_d کنترل می شود.

[1] Eddy current braking

فصل ۵ - اجزا شبکه بالاسری و مشخصات کلی آنها

هنگام احداث یک خط برقی برای انتخاب سطح ولتاژ و نوع شبکه باید پارامترهای متعددی مد نظر قرار گیرد یعنی ضمن انجام محاسبات اقصادی دقیق، مشخصات خط (قدرت، ترافیک و موقعیت جغرافیائی)، توسعه آینده، ترافیک و اهمیت خط و ..... در نظر گرفته شود.

محاسبات باید پارامترهای متعددی را در بر گیرد از جمله:

- ولتاژ و ساختار شبکه تماس
- تعداد و قدرت پستها
- فیدرها
- نوع و تعداد بوستر ترانسفورماتورها یا اتو ترانسفورماتورها
- مشکلات و هزینه حفاظت از تجهیزات

با توجه به ویژگی های خاص راه آهن برقی که در مقدمه به آن اشاره شد شبکه راه آهن برقی دارای اجزا متعددی است، سه جز اصلی آن عبارتند از:

۱- شبکه تغذیه فشار قوی[1]

۲-پست[2]

۳-شبکه تماس بالاسری[3]

۵-۱- شبکه تغذیه فشار قوی

راه آهنهای برقی خود نوعی بار الکتریکی هستند که به علت استفاده از ولتاژ بالا، انرژی الکتریکی مورد نیاز آنها مستقیماً توسط شبکه انتقال یا شبکه فوق توزیع (که در مواردی رابط بین شبکه های انتقال و توزیع بوده و دارای سطح ولتاژی بین ولتاژ این دو شبکه است) تغذیه می شوند. انرژی الکتریکی در محلی که پست کشش[4] نامیده می شود به سیستم راه آهن برقی تحویل می گردد. به علت اهمیت بالای بار پستهای کشش، این پستها از نظر اهمیت در دسته بارهای درجه اول شبکه های الکتریکی دسته بندی می شوند. در جهت

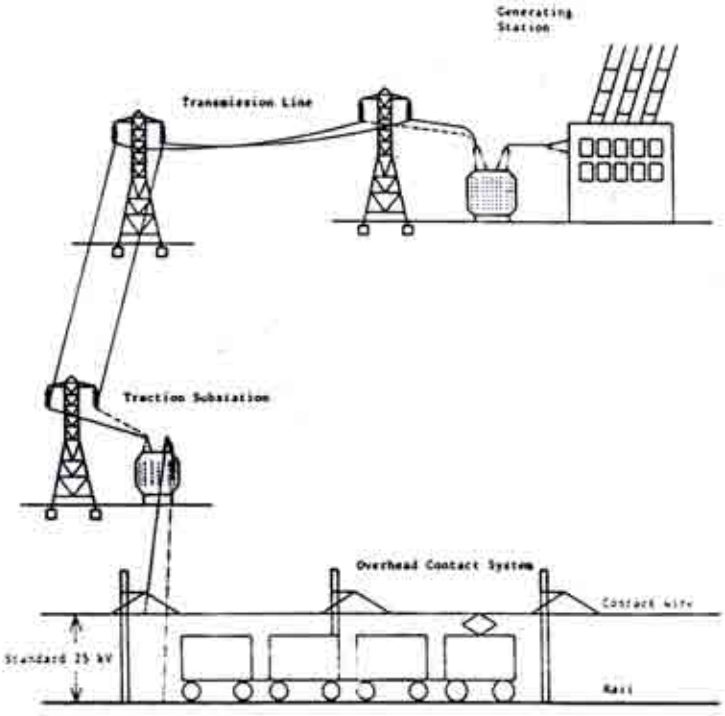
---

[1] HVFEED
[2] Substation
[3] Over Head Contact System
[4] Traction post

حفظ تداوم انرژی در پستهای کشش و افزایش ضریب اطمینان آنها، این پستها توسط دو خط انتقال مستقل یا یک شبکه به هم پیوسته تغذیه می شود. استقلال دو خط تغذیه باعث افزایش ضریب اطمینان سیستم خواهد شد و در مواردیکه نتوان دو خط انتقال را از دو محل متفاوت تغذیه نمود، این دو خط حداقل باید توسط دو باسبار[1] مختلف از پست تغذیه شوند. در حالت عادی کار شبکه، یکی از خطوط به عنوان خط اصلی در مدار بوده و خط دیگر به صورت آماده کار[2] خواهد بود. در صورت بروز خطا در مدار اصلی یا ضرورت دیگر این خط از مدار خارج شده و خط دیگر در مدار قرار می گیرد و به این ترتیب بار همیشه برقدار خواهد بود. از آنجا که در سیستم تغذیه راه آهنهای برقی تداوم انرژی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، لازم است کلیه اعمال کلیدزنی و حفاظت با دقت تمام و هماهنگ با قسمتهای دیگر انجام شود.

در سیستم AC، برق فشار قوی با ولتاژ۱۱۵ الی۲۳۰ کیلو ولت از نیروگاه و از طریق خطوط انتقال به پستهای کشش منتقل می‌شود که به ۲۵ کیلو ولت تکفاز تبدیل می‌شود که خط تماس را تغذیه می‌کند.

شکل ۵-۱ نحوه تغذیه راه‌آهن برقی توسط سیستمهای قدرت الکتریکی را نشان می‌دهد.

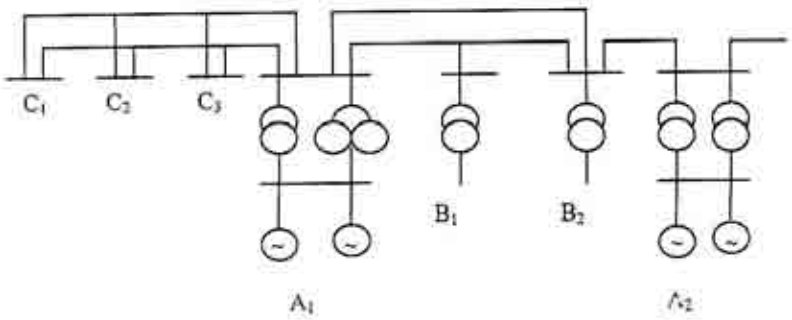


شکل۵-۱- سیستم تغذیه بار راه آهن برقی

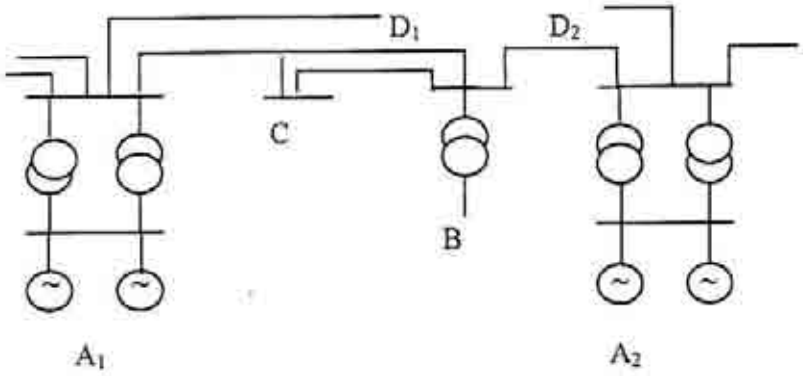
[1] busbar
[2] Stand by

در شکل ۵-۲-a ، C_3, C_2, C_1 سه پست کشش را نشان می‌دهند، پستها به شین فشار قوی A_1 که یک نیروگاه یا پست منطقه‌ای می‌باشد، متصل هستند. شین فشار قوی A_2 هم مشابه A_1 است. B_2, B_1 پستهای داخلی را نشان می‌دهند که بارهای عادی شبکه هستند. به منظور حفظ ضریب اطمینان راه‌آهن‌های برقی در سطح اول بارهای قدرت آورده شده‌اند و پستهای کشش باید توسط دو حلقه از خطوط انتقال تغذیه شوند. در شکل۵-۲-a پست کشش توسط سیستم قدرت از یک مسیر تغذیه می‌شود که تغذیه قدرت یکطرفه یا شعاعی نامیده می‌شود.

در شکل ۵-۲-b پست کشش C توسط نیروگاه‌های A_1, A_2 از دو مسیر تغذیه می‌شود که تغذیه قدرت دو طرفه نامیده می‌شود. اگر D_1 با D_2 در شکل ۵-۲-b به هم متصل شوند، پست کشش C در یک حلقه از سیستم قدرت قرار می‌گیرد، که مدار تغذیه قدرت رینگ نامیده می‌شود. معمولاً تغذیه قدرت دو طرفه یا رینگی از قابلیت اعتماد بالاتر و تغذیه بهتری نسبت به تغذیه یکطرفه برخوردارند.[4]



الف



ب

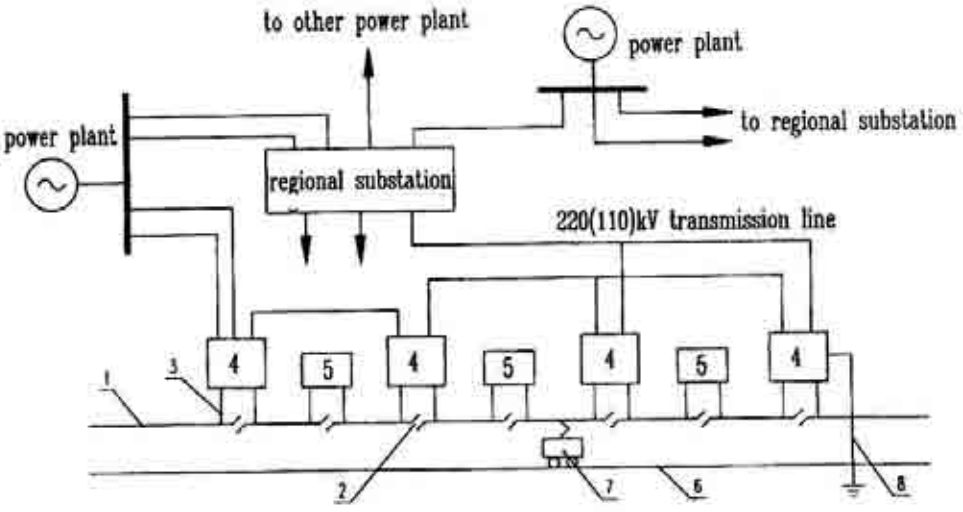
شکل۵-۲-الف)تغذیه قدرت یکطرفه ب)تغذیه قدرت دو طرفه یا رینگی

پستهای کشش خود وظیفه تغذیه شبکه بالاسری را برعهده دارند. شبکه بالاسری معمولا یک شبکه شعاعی است که خود وظیفه انتقال انرژی الکتریکی از پست کشش تا لوکوموتیو یا قطار برقی را برعهده

دارد. شکل ۵-۳ وضعیت کلی پست کشش، شبکه بالاسری و لوکوموتیو را نسبت به هم نشان می دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، پستهای کشش راه‌آهن‌های برقی از بارهای درجه یک به حساب می‌آیند و جزء مهمترین مصرف کننده‌های سیستم قدرت می‌باشند. بعلاوه برای بالا بردن ضریب استفاده از تغذیه نیروی کشش، یک مدار دو خطه از خطوط انتقال با ولتاژ بالا یا یک شبکه رینگی در تغذیه هر پست کشش استفاده می‌شود. دو مدار تغذیه قدرت از یکدیگر مستقل می‌باشند. در نیروگاهها، و پستهای اصلی نیز دو شینه بندی جهت تغذیه مدار وجود دارد، که در بعضی ازآنها شین‌های مشابه (دوبل باسبار) و برخی دیگر دارای سیستم تغذیه اصلی و فرعی بکار رفته. در شرایط کارکرد عادی، یکی از دو مدار در حال عملکرد و دیگری به صورت آماده‌باش[1] می‌باشد که یکی برای تغذیه قدرت اصلی و دیگری پشتیبان نامیده می‌شود. وقتی خطایی در عملکرد مدار اصلی رخ دهد، مدار پشتیبان بصورت اتوماتیک وارد عمل می‌شود که تثبیت ضریب اطمینان و یکنواختی تغذیه نیروی کشش را تضمین می‌کند.[4]

بطورکلی شبکه فشارقوی وظیفه انتقال انرژی الکتریکی از محل نیروگاهها یا پستهای فشارقوی شرکت تامین کننده انرژی الکتریکی به محل پستهای تغذیه کننده راه آهن برقی را بر عهده دارد. در حال حاضر تغذیه فشارقوی شبکه های راه آهن برقی توسط عوامل زیر قابل تامین هستند

- پستها ی فشار قوی kV ٦٦، kV ۱۳۲ و kv ۲۳۰
- خطوط فشار قوی kV ٦٦، kV ۱۳۲ و kv ۲۳۰ با اتصالات موازی یا بصورت ورود و خروج در پست کشش
- پستهای فشار متوسط (در داخل شهرها)



[1] Standby

شکل ۵-۳-تغذیه قدرت برای لکوموتیوهای برقی توسط سیستم قدرت الکتریکی به روش سیستم قدرت الکتریکی.

طراحی خطوط و تحلیل شبکه فشارقوی در راه آهنهای برقی دقیقا مشابه طراحی خطوط و تحلیل شبکه فشارقوی در سیستمهای انتقال قدرت معمولی است و مباحث مربوط به آن در کلیه کتب تحلیل سیستمهای قدرت یافت می شود. [۱،۲،۳،٤]

۵-۲- پست

پست مجموعه تجهیزات ثابتی است که انرژی الکتریکی را دریافت و با کنترل،تبدیل سطح و نوع ولتاژ آنرا برای مصرف در راه آهن هدایت می نماید.

شبکه راه آهن برقی دارای انواع پستهای متفاوتی است که وظایف مختلفی را بر عهده دارند. از جمله:

- پست کشش[۱]
- پست جداساز[۲]
- پست موازی ساز[۳]
- پست اتوترانسفورماتور
- پست بوستر ترانسفورماتور

هرگاه از جریان متناوب برای تغذیه شبکه استفاده شود، به علت حضور میدانهای متناوب در اطراف هادی تماس و عبور قسمتی از جریان از داخل زمین(نه از ریل)، شبکه تماس آثار مخربی بر سیستمهای مخابراتی و سیگنالینگ اطراف خود خواهد داشت که آنرا تداخل میدانهای مغناطیسی[٤] می نامند. در صورت عدم جبران تداخل میدانهای مغناطیسی، کارکرد سیستمهای مخابراتی و سیگنالینگ کاملاً مختل خواهد شد. برای جبران تداخل میدانها از دو سیستم بوستر ترانسفورماتور و اتوترانسفورماتور استفاده می شود، بنابراین لازم است در مدار محل مناسبی برای پست بوستر ترانسفورماتور[۵] و پست اتوترانسفورماتور[٦] در نظر گرفته شود. در مورد عملکرد این سیستمها و مزایا و معایب آنها در فصلهای بعد به تفصیل صحبت خواهد شد.

موقعیت انواع پستها در شبکه در بحث خطوط تغذیه راه آهن برقی بیشتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت و در این بحث تنها به ساختار آنها اشاره خواهد شد.

۵-۲-۱- پست کشش

---

[1] Traction Substation
[2] Sectioning post
[3] Paralleling post
[4] Electromagnetic interfrence
[5] Booster transformer post
[6] Auto transformer post

پست کشش پستی است که انرژی الکتریکی را از شبکه فشارقوی دریافت و با تبدیل سطح و نوع ولتاژ آنرا برای مصرف در راه آهن آماده می نماید.

در شبکه های جریان متناوب با فرکانس صنعتی پستهای کشش بسیار ساده هستند زیرا فقط وظیفه تبدیل سطح ولتاژ را برعهده دارند درنتیجه فقط دارای ترانسفورماتور هستند.

در شبکه های جریان مستقیم یا فرکانس کم پستهای کشش علاوه بر تبدیل سطح ولتاژ وظیفه تبدیل نوع یا فرکانس را نیز برعهده دارند لذا این نوع پست دارای تجهیزات پیچیده تری است.

پست کشش از طریق سیستم تماس[1] انرژی الکتریکی را به قطار منتقل می سازد. سیستم تماس خود انواع مختلفی دارد که در بحث خطوط تغذیه راه آهن برقی به آن پرداخته می شود. عمده ترین نوع سیستم تماس نوع شبکه بالا سری[2] و شبکه ریل سوم[3] است.

۵-۲-۲- پست جداساز

وظیفه این نوع پست جداسازی مسیر بین دو پست کشش به دو قسمت است به گونه ای که هر پست فقط بتواند یک قسمت را تغذیه نماید، ضمناً این پست از ایجاد جریان چرخشی در شبکه تماس و از انتقال انرژی از یک پست به پست دیگر از طریق شبکه بالاسری جلوگیری می نماید. ممکن است عمل جدا سازی به علت وجود اختلاف پتانسیل بین دو قسمت صورت گیرد.

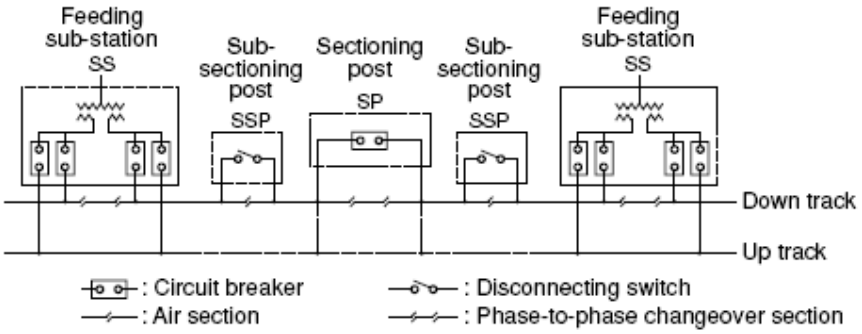
۵-۲-۳- پست موازی ساز

وظیفه پست موازی ساز جهت افزایش ضریب اطمینان قسمتی را که توسط یک پست کشش تغذیه می شود به دو قسمت تقسیم می کند و در مسیرهای دو خطه، با هدف کاهش افت ولتاژ در شبکه و ایجاد مسیرهای مشترک جریانی، امکان موازی کردن دو خط رفت و بر گشت را فراهم می کند. در محل پست خط به دو قسمت تقسیم می شود و بین این دو قسمت یک کلید که در حالت عادی بسته است (NC) قرار می گیرد. برای موازی کردن دو مسیر رفت و برگشت کلیدهایی بین این دو قرار می گیرد.بسته یا باز بودن این کلیدها در حالت عادی (NC یا NO) بستگی به طراحی سیستم دارد. در مسیرهای یک خطه و یا مواردیکه قصد موازی کردن دو مسیر رفت و بر گشت وجود ندارد این پست فقط به عنوان پست جداساز فرعی[4] خواهد بود.

---

[1] Contact system
[2] Over head contact system
[3] Third rail
[4] Subsectioning post

شکل ۵-٤ ساختار یک شبکه جریان متناوب شامل شبکه بالاسری و پستهای کشش و جداساز و جداساز فرعی را نشان می دهد



شکل ۵-٤ ساختار یک شبکه جریان متناوب شامل شبکه بالاسری و پستهای کشش و جداساز و جداساز فرعی

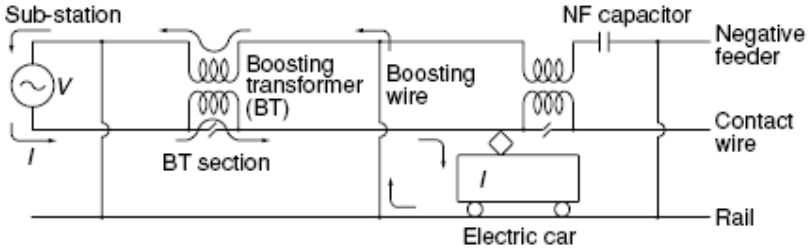
۵-۲-٤- پست بوسترترانسفورماتور

سیستم بوسترترانسفورماتور یکی از سیستمهائی است که برای جبران اثر سیستم راه آهن برقی بر سیستمهای مخابراتی و سیگنالینگ استفاده می شود. در این سیستم یک هادی اضافی برای جریان برگشت لازم است علاوه بر این در فواصل ۲ تا ٤ کیلومتر نیاز به محلی به نام پست بوسترترانسفورماتور برای نصب تجهیزات این سیستم است. هادی تماس و هادی برگشت در محل پست بوسترترانسفورماتور قطع می شود. در این پست یک بوسترترانسفورماتور با نسبت تبدیل یک قرار می گیرد که سیم پیچ اولیه آن با هادی بالاسری و سیم پیچ ثانویه آن با مسیر برگشت جریان در محلی که قطع شده اند، سری می شوند. در نقطه ای حدودا وسط دو بوستر ترانسفورماتور متوالی هادی برگشت جریان به ریل متصل می شود.

هنگام عبور پانتوگراف از روی محل بوسترترانسفورماتور به علت قطع و وصل جریان توسط بوسترترانسفورماتور ممکن است جرقه بوجود آید. در اینحالت می توان از خازن برای حذف جرقه و نوسانات ولتاژ ناشی از آن استفاده نمود.

امپدانس سری بوسترترانسفورماتور (که در مدار سری شده) و نیز جرقه ناشی از عبور پانتوگراف از محل بوستر ترانسفورماتور از عوامل محدود کننده سرعت در این سیستم هستند. این سیستم در قطارهای سریع قابل استفاده نیست.

شکل ۵-۵ مدار الکتریکی شبکه با بوستر ترانسفورماتور را نشان می دهد.



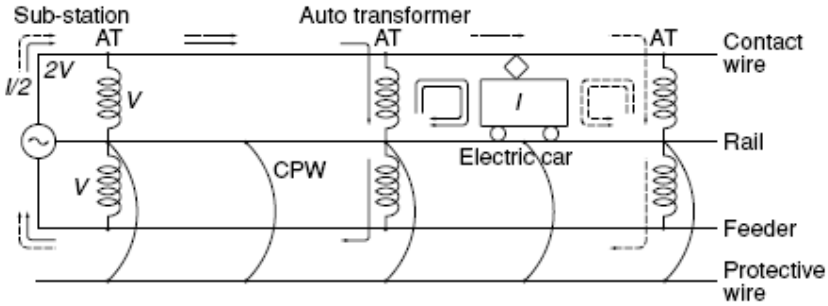
شکل ۵-۵ مدار الکتریکی شبکه با بوستر ترانسفورماتور

۵-۲-۵- پست اتوترانسفورماتور

سیستم اتوترانسفورماتور یکی از سیستمهائی است که برای جبران اثر سیستم راه آهن برقی بر سیستمهای مخابراتی و سیگنالینگ استفاده می شود. در این سیستم در فواصل حدود ۱۰ کیلومتر نیاز به محلی به نام پست اتوترانسفورماتور برای نصب تجهیزات این سیستم است.

در این سیستم ولتاژ پستهای کشش دو برابر ولتاژ لکوموتیو است. در این پست یک اتوترانسفورماتور قرار می گیرد که ولتاژ اولیه آن دو برابر ولتاژ شبکه بالاسری و ولتاژ ثانویه آن برابر ولتاژ بالاسری است و توسط پست کشش تغذیه می شود. شبکه بالاسری توسط خروجی این اتو ترانسفورماتورها تغذیه می شود. شکل ۵-٦ مدار الکتریکی شبکه با اتوترانسفورماتور را نشان می دهد

هدف این جزوه ایجاد مقدمات لازم جهت تحلیل شبکه بالاسری است و مبحث تکمیلی در مورد انواع پستهای شبکه راه آهن برقی، وظایف و مشخصات آنها در جزوه بررسی پستهای راه آهن برقی آمده است.



شکل ۵-٦ مدار الکتریکی شبکه با اتوترانسفورماتور

۵-۳-شبکه تماس بالاسری[1]

شبکه تماس بالاسری مدار الکتریکی است که انرژی الکتریکی را از پست کشش به سمت قطار منتقل می کند. مشخصات شبکه بالا سری برحسب عملکرد شبکه قدرت و نیز قدرت مورد نیاز سیستم تعیین می شود، اما مهمترین مشکلات فنی در طراحی شبکه بالا سری در مسائل مکانیکی آن نهفته است، زیرا شبکه

[1] Overhead Contact System (OCS)

بالاسری باید اتصال دائم بین شبکه و پانتوگراف[1] را بصورت دائم و بدون جابجا شدن پانتوگراف و هادی تماس تامین نماید. با افزایش سرعت این مسئله اهمیت بیشتری یافته و حل آن مشکلتر می شود.

شبکه تماس خود دارای اجزا متعددی است از جمله:

- اجزا نگهدارنده کتناری[2]
- عایقها[3]
- بستها (گیره ها)[4]
- هادی تماس[5]
- هادی حمال[6]
- آویزها[7]
- جداساز الکتریکی[8]

جزئیات و اجزا شبکه بالا سری در بحث شبکه بالاسری خواهد آمد.

۵-٤- مشخصات اجزا شبکه تغذیه راه آهن برقی

هنگام انتخاب و طراحی سیستم راه آهن برقی مشخصات مختلف سیستم باید تعیین شوند بعضی از این مشخصات عبارتند از

۵-٤-۱- سطح ولتاژ

ولتاژ نامی سیستم، مقدار مؤثر ولتاژ یک فاز متناوب بین هادی شبکه بالاسری و زمین و ولتاژی است که شبکه سراسری برای آن طراحی شده و تجهیزات، عایقبندی و کلیرانسها بر اساس آن انتخاب می شوند. اما هیچ دلیلی وجود ندارد که ولتاژ در تمام طول هادی بالاسری برابر مقدار نامی آن باشد. معمولا در شبکه های بالاسری عادی از دو نوع سطح ولتاژ ممکن است استفاده شود که عبارتند از ۲۵ و ۵۰ کیلو ولت.

حداکثر ولتاژ شبکه، حداکثر ولتاژی است که شبکه بالاسری می تواند تحت آن وظیفه عادی خود را انجام دهد. هنگام حضور هارمونیها در شبکه ممکن است ولتاژ از مقدار موثر در حالت بدون هارمونی بیشتر باشد. اضافه ولتاژ برحسب مدت حضور، فرکانس و منشاء تقسیم بندی می شود

---

[1] Pantograph
[2] Catenary supports
[3] Insulators
[4] Clamp
[5] Contact wire
[6] Measanger wire
[7] Drooper
[8] Phase break

الف- اضافه ولتاژ موقت یا با فرکانس نامی- که بر اثر تغییرات ناگهانی در بار کششی، کلید زنی فیلترهای خازنی موازی یا سکشنهای شبکه بالاسری بوجود می آیند. زمان حضور چنین اضافه ولتاژهائی معمولا از چند ثانیه تجاوز نمی نماید.

ب- اضافه ولتاژهای رزنانس – که بر اثر تاثیر متقابل تزریق هارمونی توسط مبدلهای الکترونیک قدرت داخل لکوموتیوها به شبکه بالاسری و امپدانس شبکه بالاسری و شبکه قدرت بوجود می آید. زمان حضور چنین اضافه ولتاژهائی معمولا درحدود چند دقیقه است.

ج- اضافه ولتاژ کلید زنی-که بصورت موج ضربه بوده و توسط بستن یا باز شدن مدارشکنها[1] در شبکه بالاسری بوجود می آید و فرکانس آنها بین چند تا چند هزار هرتز و زمان حضور آنها در شبکه در حدود چند میلی ثانیه خواهد بود.

د- اضافه ولتاژ صاعقه-که بصورت موج ضربه بوده بر اثر اصابت صاعقه به شبکه بالاسری یا نزدیک آن بوجود می آید و زمان حضور آنها در شبکه در حدود چند صد میکروثانیه خواهد بود.

مقادیر حداکثر ولتاژ در حالات مختلف در جدول ۵-۱ آمده است. کلیرانسها و سطوح عایقی بر اساس حداکثر ولتاژ انتخاب می شوند.

۵-٤-۲- کلیرنسهای عمودی[2] و عرضی (جانبی)[3]

در شبکه الکتریکی راه آهنهای برقی علاوه بر کلیرنسهای فیزیکی در سازه ها باید از نظر الکتریکی بعضی از فاصله ها رعایت شود. حداکثر ارتفاع قطاری که از زیر شبکه بالاسری عبور می نماید باعث در نظر گرفتن حداقل ارتفاع برای شبکه بالاسری می شود، از طرف دیگر به علت افزایش قیمت، نباید ارتفاع شبکه بالا سری از حد معینی بیشتر باشد

ولتاژ نامی (کیلو ولت)	حداکثر ولتاژ مؤثر(کیلو ولت)	ضریب اضافه ولتاژ (V_{Ovpeak}/V_{Hpeak})			
		موقت	هارمونی	هارمونی و موقت	ضربه کلید زنی
۲۵	۲۷/۵	۱/۱۰-۱/۰۵	۱/۱۵-۱/۰۵	۱/۱۵-۱/۱۰	۲/۲۰-۱/۸
۵۰	۵۵/۰	۱/۱۰-۱/۰۵	۱/۱۵-۱/۰۵	۱/۱۵-۱/۱۰	۲/۲۰-۱/۸

جدول ۵-۱- مقادیر حداکثر ولتاژ در حالات مختلف

.

[1] Circuit breakers
[2] Vertical clearance
[3] Lateral clearance

ارتفاع انتخاب شده بر طراحی پانتوگراف[1]، ساختمان شبکه بالاسری و تجهیزات کنار خط و نیز نحوه بهره برداری تاثیر خواهد گذاشت.

در انتخاب کلیرنسهای شبکه بالاسری موارد زیر باید در نظر گرفته شوند

الف- حداکثر ارتفاع قطار با بار که در محدوده کلیرنس حمل می شود

ب- حد کلیرنس دینامیک

ج- کلیرنس الکتریکی بین قسمتهای برقدار و تجهیزات نزدیک خط در دو حالت دینامیک و استاتیک

د-ارتفاع و عرض پانتوگراف و میزان جابجائی آن در عرض و ارتفاع

ه- بالا رفتن و نوسانات پانتوگراف بر اثر حرکت پانتوگراف

و- قوس هادی تماس[2] بین دو دکل نگهدارنده

ز- فاصله عمودی بین هادی تماس و سیم حمال[3] (یا هر نگهدارنده دیگر)

ح - تلرانسها، نحوه نگهداری خط، شبکه بالاسری و تجهیزات دیگر

ط- کلیرنسهای فیزیکی

ی-موقعیت هادیهای تغذیه

ک- فعالیتهائی که در جهت حفظ ایمنی، راندمان سیستم انجام می شود

در کلیه حالات حداقل کلیرانس بصورت موازی و در جهت زاویه مثبت نسبت به صفحه بالای ریلها تعیین می شود. در قوسها، مقادیر عرضی و عمودی باید به مقادیر در جهتهای عرضی و عمودی واقعی تبدیل شوند. معمولا سطح بالای ریل (T/R) برای اندازه گیری های عمودی و محور وسط خط برای اندازه گیری های عرضی به عنوان مرجع استفاده می شود.

در قوسها نسبت به مسیرهای مستقیم تعیین کلیرنسها مشکل تر خواهد بود. در اینحالت باید به قطار و واگنها (یا سایر تجهیزات) اجازه داد تا مقدار جابجائی ناشی از سرعت در پیچ (یا هر عامل دیگر که باعث جابجائی نا مساوی در طرفین می شود) را داشته باشد.

در کلیرانس فیزیکی عرضی باید به ازای هر درجه از قوس حداقل ۲۵ میلیمتر بر کلیرنس مجاز افزود.(اطلاعات بیشتر در AREA Manual chapter 28)

در محل تغییر فاز[4] و سایر نقاط خاص در شبکه بالا سری باید کلیرنسها مورد توجه خاص قرار گیرند

۵-٤-۳-کلیرانسهای الکتریکی

---

[1] Pantograph
[2] Sag
[3] Measanger wire
[4] Phase break

با توجه به احتمال کم بروز صاعقه و نیز غیر اقتصادی بودن در نظر گرفتن آن هنگام تعیین کلیرانس الکتریکی و هماهنگی عایقی، معمولا جهت حفاظت عایقهای پست و سایر تجهیزات شبکه تغذیه (مانند ترانسفورماتورها،ترانسفورماتورهای ولتاژ و جریان، فیلتر هارمونیها و ..) در مقابل صاعقه، بجای افزودن برکلیرنس الکتریکی، از برق گیر[1] استفاده می شود وکلیرنسها فقط بر اساس ولتاژهای آمده در جدول ۵-۱ تعیین می شوند.

جهت هماهنگی عایقی و محاسبه پارامترهای الکتریکی، کلیرانس به دو نوع تقسیم می شوند

الف- کلیرانس الکتریکی استاتیک[2]- کلیرانسی است که برای شرایط دائمی یا حالاتی که در زمانها طولانی در شبکه می مانند انتخاب می شود.

کلیرانس الکتریکی استاتیک باید بدون حضور پانتوگراف بین قسمتهای برقدار شبکه بالاسری و قسمتهای زیر رعایت شود

- بقیه قسمتهای شبکه بالا سری که بدون برق هستند
- قسمتهای زمین شده شبکه بالا سری
- سازه های کنار مسیر مانند دیوارها، پلها و ...
- حد کلیرانس بار

در محلهائیکه احتمال توقف لکوموتیو وجود دارد کلیرنس استاتیک نسبت به قسمتهای فوق باید در حضور پانتوگراف با فشار کامل در نظر گرفته شود

کلیرانس الکتریکی استاتیک باید در حضور پانتوگراف بین قسمتهای برقدار شبکه بالاسری وقسمتهای زیر رعایت شود

- شبکه بالا سری در خطوط دیگر
- قسمتهای زمین شده شبکه بالا سری
- سازه های کنار مسیر مانند دیوارها، پلها و ...

ب- کلیرانس الکتریکی دینامیک[3]- حداقل کلیرانس مجازی است که به تناوب و مقطعی باید بین قسمتهای برقدار شبکه بالاسری و قسمتهای زیر رعایت شود

- بقیه قسمتهای شبکه بالا سری که بدون برق هستند
- قسمتهای زمین شده شبکه بالا سری
- سازه های کنار مسیر مانند دیوارها، پلها و ...

این حالات تناوب و مقطعی عبارتند از:

---

[1] Surge arrester
[2] Static clearance
[3] Dynamic clearance

- وقتی سرعت باد از ۹۰٪ مقدار احتمالی تجاوز نماید
- در فشار کامل پانتوگراف در حد کلیرانس دینامیک بار بدون فشار پانتوگراف

رعایت کلیرنس الکتریکی دینامیک بین قسمتهای برقدار شبکه بالاسری و حد کلیرانس دینامیک بار در غیاب پانتوگراف مجاز است.

در محلهائیکه محدودیت فضا وجود دارد (مانند تونلها، پلها) کلیرانس الکتریکی بین قسمتهای برقدار و قسمتهای زیر رعایت می شود. مشروط بر اینکه طول آن از ۱۰۰ متر تجاوز نکند و در شرایط کار عادی لکوموتیو روی خط توقف نکند.

- شبکه بالا سری در خطوط دیگر
- قسمتهای زمین شده شبکه بالا سری
- سازه های کنار مسیر مانند دیوارها، پلها

مقادیر رایج برای کلیرنسهای الکتریکی استاتیک و دینامیک در جدول ۵-۲ آمده است. مقدار دقیق کلیرانس باید بر اساس دمای محیط، دمای هادی و سرعت باد انتخاب شود.

اگرچه همواره سعی می شود کلیرنسها مطابق جدول ۵-۲ مورد استفاده قرار گیرد، اما در مواردی لازم است که در مقدار کلیرانس تغییراتی داده شود مانند

الف-برای تراک سکشنهای با طول زیاد (مثلا بیش از ۳۰۰ متر) و ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ متر از سطح دریا- شرایط جوی استاندارد با استفاده از چگالی نسبی هوا[1] تعریف می شود که عبارت است از

$$RAD = \frac{۲/۸۹b}{(۲۷۳ - t)}$$

که در آن

b فشار بارومتری برحسب کیلوپاسکال

t دما برحسب درجه سانتیگراد

هستند.

[1] Relative Air Density-RAD

ولتاژ نامی (کیلو ولت)	حداکثر ولتاژ مؤثر(کیلو ولت)	کلیرانس عادی		حداقل کلیرانس	
		استاتیک (mm)	دینامیک (mm)	استاتیک (mm)	دینامیک (mm)
۲۵	۲۷/۵	۲۵۰	۱۷۰	۲۰۰	۱۵۰
۵۰	۵۵/۰	۵۰۰	۳٤۰	٤۰۰	۳۰۰

جدول۵-۲- مقادیر روتین برای کلیرنسهای الکتریکی (این مقادیر برای استقامت در مقابل اصابت صاعقه نمی باشد)

برای مقادیر کمتر از ۰/۹۳ برای RAD در چگالی هوا در ارتفاع ۱۰۰۰ متر، کلیرانس به ازای هر ۱٪ کاهش RAD، ۱٪ افزایش کلیرانس پیشنهاد می شود، که به معنی ۱٪ افزایش کلیرنس به ازای افزایش ۱۰۰ ارتفاع در ارتفاعات بیش از ۱۰۰۰ متر خواهد بود.

هنگامیکه دمای محیط به میزان قابل توجهی از ٤۰ درجه سانتیگراد کمتر باشد (مانند داخل تونلهای طویل) به ازای هر ۱۰ درجه کاهش نسبت به ٤۰ درجه سانتیگراد می توان ۳٪ از کلیرنسهای ذکر شده در جدول ۵-۲ کاست.

ب- در تونلها، پلها و بعضی محلهای خاص می توان با کاهش سطح اضافه ولتاژ از مقادیر کلیرنس کاست. کاهش سطح اضافه ولتاژ با استفاده از برق گیر یا اصلاح شکل یا محیط فاصله هوائیها صورت می گیرد. در بعضی از حالات ممکن است پذیرش ریسک جرقه روی مدار اقتصادی تر از افزایش کلیرنس باشد، به عنوان مثال ممکن است در شبکه ۲۵ کیلو ولت کلیرنس دینامیک ۷۰ میلیمتر بکار رود.

ج- در محیطهای آلوده ممکن است برحسب مطالعات انجام شده کلیرنسها افزایش یابد.

در تعیین کلیرانسهای الکتریکی استاتیک حالات زیر نیز در نظر گرفته می شود

۵-٤-٤- کلیرانس بار

محدوده حرکت قطار خصوصا ارتفاع قطار توسط این کلیرانس مشخص می شود و هنگام تعیین آن باید حرکتهای نامنظم لکوموتیو و قطار (مانند حرکت ناشی از اعوجاج چرخ و ریل) در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه ارتعاشات چرخ و ریل ممکن است در بعضی از سرعتها دچار رزنانس گردد جابجائی ناشی از ارتعاشات حتی ممکن است به ۵۰ تا ۷۵ میلیمتر هم برسد. استفاده از سیستم تعلیق مناسب می تواند از دامنه ارتعاشات بکاهد. اما در کلیه حالات معمولا تفاوت بین کلیرانس استاتیک و دینامیک بیشتر از دامنه ارتعاشاتی است که ممکن است در عمل برای قطار پیش بیاید، لذا معمولا کلیرانس استاتیک اصلی ترین عمل محدود کننده به شمار می رود. بر اساس استاندارد بکار رفته ممکن است ارتفاع قطار ۵۱۸۰، ۵۸۰۰، ٦۱۰۰ میلیمتر و یا حتی بیشتر انتخاب شود.

برای حالات غیر عادی باید جابجائیهای عرضی نیز مد نظر قرار گیرند.

الف- جابجائی عمودی شبکه بالاسری[1] (L) - حداکثر جابجائی عمودی هادی تماس، سیم حمال و سایر اجزا برقدار مدار که معمولا تحت تاثیر پانتوگراف بوجود می آید و ممکن است تحت تاثیر باد تشدید شود. تعداد پانتوگرافها می تواند بر مقدار L موثر باشد. مقدار L بر سرعت بهره برداری و قیمت تجهیزات موثر خواهد بود.

ب- جابجائی پانتوگراف (Lt و S) – علاوه بر جابجائی عمودی پانتوگراف در اثر جابجائی عمودی هادی تماس باید جابجائی ناشی از حرکت عمودی مربوط به حرکت زیگزاگ سیم بالای خط[2] (Lt) و نوسانات لکوموتیو و پانتوگراف در نظر گرفته شود. معمولا مقدار مجاز ۲۵ میلی متر در نظر گرفته می شود.

معمولا حداقل نوسانات عرضی پانتوگراف (S) که بر روی لکوموتیو نصب شده مطابق جدول ۵-۳ انتخاب می شود.

حداقل نوسانات عرضی پانتوگرافی که بر روی ترن ستها نصب می شود معمولا بسیار بزرگتر از مقادیر جدول ۵-۳ است و باید بر اساس مشخصات اجزا محاسبه شود.

ارتفاع (میلیمتر)	S (میلیمتر)
۵۸۰۰	۲۶۰
۶۷۰۰	۳۲۰
۷۶۰۰	۳۸۰

جدول ۵- ۳ - حداقل نوسانات عرضی پانتوگراف (S)

۵-٤-۵- قوس هادی تماس بین دو دکل نگهدارنده[3] (G)

پایین ترین نقطه قوس هادی تماس بین دو دکل نگهدارنده در بدترین حالت باید در تعیین کلیرانسهای دینامیک و استاتیک نسبت به حد کلیرانس بار در نظر گرفته شود. این قوس بر ارتفاع دکلها موثر خواهد بود. در شبکه هائی که نیروی کشش مکانیکی توسط وزنه تنظیم می شود قوس بوجود آمده نباید تحت تاثیر دما تغییر نماید.

۵-٤-٦- فاصله عمودی قسمتهای برقدار شبکه بالاسری (D)

[1] OCS Uplift (L)
[2] offset
[3] Sag

که عبارت است از فاصله عمودی بین پایین ترین نقطه هادی تماس با بالاترین نقطه برقدار شبکه بالاسری. برای تعیین کلیرانسها پیشنهاد می شود این مقدار در محل دکلها اندازه گیری شود. مقدار این فاصله را می توان با کوتاه کردن فاصله بین دکلها یا افزودن نیروی کشش کاهش داد.

جدول ۵-٤ مقادیر تلرانس و مجاز کلیرانسها را نشان می دهد

	علامت	ارتفاع (میلیمتر)*	مسیر(میلیمتر)**
خط اصلی***	T	+۲۵	±۲۵
حد مجاز تراز****	F1	+۸۰	-
یخ****	F2	+۱۰۰	-
پلها، تونلها و سایر سازه های بالی خط	Ts	-۱۵	±۱۵
شبکه بالا سری	C	±۵۰	±۵۰

جدول ۵-٤ مقادیر تلرانس و مجاز کلیرانسها

* مثبت به سمت بالا و منفی به سمت پایین

** در تونلهای با سقف قوسی عدم هم محوری در عرض می تواند باعث افزایش کلیرانس عمودی شود

*** مقادیر داده شده برای خطوط اصلی با ترافیک سنگین است، بر حسب اهمیت و ترافیک خط، ممکن است تلرانس کمتر یا بیشتر باشد

**** بر حسب شرایط محیط وکار ممکن است تغییر نمایند

۵-٤-۷- مشخصات عایقها در شبکه بالاسری (شامل تجهیزات خط- ترانسفورماتورها، سوئیچ گیرها، فیلترها و خازنها)

جدول ۵-۵ استقامت الکتریکی عایقهای الکتریکی در حالات برقدار مرطوب[1]، موج ضربه صاعقه[2] و حداقل طول سطح نشتی[3] را در شبکه هوائی نشان می دهد.

مقادیر آمده در این جدول نیز با تغییراتی مواجه است از جمله:

الف- مقادیر این جدول تا ارتفاع ۱۰۰۰ متر صادق بوده و در ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ متر کلیه مقادیر به ازای هر ۱۰۰ متر ۱٪ افزایش می یابد.

[1] Wet power witstand voltage
[2] Lightning impulse witstand voltage
[3] Minimumsurface leakage distance

ب- مقادیر جدول در محدوده دمای ٤٥- الی ٤٠ درجه سانتیگراد معتبر است.

حداقل طول سطح نشتی در جدول ٥-٥ تقریبا برابر ٢٥ mm/kV ولتاژ نامی است. این مقدار بصورت وسیع در آمریکا بکار رفته و توسط IEC برای خطوط انتقال در محیطهای با آلودگی کم پیشنهاد شده است. چگالی نمک مجاز روی عایقهای به گونه ای که عایق وظیفه خود را بخوبی انجام دهد بین ٠/٣ الی ٠/٦ گرم بر متر مربع است.با توجه به حضور کم جرقه روی عایقهای خطوط راه آهن برقی به نظر می رسد این مقدار ناخالصی در محیطهای با آلودگی متوسط قابل قبول باشد. اما در محیط های با آلودگی زیاد (مثلا ٣ گرم بر متر مربع) یا با آلودگی های همراه با غبار فلزهای هادی باید در تعیین سطح عایقی توجه خاص نمود و آنرا از طریق نتایج آزمایش در شرایط محل تعیین نمود.

ولتاژ نامی (کیلو ولت)	حداکثر ولتاژ مؤثر(کیلو ولت)	استقامت در حالت برقدار مرطوب (کیلو ولت)	استقامت در حالت موج ضربه صاعقه (BIL) kV_p	حداقل طول سطح نشتی mm
٢٥	٢٧/٥	٧٥	١٥٠	٧٠٠
٥٠	٥٥/٠	١٢٠	٣٠٠	١٤٠٠

جدول ٥-٥- استقامت الکتریکی عایقهای الکتریکی درحالات مختلف در شبکه هوائی

از جمله روشهای حل این مشکل:

- استفاده ازعایق بزرگتر
- تمیز کردن منظم عایق ها
- استفاده از پوشش گریس (که بصورت منظم تعویض می شود)
- استفاده از عایقهای ارگانیک

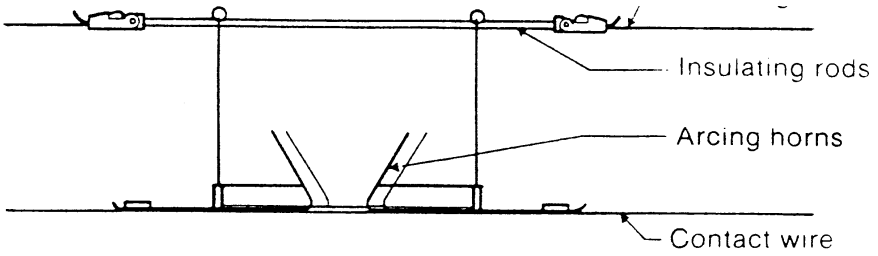
به نظر می رسد در بیشتر موارد استفاده از عایق بزرگتر اقتصادی ترین روش باشد.

٥-٤-٨-کلیرانس فیزیکی و محاسبه کلیرانس کل

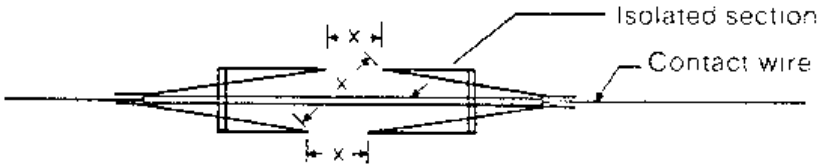
هر شرکت راه آهن باید یک دیاگرام کلیرانس استاندارد را برای تجهیزات خود در نظر داشته باشد و سایر تجهیزات شامل شبکه بالاسری نباید درون این کلیرنسها قرار گیرند.تفاوت بین ابعاد دیاگرام کلیرانسها و حد کلیرانس بار نشاندهنده تلرنسها، حد مجاز برای جابجائی قطار (واگن) و .... است.

شکل ٥- ٧ کلیرانس در جداساز را نشان می دهد. در حالتیکه جداساز بین یک قسمت برقدار و زمین باشد حداقل کلیرانس برابر کلیرانس استاتیک و در صورتیکه بین دو قسمت برقدار باشد حداقل کلیرانس، دو برابر کلیرانس استاتیک است.

کلیرانس افقی با نزدیکترین خط مجاور نباید کمتر از دو برابر کلیرانس استاتیک کمتر باشد. اگر دو قسمت شبکه بالاسری توسط منبع یکسان تغذیه شوند، حداقل کلیرانس بین دو قسمت برقدار نباید کمتر از کلیرانس استاتیک باشد اگر توسط دو فاز مختلف تغذیه شوند حداقل کلیرانس ۱/۷۳ برابر کلیرانس استاتیک است.

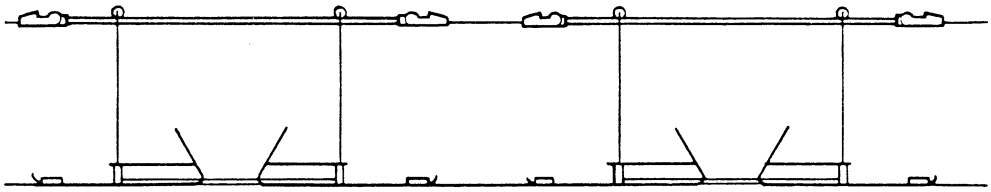


تصویر از کنار

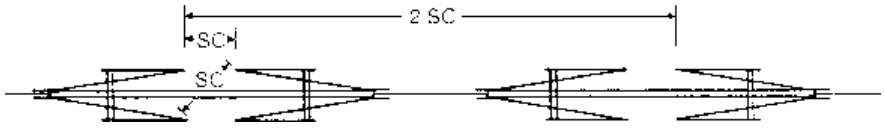


تصویر افقی

الف- جداساز سکشن X=1.25 SC



تصویر از کنار



تصویر افقی

ب- جداساز سکشن

SC کلیرانس استاتیک

شکل ۵-۷- شکل کلی جداساز سکشن و جداساز سکشن

۵-٤-۹- هماهنگی سطح عایقی[1] و کلیرانسها

عایقبندی و کلیرانسها بین قسمتهای برقدار با هم و با زمین باید به گونه ای باشد که خطرات احتمالی برای افراد و تجهیزات مجاور و تلفات در شبکه تغذیه را به مقادیر قابل قبول از نظر فنی و اقتصادی برساند. نا هماهنگی در انتخاب سطوح عایقی و کلیرانسها در یک مجموعه می تواند از یک طرف باعث افزایش بی جهت در هزینه ها و از طرف دیگر وجود نقطه حساس در شبکه شود.

۵-٤-۱۰- اجتناب از خوردگی[2]

معمولا مسیر برگشت جریان کشش توسط خط تامین می شود. در حالاتیکه به علت وجود بلوکهای اتوماتیک[3] یا سایر سیستمهای کنترل خط در قسمتهای مختلف ایزوله می شود، پیوستگی مسیر در محل ایزولاسیون باید توسط تجهیزات یا مسیرهای کمکی تامین شود.

جهت اطمینان از اینکه جریان کشش بر نگهدارنده های فلزی تاثیر نداشته و باعث خوردگی آنها نمی شود، مسیر برگشت جریان بصورت الکتریکی از سیستم حفاظت زمین نگهدارنده ها (که با اتصال دکلها به یکدیگر به وسیله دو کابل آلومینیمی تامین می شود) جدا می شود.

در صورت بروز شکست عایقی که دکل برقدار می شود، توصیه می گردد دکل به خط متصل شود تا سیستم حفاظتی پستها بتوانند عمل کنند. برای این منظور در فواصل ۳ کیلومتر، سیستم حفاظت زمین و خط از طریق یک سیستم کنترل سطح ولتاژ[4] به یک دیگر متصل می شوند. تا زمانیکه ولتاژ بین خط و سیستم زمین صفر یا کمتر از ۲۵۰ ولت است دو سیستم از نظر الکتریکی از هم جدا هستند. در صورت بروز خطا و افزایش سطح ولتاژ، سیستم کنترل سطح ولتاژ عمل کرده و دو مدار را به یکدیگر وصل می کند که خود منجر به عملکرد سیستم حفاظتی در پست می شود.

۵-٤-۱۱-زمین

عمل زمین کردن با اهداف حفاظت یا بهره برداری انجام می شود و هر مدار زمین می تواند هر دو هدف را تامین نماید. برای تعیین مشخصات زمین می توان از استانداردهای مربوطه از قبیل استاندارد شماره IEEE 80 استفاده نمود.

۵-٤-۱۱-۱- زمین کردن با هدف بهره برداری

در اینحالت عمل زمین کردن با هدف کسب اطمینان از عملکرد در محدوده مجاز معیارهای زیر انجام می شود:

---

[1] Insulating coordination
[2] corrosion
[3] automatic block
[4] voltage-regulator valves

- رگولاسیون ولتاژ در طول شبکه بالاسری
- عملکرد سیستمهای حفاظتی اتصال زمین
- گرم شدن هادیهائی که جریان برگشت زمین را انتقال می دهند
- عملکرد سیستمهای مخابراتی وسیگنالینگ مجاور

۵-٤-۱۱-۲- زمین کردن با هدف بهره برداری

جهت حفاظت کارکنان و افراد مجاور تجهیزات در مقابل شوک الکتریکی ناشی از القا ولتاژ یا تماس مستقیم آن در تجهیزات بکار می رود.

در عمل ریل مستقیما به سیستم زمین وصل نمی شود و در صورت نیاز باید ریل را از طریق امپدانس به زمین وصل نمود. در مواردیکه اتصال زمین به ریل مورد نیاز باشد، به جای این اتصال، از اتصال سیستم زمین به هادی برگشت استفاده می شود.

۵-٤-۱۲- زمین کردن اجزا شبکه سراسری

اجزا زیر باید به گونه ای به سیستم زمین متصل شوند که شرایط استاندارد IEEE80 رعایت شود.

۵-٤-۱۲-۱- دکلها و سایر سازه های نگهدارنده

این تجهیزات ممکن است بر اثر جریان چرخشی کار عادی یا جریان اتصال کوتاه نسبت به یک زمین دور دارای ولتاژ شوند.

دکلها و سایر سازه ها باید چنان زمین شوند که ولتاژ تماس در حالت عادی به ٢٤ ولت موثر و در حالت اتصال زمین به ۲۳۰ ولت موثر در کلیه نقاط کاهش یابد. برای محاسبه این ولتاژ می توان از استاندارد IEEE80 استفاده نمود و زمان وجود ولتاژ برابر زمان عملکرد سیستم حفاظتی است. برای زمین کردن می توان از معیار فوق برای تعیین موقعیت دو دکل متوالی که زمین می شوند استفاده نمود، اما به هر حال فاصله دو دکل متوالی که زمین می شوند نباید بیش از ۵۰۰ متر باشد.

کلیه سازه ها در ایستگاهها و سایر محل های پر رفت آمد بدون توجه به معیارهای فوق باید زمین شوند.۸۲۱۵و ۸۲۱٦ ص ۳۹

۵-٤-۱۲-۲- کلیدها، جداسازها و فیوزها

بدنه فلزی این تجهیزات توسط سیم مسی که سطح مقطع آن کمتر از ۵۰ میلیمتر مربع نباشد به سیستم زمین متصل می شود.

۵-٤-۱۲-۳- برقگیر ها

باتوجه به اینکه برق گیرها وظیفه کنترل سطح ولتاژ نسبت به زمین و محدود کردن اضافه ولتاژها را بر عهده دارند، لازم است برق گیرها بین زمین و قسمتهای برقدار قرار گیرند.

۵-٤-۱۲-٤- سیستم های حفاظتی

باید هماهنگی حفاظتی برای وسائل ودستگاههای بکار رفته در پستهای کشش وشبکه در نظر گرفته شود تا چنانچه در قسمتی از پستهای کشش یا خطوط اتصال کوتاه اتفاق افتاد بلافاصله شناسایی واز قسمتهای دیگر جدا شود بطوریکه این خرابی توسعه پیدا نکند واز خسارت رسیدن به دستگاهها وخطوط دیگر جلوگیری بعمل آید .

برای این منظور در طول مسیر جهت حفاظت دستگاهها و وسائل تولید کننده الکتریسیته دستگاهها و وسائل پستهای کشش وشبکه بالاسری باید سیستم حفاظتی مناسبی طراحی ونصب نمود. عملکرد این سیستمهای حفاظت باید به طور هماهنگ صورت پذیرد.

در صورتیکه تغذیه بصورت رادیال (T-off) انجام گرفته باشد این هماهنگی با دستگاهها و وسائل تولید الکتریسیته با یک سیستم حفاظتی جهت سه ترمینال باید به انجام برسد .

۵-٤-۱۲-۵- تجهیزات پستهای کشش و کلیدزنی

۵-٤-۱۲-٦- ریل در انتهای خط

جهت اجتناب از اضافه ولتاژ در ریل از طریق یک امپدانس یا مستقیما، انتهای یک خط را زمین می کنند.

۵-٤-۱۲-۷- سایر سازه های فلزی [۵]

۵-۵- ساختمان شبکه بالاسری[1]

شبکه بالاسری عبارت است از مجموعه هادی های معلق که در تمام طول مسیر بالای قطار قرار گرفته و از طریق پانتوگراف انرژی الکتریکی را به قطار منتقل می کند. شبکه بالاسری به علت شکل بوجود آمده از آویزان شدن سیم بین دو دکل کتناری[2] نیز نامیده می شود. جهت جبران شکل این منحنی سیم باید در طول خط کشیده شده و بصورت افقی نگهداشته شود.

هادی تماس و پانتوگراف هردو باید تحمل جریان عبوری و فشارهای مکانیکی ناشی از حرکت قطار، باد، یخ و .. را تحمل کرده و تماس قابل قبولی را با یکدیکر داشته باشند. ضمنا باید در اثر تغییرات دمای محیط اختلالی در عملکرد آنهابوجود نیاید. با توجه به اینکه هادی تماس[3] و پانتوگراف باید با نیروی نسبتا ثابت تماس با یکدیگر باشند لازم است هادی تماس در فاصله ای از ریل بالای سر قطار قرار گیرد که بازوی پانتوگراف بتواند آنرا لمس نماید ضمن اینکه حتی المقدور این فاصله باید ثابت باشد. بنابراین در طراحی شبکه بالاسری موارد ذیل در نظر گرفته می شود.

- متناسب با سرعت قطار باشد

---

[1] Overhead contact wire
[2] Catenary
[3] Contact Wire

– در فاصله ای از ریل بالای سر قطار قرار گیرد که بازوی پانتو گراف بتواند با مناسبترین نیرو لا پآن در تماس باشد.

– در هنگام باد یا عبور قطار با سرعت مجاز حداقل نوسانات را داشته باشد

– در مقابل خوردگی، نوسانات مکانیکی، گرما و ... استحکام لازم را در طول عمر سیستم داشته باشد.

بر حسب سرعت و نوع طراحی انواع مختلفی از شبکه بالاسری ممکن است بکار رود. در یک سیستم با سرعت کم (مانند تراموا و اتوبوس برقی یا داخل دپوها) یک شبکه ساده مانند شکل ۵–۸ که با آویزان کردن هادی تماس بین دو دکل مجاور توسط مقره ها بدست می آید کفایت می کند.

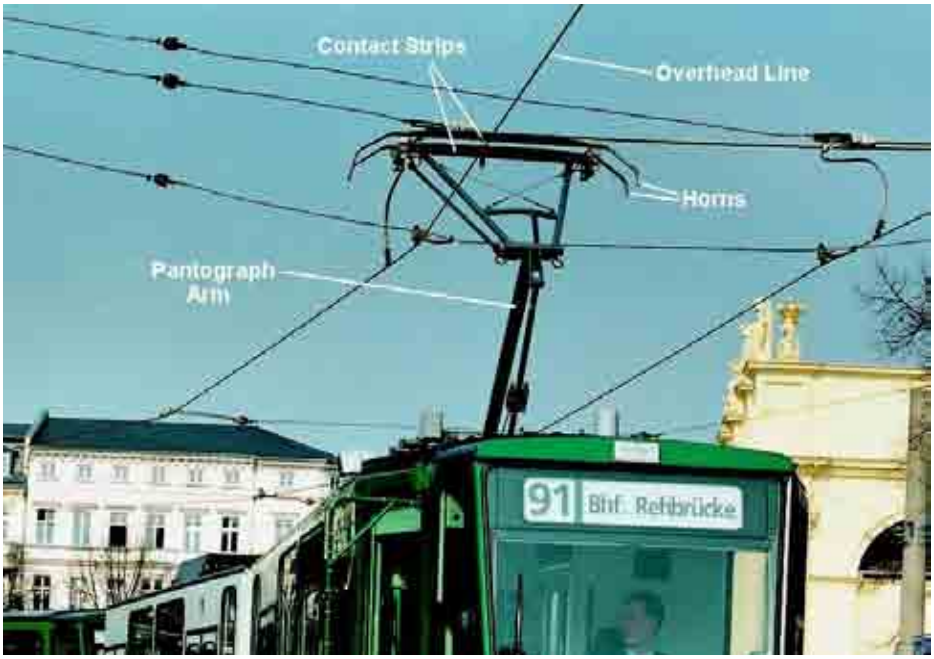
با توجه به موارد ذکر شده، در سرعتهای بالا یک سیم ساده که بین دکلها آویزان شود نمی تواند نیازهای مکانیکی شبکه بالاسری را تامین نماید. بنابراین در شبکه بالاسری ابتدا یک سیم به عنوان هادی حمال بین دو دکل متوالی آویزان می شود، سپس هادی تماس توسط آویزها در فواصل معین به هادی حمال آویزان می شود. افزایش سرعت بر پیچیدگی طرح شبکه بالاسری می افزاید. شکل ۵–۹ چند نوع ساختمان مکانیکی شبکه بالاسری که در رنج سرعتهای متفاوت بکار می رود را نشان می دهد. شکل ۵–۱۰ ساختار کلی شبکه بالاسری را نشان می دهد. جهت سایش یکنواخت تمام سطح جاروبک و افزایش طول عمر آن معمولا هادی تماس بالای خط روی یک سطح افقی حرکت زیگزاگ دارد. مشخصات شبکه بالاسری کاملا متناسب با سرعت و نوع طراحی است شکل ۵–۱۱ شبکه بالاسری بکار رفته در چند نوع قطار سریع السیر در کشورهای مختلف را نشان می دهد.

در ایتالیا به علت جریان زیاد در ولتاژ ۳ کیلو ولت از شلکه بالاسری دوبل استفاده شده است. جدول ۵–۶ مشخصات شبکه بالاسری در چند مسیر سریع السیر را مقایسه می کند.

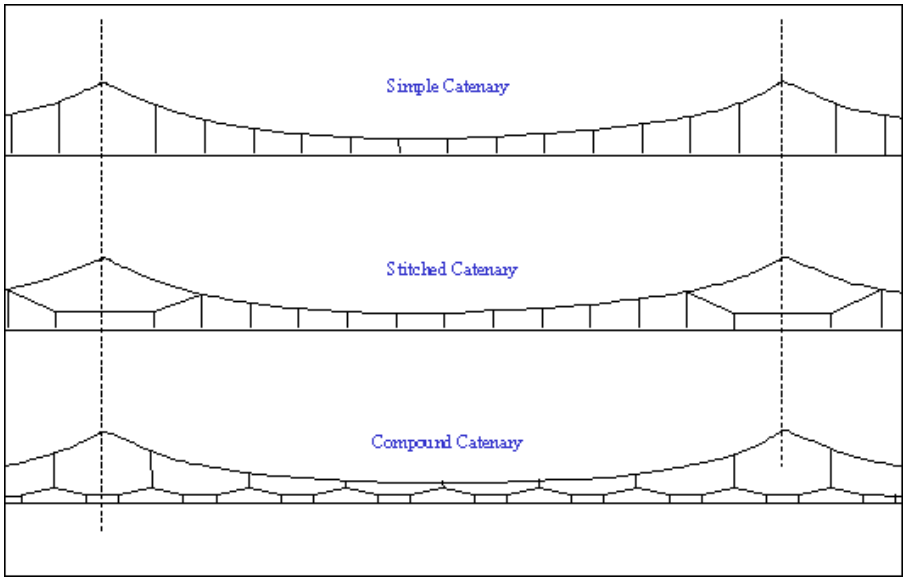
شبکه کمپوند ظرفیت جریانی بالاتر و جابجایی عمودی کمتر پانتوگراف را دارد اما دارای قطعات بیشتر و طراحی پیچیده تری است.

در اروپا جهت جبران جابجایی پانتوگراف یک قوس در طول هادی تماس بوجود می آورند به گونه ای که در وسط اسپن[1] هادی تماس به اندازه یک هزارم طول اسپن پایین تر از هادی تماس در محل دکلها است. در عمل این جابجایی بین ۲۰ تا ۳۰ میلیمتر است. این عمل به پانتوگراف اجازه می دهد در جابجایی های ریل، سیستم تعلیق یا ..... جابجایی عمودی داشته باشد.

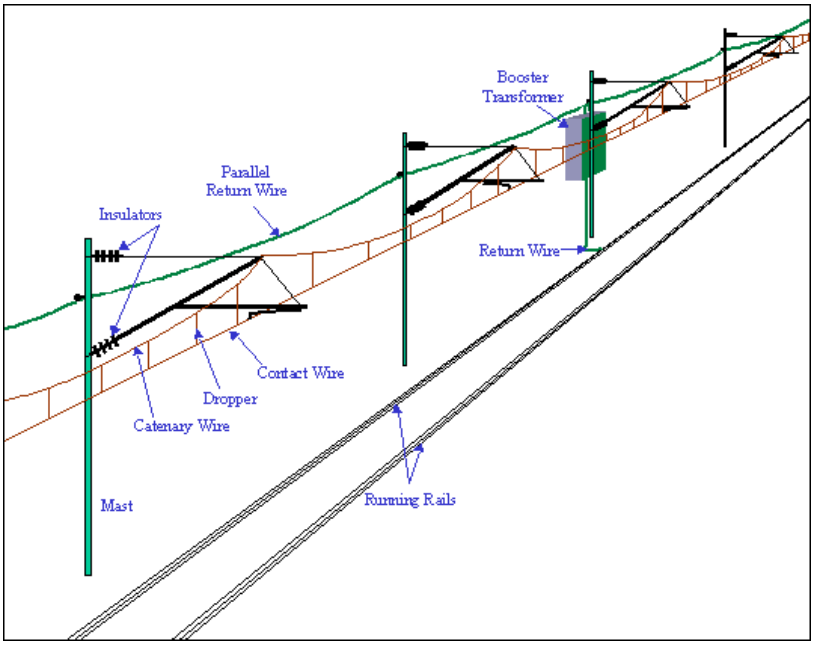
[1] فاصله دو دکل



شکل ۵-۸ شبکه بالاسری ساده



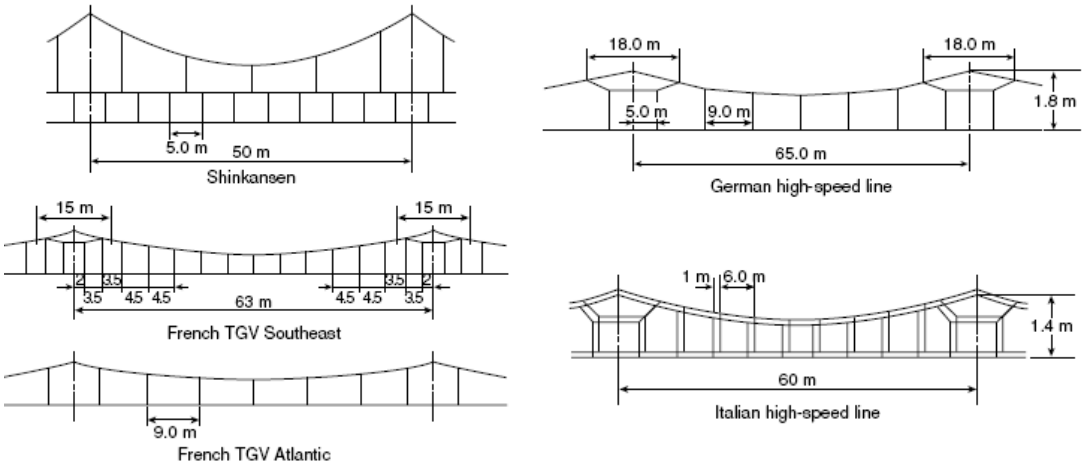
شکل ۵-۹ - چند نوع ساختمان مکانیکی شبکه بالاسری در رنج سرعتهای متفاوت



شکل ۵-۱۰ ساختار کلی شبکه بالاسری

Item		Japan	France		Germany	Italy
			TGV Southeast	TGV Atlantic		
Catenary type		Heavy compound type	Stitched and simple	Simple	Stitched and simple	Twin stitched and simple
Standard span [m]		50	63 (Stitched wire 15)	63	65 (Stitched wire 18)	60 (Stitched wire 14)
Standard wire height [m]		5.0	4.95	4.95	5.3	4.85
System height [mm]		1,500	1,400	1,400	1,800	1,400
Wire grade	Suspended	St 180 mm^2 (1.450 kg/m)	Bz 65 mm^2 (0.59 kg/m)	Bz 65 mm^2 (0.59 kg/m)	Bz11 70 mm^2 (0.63 kg/m)	CdCu 153.7 mm^2 (1.42 kg/m)
	Auxiliary suspended	Cu 150 mm^2 (1.375 kg/m)	Bz 35 mm^2	—	Bz11 35 mm^2 (0.31 kg/m)	(0.30 kg/m)
	Contact wire	Cu 170 mm^2 (1.511 kg/m)	CdCu 120 mm^2	Cu 150 mm^2 (1.33 kg/m)	CuAg Ri 120 mm^2 (1.08 kg/m)	CuAg 151.7 mm^2 (1.35 kg/m)
Contact line total density [kg/m]		4.34	1.65	1.92	1.71	2.77 × 2
Catenary wire tension	Suspended [N]	24,500	14,000	14,000	15,000	18,400
	Auxiliary suspended [N]	14,700	4,000 (Stitched wire)	—	2,800 (Stitched wire)	2,900 (Stitched wire)
	Contact wire [N]	14,700	14,000	20,000	15,000	14,700
	(Total tension) [N]	(53,900)	(28,000)	(34,000)	(30,000)	(33,100 × 2)
Wave propagation velocity of contact wire [km/h]		355	414	441	424	376
β (train speed/ wave propagation velocity)		0.68, 0.76 (= 240, 270/355)	0.65 (= 270/414)	0.68 (= 300/441)	0.59 (=250/424)	0.66 (= 250/376)
Pre-sag		None	1/1,000	1/1,000	1/1,000	1/1,000

جدول ۵-٦ – مقایسه مشخصات شبکه بالاسری در چند مسیر سریع السیر



شکل ۵-۱۱ شبکه بالاسری بکار رفته در چند نوع قطار سریع السیر در کشورهای مختلف

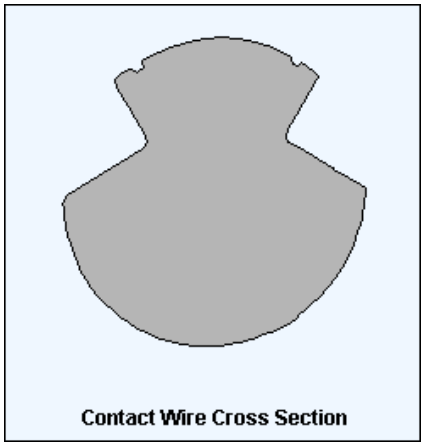
۵-۵-۱-هادی شبکه بالاسری (هادی تماس[1])

هادی تماس یکی از اجزای اصلی شبکه بالاسری است. به علت سایش دائمی جاروبک پانتوگراف روی سیم باید هادی تماس باید گرد باشد و به علت اینکه بست نگهدارنده ها مانع حرکت پانتوگراف روی سیم نشود، سطح مقطع هادی تماس باید مطابق شکل ۵-۱۲ باید دارای یک قوس اضافی باشد تا بستها بتوانند هادی تماس را نگهدارند بدون اینکه مانع حرکت پانتوگراف شوند. شکل ۵-۱۳ نحوه اتصال بستها به هادی تماس را نشان می دهد.

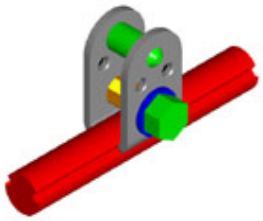
معمولا هادی تماس از جنس مس سخت[2] ساخته می شود. مس به علت مقاومت الکتریکی و خوردگی کم در مقابل هوا هادی مناسبی برای شبکه بالاسری است.

در ژاپن از مس با ۳ درصد قلع استفاده می شود. در تونلها جهت کاهش مقاومت و حرارت ناشی از آن از آلیاژ مس و نقره استفاده می شد اما امروزه از آلیازهای مس و قلع استفاده می شود. در قطارهای شینکانسن جهت افزایش استقامت مکانیکی هادی ها در سرعتهای بالا از دو نوع هادی مس و آلومینیم با مغز فولادی مطابق شکل ۵-۱٤ استفاده شده است.

[1] Contact-Wire
[2] hard-drawn copper



شکل ۵-۱۲- سطح مقطع هادی تماس



شکل ۵-۱۳ نحوه اتصال لستها به هادی تماس

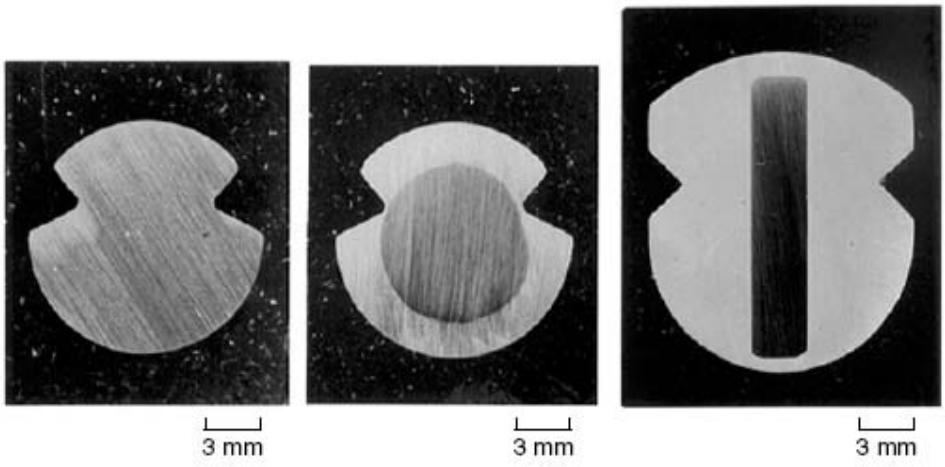
هادی های حمال[1] می توانند از جنس فولاد گالوانیزه و به صورت افشان (هادی های فولادی گالوانیزه به هم پیچیده[2] باشند. در سکشن هایی که جریان زیاد است می توان از هادی حمال مسی نیز استفاده نمود. همچنین جهت افزایش ظرفیت و نیروی کشش هادی بصورت اقتصادی می توان از هادی های آلومینیمی که توسط فولاد تقویت شده اند[3] (ACSR) استفاده نمود.

بستهای هادی حمال محدودیتهای مکانیکی هادی تماس را ندارند اما باید از جنس مواد با استقامت مکانیکی زیاد و مقاوم در مقابل خوردگی مانند فولاد ضد زنگ و آلیاژهای مس انتخاب شوند. مواقعی کاهش وزن شبکه مد نظر باشد ممکن است از آلیاژهای آلومینیم نیز استفاده شود. شکل ۵-۱۵ حالت کلی این اتصال را نشان می دهد

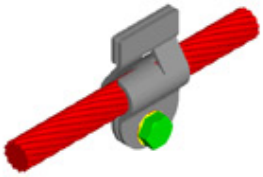
[1] Messenger wire
[2] galvanized stranded-steel wire
[3] Aluminium steel rainforced (ACSR)

۵-۵-۲- شبکه بالاسری با هادی سخت[1]

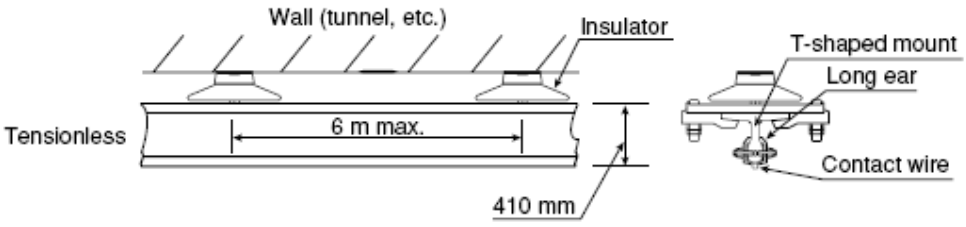
این سیستم برای اتصال بین مسیرهای شهری و متروها و نیز در تونلها قابل استفاده است. شکل ۵-۱۶ و ۵-۱۷ ساختار این سیستم را نشان می دهند. حداکثر سرعت این سیستم حدود ۹۰ کیلومتر بر ساعت است.



شکل ۵-۱۴ سطح مقطع دو نوع هادی مس و آلومینیم با مغز فولادی

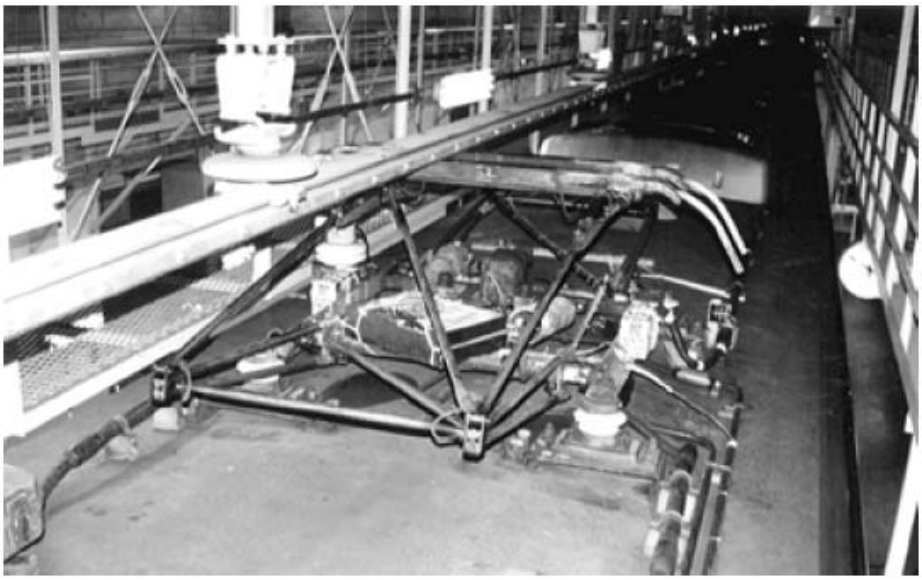


شکل ۵-۱۵- بست هادی حمال



شکل ۵-۱۶- شبکه بالاسری با هادی سخت

[1] Overhead rigid conductor system



شکل ۵-۱۷- شبکه بالاسری با هادی سخت در حضور پانتوگراف

۵-۵-۳- سرعت انتشار موج طولی[1]

کشش و وزن واحد طول شبکه مهمترین پارامتر در تعیین رفتار مکانیکی شبکه بالاسری هستند. کشش کل بر اساس نیروی سمت بالای پانتوگراف و جابجایی عمودی شبکه بالاسری تعیین می شود. نیروی کشش مورد نیاز در شبکه بالاسری معمولا توسط وزنه هایی که در دو طرف یک اسپن آویزان می شود تامین می گردد.

در شینکانسن ژاپن کشش برابر ٥٤ kN و در قطارهای اروپایی بین ۲۸ تا ۳٤ کیلونیوتن است. در قطارهای ایتالیایی کشش ٦٦ kN است زیرا از شبکه بالاسری دوبل با هادی با سطح مقطع بزرگ (شبکه بالاسری سنگین وزن) استفاده شده است. نیروی سمت بالا در پانتوگراف قطارهای ژاپنی ۷۰ تا ۸۰ نیوتن و ۱۳۰ تا ۲۵۰ کیلونیوتن در قطارهای فرانسوی و آلمانی و ۲۰۰ تا ۳۰۰ نیوتن در قطارهای ایتالیایی است. تفاوت نیروها ناشی از تفاوت وزن شبکه در این کشورها است نیروی بزرگتر به معنی شبکه سنگین تر و تعداد پانتوگراف مورد نیاز کمتر است. از طرف دیگر هرچه شبکه سبکتر باشد سیستم پایدارتر است.

سرعت انتشار موج طولی در شبکه برابر جذر نسبت نیروی کشش به وزن واحد طول شبکه بالاسری است. یعنی

$$v = \sqrt{\frac{T}{w}}$$

[1] Lateral wave propagation velocity

که در آن

T نیروی کشش در هادی تماس بر حسل نیوتن

W وزن واحد طول هادی تماس بر حسب کیلوگرم بر متر

v سرعت انتشار موج بر حسب متر بر ثانیه (برای تبدیل به کیلومتر بر ساعت کافی است فرمول فوق در عدد ۳/٦ ضرب شود)

هستند.

این پارامتر مهمترین پارامتر شبکه بالاسری است و تعیین کننده سرعت بحرانی است. نسبت سرعت قطار به سرعت انتشار موج را با β نشان می دهند. جدول ۵-۳ سرعت انتشار موج و β را در قطارهای سریع السیر مختلف نشان می دهد.

افزایش β، وزن شبکه و سختی اتصالات باعث می شود حفظ اتصال بین هادی تماس و پانتوگراف مشکل تر شود. هرگاه β از ۰/۷ الی ۰/۸ تجاوز نماید تماس بین پانتوگراف و هادی تماس کاملا نا مطلوب خواهد بود. در این سرعت تماس به طور فزاینده ای از بین می رود و در مواردی می تواند موجب انحدام شبکه بالاسری شود.

بنابر این باید β کوچک یا به عبارت دیگر سرعت انتشار موج طولی خیلی بیشتر از سرعت قطار باشد. افزایش سرعت انتشار موج طولی با افزایش نیروی کشش و استفاده از هادی های سبکتر ممکن است. با در نظر گرفتن مسائل ایمنی و استفاده از هادی تماس مسی سرعت ۵۰۰ km/h ممکن گردیده است. هرگونه افزایش در سرعت انتشار فقط با استفاده از هادی های سبکتر با استفامت در مقابل کشش بیشتر ممکن است. برای این منظور استفاده از آلیاژهای مس، هادیهای آلومینیمی با مغز فولادی و مسی با مغز فولادی تحت بررسی هستند.

انتخاب نا مناسب نیروی کشش و سرعت غلط منجر به جدا شدن پانتوگراف و هادی تماس در طول حرکت می شود. هر بار جدا شدن و اتصال مجدد پانتوگراف و هادی تماس ضمن کاهش انرژی ورودی، یک جرقه به همراه دارد که باعث صدمه دیدن پانتوگراف و هادی تماس می شود.

استفاده از دو پانتوگراف در یک قطار می تواند مشکل مشابهی را بوجود آورد، زیرا پانتوگراف جلویی موجی را روی هادی تماس بوجود می آورد که مانع تماس کامل پانتوگراف عقب با هادی تماس می شود. افزایش سرعت بر شدت مشکل فوق می افزاید.

در قطارهای TGV (فرانسوی) قطار دارای دو پانتوگراف در ابتدا و انتهای قطار است اما همواره قطار از پانتوگراف جلویی استفاده می کند (پانتوگراف عقب پایی است) و مدار قدرت کابین عقب از طریق یک کابل ۲۵ کیلوولت توسط پانتوگراف جلو تغذیه می شود.

درقطارهای انگلیسی به علت مسایل ایمنی اینکار ممنوع است.

موج روی هادی تماس باعث جمع شدن سیمهای آویز و ناقص شدن اتصال الکتریکی و مکانیکی بین قسمتهای مختلف آن می شود.

شبکه بالاسری معمولا به قسمتهای مجزا تقسیم می شود. برای اینکه این قسمتها از یکدیگر عایق شوند و در عین حال پانتوگراف تغییر موقعیت و ارتفاع ندهد و شوک مکانیکی به هادی تماس و پانتوگراف اعمال نگردد از عایقهای مشابه شکل ۵–۱۷ و ۵–۱۸ استفاده می شود.

این عایقها بین دو هادی تماس در دو قسمت مجاور قرار می گیرند. در صورت لزوم می توان دو قسمت مجاور که از هم عایق شده اند را توسط کلید به یکدیگر متصل نمود. خارج شدن پانتوگراف از یک قسمت و ورود آن به قسمت بعدی که نسبت به قسمت قبل عایق است همراه با جرقه است که می تواند به هادیهای تماس، پانتوگراف و عایق صدمه بزند و باعث کاهش طول عمر آنها شود.

برای کاهش جرقه در محل عایقها، در بعضی از شبکه ها از دو زوج مغناطیس مشابه شکل۵–۱۹ در دو طرف عایق استفاده می شود. به محض عبور قطار از مقابل اولین زوج مغناطیس دستور لازم برای قطع کلیدهای مدار قدرت در قطار صادر می شود. با عبور قطار از ناحیه خنثی و سپس زوج مغناطیس دوم دستور وصل مدار قدرت صادر می شود.

شکل ۵–۱۸– عایق بین هادیهای بالاسری در دو قسمت مجاور در حضور پانتوگراف

Track magnets mounted outside the rails at the approach to a neutral section in 25 kV AC catenary. Detectors carried on the leading bogie switch off the power supply on the train as they pass over the magnets. On the other side of the neutral section, a second set of magnets switches the power on again.

شکل۵-۱۹- مغناطیسهای دو طرف عایق بین سکشنهای مجاور

در شبکه های جریان مستقیم در ولتاژ ۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ولت معمولا از شبکه بالاسری استفاده می شود. شبکه های بالاسری در ولتاژ مستقیم دارای هادی های با سطح مقطع بزرگتر و سنگینتر نسبت به شلکه های ولتاژ متناوب هستند. در مواردی مانند شبکه ۱۵۰۰ ولت هنگ کنگ و ۳۰۰۰ ولت ایتالیا از شبکه بالاسری دوبل استفاده می شود.

در ولتاژهای کمتر از ۱۵۰۰ ولت می توان از ریل سوم استفاده نمود. ریب سوم دارای هزینه کمتر بوده و فضای کمتری را اشغال می کند (که آن را برای داخل تونلها و مسیرهای مترو مناسب می سازد). اما در مقابل احتمال اتصال زمین و برخورد افرادیکه در سطح زمین قرار دارند با آن زیاد است، خصوصا وقتی که قطار متوقف می شود و باید مسافران آنرا تخلیه نمود، باید قبل از اینکه به مسافران اجازه ترک قطار داده شود، ولتاژ ریل سوم قطع گردد.

فصل ٦ - اجزا شبکه ریل سوم و مشخصات کلی آنها

تغذیه راه آهن برقی باید ایمن، اقتصادی و ساده باشد. تغذیه می تواند AC یا DC باشد. انتقال قدرت در طول خط به وسیله شبکه هوایی بالای سری قطار[1] یا شبکه هم سطح زمین انجام می شود. در سیستم AC به علت ولتاژ بالا تقریبا همیشه از شبکه بالاسری استفاده می شود. سیستم DC هر دو نوع سیستم استفاده می شود.

عمومی ترین نوع شبکه هم سطح زمین استفاده از هادی دیگری غیر از ریلهای اصلی است که در طول خط و کنار ریلهای حرکتی کشیده شده است. به این هادی ریل سوم[2] می گویند.

در هر دو سیستم بالاسری و ریل سوم وسیله ای در قطار وجود دارد که دائما در تماس با هادی بالاسری یا ریل سوم است و انتقال قدرت از هادی به قطار را ممکن می سازد. در شبکه هوایی این وسیله پانتوگراف[3] نامیده می شود.

٦-١- ریل سوم

ریل سوم قدیمی‌ترین شکل خطوط تغذیه جریان ترکشن برای راه‌آهن‌های برقی است. این سسیتم با ریل سوم که در خطوط با دو گیج[4] بکار می رود تفاوت دارد. در این سیستم علاوه بر دو ریل حرکتی یک ریل جهت انتقال ولتاژ و جریان به داخل قطار در مجاورت ریلهای حرکتی (اما معمولا بالاتر از آنها) قرار می گیرد. به علت برقدار بودن ریل سوم این ریل توسط عایق (مقره یا هر عایق دیگری که در طرح ممکن باشد) از زمین ایزوله می شود.

ریل سوم در واقع هادیهای صلبی هستند که در کنار خط و بر روی پایه‌های عایق بمنظور انتقال انرژی نصب می‌گردند و افراد در مقابل تماس عمدی یا غیرعمدی با آن، محافظت می‌گردند. گرفتن جریان از ریل سوم می‌تواند از بالا، کنار و یا زیر ریل باشد. حفاظت در برابر تماس با ریل برقدار توسط نصب پوشش[5] عایق با خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی مناسب در شرایط آب و هوایی مربوطه حاصل می‌گردد.

---

[1] Overhead contact system
[2] third rail
[3] pantograph
[4] dual-gauge
[5] Cover board

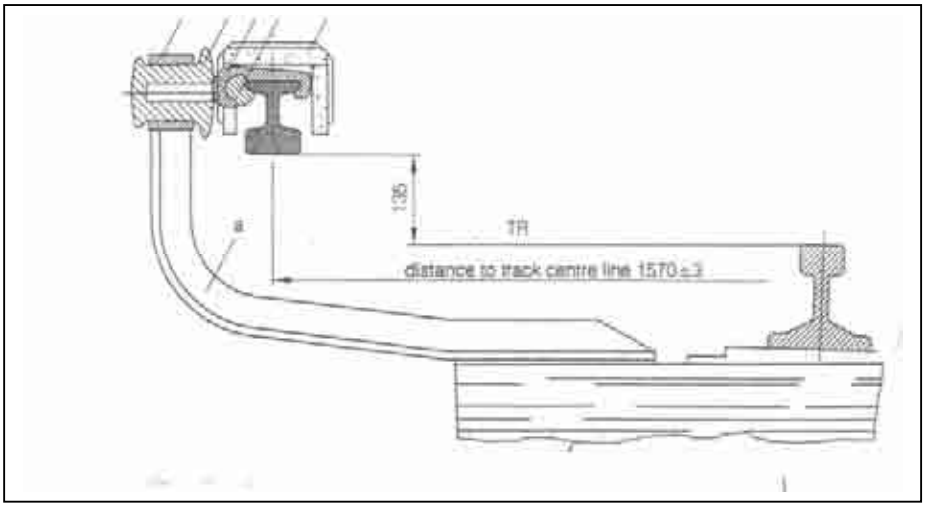
پوشش ریل سوم بر روی عایقهای نصب شده بر روی قسمت ثابت ریل سوم یا بر روی تکیه‌گاههای ریل سوم نصب می‌گردند. در متروی برلین، تکیه‌گاه‌های ریل سوم در فواصل ۵/۲m نصب گردیده‌اند. فاصله حقیقی تکیه‌گاه‌ها به نوع تراورس و زیرسازی خط بستگی دارد و تا ٦m نیز می‌رسد. طرح ریل سوم مربوط به متروی برلین با ریل سوم فولادی در شکل ٦-١ نشان داده شده است.

معمولا مسیر برگشت جریان از طریق ریلهای حرکتی تامین می شود اما در مواردی از یک ریل چهارم برای برگشت جریان استفاده شده است . ریلهای حرکتی دارای پتانسیل زمین هستند

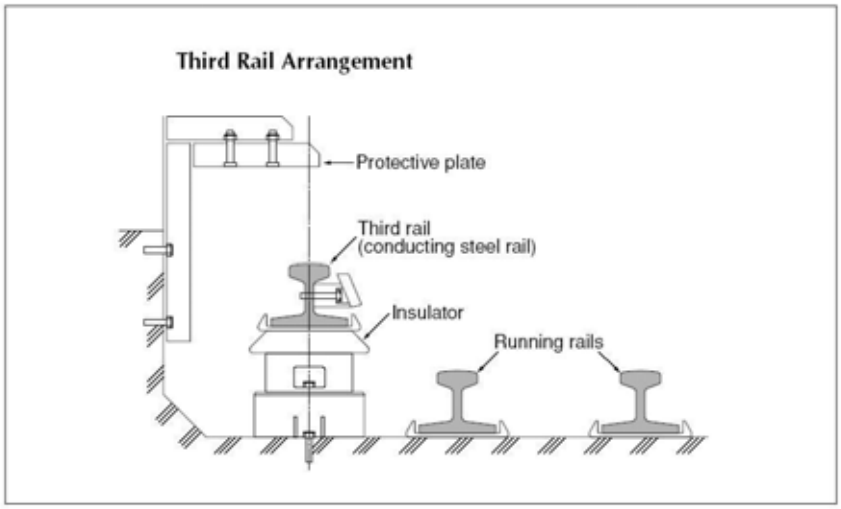
ریل سوم بیشتر برای انتقال انرژی به وسائط نقلیه در سیستمهای راه‌آهن زیرزمینی و متروها استفاده می‌شود. ۸۰٪ از مجموع ۱۰۲ خط راه‌آهن DC با ولتاژ کمتر از ۱۰۰۰V سال ۱۹۸۲، برای انتقال انرژی از ریل سوم استفاده کرده‌اند. در سیستمهای با ولتاژ بیش از ۱۵۰۰V، ۸۷/۵% از خطوط بالا سری استفاده کرده‌اند. برای ولتاژهای نامی بالاتر از ۱۵۰۰V تنها خطوط با ریل سوم آزمایشی وجود داشته‌اند.

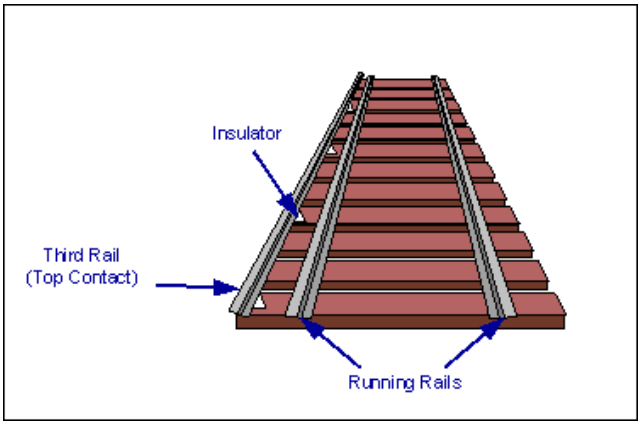
اولین قطار برقی که توسط زیمنس در سال ۱۸۷۹ راه اندازی شد توسط ریل سوم تغذیه می شد. در سال ۱۸۸۰ این سیستم در حمل و نقل عمومی مورد استفاده قرار گرفت. اولین کاربرد ریل سوم در مترو، درسال ۱۸۹۰ در مترو لندن بود.

شکل ٦-٢ ساختار ریل سوم را نشان می دهد. دراین سیستم ریل سوم در فواصل ۲/۵ الی ۵ متر توسط مقره ها مهار می شود. ریل سوم معمولا برای مترو ها و قطارهای شهری استفاده می شود و سرعت آن حداکثر حدود km/h ۱۵۰ است.



شکل ٦-١ -طرح ریل سوم مربوط به متروی برلین با ریل سوم فولادی a: تکیه‌گاه ریل سوم b: بست c: عایق چینی d: ثابت‌کننده ریل سوم e: گوه نگهدارنده f:: پوشش عایق‌کننده از چوب اشباع‌شده





شکل٦-٢ ساختار ریل سوم

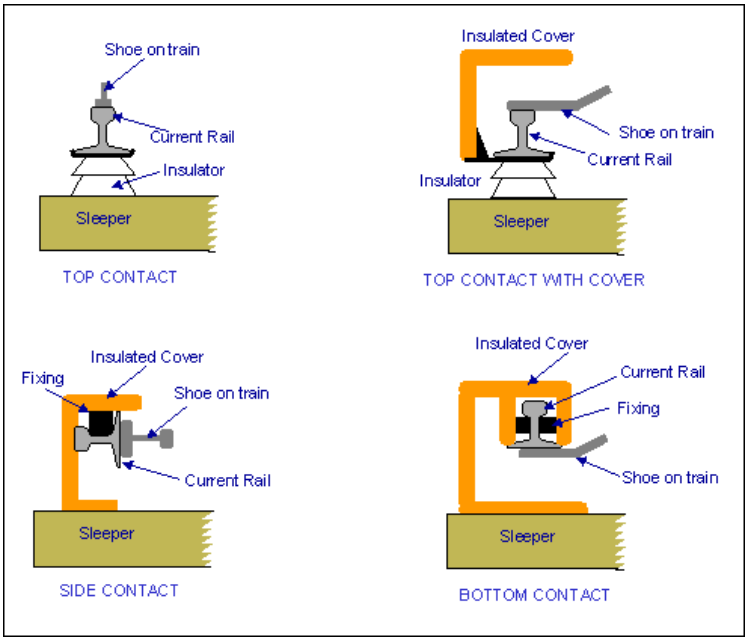
ریل سوم می تواند در کنار دو ریل حرکتی یا در وسط آنها قرار گیرد. این ریل نمی تواند از سطح زمین فاصله زیادی داشته باشد.

در این سیستم کفشک[1] روی ریل سوم حرکت می کند و توان الکتریکی را به لکوموتیو منتقل می کند. کفشک توسط کفشک نگهدار با نیروی ثابت روی ریل سوم قرار می گیرد. شکل ٦-٣ کفشک نگهدار یک سیستم تماس از بالا را نشان می دهد.

برحسب نوع طراحی اتصال کفشک به ریل سوم می تواند از بالا، کنار یا پایین باشد. شکل ٦-٤ انوع روشهای اتصال کفشک و ریل سوم را نشان می دهد.

[1] shoe

شکل ٦-٣ – کفشک نگهدار



شکل ٦-٤ انوع روشهای اتصال کفشک و ریل سوم

اتصال از بالا قدیمی ترین و ساده ترین نوع است. اما در مقابل برف و یخ و اجسام خارجی حساس تر است، حالت قرار گیری کفشک در این نوع تماس باعث می شود تا نتوان از پوشش محافظ برای ریل سوم استفاده کرد. امروزه این سیستم کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. شکلهای ٦-٥ و ٦-٦ نحوه قرار گرفتن کفشک روی ریل در نوع تماس از بالا را نشان می دهند.

از مشکلات دیگر حالتِ تماس از بالا آلودگی و در نتیجه خوردگی آن است. به دلیل نبود پوشش مناسب در این نوع تماس, آلودگی و گرد و غبار به راحتی روی سطح آن می نشیند و باعث میشود تا انتقال

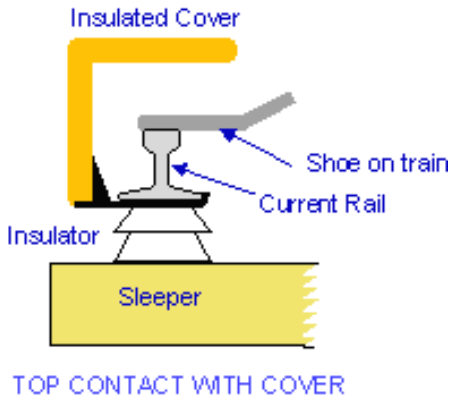
جریان به قطار دچار مشکل گردد و همچنین این آلودگی ها در دراز مدت سبب میشود که ریل سوم دچار خوردگی و آسیب شود.

مشکل دیگر این تماس کنترل سخت کفشک در موقعیت مناسب و در ریل سوم است. در این نوع تماس اگر بوژی دچار هانتینگ شود ممکن است کفشک از روی ریل سوم خارج شده به لبه زیرین تاج ریل سوم گیر کند. البته باید گفت که سیستم کفشک در این حالت بسیار ساده است ولی با این وجود به علت آن که وزن سیستم کفشک باید کنترل شود, هدایت آن بر روی ریل سوم و نیز ایجاد نیروی لازم توسط این کفشکها بسیار مشکلتر خواهد بود.

اگر بخواهیم در نوع تماس از بالا از محافظ و عایق ریل سوم استفاده شود باید اهرمی برای کفشک قرار داد تا به صورت شعاعی در تماس باشد. البته می توان به جای استفاده از اهرم, شکل ریل سوم را به صورت تماس شعاعی طراحی کرد. با وجود این کاور استفاده شده به طور موثر عمل نخواهد کرد چرا که باید فضایی در بالای ریل سوم در نظر گرفته شود تا کفشک بتواند با ریل سوم در تماس باشد و نیز اگر از نوعی باشد که دارای سیستم بلند شونده است فضایی هم برای این جابجایی در نظر گرفته شود. در شکل ٦–٧ این حالت را نشان می دهد . شکل ٦–٨ این نوع کفشکها را که در متروی نیویورک استفاده شده نشان می دهد.

شکل ٦–٥ کفشک نگهدار لکوموتیو با اتصال از بالا

شکل ٦-٦ نحوه قرار گرفتن کفشک روی ریل در نوع تماس از بالا



شکل ٦-٧- تماس از بالا در نوع شعاعی و با محافظ

New York Subway cast steel truck showing shoegear equipment. The shoe is the top contact type, radially mounted to fit under the third rail cover. The pigtail is a copper braided cable which connects the shoe to the shoe fuse. The height of the shoe is adjusted by raising or lowering the shoebeam. This allows compensation for wheel or shoe wear. A hole in the shoe is provided for a "stinger" pin to be inserted in the shed. The stinger provides a shore supply for the car. Only the weight of the stinger keeps the pin in the hole. Crude but effective.

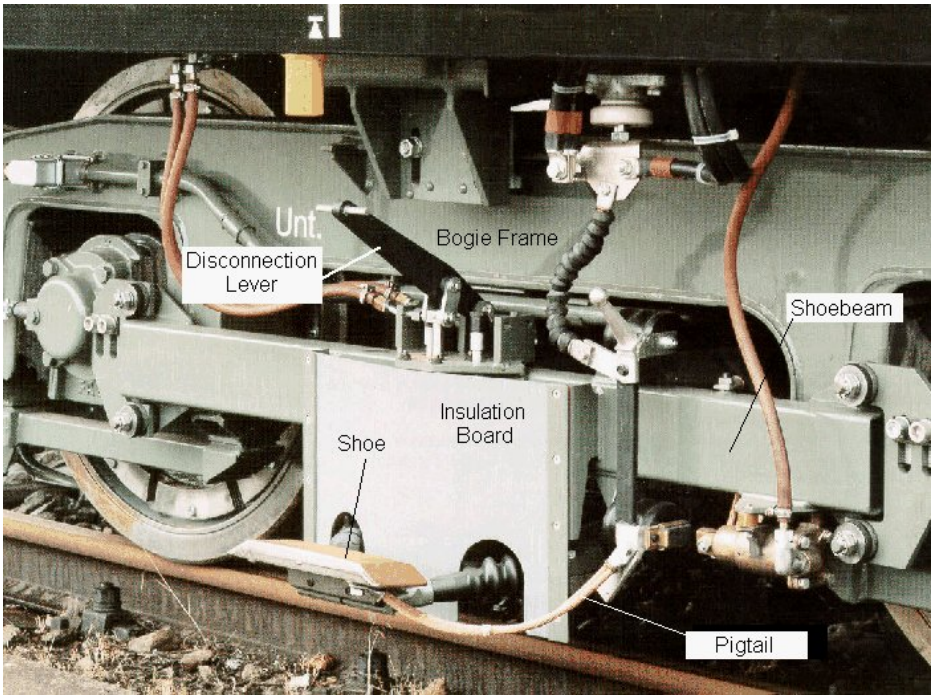
شکل ٦-٨ کفشکهای تماس از بالا در متروی نیویورک

حالت تماس از کنار کمی بهتر از حالت تماس از بالا است و استفاده از عایق و کنترلِ تماس موثر در آن بسیار بهبود یافته است. البته در حالت سیستم کفشک پیچیدگی بیشتری دارد و برای اعمال نیروی لازم در تماس باید از فنر در آن استفاده کرد.

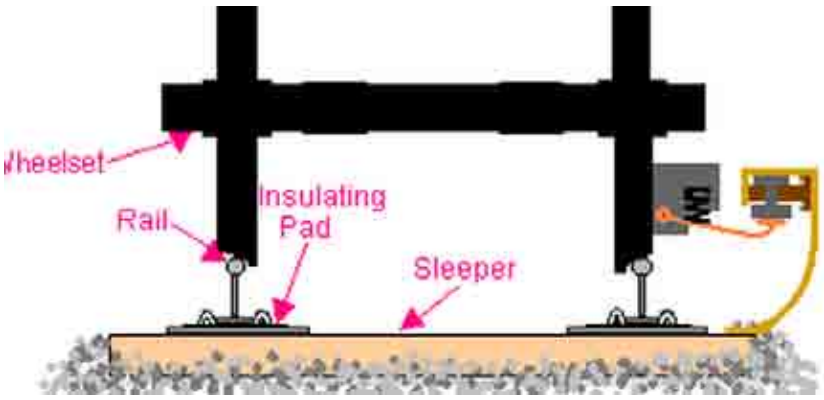
بهترین و مناسبترین حالت که امروزه در خطوط نوساز و جدید بسیار استفاده میشود, حالت تماس از پایین است. سیستم اتصال از پایین اگرچه در اجرا مشکل تر است اما در شرایط مختلف آب و هوایی با مشکلات کمتری مواجه می شود. شکلهای ٦-٩ سیستم کفشک نگهدار با اتصال از پایین را که در متروی انگلیس استفاده میشود نشان می دهد.. شکل ٦-١٠ طرحی از موقعیت ریل سوم و جاروبک نگهدار با تماس از پایین را نسبت به هم نشان می دهد.

در انواع پیشرفته این نوع کفشکها دیگر مشکلات ذکر شده در قسمت قبل مشاهده نمیشود. با اینکه سیستم کفشک در حالت تماس از پایین بسیار پیچیده تر است ولی سیستمهای کنترلی آن بسیار موثر عمل کرده و ارتباط مناسبی را ریل سوم برقرار میکند. در این حالت دیگر مشکل وزن سیستم کفشک وجود ندارد و برای اعمال نیروی لازم در سطح تماس از فنرهایی در این سیستم استفاده می شود.

یکی از مواردی که در نوع از تماس مرتفع شده مشکل کاور و عایق می باشد که میتوان به بهترین نحو اکثر سطح ریل سوم را پوشاند بطوری که تماس کفشک با ریل سوم دچار مشکل شود. به این ترتیب سطح زیادی از ریل سوم با کارو پوشیده است و مشکل آلودگی و گرد و غبار نیز بسیار بهبود می یابد.



شکل ٦-٩ کفشک نگهدار دو نوع لکوموتیو با اتصال از پایین



شکل ٦-١٠ – طرحی از موقعیت ریل سوم و جاروبک نگهدار با تماس از پایین نسبت به هم

٦-٢- تجهیزات و اجزای ریل سوم

٦-٢-١- مشخصات هادی ریل سوم

ریل سوم مقطعی مانند ریل اصلی داشته و از لحاظ جزئیات و اندازه مقطع تنوع زیادی دارد. البته امروزه مقطعی استاندارد را برای ریل سوم در سطح جهان انتخاب کرده اند که مساحت مقطع آن ١٦٠٥٠ میلیمتر مربع می باشد. جزئیات این مقطع در شکل ٦-١١ نشان داده شده است.

جنس ریل سوم از فولاد کم کربن ساخته می شود که غیر سخت و انعطاف پذیر است. مقاومت الکتریکی این ریل کم بوده و ماکزیمم مقاوت الکتریکی آن در دمای ٢٠ درجه حدود ٠/٢ اُهم بر کیلوگرم است. این ریل با اندازه های حدود ٥ متر و با وزن تقریبی حدود ٤٨ کیلوگرم بر متر ساخته میشود.

یکی از خصوصیات ریل سوم محل قرارگیری آن نسبت به ریل اصلی است که با دو پارامتر عمودی و افقی سنجیده می شود.

R فاصله افقی ریل سوم از ریل اصلی و E فاصله عمودی سطح بالایی ریل سوم از سطح بالایی ریل اصلی است. این فاصله از آن جهت مهم است که کفشکهای تماس باید نسبت به این موقعیت تنظیم شوند تا نیروی لازم را در محلی صحیح برای ایجاد تماسی موثر با ریل سوم اعمال کنند. این تماس موثر است که باعث می شود به صورت یکنواخت و دائم انتقال جریان از ریل سوم به قطار ممکن شود.

در شکل ٦-١٢ محل قرار گیری یک نوع ریل سوم را نسبت به ریل اصلی و مقادیر R و E آن نشان داده شده است.

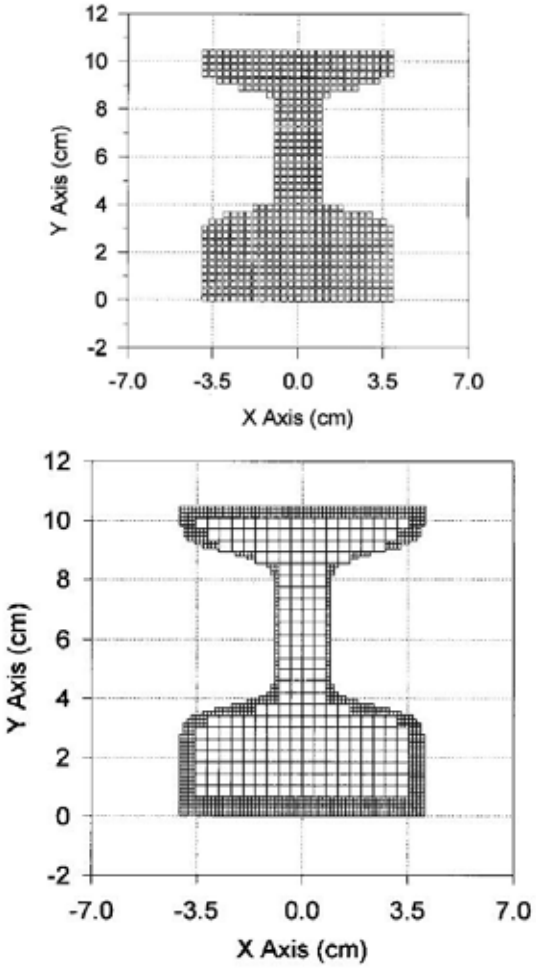


Fig. 4. Subdivision of rail cross sections. Subconductors near the surface are *h* times slimmer than those in the center. In this figure, *h* equals 3.

شکل ٦-١١- جزئیات مقطع ریل سوم

Height Above Railhead (E):	1/8" 3.2mm	1/8" 3.2mm	3/32" 2.4mm	1/16" 1.6mm
Offset From Gage Line (R):	1 1/8" 28.6mm	11/16" 17.5mm	7/16" 11.1mm	5/16" 7.9mm

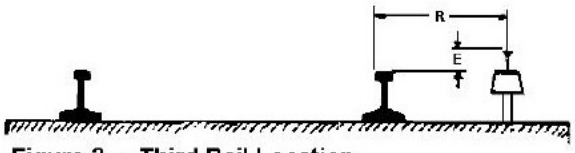


Figure 2 -- Third Rail Location

شکل ٦-١٢ -محل قرار گیری یک نوع ریل سوم نسبت به ریل اصلی

تا اوایل نیمهٔ دوم قرن بیستم، تنها ریل سوم فولادی مورد استفاده قرار می‌گرفتند. ریلهایی که تا نیمهٔ دهه 1950 نصب می‌شدند، دارای مقاومت مخصوص بین Ωmm^2m^{-1} ۰/۱۲۵ و ۰/۱۴۳ بودند. بعد از آن، مشخصات تغییر داده شدند و درجهٔ فولاد مورد استفاده که معمولاً "آهن"[1]نامیده می‌شود بهبود داده شد و مقاومت مخصوص به کمتر از $0.119\Omega mm^2m^{-1}$ رسیده است. بمنظور افزایش قدرت راه‌آهن DC در سیستم حمل و نقل عمومی، ریلهای ترکیبی آلومینیوم – فولاد مورد استفاده قرار گرفتند. جدول ٦–١ پارامترهای ضروری برای چندین نوع ریل سوم را نشان می‌دهد.

Material	m' kg/m	A mm²	R' Ω/km	used in
Soft steel ("iron")	40	5100	0,0225	Berlin, Munich
	60	7600	0,0154	Vienna
	75	9200	0,0128	New York
Aluminium composite	6,4	2100	0,0148	Barcelona
	15,7	5100	0,0069	Berlin

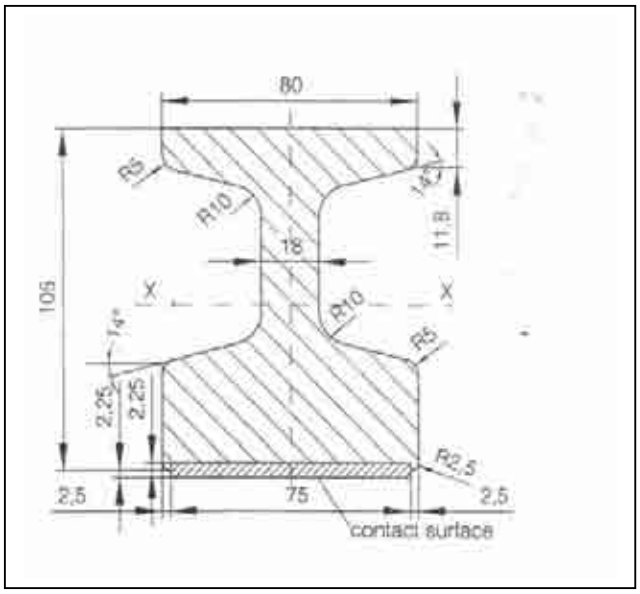
جدول ٦–١– پارامترها و مقادیر چندین نوع ریل سوم(مقاومت در واحد طول در دمای ۲۰ °C)

تا به حال، ریل سوم فولادی در اروپای مرکزی استفاده شده است. مشخصات فنی برای این نوع ریل سوم در استاندارد DIN 17122 تحت عنوان ریل سوم فولادی برای راه‌آهن های الکتریکی آورده شده است.

استفاده از ریل سوم آلومینیوم – فولاد به علت مقاومت مخصوص آلیاژ بکار رفته که تقریبا ۳/٤ بار کمتر از نوع فولادی می‌باشد و همچنین به علت خواص مکانیکی نسبتاً خوب رو به افزایش می‌باشد. ریل سوم ترکیبی آلومینیومی مورد استفاده در راه‌آهن برقی دارای همان شکل سطح مقطع ریل سوم فولادی می‌باشند. از آنجاییکه ریلهای آلومینیومی توخالی با سطح مقطع $2100mm^2$ توسط فرآیند قالب‌ریزی ممتد تولید می‌گردند، ریلهای با سطح مقطع $5100mm^2$ پروفیلهای صلب با ماشین دوار شده می‌باشد.

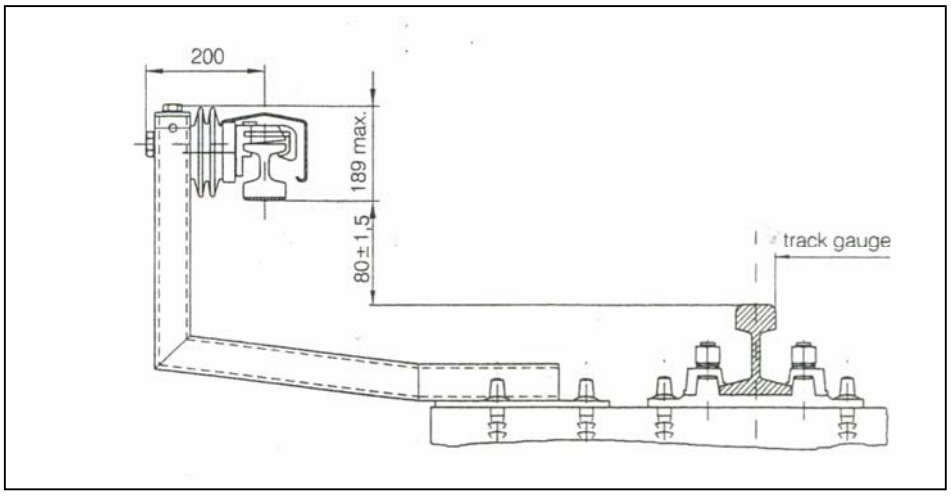
ریل سوم ترکیبی دارای سطح تماس از جنس فولاد ضد زنگ با استحکام کششی حداقل $500N/mm^2$ می‌باشد. ریلهای ترکیبی آلومینیوم – فولاد قالب‌ریزی شده دارای پیوستگی بین آلومینیوم و فولاد به محکمی اتصال جوشکاری می‌باشد. سطح تماس فولاد ضد زنگ دارای مقاومت بالا در برابر فرسودگی و در نتیجه طول عمر طولانی می‌باشد. شکل ٦–١٣ سطح مقطع مربوط به ریل سوم ترکیبی را نشان می‌دهد.

[1] Iron



شکل ٦-١٣- سطح مقطع مربوط به ریل سوم ترکیبی آلومینیوم- فولاد

. شکل ٦-١٤ یک سیستم را که از ریل سوم ترکیبی آلومینیوم – فولاد[1] استفاده می‌کند را نشان می‌دهد. تکیه‌گاه‌ها و نقاط ثابت شدهٔ عایق برای این نوع ریل سوم دیده می‌شود. نقاط ثابت شده طوری طراحی شده‌اند که حرکت طولی ریل مجاز باشد. این ریلها توسط قالبهای پلاستیکی با خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی مناسب در شرایط محیطی مربوطه پوشیده می‌شوند.



شکل ٦-١٤- سیستم استفاده‌کننده از ریل سوم ترکیبی آلومینیوم – فولاد

[1] Aluminum – Steel Composite Conductor rail

شکل ٦-١٥ طراحی یک سیستم با تماس از کنار و ریلهای میان تهی آلومینیومی قالب ریزی شده که در متروی هامبورگ مورد استفاده قرار گرفته است را نشان می‌دهد.

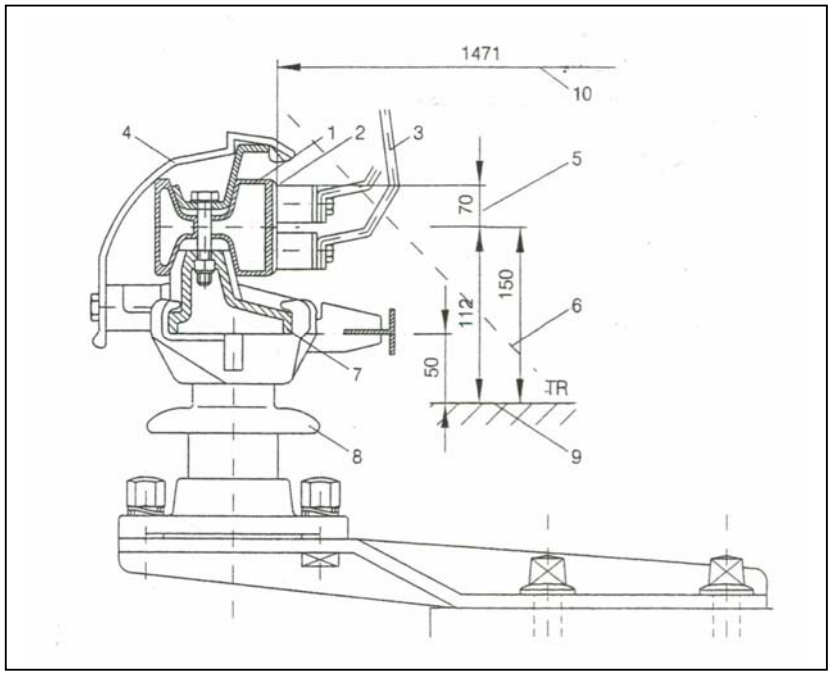
٦-٢- ٢- شمشیری ریل سوم

در ابتدای خطوط در ایستگاهها یا در تقاطعها و یا انشعابها که Gap داریم و ریل سوم قطع شده است, از شمشیری ریل سوم استفاده می شود. شمشیری ریل سوم فقط به خاطر این است که کفشک به طور موثر بتواند با ریل سوم درگیر شود. شماتیک شکل شمشیری ریل سوم در شکل ٦-١٦ نشان داده شده است.

٦-٢- ٣- ساپورتها و نگهدارنده های ریل سوم

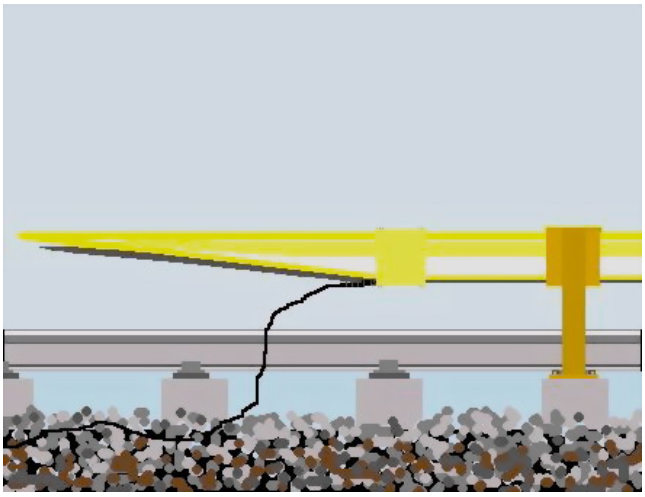
برای نگه داشتن ریل سوم در مکان صحیح آن و استحکام کافی برای نیروهای مختلفی که به آن وارد می شود از نگهدارنده ها و ساپورتها استفاده می شود. این ساپورتها یا از جنس فولاد هستند و یا از جنس همان عایق ریل سوم که در این صورت باید از ضخامت بیشتری نسبت به آن کارو برخوردار باشد.

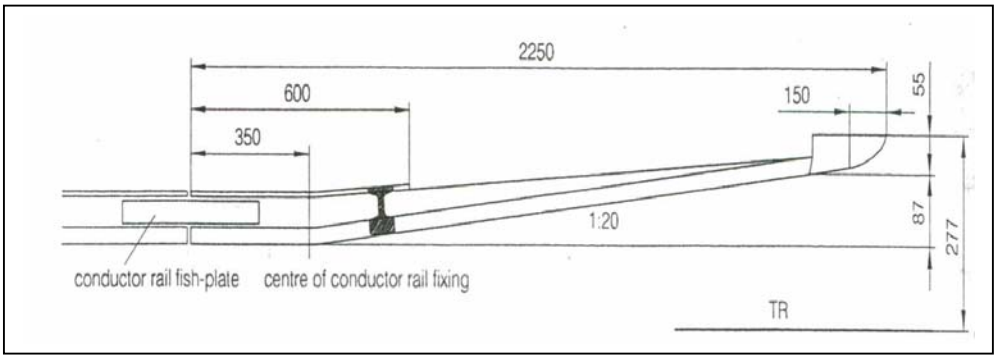
این ساپورتها روی تراورسها نصب میشوند و در بعضی موارد ممکن است در تونلها و خطوط زیر زمینی روی دیواره ها نیز نصب شوند. فاصله بین ساپورتها معمولا ۵ متر است.



شکل ٦-١٥- ریل سوم استفاده شده در متروی هامبورگ 1 ریل سوم ترکیبی آلومینیوم- فولاد قالب ریزی شده؛ 2 سطح تماس فولادی؛ 3 کفشکهای تماس با کلکتورهای E-Cu ؛ 4 پوشش عایق‌کننده؛ 5 ماکزیمم

حرکت عمودی کلکتور؛ 6 فاصلهٔ استاندارد وسیله نقلیه؛ 7 پایه آلومینیومی قالب‌ریزی شده؛ 8 تکیه‌گاه با عایق ریل سوم؛9 سطح بالایی ریل حرکتی؛ 10 فاصلهٔ بین سطح تماس و مرکز خط





شکل ٦-١٦- شماتیک شکل شمشیری ریل سوم در نوع اتصال از زیر

٦-٢-٤- ساختار و عملکرد ریل سوم

ریل سوم دارای جرم زیاد در واحد طول می‌باشد. جدول ٣-١ نشان می‌دهد که وزن ریلهای فولادی حدود 40kg/m می‌باشد. جرم واحد طول ریل ترکیبی 15.7kg/m می‌باشد، بمنظور ساده‌سازی امور ساختمانی، ریلهای فولادی به طول ١٥m و ریلهای ترکیبی به طول ١٨m ساخته می‌شوند. برای دمای بین $80^{\circ}C$ تا $-30^{\circ}C$ ریل فولادی با طول مذکور، دچار ٢٣/٣mm تغییر طول می‌شود در حالیکه ریل ترکیبی با طول ١٨m حدود ٤٦mm تغییر طول خواهد داد. بعنوان نتیجه از این انبساط و انقباض دمایی، اتصال جبرانی در هر ٤٥ تا ٦٠ متر مورد نیاز می‌باشد. اتصال جبرانی[1] توسط صفحه اتصالی[2] بمنظور فراهم آمدن زمینه تغییر طول به علت تغییرات دما ایجاد می‌گردد.

[1] Compensation Joint
[2] Fish- Plate

ثابت کردن حفاظتی طولی[1] در وسط یک قطعه ریل سوم که بطور صلب بین دو اتصال جبرانی بهم متصل گردیده‌اند انجام می‌گیرد. این امر توسط قرار دادن یک میله فولادی که در تکیه‌گاه ریل سوم در یکی از سوراخهایی که در هر کلمپ ریل سوم ایجاد می‌شود تحقق می‌یابد. انتهای برآمده پایینی میله در فرورفتگی موجود در محل اتصال ریل سوم قرار می‌گیرد. اتصالات صلب بین ریل سوم متوالی توسط جوشکاری یا صفحات اتصال محقق می‌گردد. اتصالات توسط کابلهای متصل‌کننده بهم وصل می‌شوند. مشخصات لازم می‌دارند که طول الکتریکی معادل ریل سوم مربوط به محل اتصال کمتر از ۵m از ریل سوم باشد.

در سیستم متروی برلین، صفحات اتصال برای متصل‌کردن ریل سوم مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در جایی که صفحات اتصال به ریلها پیچ شده‌اند، یک روکش از جنس روی بر روی ریل سوم اسپری می‌گردد. این نوع وصل کردن صفحات اتصال از نظر الکتریکی معادل با ۲m طول ریل سوم در هر اتصال می‌باشد. شکاف انبساط[2] در ریل سوم فولادی ۲۰mm در دمای نصب $15^{\circ}C$ می‌باشد. شکاف انبساط از نظر الکتریکی با استفاده از پلهای مسی ورقه‌ای با سطح مقطع $600mm^2$ یا هادیهای بسیار قابل انعطاف متصل می‌گردد.

به علت شرایط هندسی خط، شکافهای طولی در ریل سوم اجتناب‌ناپذیر می‌باشند. این شکافهای ایجاد شده در ریل سوم، قسمتهایی از مسیر هستند که فاقد ریل سوم می‌باشند و بایستی از کوتاهترین فاصله بین کفشکهای جمع کننده جریان مربوط به کوتاهترین وسیله نقلیهٔ عملی کوتاهتر باشد. در مقابل، قسمتهای منفصل ریل سوم[3]، قسمتهایی از مسیر بدون ریل سوم می‌باشند که بلندتر از کوتاهترین فاصله بین کفشکهای جمع آوری جریان مربوط به کوتاهترین وسیله نقلیه عملی می باشند.

سطح شیب‌دار مربوط به ریل سوم[4] در انتهای هر قسمت از ریل سوم مورد نیاز می‌باشد. انتهای شیب‌دار هادی بمنظور اطمینان از حرکت ایمن کفشک هادی جریان در جهت عمودی کاربرد دارد. این نوع شیب انتهایی در شکل ٦-١٦ نشان داده شده است. قطع‌کننده‌های[5] ریل سوم بمنظور قطع‌و وصل توان مربوط به قسمتهای تغذیه تکی، مسیر یا گروهی از مسیرها در شرایط نرمال مورد نیاز می‌باشند. این قطع‌کننده‌ها موجب می‌شوند که ریل سوم نصب شده بطور طولی و افقی به قسمتهای ایزوله شده تفکیک گردد. شکل ٦-١٧ طراحی قطع کننده ریل سوم از نوع SHB 4000 را نشان می‌دهد. این قطع‌کننده برای عملکرد ولتاژ ١٥٠٠VDC و جریان مجاز ممتد ٤٠٠٠A طراحی شده است. این قطع‌کننده بمنظور ایزوله کردن بدون بار ریل سوم استفاده می‌شود.

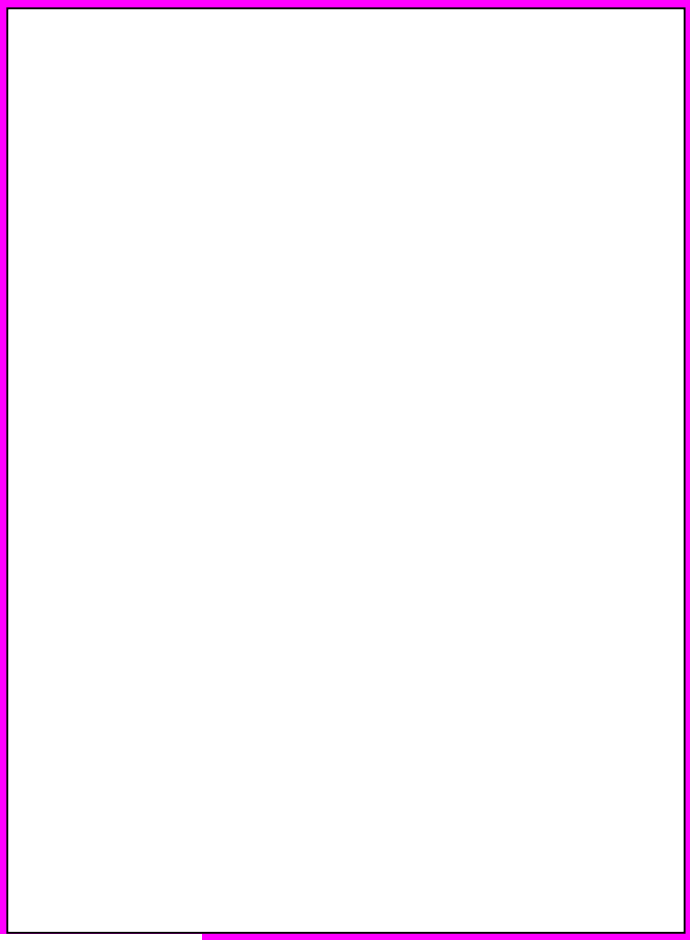
---

[1] longitudinal protective fixing
[2] expansion gap
[3] Conductor Rail Separation
[4] Conductor Rail Ramp
[5] Disconnector

در پی استفاده نرمال، ریل سوم دچار خوردگی و فرسودگی می‌شود. مشخصات ریل فولادی استفاده شده در متروی برلین نشان می‌دهد خوردگی در ریل سوم نبایستی از مقادیر زیر تجاوز کند :

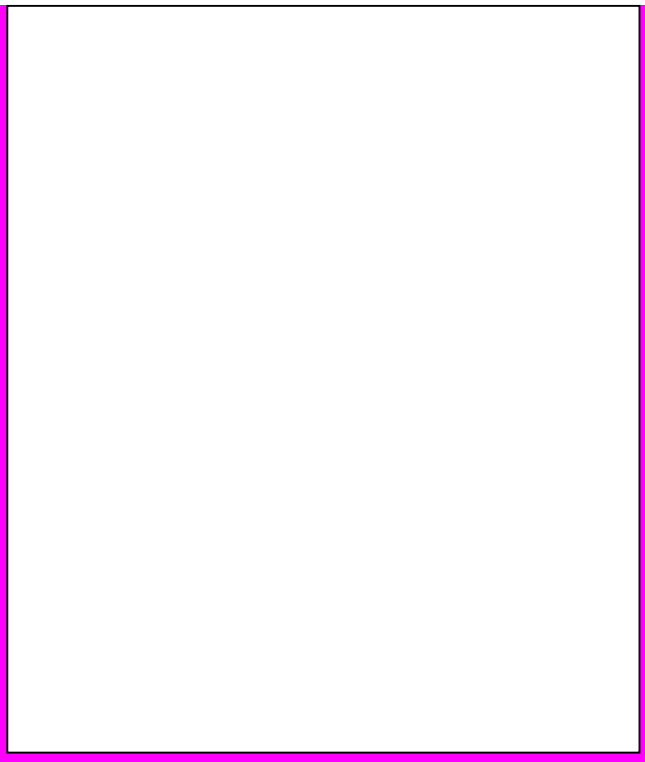
- ۱۰٪ در طول خطوط مترو.
- ۱۵٪ در طول خطوط مربوط به مراکز شهر.
- ۲۰٪ در خطوط جانبی بن بست.

خوردگی در ریل سوم بوسیلهٔ اندازه‌گیری ارتفاع h مربوط به سطح مقطع ریل تعیین می‌گردد.



شکل ٦-۱۷ قطع کننده ریل سوم از نوع SHB 4000

شکل ٦-۱۸ ارتباط بین این اندازه‌گیری با سطح مقطع را برای ریل سوم با سطح مقطع A5100 را نشان می‌دهد.



شکل ٦-١٨- ارتباط بین اندازه‌گیری ارتفاع با سطح مقطع برای ریل سوم با سطح مقطع A5100

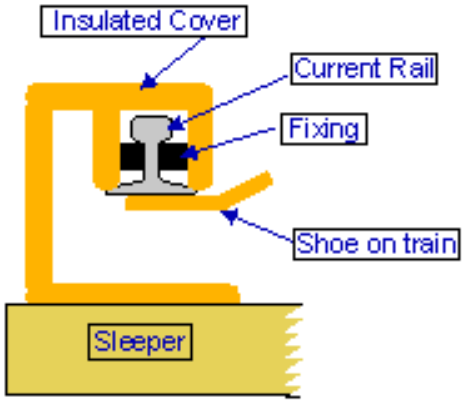
٦-٢-٥- مهره و پابند اتصال به تراورس

برای ثابت کردن پایه ساپورت از پابند با پیچ و مهره استفاده میشود. معمولاً صفحه ای در قسمت زیرین ساپورت قرار میدهند و سپس به وسیله اتصالات ساپورت را روی آن محکم می کنند.

٦-٢-٦- کاور و محافظ

برای عایق کردن ریل سوم نسبت به محیط اطراف از کاوری مانند شکل٦-١٢ به عنوان محافظ الکتریکی استفاده می شود. البته این محافظ کاربردهای دیگری نیز دارد مثلاً از ورود آب و برف و کثافات جلوگیری کرده و جلوی نشستن گرد و غبار را میگیرد. در مواردی این کاور طوری طراحی می شود که عایق حرارتی هم باشد و در شرایط بد جوی جلوی یخ زدن ریل سوم را بگیرد.

جنس این کاور از مواد کامپوزیتی با ضریب عایق الکتریکی بالا ساخته میشود و معمولاً به رنگ زرد یا سفید در خطوط شهری و یا مترو مشاهده می گردد.



شکل٦-١٢-کاور محافظ

٦-٢-٧- تجهیزات ایزوله نسبت به زمین

معمولاً در زیر ساپورتها و محل اتصال به تراورس و یا در حالت Top Contact در زیر خود ریل سوم از عایقهای الکتریکی بسیار قوی یا مقره هایی برای عایق کردن ریل سوم نسبت به زمین استفاده می شود چرا که فاصله ریل سوم تا زمین کم بوده و اختلاف پتانسیل آن به دلیل ولتاژ بالای ریل سوم زیاد است. شکل ٦-١٩ نمونه ای از این عایقها را نشان می دهد.

٦-٢-٨- سیمهای اتصال

سیمهای ظخیم مسی هستند که معمولا در محل Gapها و یا در محل پستهای کشش برای اتصال و هدایت الکتریکی استفاده می شوند.

٦-٢-٩- تجهیزات اتصال

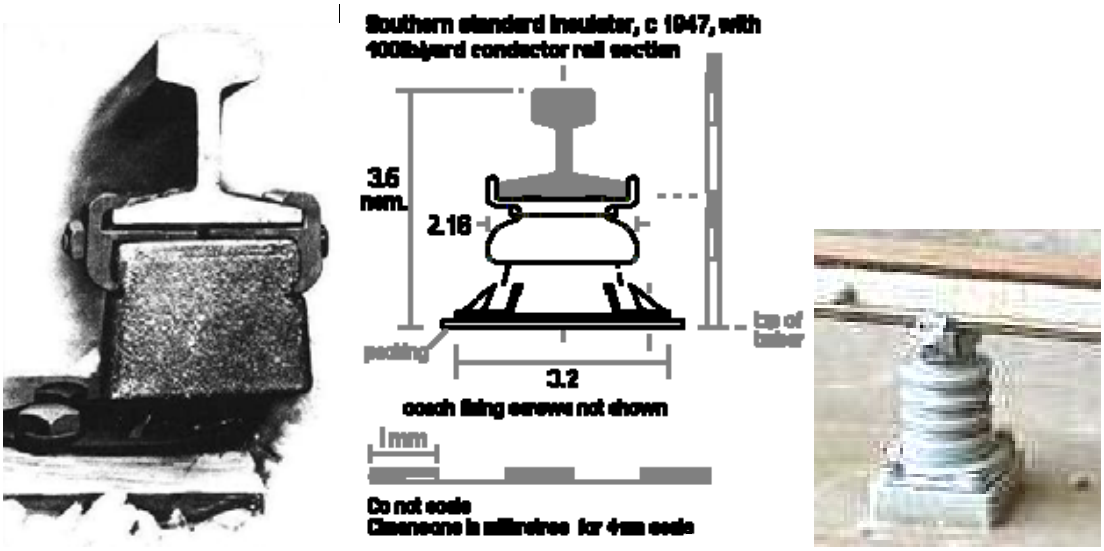
برای اتصال سیمهای منتقل کننده جریان به ریل سوم و نیز به پستهای ترکشن از اتصالات هادی الکتریسیته با مقاومت الکتریکی کم استفاده می شود. این اتصالات با توجه به محل و مورد استفاده, دارای اشکال مختلفی هستند که در ذیل نمونه هایی را مشاهده می کنید.

٦-٢-١٠- پستهای تراکشن

این پستها اغلب با برق منطقه ای ٥ تا ١٦ کیلو ولت تغذیه می گردند و کار آنها تبدیل نوع و سطح ولتاژ است. پستهای کشش معمولاً در فواصل ٢ , ٣ , ٤ و یا ٥ کیلومتری از هم نصب می شوند.

٦-٢-١١- سیگنالها و علائم

برای ریل سوم سیگنالها و علائم خاصی برای نشان دادن برق دار بودن یا بی برق بودن سکشن بعدی قرار می دهند تا قطار قبل از ورود به آن متوقف شده و مشکلی برایش پیش نیاید.



شکل ٦-١٩ نمونه ای عایقها

٦-٣- کفشکهای تماس

کفشک وسیله تماس قطار با ریل سوم است. کفشکهای تماس که بر روی بوژیهای واگنها نصب می گردند باید طوری طراحی شوند که علاوه بر در نظر گرفتن موقعیت ریل سوم, بتوانند نیروی معینی را از هر جهتی که با آن در تماسند به ریل سوم وارد کنند.

کفشکها در انواع بسیار زیادی ساخته می شوند و میتوان گفت که تنوع این کفشکها به اندازه تنوع خود قطارهاست. به عبارت دیگر هر شرکت سازنده قطار با توجه به موقعیت ریل سوم کفشک خاص خود را طراحی کرده است. با این وجود باید در طراحی خود نیروهای تماسی و موقعیت ریل سوم و همچنین نوع تماس را در نظر بگیرند تا نه برای سیستم ریل سوم مشکلی پیش آید و نه برای کفشک تماس. در مورد انواع تماس کفشک و مزایا و معایب هر یک در بخش بعد بحث میشود.

با پیشرفت صنعت ریلی, کفشکهای تماس نیز پیشرفتهای زیادی کرده اند. در گذشته کنترل کفشک برای استقرار در محلی مناسب برای ایجاد تماسی موثر در هنگام سیر بسیار مشکل بود طوری که مشکلات بسیاری را برای کل سیستم ایجاد میکرد. مشکلات ایجاد شده به قرار زیر است:

- خارج شدن کفشک از موقعیت مناسب و قطع ارتباط آن با ریل سوم.
- ایجاد سایش بیش از حد در ریل سوم و خود کفشک تماس.
- شکستن کفشک به علت طراحی نامناسب. این مشکل از آنجا ناشی می شود که نیروی زیادی که در طراحی در نظر گرفته نشده به کفشک وارد می شود. این مشکل در اکثر موارد باعث اتصال کوتاه شده و کل سیستم را مختل میکند. که هم از لحاظ ترافیکی و هم از لحاظ خسارت مالی بسیار

شدید است. طوری که اگر این مشکل رخ دهد قطار می ایستد و دیگر قادر به ادامه مسیر خود نیست و باید تا زمانی که مشکلات قطار و پست کشش بر طرف گردد منتظر بماند.

- جدا شدن پی در پی کفشک از ریل سوم و ضربه زدن به آن به علت طراحی نامناسب. این مشل باعث تخریب ریل سوم و کفشک شده و عمر انها را پایین می آورد. از طرف دیگر این مشکل موجب می گردد تا جرقه های زیادی در هنگام سیر بین کفشک و ریل سوم رخ دهد که مشکلات فراوانی برای ریل سوم, کفشک و سیستم تغذیه دارد.

عدم وجود سیستم بلند کننده و جابجا کننده ی کفشک در کفشکهای قدیمی بسیار مشکل ساز است. در هنگام بروز مشکل در سیستم تغذیه اگر لازم باشد قطار با ریل سوم تماس نداشته باشد, باید به شکلی کفشکها را از ریل سوم جدا کنیم که این کار در صورت عدم وجود سیستم بلند کننده کفشک از ریل سوم ناممکن است. البته در گذشته با بروز چنین مشکلی دو کار انجام می دادند اول اینکه به وسیله یک کشنده دیگر کل قطار را از آن Section به سکشن دیگری که بی برق شده و یا به Dead Section منتقل می کردند. در حالت دوم به وسیله دیلم کفشکها را یکی یکی بلند کرده و بین آن و ریل سوم عایقی (مانند یک تکه چوب) قرار می دادند. امروزه با استفاده از سیستمهای پنیوماتیکی و یا هیدرولیکی به راحتی با استفاده از یک دکمه که در کابین راننده تعبیه شده, کفشک را از ریل سوم جدا می کنند.

در شکل٦-٢یک نمونه کفشک تماس را که از نوع Top Contact بوده و دارای سیستم بلند کننده کفشک از ریل سوم میباشد را مشاهده می کنید.

عدم وجود سیستم تعلیق مناسب بین بوژی و سیستم کفشک تماس در کفشکهای قدیمی باعث میشد که اگر بین بوژی و سیستم کفشک تماس تعلیق مناسبی در نظر گرفته نشود نیروهای وارده از سمت ریل به بوژی, به کفشک نیز منتقل شده و باعث ایجاد حرکات و نیروهای اضافی در آن میشود. البته بهترین تعلیق زمانی اتفاق می افتد که سیستم کفشک روی فریم بوژی نسب نشود و یکراست به وسیله تیری روی سر محور نصب شود. این کار باعث میشود تا جابجایی های زیاد که در فنرهای بین فریم و چرخ و محور ایجاد میشود به کفشک منتقل نشود.

٦-٤- محاسن ریل سوم

- سادگی سیستم خط، نصب ریل سوم ساده تر و ارزانتر است
- سادگی سیستم قطار
- نسبت به شرایط محیطی کمتر صدمه پذیر است (به غیر از سیل و یخبندان)
- در پلها و تونلها فضای کمتری اشغال می کند. در نتیجه به علت کاهش سطح مقطع تونلها و پلها هزینه احداث کاهش می یابد.

- بهترین انتخاب برای خطوط زیر زمینی و متروها

فقط یک ریل آن هم با تجهیزات کوچک و کم به خط اضافه میشود که سیستم خطوط برقی را بسیار ساده کرده و عملاً هیچ فضای اضافی را اشغال نمی کند. شکل ٦-٢٠ سطح مقطع کوچک تونلی در متروی لندن را نشان می دهد.

شکل ٦-٢٠- سطح مقطع تونلی در متروی لندن

٦-٥- معایب ریل سوم

معایب ریل سوم عبارتند از:

- ایمنی- به علت در دسترس بودن، عدم رعایت نکات ایمنی می تواند منجر به مرگ شود.
- ضریب اطمینان پایین- پایین بودن ضریب ایمنی و تاثیر پذیری از شرایط جوی ضریب اطمینان سیستم را نیز کاهش می دهند.
- به علت مسایل ایمنی و نیز عایقبندی ولتاژ شبکه از حد معینی (معمولا ١٥٠٠ ولت) نمی تواند بیشتر باشد
- در تقاطع ها در ریل سوم یک فاصله ایجاد می شود. در صورت توقف قطار در این فواصل به علت عدم اتصال به ریل سوم عملا حرکت قطار به جز با کمک عوامل کمکی دیگر غیر ممکن است.
- به علت غیر پیوسته بودن سیستم تغذیه دارای محدودیت سرعت است. (١٦٠ کیلومتر بر ساعت)
- وجود جرقه هنگام عبور از گپها
- شرایط جوی می تواند برکیفیت تماس کفشک و ریل سوم موثر باشد.

در شرایط بد جوی و بوران و یخ بندان سطح ریل سوم را لایه ای از یخ می پوشاند که این موضوع باعث می شود در این شرایط جوی تماس موثری بین کفشک و ریل سوم بوجود نیامده و سیستم قطار از کار بیفتد.

در صورت قرار داشتن درفضای باز برگ درختان، یخ و ... می تواند مانع تماس کامل جاربک و ریل سوم شود.

- تعمیر و نگهداری سخت و پر هزینه
- فاصلهٔ کم پستها نسبت به هم
- کوچک بودن sectionها
- قدرت کم
- مشکل اتصال کوتاه و جرقه ناشی از آن
- عمر کم
- سایش
- حرکتهای عرضی قطار یا هانتینگ
- افتادگی بالاست و تراورسهایی که نگه دارنده ساپروتهاست
- افت ولتاژ بالا (به علت جریان زیاد)
- به علت قرار گرفتن هادی های برقدار در مجاورت زمین و همچنین در معرض تماس افراد (پرسنل) مجاور خط امکان افزایش ولتاژ به مقادیر بالاتر از یک حد معین وجود ندارد، این محدودیت ولتاژ و در نتیجه افزایش جریان محدودیتهای فنی را ایجاد می کند که بعضی از آنها عبارتند از:
  - دارای ظرفیت محدود است
  - دارای افت ولتاژ زیاد است
  - فاصله کم پستهای ترکشن در نتیجه نیاز به تعداد زیادی پست تراکشن, که باعث بالا رفتن هزینه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری می شود.

به علت سطح مقطع بالای ریل سوم و ولتاژ پایین شبکه, میزان اتلاف انرژی الکتریکی در این نوع از مدار تغذیه بسیار بالا است. وجود این مشکل باعث شده تا طول sectionها کم شده و ترکشن پستها را با فواصل کمتری نسبت به هم نصب کنند. فاصله کم بین پستها باعث افزایش هزینه ها و تعمیر و نگهداری می شود و از طرف دیگر برای خود قطار و مبحث ترافیک خط نیز مشکل زا است.

با بهینه کردن جنس و شکل ریل سوم و همچنین استفاده از اتصالات مناسب در هادی و ایزوله های قوی بین ریل سوم و زمین میتوان میزان تلفات را مینیمم کرد.

یکی دیگر از مشکلات ریل سوم ایجاد اتصال کوتاه و جرقه در طول مسیر است چرا که معمولاً فاصله لازم از هادی جریان (ریل سوم) که دارای ولتاژ بالایی نیز میباشد رعایت نمی شود. فاصله کم ریل سوم با زمین ریلها و خود قطار باعث به وجود آمدن جرقه می گردد. این جرقه ها هم به ریل سوم و هم به کفشکها آسیب می رساند. در مواردی که این جرقه ها ایجاد می گردند ممکن است جریان از جعبه یاتاقان

عبور کند که این خود باعث میشود که یاتاقانها آسیبهای جدی دیده و عمر آنها کاهش یابد. شکل ٦-٢١ جرقه روی جاربک در انتهای یک سکشن از ریل سوم را نشان می دهد.

از طرف دیگر به علت در دسترس بودن ریل سوم امکان تماس حیوانات منطقه و افرادی که به آن نزدیک می شوند هست و ایجاد این تماس موجب ایجاد اتصال کوتاه در شبکه و از کار افتادن آن می شود. از طرفی باعث از بین رفتن آن جاندار می گردد. این مشکل یکی از معمولترین مشکلات شبکه تغذیه با ریل سوم است که در سراسر جهان بسیار اتفاق می افتد.

به علت پایین بودن ولتاژ تغذیه, قدرت و سرعت ترکشن کاهش می یابد و این موضوع موارد استفاده آن را در بارهای سنگین و سرعتهای بالا کاهش می دهد, به همین دلیل این سیستم در قطارهای باری و بین شهری استفاده نمی شود.

در مورد مشکلاتی همچون Section , Gap و تعمیر نگهداری ریل سوم در بخشهای بعدی بحث خواهد شد

به علت محدودیت قدرت و سرعت لکوموتیو با ریل سوم مزیتی نسبت به لکوموتیوهای دیزل الکتریک ندارد (در صورتیکه مزیت اصلی برقی کردن خطوط قدرت و سرعت بیشتر لکوموتیوهای برقی است). اما باید بخاطر داشت که لکوموتیو با ریل سوم می تواند در تونلهای طویل (مثل متروها) براحتی حرکت کند در حالیکه اینکار برای لکوموتیوهای دیزل الکتریک غیر ممکن و برای لکوموتیو با شبکه تغذیه هوایی سطح مقطع بزرگی را برای تونل می طلبد.

شکل ٦-٢١- جرقه روی جاربک در انتهای یک سکشن از ریل سوم

به علت تماس فلز با فلز در سطح تماس ریل سوم و محدودیت در استفاده از مواد روانکار, پس از مدتی شاهد سایش سطح ریل سوم و کفشکها خواهیم بود. البته اعمال نیروهای بیش از حد نیاز از طرف کفشک این سایش را چندین برابر می کند.

حرکتهای عرضی قطار یا هانتینگ باعث میشود تا کفشک حرکتهای زیادی در راستای عرضی داشته باشد. این امر باعث میشود که نرخ سایش چندین برابر شود و یا اینکه کفشک از جای خود خارج شده و بشکند.

٦-٦- غیر پیوستگی در ریل سوم

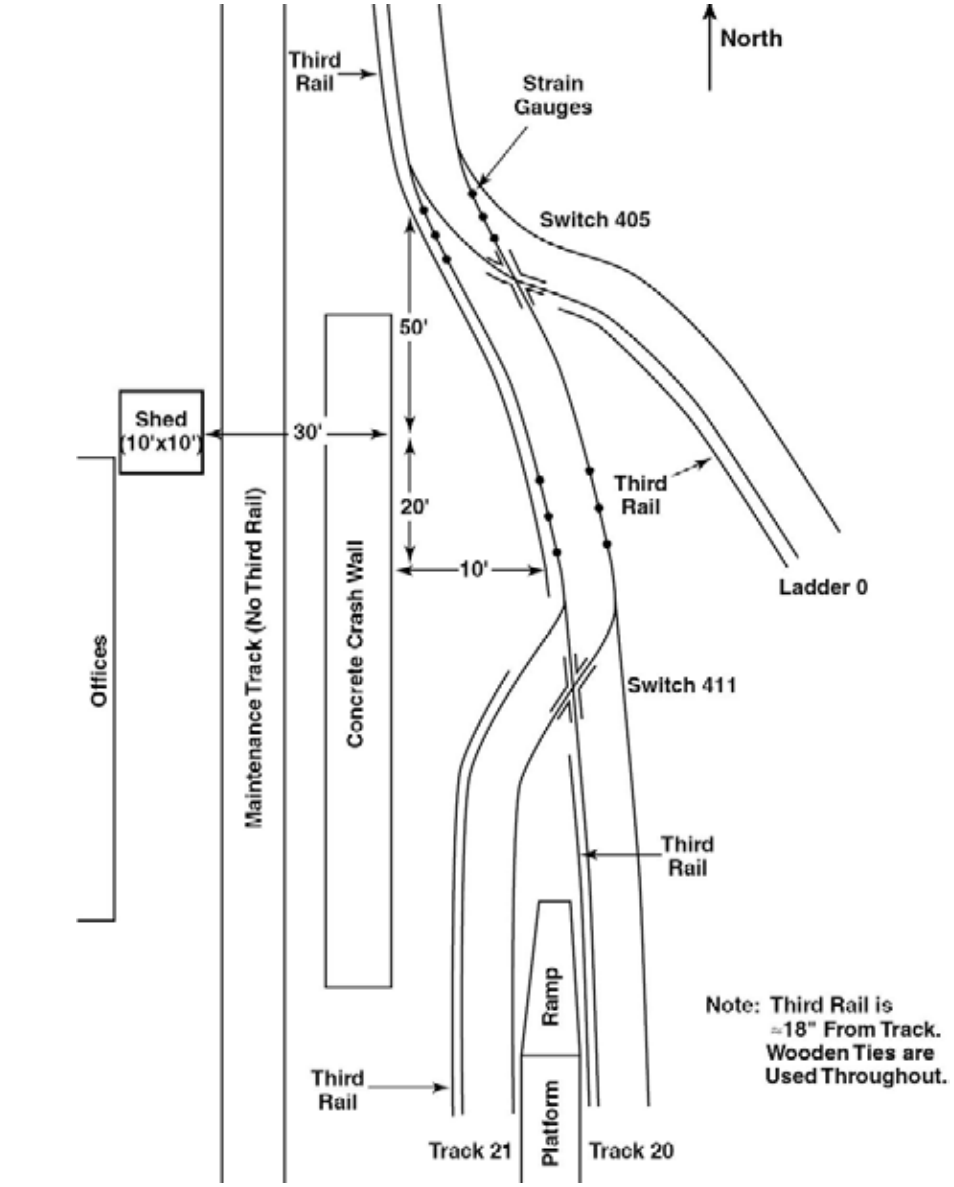
در خطوطی که از شبکه ریل سوم استفاده می شود فواصلی مشاهده می شود که بدون ریل سوم است و ریل سوم در آنجا کار گذاشته نشده است. به این فواصل در شبکه ریل سوم, گپ می گویند. در شبکه هوایی تقریبا در تمامی طول مسیر شبکه هوایی بصورت مکانیکی پیوسته است (بصورت برقدار یا بدون برق). در سیستم ریل سوم ریلهای حرکتی و ریل سوم در مجاورت هم قرار دارند. معمولا ریل سوم از سطح ریل اصلی بالاتر است, پس اگر تقاطعی و یا انشعابی در خطوط باشد ریل سوم جلوی حرکت قطار را خواهد گرفت در این محدوده قطار اگر بخواهد عبور کند به ریل سوم بر خورد می کند در نتیجه برای ادامه یافتن مسیر اصلی باید ریل سوم قطع شود شکل ٦-٢٢ وضعیت گپ در محل انشعاب (سوزن) را نشان می دهد. بنابراین در محل سوزنها به علت لزوم پیوستگی ریلهای حرکتی ریل سوم ناچار است که قطع شود. در محل انقطاع[1] ریل سوم لکوموتیو نمی تواند انرژی الکتریکی دریافت نماید. جهت جبران قسمتی از این مشکل، از چند کفشک در طول لکوموتیو استفاده می شود (در حالیکه در سیستم بالاسری یک یا حداکثر دو پانتوگراف استفاده می شود.

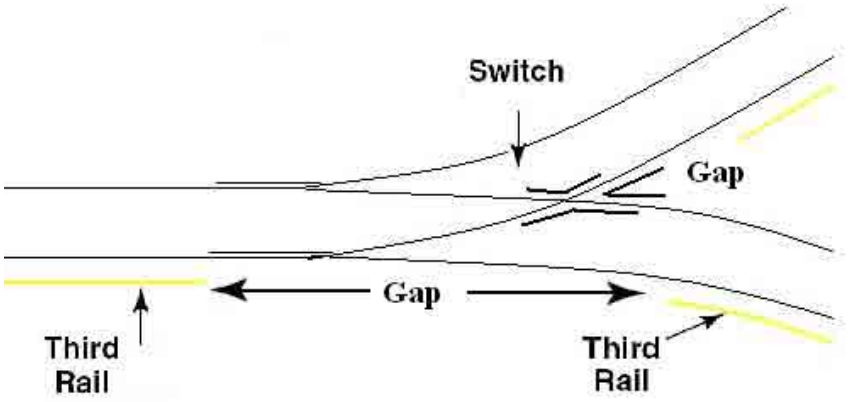
با توجه به شعاعی بودن تغذیه در راه آهن برقی جهت حفظ پیوستگی مدار از نظر الکتریکی معمولا ریل سوم در دو طرف محل انقطاع مطابق شکل ٦-٢٣ توسط هادیهایی[2] به هم متصل می شود.

در مواردی ممکن است که اندازه گپ از طول خود قطار نیز بیشتر شود, در این حالت اگر سرعت قطار کم بوده و نتواند این گپ را پشت سر بگذارد, در آن گیر افتاده و دیگر نمی تواند از موتورهای خود برای حرکت استفاده کند. تنها راه ممکن در این مورد, استفاده از لوکوموتیو دیگری به عنوان یدک است تا قطار گیر کرده در گپ را حل داده و از آن منطقه خارج کند.

---

[1] gap
[2] busline



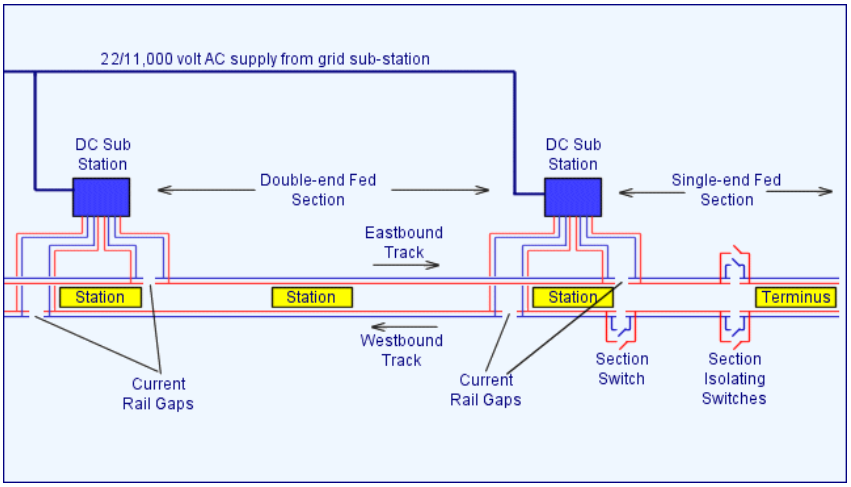


شکل ٦-٢٢ وضعیت گپ در محل انشعاب (سوزن)

شکل ٦ –٢٣– انقطاع در ریل سوم و اتصال ریل سوم در دو طرف انقطاع

انقطاع در ریل سوم ممکن است با هدف افزایش ضریب اطمینان سیستم انجام شود. فاصله بین دو پست تراکشن متوالی سکشن[1] می گویند. در شبکه تغذیه مستقیم به علت افت ولتاژ بالای این سیستم، فاصله بین پستها و یا همان طول سکشنها کم است. سکشنها معمولا از یک پست مجاور و یا از هر دو پست مجاور برای تغذیه قطار استفاده میکند. حالت دوم از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است چرا که اگر یکی از پستها دچار مشکل شود پست دیگر میتواند مدار را تغذیه کند. شکل ٦–٢٤ شبکه کاملی از ریل سوم را نشان میدهد. که در آن از هر دو نوع سکشن استفاده شده است.

مورد دیگر در سکشنها معرفی سکشن مرده و سکشن زنده می باشد. به طور کلی سکشنی که از شبکه تغذیه میشود و متصل به شبکه اصلی است را سکشن زنده گویند. در صورتی که بخواهیم قطار را نسبت به شبکه اصلی ایزوله کنیم از سکشن دیگری به نام سکشن مرده استفاده میشود. این سکشن متصل به شبکه اصلی نبوده و برق آن از جای دیگری تعمین میگردد. البته به سکشنهایی که به هر دلیل (خرابی سیستم تغذیه و یا قطع برق به وسیله سویچ) بدون برق باشند نیز سکشن مرده میگویند.



شکل ٦–٢٤ – مدار الکتریکی ریل سوم و محلهای انقطاع در آن

[1] Section

در حالت عادی در شبکه های جریان مستقیم (که معمولا در ریل سوم مورد استفاده قرار می گیرند) دو پست یکسوساز مجاور می توانند از طریق ریل سوم به هم متصل باشند. اما اگر در یکی از پستهای کشش یا قسمتی از ریل سوم خطایی رخ دهد ممکن است همه شبکه از کار بیفتد. برای رفع این مشکل می توان در قسمتهای مختلف در طول ریل سوم انقطاع ایجاد نمود و با بروز خطا در یک قسمت بقیه قسمتها بتوانند به کار خود ادامه دهند. در اینحالت ریل سوم در دو طرف انقطاع توسط کلیدهایی به هم متصل یا از هم جدا می شوند. در اینحالت اگر یکی از قسمتها بی برق شده باشد قطار حق ندارد از قسمت برقدار به سمت قسمت بی برق حرکت کند زیرا قسمت بی برق از طریق جاروبکها بین قسمت برقدار و بی برق اتصال ایجاد می کنند.

در مواردی لازم است قطار در محلی بدون برق متوقف شود. در اینصورت در محل توقف مجدد در ریل سوم فاصله ای ایجاد می شود و در موارد لازم توسط کلید به ریلهای سوم متصل به پست یکسوساز متصل یا از آن جدا می شود. شکل ٦-٢٤ مدار الکتریکی ریل سوم و محلهای انقطاع در آنرا نشان می دهد.

در شبکه هوایی معمولا فقط یک یا حداکثر دو پانتوگراف وجود دارد اما در سیستم ریل سوم معمولا چند کفشک برای اتصال به ریل سوم وجود دارد. در مقابل هرگاه در یک سکشن اتصال کوتاه رخ دهد و بی برق باشد، نباید قطار بعدی وارد آن سکشن شود چرا که موجب اتصال کوتاه در سکشن قبلی نیز میگردد

٦-٧- تعمیر و نگهداری ریل سوم

تمیز نگه داشتن ریل سوم یکی از موارد مهم در تعمیر و نگهداری از ریل سوم است. آلودگی هایی که پس از گذشتن مدت زمانی روی ریل سوم مینشیند باعث میشود که هدایت الکترکی دچار مشکل گردد و همچنین افت ولتاژ بالا رود. از طرف دیگر این آلودگیها باعث ایجاد خوردگی در ریل سوم می گردند.

برای تمیز کردن ریل سوم مشکل اساسی ولتاژ بالای این هادی است و از طرفی نمی توان برای تمیز کردن دوره ای ریل سوم کل سیستم حمل و نقل را از کار انداخت. برای رفع این مشکل باید از ابزاری مخصوص برای رفع آلودگی استفاده کرد. این ابزار ممکن است با عایقهای قوی ساخته شده باشد و یا مانند شکل ٦-٢٥ برای تمیز کردن ریل سوم اصلاً تماسی با آن نداشته باشد. این سیستم با استفاده از سیال شوینده که به صورت جت روی سطح ریل سوم میپاشد, عمل کرده و سطح ریل سوم را تمیز میکند.

مشکل دیگری که برای تمیز کردن دوره ای وجود دارد نقاط غیر قابل دسترس در ریل سوم است. یک چنین نقاطی مثلا در تونلها که فضا خیلی کم است موجود می باشد .

بازدیدهای مرتب و دوره ای از ریل سوم جهت شناسائی و رفع مشکلاتی مانند وجود ترک در ریل سوم و یا وجود شکستگی در محافظ و کاور لازم است

پس از گذشت مدتی از شروع استفاده از یک خط, روسازی آن دچار یکسری جابجاییها میشود . خرابی در روسازی خط موجب ایجاد مشکل در ریل سوم و سیستم تغذیه قطار می شود. به عنوان مثال بالاستها از جای خود حرکت کرده و باعث می شوند که تراورس دچار افتادگی گردد. این افتادگی در تراورس باعث جابجا شدن ریل سومی که روی آن نسب شده است نیز می گردد. این جابجایی یکی از مشکلات ریل سوم محسوب میشود که باید برطرف گردد.

برای جلوگیری از چنین مشکلی باید به صورت دوره ای موقعیت ریل سوم نسبت به ریل اصلی سنجیده شود

البته امروزه دستگاههایی ساخته شده که بر روی وسیکه نقلیه نصب میگردند و با عبور از مسیر دارای ریل سوم موقعیت آن را اندازه گیری میکنند. البته باز هم در اینجا مشکل ولتاژ بالای ریل سوم وجود دارد و برای حل آن می توان از اندازه گیرهای نوری و لیزری استفاده کرد.

در فصول سرد سال و در مناطقی که برودت هوا زیاد است, ریل سوم به مراقبت ویژه ای نیاز دارد تا مشکل یخ زدگی برای آن پیش نیاید. البته بکار بردن کاور روی ریل سوم موثر است ولی در بعضی موارد کفایت نمی کند. این مشکل در خطوطی که زیر زمین قرار ندارند یک مشکل اساسی است به طوری که در شرایط بد آب و هوایی حرکت قطارها متوقف میگردد. امروزه روش جدیدی برای مقابله با این مشکل معرفی شده که با استفاده از پوششی ضد یخ و چسبناک که روی ریل سوم پاشیده میشود از ایجاد لایه یخ روی آن جلوگیری می کند.

از دیگر مواردی که در تعمیر و نگهداری ریل سوم موثر است ایجاد موانع برای ورود حیوانات به محوطه ریل سوم و نصب علائم هشدار دهنده برای مردم و کارکنان در نزدیکی ریل سوم میباشد. این موضوع باعث میگردد مشکل اتصال کوتاه به طرز چشم گیری کاهش یافته و به دنبال آن تعمیر و نگهداری ریل سوم کاهش یابد.

شکل ٦-٢٦- تمیز کردن ریل سوم بدون تماس

فصل ۷- مشخصات مدار قدرت قطارهای خط یک و دو متروی تهران

مقدمه :

قطارهای خط یک و دوی مترو هر کدام از هفت واگن و دو یونیت تشکیل شده اند که شمای کلی آن در شکل۷-۱ نمایش داده شده است. در هر یک از واگنها بجز واگنهای TC، چهار تراکشن موتور قرار دارد. بنابراین قطارهای خط یک مترو دارای ۲۸ تراکشن موتور و قطارهای خط دوی مترو به دلیل شیب کمتر مسیر دارای ۲۰ تراکشن موتور می باشند.

قطارهای خط یک

قطارهای خط دو

که شرح انواع واگنها به شرح زیر می باشد :

MC: Motor car with cab.
M: Motor car
MS: Motor car with driving stand
TC: Trailer car with cab.

شکل۷-۱ – شمای کلی قطارهای خط یک و دوی مترو

همچنین هر قطار دارای چهار موتور ژنراتور و سه کمپرسور می باشد که محل نصب موتور ژنراتورها بر روی واگنهای MC,MS در قطارهای خط یک و TC,MS در قطارهای خط دوی مترو می باشد. همچنین کمپرسورها در هر دو نوع قطار بر روی واگنهای M نصب می شوند.

در قطارخط ۱ و ۲ متروی تهران که از انواع قطارهای DC می باشد، از سه نوع مدار استفاده شده است:

۱-مدارات قدرت 750 V DC :

- هیترهای سالن و کابین
- کمپرسورها
- موتور ژنراتورها
- تراکشن موتورها

۲-مدار کمکی 220 V AC

- روشنایی
- تهویه
- شارژ که 220 V دریافت و 110 V تولید می کند.
- فنهای چاپر
- شارژ خازنهای چاپر
- گرمکن شیشه کابین راهبر

۳-مدار فرمان 110 V DC

- مدارات فرمان کنتاکتورها
- دربها
- بوق
- روشنایی اضطراری

در این فصل فقط به بررسی اجزای سیستم مدار قدرت قطارهای خط یک و دوی متروی تهران پرداخته شده است

۷-۱- هیتر های کابین[1]

این هیتر با ولتاژ 375 V DCو ماکزیمم 450 V DC کار می کند و دارای قدرت 0.25 KW می باشد.

۷-۲- هیتر های سالن[2]

این هیترها جهت سیستم گرمایشی قطار در داخل واگنها به کار می رود.

گرمایش سالنها توسط دو مدار که در هر مدار ٦ هیتر جای دارد تامین می شود.این هیتر ها زیر صندلی های واگن های MS,M,MC تعبیه شده اند.

در متروی خط یک متروی تهران، یک مدار با توان 6*1.6=9.6 KW و مدرا دیگر با توان 6*0.4=2.4 KW کار می کند و هر دو مدار در زیر یک سری صندلی نصب می شوند.

---

[1] Cab electric-heating

[2] salon electric-heating

در خط دوی متروی تهران تمام خط زیر زمین قرار گرفته است و با توجه به اینکه حداقل دمای تونل 15+ C^o می باشد، گرمایش سالنها متناسب با شرایط تنظیم شده است. در این واگنها یک تیوب گرمایش الکتریکی با توان 0.8 KW وجود دارد و هر دو مدار زیر یک صندلی نصب می شوند.

هیترها مستقیما از برق 750 V DC تغذیه می شوند و مقاومت عایقی آن نباید کمتر از 5 mΩ باشد و ماکزیمم ولتاژ آن 900 V است.

دمای سطح لوله گرمایش بیش از الکتریکی نباید 200 ^oC شود.

۷-۳- کمپرسور هوا

در قطارهای خط یک و دو متروی تهران سه کمپرسور تولید هوا در واگنهای "M" قرار دارد که هوای مورد نیاز تجهیزات قطار را تامین می کند. دستگاه موتور کمپرسور در قابی فلزی در زیر واگنهای "M" قرار دارد که برای تعبیه آن از بستهای ارتجاعی استفاده گردیده و همچنین برای جلوگیری از آلودگی صوتی از پوششهای عایقی صدا استفاده شده است.

کمپرسورها از نوع پیستونی بوده که دارای چهار سیلندر هستند که دوتای آن در مرحله اول 2.2 bar و در مرحله دوم 10 bar تولید هوا می کند.

این موتور کمپرسورها با برق 750 V DC و توان 10KW و جریان 1.75 A و از طریق کوپلینگ قابل انعطاف فعال می شوند. البته برای همزمان کار کردن این سه موتور کمپرسور از مدار فرمان 110 V DC استفاده شده که به صورت سری بسته شده اند.

هوای خارجی پس از گذشتن از یک فیلتر وارد کمپرسور شده و تبدیل به 2.2 bar می شود سپس وارد خنک کننده اولیه (اینتر کولر)شده که در سر راه آن نیز یک شیر ایمنی در 5 bar تنظیم شده وپس از گذشتن از اینترکولر این هوا تبدیل به 10 bar می شود که برای محافظت از سیستم یک شیر 13.5 bar تعبیه شده، هوای تولید شده وارد خنک کننده ثانویه (افتر کولر) می شود و سپس وارد دستگاه خشک کن هوا و مخازن اصلی می شود.

۷-٤- موتور ژنراتور

این دستگاه یکی از دستگاههای مهم کمکی است که جهت مواردی چند در قطار نصب شده است و از نوع ZQD-14/TQF-14 می باشد. این موتورها بر روی واگن های MS,MC یا MS,TC تعبیه شده اند.

ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم یکدستگاه موتور الکتریکی DC را تغذیه می کند. این موتور با یک ژنراتور سنکرون ۲۲۰ ولت سه فاز ۵۰ هرتز هم محور شده و آنرا می چرخاند.

همچنین یک واحد شارژ به عنوان کنترل قدرت کمکی در قطار استفاده می شود. واحد شارژر با مجموعه باتری موازی بوده و دارای یک محدود کننده محافظتی می باشد.

این ژنراتور مدارهای کنترل، روشنایی، هواسازی و ارتباطات را تغذیه می کند.

الف- مشخصات موتور

توان خروجی : 13.5 KW

جریان : 21 A

ولتاژ : 750 V

نوع تحریک : تحریک ترکیبی (تحریک سری + تحریک شنت + تحریک جداگانه)

سرعت : 1500 r/min

مقاومت دمپینگ : 1.5 Ω

مقاومت شروع به کار : 3 Ω

مقاومت میدان شنت : 585 Ω

کلاس عایق کاری : F

ب- مشخصات ژنراتور

ظرفیت نسبی : 14 KVA

جریان : 36.7 A

ولتاژ : 220 V

فرکانس : 50 HZ

تعداد فاز : 3

اتصال : Y (سه فاز بدون نقطه خنثی)

ضریب قدرت: 0.85 پیش فاز

کلاس عایق کاری : F

۷-٤-۱- دلایل استفاده از موتور ژنراتور

با توجه به اینکه در خط ۱ و۲ مترو از ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم برای تغذیه قطارها استفاده شده است و برای راه اندازی بعضی از تجهیزات احتیاج به انواع دیگری از ولتاژها خصوصا ولتاژ متناوب هست، لازم است از یک مبدل ولتاژ DC به ACاستفاده شود. در اینجا از میان انواع مختلف مبدلها نوع الکترو مکانیکی که ولتاژ ۷۵۰ ولت مستقیم را به ۲۲۰ ولت متناوب تبدیل می کند استفاده شده است.

۷-٤-۲-اصول کار موتور ژنراتور

این موتور از نوع DC با چهار قطب می باشد که مدار مغناطیسی آن دارای مشخصه مناسب جهت ابقاء سرعت و کاهش افت ولتاژ مجموعه است..

قطب اصلی دارای سه مجموعه سیم پیچ تحریک موازی (شنت)(E_1-E_2)، تحریک سری (D_1-D_2) و تحریک جداگانه (F_1-F_2) می باشد.

سیم پیچ تحریک شنت میدان اصلی را ایجاد می کند. هنگام نوسانات بار و ولتاژ خط، به دلیل مشخصه مناسب تحریک شنت، سرعت موتور (که به فرکانس ژنراتور بستگی دارد)، در رنج کوچکی تغییر می کند و پایداری فرکانس را حفظ می کند.

استفاده از سیم پیچ تحریک سری در واقع آنرا به موتور کمپوند تبدیل نموده و باعث افزایش گشتاور اولیه و کاهش جریان راه اندازی آرمیچر می شود.

سیم پیچ تحریک جداگانه (به عبارت دیگر، سیم پیچ تنظیم کننده) به وسایل پایدارکننده فرکانس مرتبط است. هنگامیکه سرعت ماشین نسبتا از محدوده مجاز خارج شود، در نتیجه فرکانس ژنراتور از حد مجاز خارج شود، وسایل پایدارساز فرکانس به طور اتوماتیک جریان تحریک را در سیم پیچ تحریک جداگانه کنترل نموده و دور را تنظیم می نمایند.

ژنراتور سنکرون، سه فاز و چهار قطب و دارای دو مجموعه سیم پیچ در هر قطب است. مجموعه اول سیم پیچ (F_3-F_4) میدان اصلی را تامین می کند. هنگامی که ولتاژ خروجی افزایش یابد، دستگاه پایدار ساز ولتاژ به طور اتوماتیک جریان تحریک در مجموعه سیم پیچ اول را جهت کاهش ولتاژ خروجی کاهش می دهد و بالعکس جهت افزایش ولتاژ خروجی، جریان تحریک افزایش می یابد. به این ترتیب ولتاژ می تواند ثابت بماند.

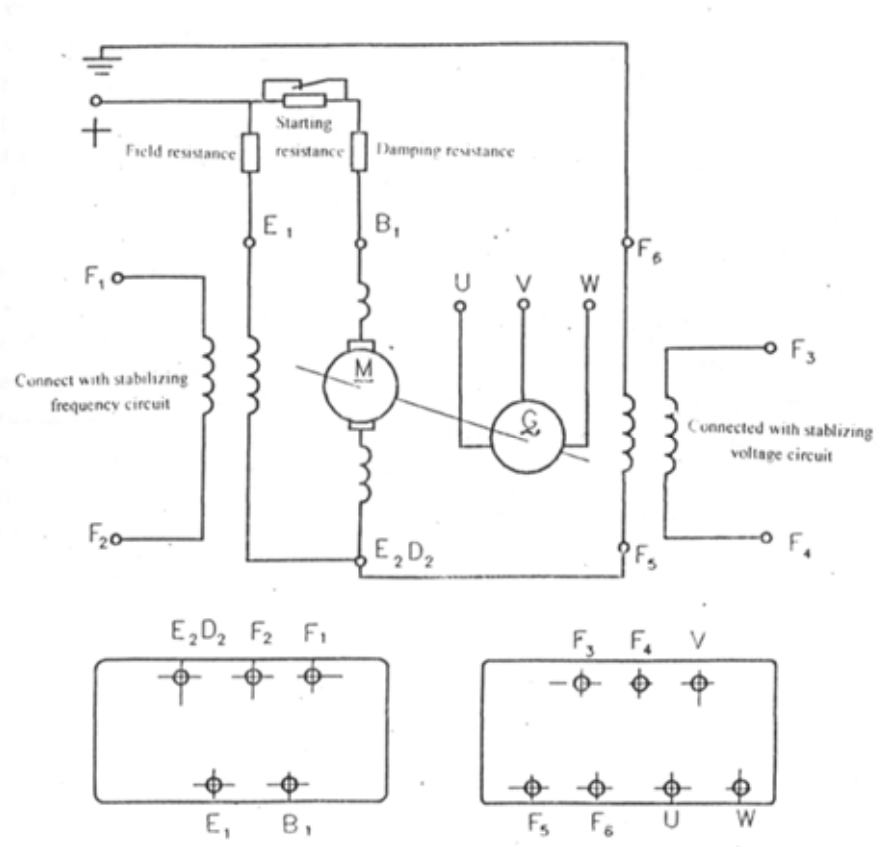
مجموعه سیم پیچ دوم (F_5-F_6) به مدار آرمیچر موتور DC سری شده است.

هنگامی که بار تغییر می یابد، سیم پیچ دوم به سیم پیچ اول جهت تنظیم میدان اصلی جهت افزایش دقت تنظیم ولتاژ کمک می کند. شکل ۷-۲ مدار الکتریکی موتور ژنراتور را نشان می دهد.

۷-۵- باکس سیرکت برکرها[1]

در این باکس جریان اصلی که به تراکشن موتورها می رسد قطع و وصل می گردد که دارای دو قسمت اصلی است : کنتاکتورهای کمکی یا مدار 110 V DC و کنتاکتورهای قدرت که جریان اصلی 750 V را به تراکشنها می رساند.

[1] Circuit Breakers Box



شکل ۷-۲ مدار الکتریکی موتور ژنراتور

مدار کنترل 110 V DC بوده و جهت فعال نمودن تراکشن موتورها به برق 750 V DC نیاز دارد. از این رو شیرهای الکترومغناطیسی را به وسیله سلنوئیدهای فشار قوی فعال و یا تحریک نموده و برق 750VDC به تراکشن موتورها ارسال می نماییم .هنگامی مدار اصلی وصل می شود که CAM SHAFT متصل شده باشد. در زمان تغییرات CAM SHAFT مدار اصلی بدون برق بوده و در بقیه اوقات برقدار می باشد.

جهت تغییرات CAM SHAFT از یک شیر الکترومغناطیسی استفاده گردیده است.

اجزای این باکس به ترتیب تشکیل گردیده از:

“KP4, KP5, KP6, QF3, KP3, QF2, QF1, KP2, KP1

در ناچهای مختلف کلیدهای قدرت از کنتاکتهای فرمان پیروی کرده و بسته می شوند تا جریان اصلی به تراکشن موتورها ارسال گردد

۷-٦- تراکشن موتور "Traction motor"

تراکشن موتورهای استفاده شده در قطارهای خط یک و دو مترو تهران از نوع DC بوده که بوسیله تنظیم مدار مقاومت آرمیچر سرعت آنها قابل تنظیم است. با تغییرات ترانزیستورهای اصلی و کمکی می توان زمان متصل شدن مقاومتها را تغییر داد تا جریان ثابتی داشته باشیم.

از این رو دستگاه چاپر جهت تنظیم مقاومتها استفاده می شود.

هر واگن به چهار تراکشن موتور مجهز شده که هر کدام از آنها با ولتاژ مجاز 750/2=375 V و توان مجاز 132 KW و جریان 390 A کار می کند. در مدار اصلی دو موتور به طور دائمی به صورت سری با یکدیگر با هم متصلند که یک مجموعه موتور را تشکیل می دهند در نتیجه این چهار موتور در دو مجموعه جای داده شده اند.

تراکشن موتورها می توانند در دو حالت کششی و ترمزی کار کنند. در حالت کششی دو مجموعه موتور به صورت سری یا موازی به یکدیگر متصلند و در حالت ترمزی هر دو مجموعه جهت پایداری الکتریکی به صورت متناوب تحریک می شوند.

هر دو حالت کششی و ترمزی به وسیله مقاومتهای تنظیمی چاپر که به وسیله میکرو کامپیوتر یک تنظیم پیوسته را انجام می دهد، کنترل می شوند.

تراکشن موتورها دارای وزن 765 kg هستند،موتور آن جهار قطبی بوده که دارای چهار عدد ذغال 64mm بوده که اگر به کمتر از 32 mm برسد باید تعویض گردد.

هنگامی که تراکشن موتور در خط یک شروع به کار کند، (با در نظر گرفتن جریان بار و شرایط چسبندگی خط) ماکزیمم جریان اولیه مجاز 1.25 برابر جریان مجاز (390 A)، و به عبارتی 488 A می باشد.

هنگامی که تراکشن موتور در خط دو شروع به کار کند، (با در نظر گرفتن جریان بار و شرایط چسبندگی خط) ماکزیمم جریان اولیه مجاز 1.5 برابر جریان مجاز (390 A)، و به عبارتی 585 A می باشد.

در حالت ترمزی، ماکزیمم جریان اولیه مجاز 1.2 برابر جریان مجاز (390 A)، و به عبارتی 468 A و ماکزیمم ولتاژ مجاز آن 1.73 برابر ولتاژ مجاز (375 V)، و به عبارتی 650 V می باشد.

۷-٦-۱- مشخصات تراکشن موتور DC

مدل : No. ZQ-132

توان نسبی : 132 KW

جریان : 390 A-650(MAX.)

ولتاژ : 375 V (600 V، ماکزیمم میزان در حالت تغییر به حالت ترمزی)

سرعت : 1580 r/min-3260(MAX.)

میدان نسبی : 80 %

سطوح میدان : 100-63-45 %

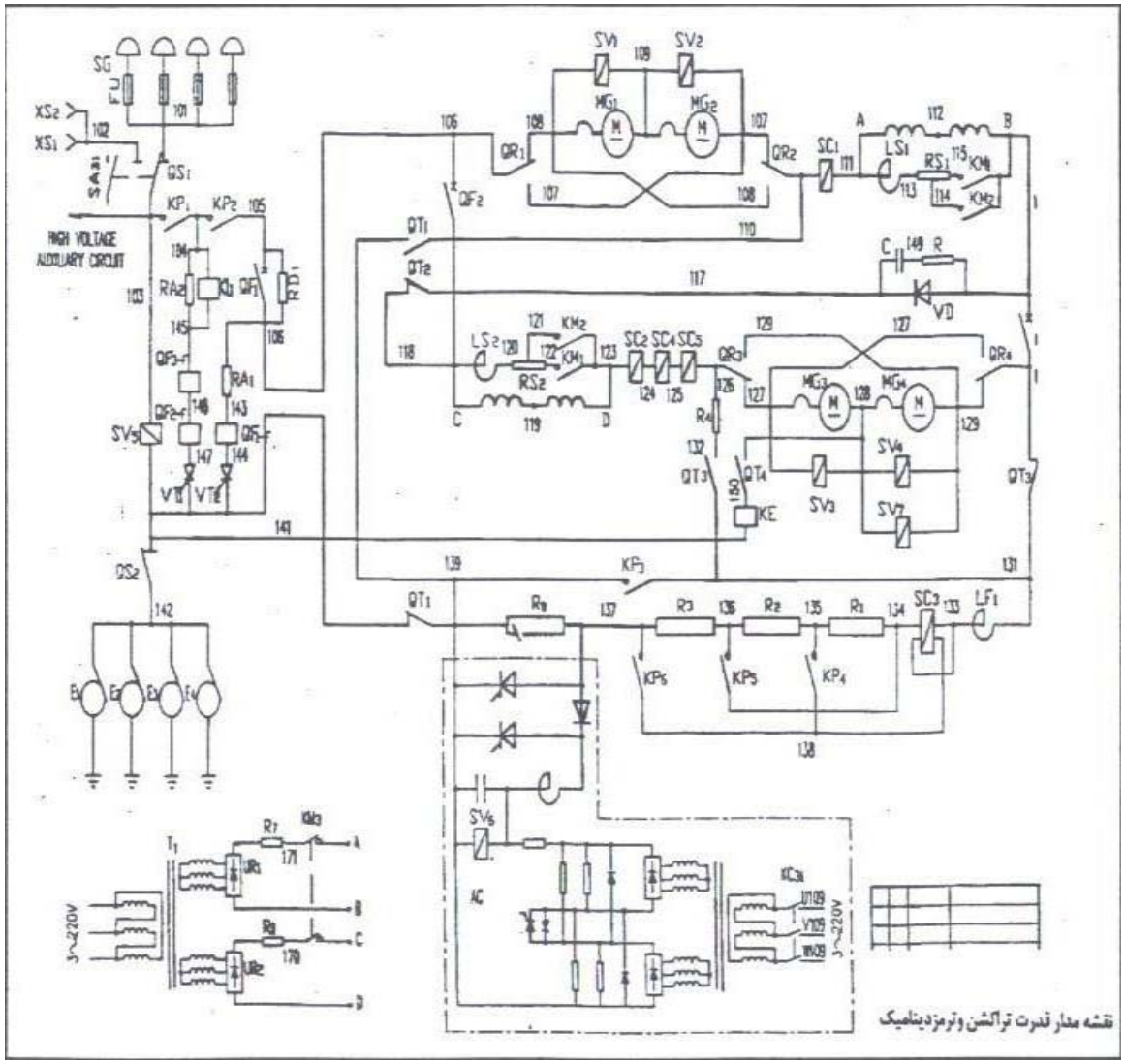
میدان : تحریک سری

کلاس عایق کاری : H

خنک کاری : خود خنک کار

وزن : 765 K

مشخصات اجزای مدار تراکشن موتور در قطارهای خط یک و دو متروی تهران مطابق جدول ۷-۱ می باشد. نقشه مدار قدرت تراکشن و ترمز دینامیک در شکل ۷-۳ نشان داده شده است



شکل ۷-۳- نقشه مدار قدرت تراکشن و ترمز دینامیک

جدول ۷-۱- مشخصات اجزای مدار تراکشن موتور در قطارهای خط یک و دو متروی تهران

No.	Code	Description & type	Technical data	Supplier
1	SG1 ~ 4	Current collector		CCC
2	FU1 ~ 4	High voltage fuse		CCC
3	XS1 ~ 2	High voltage socket	DC750V, 300A	CCC
4	QS1	Reverse switch	DC750V, 800A	XEMW
5	RA1~2	Auxiliary resistor	DC 750V, 2Ω, 3kW	XEMW
6	RD	Current-limiting resistor	DC750V, 2.4Ω, 4kW	XEMW
7	QF_1	Quick switch QDS3-2	DC750V, 900A/110V, 490kPa	XEMW
8	QS_2	Earth switch	DC 750V 800A	XEMW
9	QR	Reverse change-over switch	DC 750V, 500A/DC110V, 490kPa	XEMW
10	QT	Change-over switch for traction and braking	DC 750V, 500A/DC110V, 490kPa	XEMW
11	MG1~4	Traction motor ZQ -132	132kW,DC750V/2,390A 1580r/min	XEMW
12	LS1 ~ 2	Induction shunt QXF 3-1	4mH×2, 150A	XEMW
13	KS1 ~ 2	Shunt resistor	0.0545Ω, 150A	XEMW
14	R0 ~ 4	Starting and braking resistor	3.28Ω, 342kW	XEMW
15	LF1	Smooth reactor QXP3-1	4mH, 530A	XEMW
16	SV1 ~ 6	Voltage sensor		XEMW
17	SC1 ~ 4	Current sensor		XEMW
18	SV7	Voltage sensor		CCC
19	SC5	Current sensor		CCC
20	SA31	Limit switch	DC 220V, 5A	XEMW
21	KE,KL	Grounding relay QJJ4-1	DC750V, 0.15A ~ 0.2A	XEMW
22	VD	Block diode ZP800~3000	800A 3000V	XEMW
23	R - C	VD Absorber		XEMW
24	AC	Chopper QBZ39 - 1	528kW, DC750V 125Hz, 1300A	XEMW
25	VT1~2	Thyristor	500A, 2500V	XEMW
26	QF2~QF3	Quick switch QDS6-1	DC750V, 600A/DC110V, 490kPa	XEMW
27	KP1 ~ 2	Electropneumatic contactor QCK10-1	DC 750V, 900A/DC110V, 490kPa	XEMW
28	KP4 ~ 6	Electropneumatic contactor QCK10-2	DC 750V, 600A/DC110V, 490kPa	XEMW

	Code	Description & type	Technical data	Supplier
	KM1~3	Electromagnetic contactor QCC9-3	DC750V 300A/DC110V	XEMW
	E1~4	Grounding device QYJ1-1	180A×2	XEMW
	T1	Pre-exciting transformer SK-0.5	0.5kVA 3~220V/2×3 ~ 10V	XEMW
	UR1-2	Pre-exciting rectifier block		XEMW
	R7 - 8	Current-limiting resistor		XEMW
	KC31	Auxiliary charging contactor	3-220V, attractive voltage DC110V	XEMW

در نقشه شکل ۷-۳ مدار قدرت واگنهای قطارهای خط یک متروی تهران در حالت FW رسم شده است. بدیهی است اگر جهت جریان در سیم پیچ آرمیچر تغییر کند جهت چرخش موتورها نیز برعکس خواهد شد که جهت سادگی نقشه از رسم کنتاکتهای تغییر جهت گردش موتور BW خودداری شده است. در نقشه مذکور کلیه تجهیزات متعلق به مدار قدرت که در باکسهای مختلف وجود دارد (مانند چاپر کلیدهای قدرت – ترانسفر سوییچ) و یا بیرون از واگن نصب شده اند (مانند موتور تراکشن کفشک جریان–مقاومتهای سلفی– زغالهای زمین– سلفهای محدود کننده جریان و فیوزهای کفشک جریان) نشان داده شده است.

مشاهده می شود که تحریک موتورها از نوع سری می باشد که چهار قسمت بوده که دارای قطب کمکی جهت تعدیل میدان عرضی آرمیچر و ثابت نگهداشتن منطقه خنثی در طول زمان بارداری موتور می باشد.

در موتورهای سری سیم پیچ تحریک (S) با سیم پیچ آرمیچر (A) سری می شود یعنی جریان به وجود آورنده میزان، همان جریان آرمیچر و همان جریانی است که توسط موتور از شبکه دریافت می شود. در موتورهای سری $T \propto I^2$ است که این خاصیت میتواند ایجاد گشتاور راه اندازی بسیار زیادی را در زمان راه اندازی موتور موجب گردد.

۷-٦-۲- مشخصه گشتاور دور موتور سری

گشتاور راه اندازی موتور سری بسیار بزرگ به عبارت دیگر در بارهای کم و بی باری دور موتور بسیار زیاد است که به همین دلیل به هیچ وجه نباید موتور سری بی بار شود چرا که در این صورت دور آن بسیار زیاد شده و قسمتهای گردنده ماشین آسیب خواهند دید. دو پدال کفشک جریان که به طور مداوم با ریل سوم در ارتباط هستند و در هر قسمت قطار قرار دارند، جهت تامین و تغذیه مدار قدرت و مصرف کننده های 750 V بهکارمی روند. مشاهده می شود که هر کفشک جریان با یک فیوز 500 A سری می باشد.

کفشک زغال زمین که روی چهار محور (E1-E2) هر واگن قرار دارد (هر محور دو زغال) جهت ایجاد زمین مجازی مدار قدرت به کار می رود.

سکسیونر Qs1 جهت قطع تغذیه برق ورودی واگن از کفشکهای جریان و فعال کردن دو سو که در دو طرف قطار جهت تغذیه اضطراری تعبیه شده است می باشد. لازم به ذکر است که در حالت تغذیه اضطراری قطار فقط با ناچ ۱ حرکت می کند. سکسیونر Qs2 جهت قطع ارتباط مدار زمین می باشد.

۷-۷- چاپرباکس[1]

چاپر باکس یک شاخه اصلی تشکیل دهنده مدار قدرت می باشد و کار اصلی آنها تنظیم مقاومتها می باشد و این کار به وسیله میکرو کامپیوتر انجام می پذیرد از این مقاومتها برای شدت جریان بالا و بار زیاد استفاده می گردد.

---

[1] chopper box

مقاومتهایی که برای شروع حرکت به کار می رود R0,R1,R2,R3 نام دارند، همچنین در زمان ترمزدینامیک کاربرد دارد. میکرو کامپیوتر دارای چهار عدد سوکت ورودی و خروجی می باشد.

SC1 و SC2 سنسورهای شدت جریان می باشند. زمانی که شدت جریان وارد می شود آنرا حس نموده و به میکروکامپیوتر می فرستند، در حقیقت SC1 و SC2 اجازه نمی دهند شدت جریان بالا به میکرو کامپیوتر برسد.

"SC3" زمانیکه شدت جریان بالا می خواهیم، سنسور سوم آنرا حس نموده و وارد مدار شده، SC3 وSC4 خازنهای محافظ جریان زیاد و "R3, R4, R5, R6" مقاومتهای سیگنال می باشند.

دستگاه دارای دو مدار است که مدار اصلی در سمت راست و مدار کمکی در سمت چپ دستگاه واقع شده اند. شش عدد سنسور در کابین مدار اصلی وجود دارد که سه عدد در بالا و سه عدد در پایین قرار گرفته اند.

دو عدد ترانس منبع تغذیه برای این مدار « چاپر » تعبیه شده است که ولتاژ را از 110 V DC و جریان 1.5 A DC به ولتاژ 15 V DC و جریان 2 A DC تبدیل نموده و ولتاژها را مجزا می کند.

این مدار از دو تریستور اصلی V_1,V_2 و تریستورهای کمکی V_3,V_4 و دیود V_{22}،راکتور تبدیل جریان L_1 و مقاومتهای متعادل کننده ولتاژ R5,R6 و سلف L_2 و خازن C تشکیل شده است.

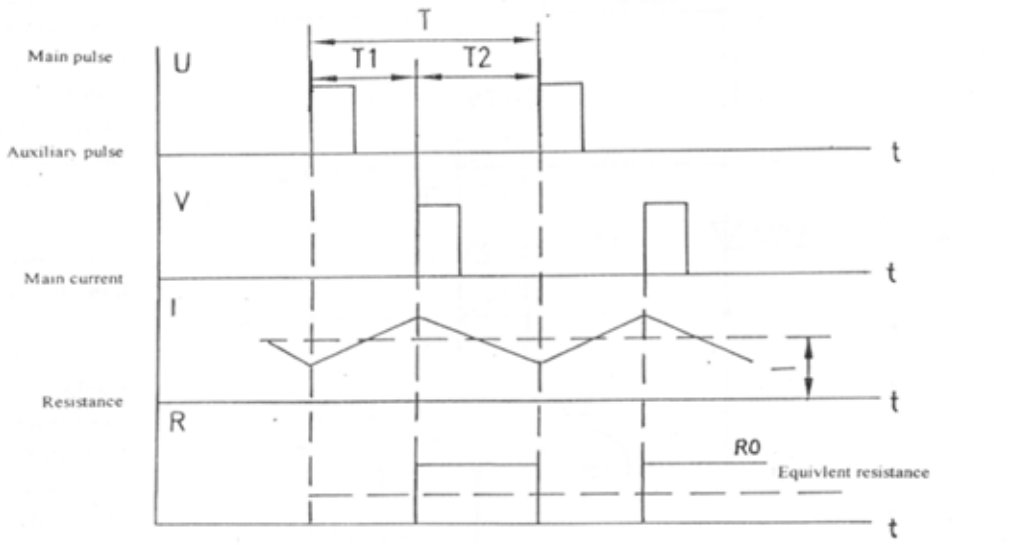
۷-۷-۱- اساس عملکرد چاپر باکس

اساس عملکرد چاپر باکس به شرح زیر است :

چاپر ها با فرکانس ثابت 125 HZ کار می کنند.

شکل ۷-٤ چگونگی ایجاد این پالسها و نحوه عملکرد چاپر ها را بر اساس پالسهای ایجاد شده نشان میدهد.

در شکل ۷-٤ T1 زمان هدایت چاپر و T2 زمان خاموشی می باشد و یک سیکل از T=T1+T2 تشکیل شده است.



شکل ۷-٤ چگونگی ایجاد پالسها و نحوه عملکرد چاپر ها

در زمان T1، R0 به وسیله چاپر اتصال کوتاه شده و مقدار آن به صفر می رسد و جریان در مدار افزایش می یابد.

در زمان T2، چاپر بسته شده و R0 در مدار وارد می شود. بنابراین جریان مدار قدرت کاهش می یابد.

در یک سیکل مقاومت معادل مدار از روش زیر به دست می آید :

$$R_e = \frac{T_2}{T_1} R_0 = \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) R_0$$

و با فرض $\alpha = T1/T$ داریم :

$$R_e = (1-\alpha) R_0$$

که α نسبت هدایت[1] (Conducting ratio) نامیده می شود که به نسبت زمان هدایت تریستور اصلی در یک سیکل مرتبط است.

تنها زمانیکه میزان α تنظیم شده است، مقاومت معادل مدار تنظیم می گردد.

۷-۷-۲- مشخصات چاپر باکس

مدل : QBZ 39-1 (در خط یک مترو) و QBZ 39-2 (در خط دو مترو)

جریان : 780 A

ولتاژ ورودی : 750 V DC

[1] Conducting ratio

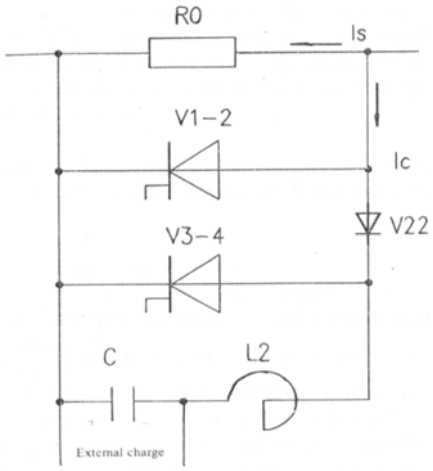
نسبت هدایت : 0.9 -0.1

فرکانس : 125 HZ

۷-۷-۳- فرایند تنظیم مقاومتی چاپر

شکل ۷-۵ مدار الکتریکی چاپر را نشان می دهد. مراحل عملکرد این مدار به شرح زیر است:

مرحله اول : در ابتدا جریان اصلی I، خازن C را شارژ می کند به طوریکه قطب مثبت در سمت راست و قطب منفی در سمت چپ باشد.



شکل ۷-۵ مدار الکتریکی چاپر

مرحله دوم: تریستور اصلی V1-2 آتش می شود و جریان را از خود عبور می دهد. جریان اصلی I از R0 به V1-2 منتقل می شود و جریان اصلی افزایش می یابد.

مرحله سوم : تریستور کمکی V3-4 آتش می شود و در این مرحله جریان د رخازن C و سلف L2 به نوسان در می آید. C به وسیله L2 و V3-4 دشارژ می شود و در L2 خاصیت مغناطیسی ایجاد می کند.

مرحله چهارم : نرخ دشارژ شدن C به تدریج کاهش می یابد و انرژی ذخیره شده در L2 از طریق V3-4 اجازه شارژ مجدد را به خازن C می دهد. هنگامی که برقراری جریان در V3-4 کمتر از جریان نگهدارنده باشد، V3-4 به صورت اتوماتیکی بسته می شود و دراین زمان اختلاف پتانسیلی در خازن C با قطب مثبت در سمت چپ و قطب منفی در سمت راست بوجود می یابد که به واسطه آن یک ولتاژ برگشت آنی در دو انتهای R0 ظاهر شده که باعث بسته شدن V1-2 می شود و جریان اصلی I به R0 منتقل می شود.

شارژ شدن مبدل خازنی C به مقدار معین، مانند یک کلید برای عملکرد طبیعی چاپر می باشد.

جهت اطمینان از قسمت عملکرد مبدل، چاپر به یک مسیر شارژ کمکی مجهز شده است. بنابراین مبدل خازنی C دو مسیر برای شارژ شدن دارد.

۷-۸- کابین سوییچهای انتقالی[1]

تجهیزات مهم و اصلی این باکس شامل دو دستگاه "CAM CONECTOR" می باشد که مهمترین عملیات قطار را بر عهده دارد.

کنتاکتور اول با مشخصه "QT" وظیفه تغییر وضعیت سیستم الکتریکی قطار را از حالت رانش[2] به حالت ترمزی[3] و بالعکس دارا می باشد.

کنتاکتور "QT" با چرخش ۵۰ درجه، تغییر وضعیت می دهد. تغییر وضعیت کنتاکتور فوق توسط یک دستگاه سیلندر هوایی دوجهته صورت می پذیرد.

جک هوایی فوق نیز توسط دو دستگاه شیر هوایی مغناطیسی[4] یا سلنوئید فعال می گردد. سلنوئید هر وضعیت توسط ولتاژ 110 V DC فعال شده و هوای فشرده 5 bar را به سمت جک مزبور هدایت می نماید. ولتاژ مورد نیاز هر سلنوئید توسط دستگیره مربوطه و اپراتور تامین می گردد.

کنتاکتوردوم با مشخصه "QR"، وظیفه تغییر جهت حرکت قطار به سمت جلو و عقب را بر عهده دارد. این کنتاکتور تغییر جهت[5] نیز مانند کنتاکتور "QT" به ترتیب توسط جک هوایی، سلنوئید مربوطه، ولتاژ 110 V DC و مارش تعیین جهت حرکت در کابین اپراتور قابل کنترل می باشد.

کنتاکتورهای "QR,QT" قابلیت انتقال برق با ولتاژ 750 V و جریان 500 A را دارا می باشند. هنگام تغییر وضعیت این کنتاکتورها باید مدار اصلی قطع باشد، که این عمل به طور خودکار صورت می گیرد و پس از تغییر وضعیت کنتاکتورها مدار اصلی وصل می گردد.

دیگر قطعات داخل این باکس شامل قطعات کنترلی مانند کنتاکتور سه فاز 220 V AC، سنسور جریان، سنسور قاومت تحیک اولیه "$RO=0.25_{ohm}$ 300_{W}"، دیود و... می باشد.

۷-۸-۱- مارش تعیین جهت حرکت قطار

اپراتور با قرار دادن مارش در هر یک از حالات FW یا BW می تواند قطار را به سمت جلو یا عقب هدایت کند. با قرار گرفتن مارش در هر یک از حالات فوق دو عدد سلونوئیدولو «شیر برقی هوایی » و جک هوایی در کابین سوئیچهای انتقالی در زیر قطار فعال شده و بر روی کنتاکتور "QR" که وظیفه تغییر جهت حرکت قطار به سمت جلو یا عقب را بر عهده دارد اثر گذاشته و قطار با دادن ناچ تراکشنی توسط اپراتور شروع به حرکت در جهت انتخابی می کند. مارش تعیین جهت در اصل فرمان این کار را با ولتاژ 110 V DC صادر می کند.

---

[1] Transfer switch box
[2] Traction
[3] Braking
[4] Electro pneumatic valve
[5] Change-over switch

۷-۸-۲- ترتیب توالی استفاده از دسته تغییر جهت حرکت FW/BW

زمایکه اپراتور از دسته تغییر جهت حرکت "FW/BW" برای تغییر جهت حرکت قطار استفاده می کند. برای حصول اطمینان باید ترتیب استفاده از دستگیره را رعایت نماید.یعنی دستگیره تغییر جهت حرکت در قطار در حال توقف بایستی به مدت بیش از دو ثانیه در وضعیت صفر باشد و سپس بنا به تصمیم اپراتور در وضعیت FW یا BW قرار گیرد. با انجام چنین عملی الکتریسته ساکن مربوط به تغذیه کامپیوتری که در محفظه چاپر[1] قرار دارد به طور کامل تخلیه خواهد شد. این امر از احتمال خاموشی[2] کامپیوتر جلوگیری کرده و زمان کافی برای فن خنک کننده موتور سه فاز موجود در محفظه چاپر را فراهم می آورد تا جهت چرخش تغییر کرده و فن موتور آسیب نبیند یا برق AC قطع نگردد.

برای اینکه کامپیوتر موجود در محفظه چاپر بعد از هر بار استفاده از دسته تغییر جهت حرکت "FW/BW" به طور عادی عمل نماید، اپراتور قطار بایستی به مدت دو ثانیه دستگیره "FW/BW" را روی یکی از وضعیتهای "FW.O.BW" نگه داشته و شاسی RESET را در جهت عقربه های ساعت و خلاف جهت عقربه های ساعت بهمدت دو ثانیه بچرخاند. دو ثانیه بعد نیز وضعیت دستگیره را عوض کند، یعنی نهایتا بعد از شش ثانیه بایستی وضعیت دستگیره "FW/BW" را تغییر دهد. فقط بعد از اجرای مراحل فوق الذکر می توان دسته تراکشن قطار را برای هدایت به کار برد.

نکته : درحین حرکت و زمانیکه سیستم ATP فعال می باشد، اگر مارش تعیین جهت در وضعیت صفر قرار گیرد، ترمز سرویس قطار فعال می گردد، همچنین اگر مارش تعیین جهت در کابین "R" در حالت "FW" قرارداده شود، کلیه بارها دارای خطای اضافه بار شده و قطار به حالت ترمز اضطراری در می آید.

۷-۹- دستگیره اعمال نیروی کشش « ناچ تراکشن »

این دستگیره دارای سه گام نیروی کششی بوده که اپراتور بر حسب نیاز و شرایط فیزیکی مسیر از آنها استفاده می کند. حداقل و حداکثر سرعت در ناچ ۱، ۱۰ تا ۱٦ کیلومتر در ساعت، در ناچ ۲، ۳٦ تا ٤٦ کیلومتر در ساعت،و در ناچ ۳، ٦۰ تا ۸۰ کیلومتر در ساعت می باشد.

حداکثر زمان استفاده از ناچ ۱ تراکشن نباید بیش از ده ثانیه به طول انجامد، زیرا به مقاومتهای R0,R2,R3 که در ناچ یک همیشه در مدار هستند فشار مضاعف وارد شده که باعث صدمه دیدنشان می شود. با استفاده اپراتور از ناچهای مختلف تراکشن، اعمال فوق الذکر در کلیدهای KP و باکسهای سیرکت بریکرها صورت می گیرد تا قطار بتواند به سهولت حرکت کند.

---

[1] Chopper box
[2] shut down

ناچ ۱

حالت تراکشن یک، برای حالت شنتینگ به کار می رود. در این حالت رو به جلو موارد زیر برقرار است:

۱. KP2, KP1, QF1, QR, QT بسته و چاپرخاموش است.

۲. میدان ضعیف کننده کنتاکتور KM2 بسته است.

۳. پس از 0.5 S، KP4 بسته و R1 اتصال کوتاه می شود.

٤. R3, R2, R0 در ناچ یک همیشه درمدار هستند.

جریان به صورت زیر جریان می یابد :

Power supply (+) → SG → QS → KP1 → KP2 → QF1 → QR1 → MG1, MG2 → QR2 → SC1→ Motor field winding (MG1 , MG2) →VD →QT2

→LS1→RS1→KM2

→ Motor field winding (MG3, MG4)→ SC2 → SC4 → SC5 → QR3 →

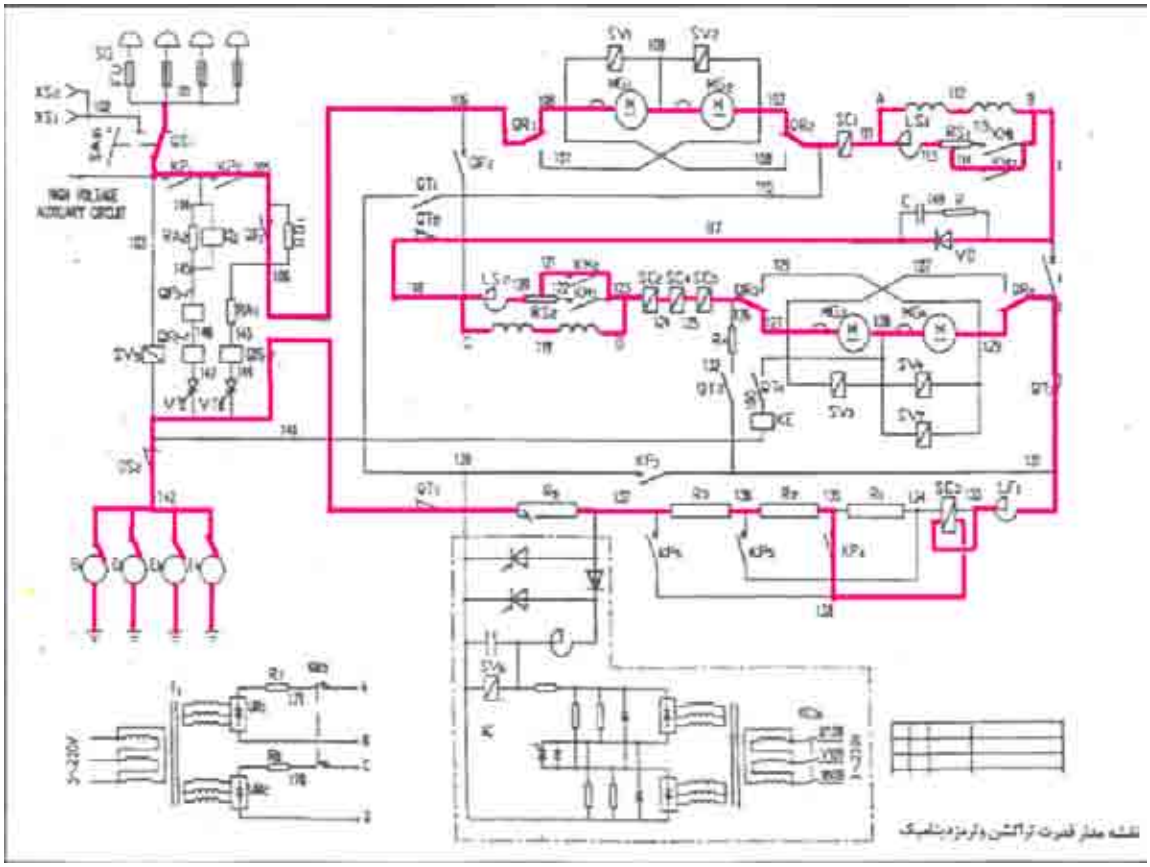
→ LS2 → RS2 →KM2

MG3,MG4 → QR4 → QT3 → LF1 → SC3 → KP4 → R2,R3,R0 → QT1 → QS2 → E1-4 → Power supply (-).

و قطار شروع به حرکت می کند.

مقاومت به کار رفته برای شروع حرکت ۳/۰۸Ω می باشد. همانطور که گفته شد مقاومت R1 که برای مدت کوتاهی به کار برده می شود، پس از ۰/۵S به وسیله بسته شدن کنتاکتور KP4 اتصال کوتاه می شود و برای حالت بار کامل در مجموعه دو موتور سری با میدان ضعیف شده ٤٥٪ استفاده می گردد. در این زمان چاپر کار نمی کند و R=2.4 Ω.

مسیر جریان عبوری از مدار در نقشه شکل ۷-٦ نمایش داده شده است.



شکل ۷-٦- مسیر جریان عبوری از مدار در ناچ یک

در حالت یک ایده آل این است که مدار با میدان کامل کار کند تا حداکثر گشتاور را داشته باشیم ولی جهت جلوگیری از پرش قطار و کاهش jerk در ابتدای حرکت قطار از میدان کامل نمی توان استفاده نمود. و طبق آزمایشات انجام شده میزان میدان مناسب جهت شروع حرکت قطار، ٤٥٪ میدان کامل می باشد.

ناچ ۲ :

حالت بسته تمام وسایل همانند حالت قبل است ولی کنتاکت KM2 باز است. مدار اصلی بر پایه حالت یک بنا شده است.

موتور در زیر حالت میدان کامل می باشد و سه مقاومت جهت افزایش سرعت قطار توسط چاپر تنظیم می شوند. در این مقطع اگر چاپر نباشد جریان زیاد به تراکشنها می رسد و به قطار شوک وارد می شود، پس از این مرحله مقاومتها از مدار خارج و R0 به مقدار می نیمم خود می رسد.

پس از جعبه میکروکامپیوتر، یک وسیله کنترل چاپر دستور کار را دریافت می کند و چاپر شروع به کار می کند و α تنظیم می شود که تنظیم این فرایند تحت شرایط جریان ثابت مدار اصلی و ادامه افزایش سرعت قطار می باشد. هنگامیکه α از α_{min} به α_{Max} تغییر یافت و به عبارتی R0 از میزان ماکزیمم به تقریبا صفر

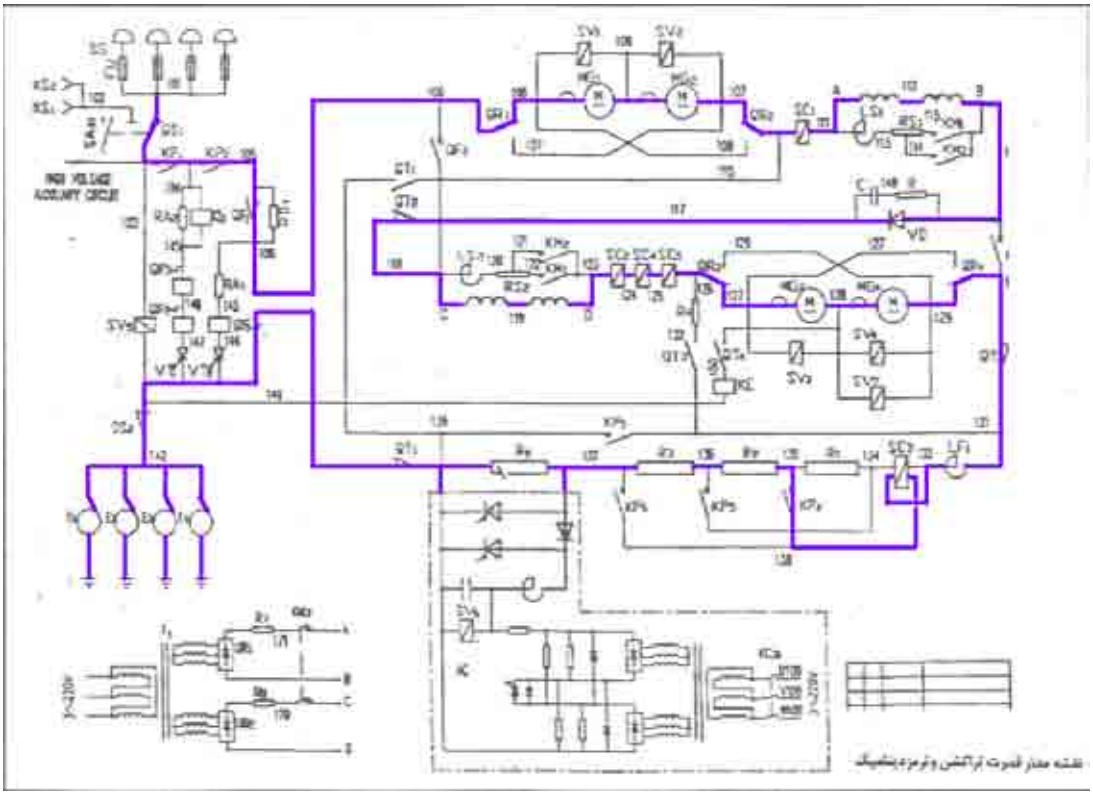
تنظیم شد جعبه میکرو کامپیوتر یک سیگنال توسعه مرحله ای می فرستد و کنتاکت اصلی KP5 در میانگین زمانی جهت اتصال کوتاه مقاومت ثابت R2 بسته می شود و به محض اینکه جعبه میکروکامپیوتر، سیگنال تغییر ناگهانی جریان را دریافت کرد، سنسور جریان آن را آشکار می کند که این سبب برگشت α_{Max} به α_{min} می شود. در این لحظه در مدار اصلی جریان مدار تقریبا نوسان ندارد چرا که مقاومتهای مدار اساسا تغییر نکرده اند.

پس از بخش اول تنظیم مقاومت، بخش دوم شروع به تنظیم می شود. مقدار α به طور مداوم تحت شرایط جریان ثابت با افزایش بی وقفه سرعت قطار تنظیم می شود.

تنظیم از حداقل مقدار به ماکزیمم مقدار α_{Max} تغییر می یابد. در این حالت KP6 بسته شده و R3 از مدار حذف شده و α دوباره به مقدار مینیمم خود برمی گردد و R0 به جای R3 جایگزین می شود. سپس α دوباره تنظیم می شود. بنابراین در آخر، تمامی مقاومتها اتصال کوتاه می شوند.

شکل ۷-۷ مسیر جریان در ناچ ۲ را نشان می دهد.

در ناچ دو، هر چهار موتور در مدار در حالت سری تنظیم شده اند.



شکل ۷-۷ مسیر جریان در ناچ ۲

ناچ ۳

در حالت ناچ سه، موارد زیر اتفاق می افتد :

۱. KM1,KM2 باز می شوند پس میدان 100% می گردد.
۲. موتورهای بوژی یک با موتورهای بوژی دو موازی می شوند. در واقع QF2,QF3 بسته می شوند
۳. چاپر همچنان فعال است.
٤. طبق رفتار چاپر KM1 بسته می شود.
۵. KM2 نیز بسته می شود میدان 45% می شود. در این زمان چاپر بای پس می شود و KP3 نیز بسته می شود.

هنگامیکه QF2و QF3 بسته می شود، در زمان کوتاهی، دیود یک پروسه هرز گرد زود گذر دارد. سپس دیود بسته می شود و اتصال چهار موتور از حالت سری به دو مجموعه موتور سری و دو موتور موازی تبدیل می شود.

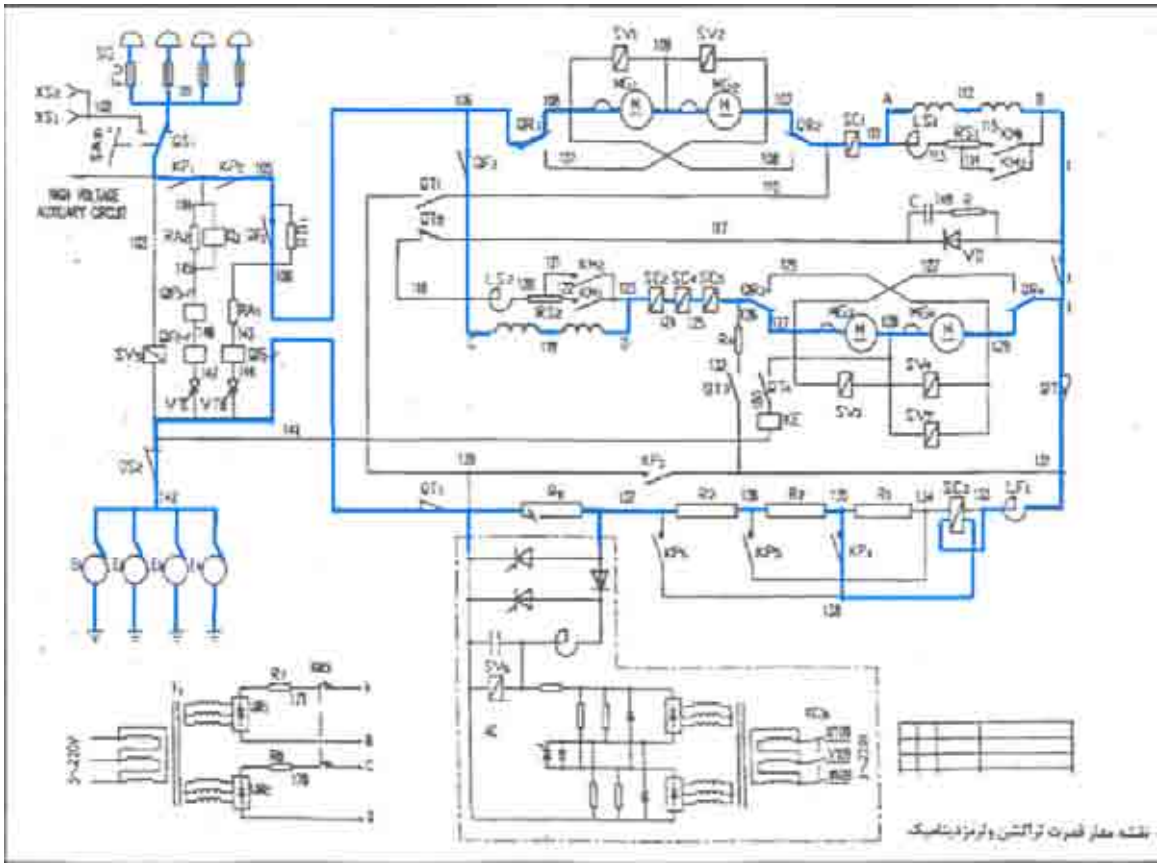
مسیر جریان به شکل زیر تغییر می یابد.

Power supply (+) → SG → QS → KP1 → KP2 → QF1 →
→QR1→MG1,MG2→QR2→SC1→Motor field winding(MG1, MG2)→QF3→
→QF2→Motor field winding(MG3,MG4)→SC2→SC4→SC5→QR3→MG3,MG4→QR4→
QT3 → LF1 → SC3 → KP4 → R2 → R3 → R0 → QT1 → QS2 → E1-4
→ AC→
→ Power supply (-).

در این زمان چاپر عملیات را جهت تنظیم R0 برای کنترل جریان ثابت دریافت می کند. روش کار همانند آنچه که در ناچ دو توضیح داده شد می باشد. پس از اینکه تنظیم R0پایان یافت، برای آخرین بار جعبه میکروکامپیوتر یک سیگنال برای کاهش میدان موتور در دو مرحله β_1=63% و β_2=45% ارسال می کند و قطار با میدان رو به کاهش کار می کند. سپس جعبه میکروکامپیوتر یک سیگنال مدار کوتاه جهت انرژی دار کردن کنتاکت KP3 ارسال می کند. کنتاکت های اصلی اتصال کوتاه شده و چاپر و smooth reactor سبب می شوند که دستگاه با ولتاژ کامل کار کنند.

در این حالت قطار با حداکثر سرعت می تواند کار کند.

شکل ۷-۸ مسیر جریان در ناچ ۳ را بر روی نقشه نمایش می دهد



نکته : هنگامی که KM1 بسته و KM2 باز باشد، میدان 63% است، حال اگر KM1 بسته و KM2 بسته باشد میدان 45% و اگر KM2 نیز باز باشد میدان 100% می شود. هرچه میدان کاهش پیدا کند سرعت افزایش می یابد.

شکل ۷-۸ مسیر جریان در ناچ ۳

۷-۱۰- حالت ترمزی

این دستگاه جهت تحقق بخشیدن به ترکیبی از ترمزگیری الکتریکی و پنوماتیک، یک ترمز قیاسگر ۱۵ مرحله ای را به کار می گیرد.

مدار قدرت، ترمز الکتریکی را به وسیله مصرف انرژی و جریان ثابت متفاوتی در ۱۵ مرحله ترمز تامین می کند.

قطار عملیات ترمزگیری را با بسته کردن QF2و QF3 جهت تشکیل مدار ترمز به صورت موازی متناوب انجام می دهد. موتور به عنوان ژنراتور با میدان کامل عمل می کند. جهت اطمینان از تحریک سریع و افزایش ولتاژ، سیستم یک پیش محرک را به کار می اندازد.

مسیر جریان به صورت زیر می شود.

۱. برای زیرمجموعه MG1, MG2 :

MG1, MG2 (+) → QR1→ QF2→ Motor field winding (MG3, MG4) → SC2 → SC4 → SC5 → R4→ QT3 → LF1 → SC3→R1 → R2 → R3 → R0 → QT1 → QR2→MG1,MG2(-).

→ AC →

۲. برای زیرمجموعه MG3, MG4 :

MG3, MG4 (+) → QR3 → R4→ QT3 → LF1 → SC3→R1 → R2 → R3 → R0 → QT1 → SC1→ Motor field winding (MG1, MG2) → QF3 → →AC → QR4→MG3, MG4 (-).

روش تنظیم مقاومت در فرایند ترمزگیری همانند حالت کشش می باشد.

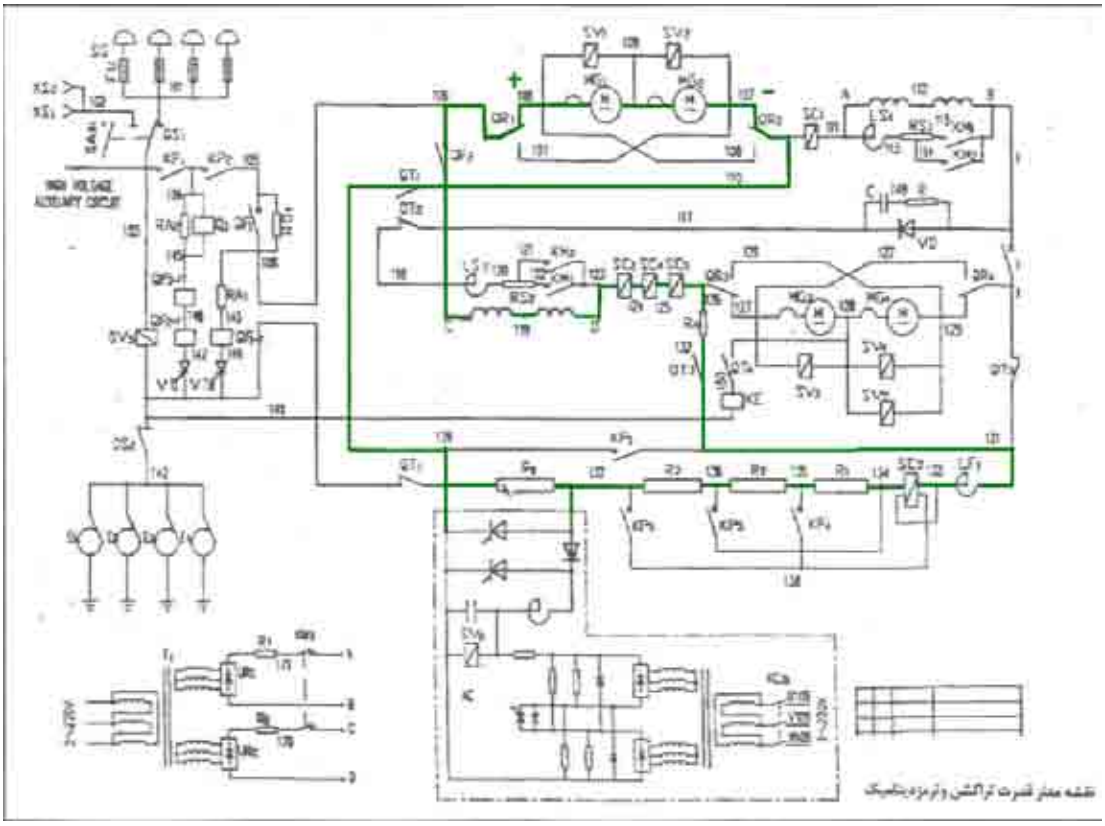
رئوستا به چهار بخش تنظیم شده است. هنگامی که R1-R3 اتصال کوتاه می شود و R0 به مینیمم مقدار خود بر می گردد، چاپر اتصال کوتاه نخواهد شد.

در فرایند ترمزگیری بر طبق شرایط خط، مقاومت می تواند به صورت معکوس پذیر کنترل گردد و د رنهایت مقاومت R4 در مدار ترمز جهت جلوگیری از اتصال کوتاه موتور باز می گردد.

هنگامی که سرعت ترمزگیری اولیه بالاتر است، سیستم در حالت تنظیم ولتاژ ثابت جهت جلوگیری از بالا رفتن بیش از حد ولتاژ در مدار قرار می گیرد. با کاهش یافتن سرعت ترمزگیری با یک جریان ترمزی مشخص سیستم به طور اتوماتیک به تنظیم جریان ثابت منتقل می شود.

همانطور که در مسیر جریان حالت ترمزی دیده می شود، جریان از یک موتور شروع شده و از سیم پیچ تحریک موتور دیگر، که در حالت ژنراتوری حکم سیم پیچ تحریک این مجموعه موتور را دارد می گذرد.

مسیر عبور جریان در حالت ترمزی در نقشه شکل ۷-۹ نمایش داده شده است.



شکل ۷-۹- مسیر عبور جریان در حالت ترمزی

فصل ۸- معرفی مدار قدرت لکوموتیو مترو تهران-کرج

در این فصل لکوموتیو های مورد استفاده در خطوط تهران کرج معرفی و مشخصات اجزای این لکوموتیو ارائه می شود

۸-۱-پانتوگراف

لکوموتیو به دو پانتوگراف TSG3 630/25 مجهز است که به وسیله سیلندرهایی حرکت میکنند که نیروی خود را از هوای فشرده شده می گیرند اطلاعات اصلی مربوط به پانتوگراف به صورت زیر است

ولتاژ نامی	25KV+20%/-30%
جریان نامی	630 A
نیروی حالت استاتیک	70+/-10 N
ارتفاع بالا آمدن	1800 mm
زمان بالا آمدن	6-8 s
زمان پایین رفتن	5-8 s

۸-۲- مدار شکن هوایی

این مدار شکن که توسط نیروی فشار هوا کار می کند مدار سمت فشار قوی ترانسفورماتور اصلی را جهت محافظت مدار در برابر جریان زیاد اتصال به زمین و غیره قطع ووصل می کند

نوع	TDZ1A-250/25 A
جریان نامی	400 A
ولتاژ نامی	25 KV
ماکزیمم ولتاژ	30 KV

۸-۳- برق گیر

این وسیله جهت جذب ولتاژ ضربه ای رعد و برق نصب شده است

نوع	Y10W(ID)-42/105
ولتاژ نامی	42 KV
جریان استاندارد	10 KA

ماکزیمم ولتاژ دائم 30 KA

۸-٤- معکوس کننده

از دو بازوی اصلی چرخنده تشکیل شده که در دو جا عمل می کند یکی تبدیل مدار ترکشن به مدار ترمز و دیگری معکوس کردن جهت حرکت. این وسیله در مدار وظیفه عکس کردن جریان را بر عهده دارد.

نوع TKH4

ولتاژ نامی 1000 V

جریان نامی 970 A

ولتاژ کنترل 110 V

۸-٥- یکسوساز

از دیودها و تریستورهای مختلفی تشکیل شده که با روش کنترل زاویه آتش یک جریان صاف و تنظیم شده را به وجود می آورد و در هر بوژی یک لکوموتیو یک واحد از آن موجود است

نوع خنک کاری هوای فشرده با سرعت ٦ متر بر ثانیه

جریان شروع 2840 A

ولتاژ نامی 1000 V

۸-٦-ترانسفورماتور اصلی

به همراه سلف صافی جریان درون یک تانک روغن قرار دارند که روغن آن در یک مدار توسط دمنده خنک می شود

نوع ترانسفور ماتور اصلی TBQ9-5816/25

جریان هوا 300 M^3/H

جریان روغن 80 M^3/H

فرکانس 50Hz

ولتاژ نامی 25 KV

جریان نامی 254 A

	سیم پیچ ترکشن	سیم پیچ تحریک	سیم پیچ کمکی I	سیم پیچ کمکی II
ولتاژ نامی (V)	٢*(٣٤٣.٤*٢+٦٨٦.٨)	٩١.٦	٣٨٩	٢٢٩
جریان نامی(A)	١٩٤٠	٩٧٠	٥٦٥	١٠٠

۸-۷-مقاومت های ترمزی

این مقاومت ها جهت مصرف توان تولید شده هنگام ترمز دینامیک مورد استفاده قرار می گیرند. هـوایی که جهت خنک کردن آنها مورد استفاده قرار می گیرد توسط یک دمنده از زیر واگن کشیده می شود

نوع	TZZ6
تعداد	٤ ست
ماده سازنده	N40
جریان هوا	2*7.5 M^3/s
مقاومت	4*0.72+/-5%
جریان	880 A

۸-۸-ترکشن موتور

ترکشن موتور های مورد استفاده به صورت مخصوص برای لکوموتیوهای برقی قطار مسـافری طراحـی شده اند و دارای ساختار جدید و بهره وری و قابلیت اطمینان بالا هستند

توان نامی	800 KW
ولتاژ نامی	950 V
جریان نامی	910 A
سرعت چرخشی نامی	990 rpm
نوع تحریک	سری
خنک کاری	مکش هوا

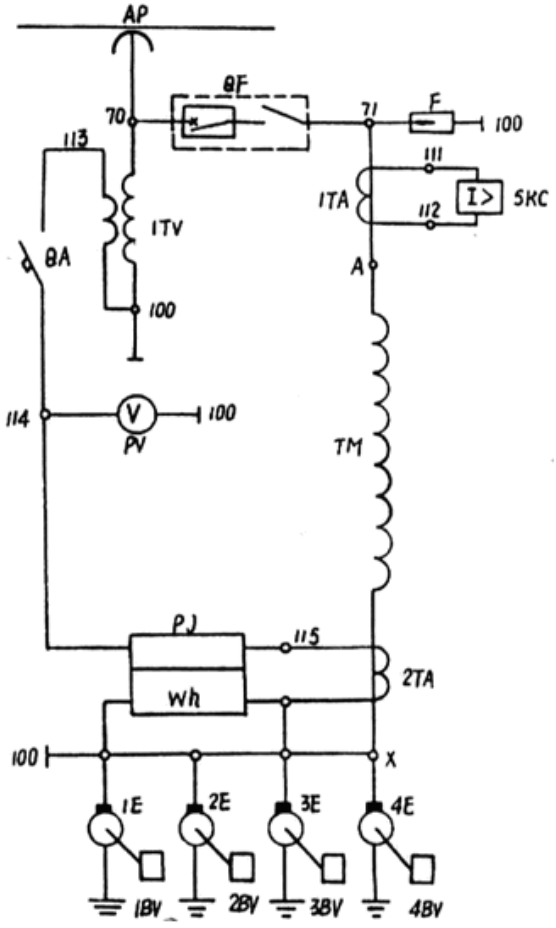
۸-۹-اینورتر برای مصرف قطار

یک اینورتر ثابت نیز جهت تأمین برق قطار تعبیه شده که مصارف کمکی نظیر بوق برف پاک کن دمنـده ها و ... را تأمین می کند

توان نامی	300 KW
ولتاژ ورودی	یک فاز ۵۰ هرتز
ولتاژ خروجی	۳ فاز ۳۸۰ ولت
فرکانس خروجی	۵۰ هرتزبا یک در صد خطا
نوع کنترل	میکروپروسسوری

۸-۱۰-مدار اصلی

در مدار اصلی که در شکل۸-۱ نشان داده شده سمت اول ترانسفورماتور اصلی دیده می شود که توسط یک مدار شکن BF در برابر جریان زیاد محافظت میشود برقگیر F نیز در شکل دیده می شود یک رله (5KC) با اندازه گیری جریان به مدار شکن دستور قطع مدار را می دهد مدار توسط جاروبک هایی که روی محور های E نصب شده اند کامل می شود یک آمپرمتر یک ولتمتر و همچنین یک واتمتر نیز در مدار قرار دارد. مدار شکن BA نیز جهت محافظت از اندازه گیر ها در مدار نصب شده این مدار توسط یک ترانسفور ماتور که در شکل نشان داده شده با ولتاژ ۱۰۰ ولت تغذیه می شود پانتوگراف AP با اتصال به مدار بالای سری ترانسفورماتور را تغذیه میکند

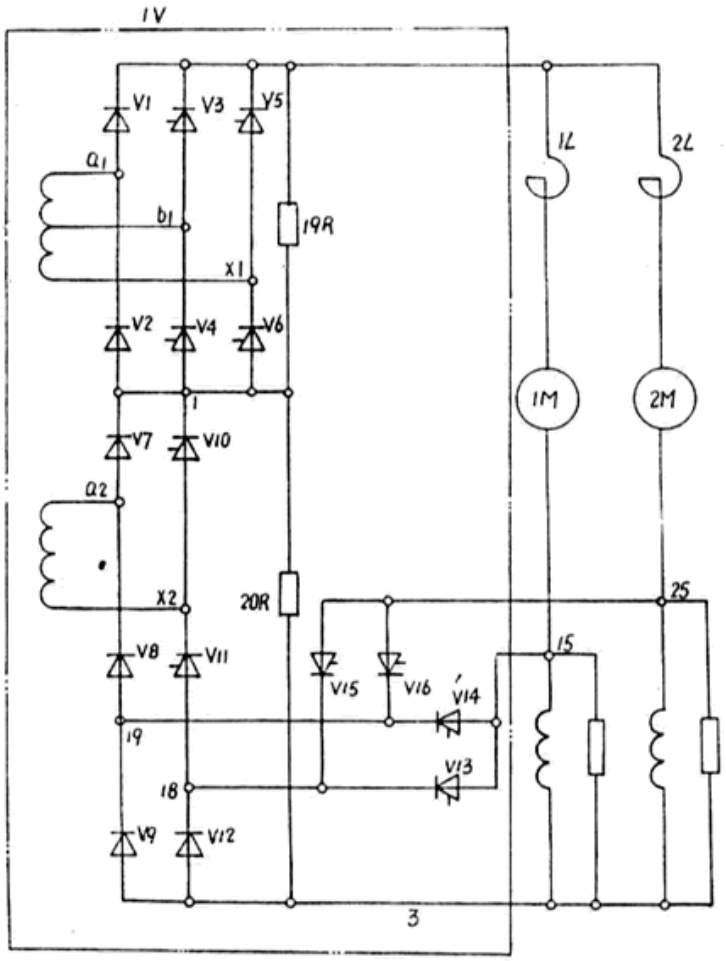


شکل۸-۱- در مدار اصلی در سمت فشار قوی

۸-۱۱- مدار یکسو کننده و تنظیم ولتاژ

همانطور که گفته شد دو واحد یکسوساز جهت یکسوسازی و تنظیم ولتاژ به صورت جداگانه روی هر بوژی نصب شده این یکسوساز از نوع نیمه کنترل شده یا نیمه تریستوری است و تنظیم ولتاژ در آن به

وسیله تنظیم زاویه آتش انجام می شود. ولتاژ در ترانسفورماتور به در سیم پیچ ترکشن بـه انـدازه ۶۸۷ ولـت کاهش می یابد. شکل ۸-۲ مدار یکسوساز و رگولاتور ولتاژ را نشان می دهد.



شکل ۸-۲ مدار یکسوساز و رگولاتور ولتاژ

رابطه ولتاژ یکسو ساز U_d و زاویه آتش به صورت معادله ۸-۱ است

$$U_d = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + Cos\alpha) \qquad ۱-۸$$

با توجه به فرمول۸-۱ ولتاژ توسط زاویه آتش کنترل می شود.

تریستورهای V10وV11 ابتدا مدار ترکشن را باز میکند برای مثال در یک لحظه خاص با دستور تریستور V11 که جریان مثبت است جریان مسیر زیر را طی میکند a2 به V7 به V2 به V1 و توسط سیم رابط ۱ به صاف کننده جریان سپس به آرمیچر ترکشن موتور و سپس سیم پیچ تحریک سیم رابط ۳ از آنجا به V12به V11بهx2 و سیم پیچ تراکشن یعنی a2-x2 به a2 برمیگردد.

همچنین در نیمه منفی با دستور تریستور V10 مسیر زیر توسط جریان طی می شود.

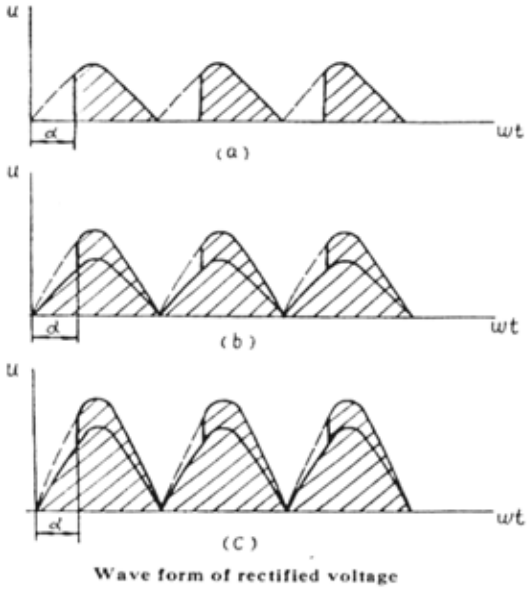
از x2 به V10 به V2 به V1 و توسط سیم رابط ۱ به صاف کننده جریان سپس به آرمیچر ترکشن موتور و سپس سیم پیچ تحریک سیم رابط ۳ از آنجا به V9به V8بهa2 و سیم پیچ تراکشن یعنی a2-x2 به

a2 برمیگردد.همچنین دیود هایب V9, V2, V1 برای جریان هرزگرد است هنگامی که زاویه آتش از ۱۸۰ درجه به صفر تغییر می کند ولتاژ از صفر تا نصف U_d کاهش می یابد

۸-۱۲- مدار تراکشن

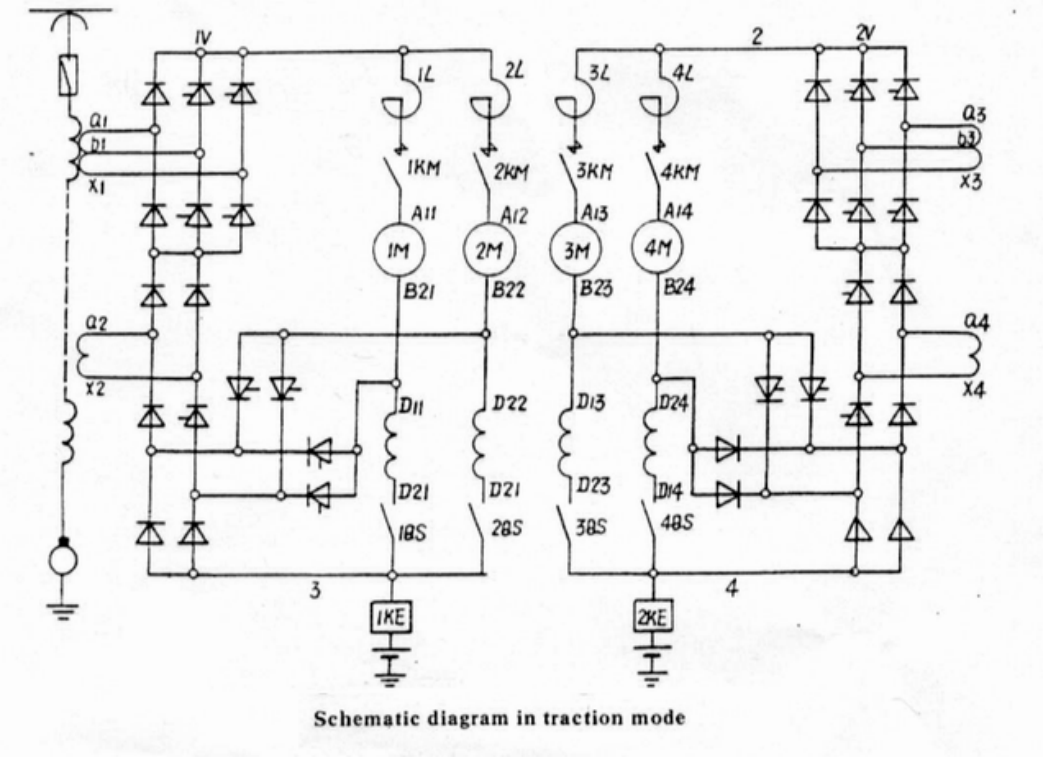
مدار تراکشن که در شکل ۸-٤ نشان داده شده از دو بلاک مستقل و شبیه هم تشکیل شده است هر موتور دارای یک شاخه جداست موتور ها روی هر بوژی با هم موازی هستند

در شکل ۸-۵ یک شاخه ترکشن به صورت جداگانه در شکل زیر نشان داده شده است که برای هر چهار تراکشن موتور یکسان است

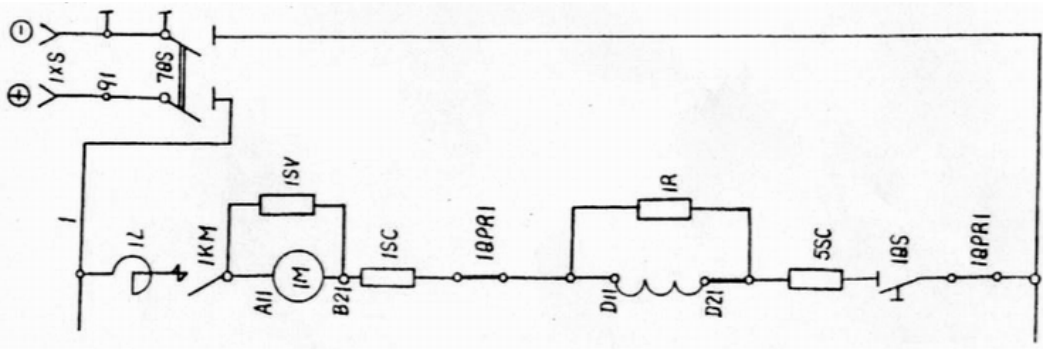


Wave form of rectified voltage

شکل ۸-۳- شکل موج ولتاژ یکسو شده



شکل ۸-٤مدار تراکشن



شکل ۸-۵ یک شاخه ترکشن به صورت جداگانه

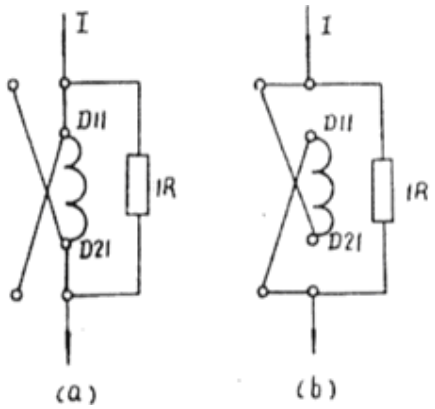
موتور دارای تحریک سری است یک صافی جریان که از یک سلف تشکیل شده که در برابر تغییرات جریان مقاومت می کند به علت نحوه نصب تراکشن موتورها که هنگام چرخش از یک زاویه دید در جهت عکس هم کار میکند گشتاور حاصل از تراکشن موتور ها روی بوژی خنثی می شود.

همانطور که گفته شد در هر شاخه یک صافی جریان وجود دارد این صافی کمک می کند که جریان تنظیم شده به وسیله زاویه آتش که دارای هارمونی زیادی است صاف شود کلید KM که وظیفه قطع جریان مدار را دارد دارای سه کارکرد مختلف است اول اینکه قبل از تغییر جهت قطار مدار تراکشن را قطع می کند در این حالت باید دقت شود که قطار ابتدا باید متوقف شود سپس مدار قطع شده و در نهایت جهت حرکت

توسط سوییچ تغییر جهت جریان تحریک عوض می شود همچنین در صورت ازدیاد جریان مدار آن را قطع می کند تا به سیم پیچ ترانسفورماتور آسیب نرساند.

سومین کارکرد این کلید در هنگامی است که قطار در حال کشیده شدن است در این حالت مدار تغذیه قطع است ولی از آنجا که دو تراکشن موتور روی یک بوژی به هم موازی هستند در هنگام کشیده شدن اگر این ارتباط قطع نشود به علت تفاوت در خصوصیات پسماند مغناطیسی وقتی کشیده می شوند و در حالت ژنراتری قرار می گیرند دارای توان متفاوتی هستند به این ترتیب یکی به مصرف کننده و دیگری و ژنراتور تبدیل می شود و با بالا رفتن جریان به سیم پیچ های آرمیچر آسیب می رسد در مدار دو اندازه گیر جریان 1SCو2SC به ترتیب جریان های آرمیچر و تحریک را اندازه می گیرد همچنین یک اندازه گیر ولتاژ SV ولتاژ آرمیچر را اندازه می گیرد.

همانطور که گفته شد جهت حرکت موتور به وسیله تغییر جهت جریان تحریک تغییر میکندشکل شماتیک این تغییر جهت در شکل ۸-٦ نشان داده شده است

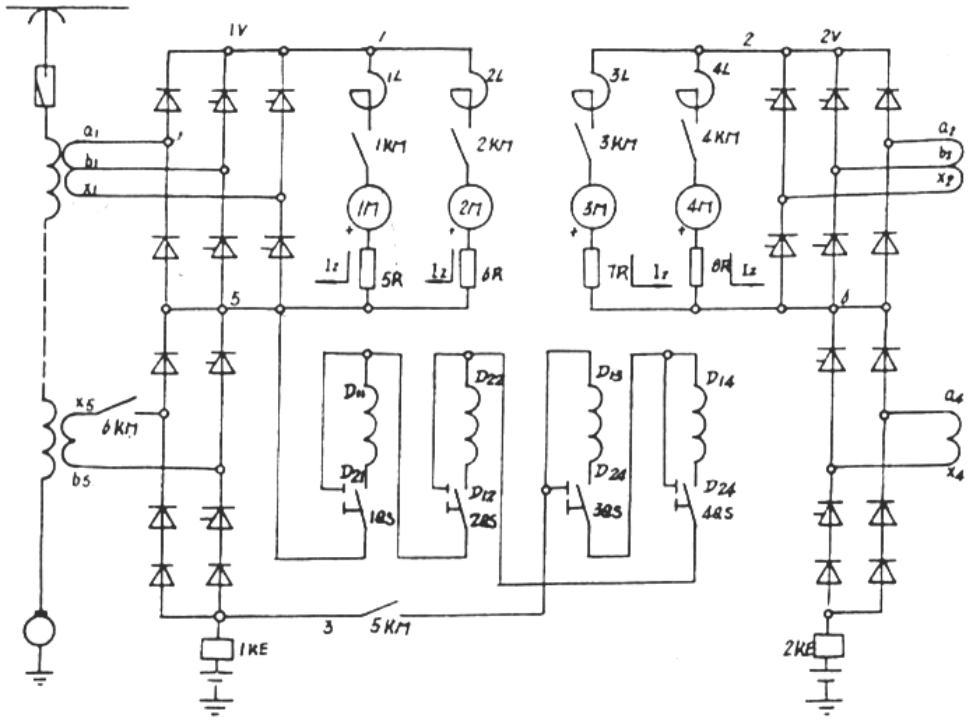


شکل ۸-٦- شکل شماتیک مدارتغییر جهت حرکت

۸-۱۳-مدار ترمز

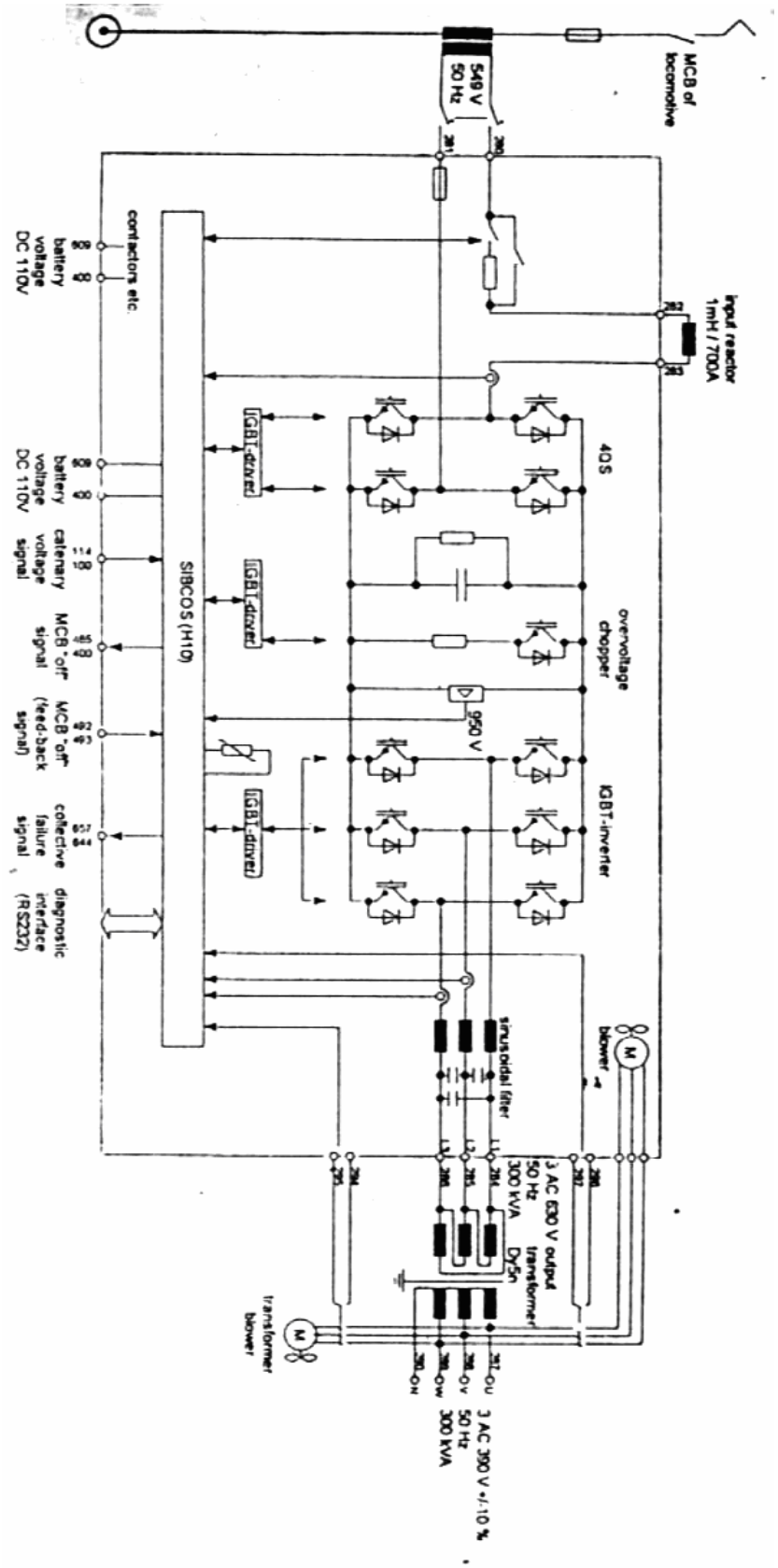
در هنگام ترمز دینامیک که تمام تراکشن موتورها به ژنراتور تبدیل میشوند با چند سوییچ و معکوس کننده به صورت شکل ۸-۷ تغییر میکند ابتدا تمام مدار تحریک ها با هم سری می شوند توسط یک معکوس کننده جهت جریان آرمیچر تغییر می کند این امر به این علت است که ژنراتور تولید کننده شده است و جهت جریان آن توسط قسمت اول پل دیودی یعنی a1-b1-x1 حفظ میشود جریان تحریک نیز توسط قسمت اول پل دیودی تأمین می شود

همچنین یک اینورتر مطابق شکل ۸–۸ جهت ایجاد برق سه فاز ۳۸۰ ولت با فرکانس ۵۰ هرتـز اسـتفاده می شود. پس از کاهش ولتاژ در یک ترانسفورماتور جریان توسط یک یکسوساز به جریـان DC ۹۵۰ ولـت تبـدیل مـی شـود و سـپس بـه وسـیله یـک مـدار سـوییچ زنـی PWM کـه کنتـرل آن توسـط یـک مـدار میکروپروسسوری است به جریان متناوب ۵۰ هرتز سه فاز تبدیل می شود.



Simplified schematic diagram at braking mode

شکل ۸–۷– مدار در هنگام ترمز دینامیک که تمام تراکشن موتورها به ژنراتور تبدیل میشوند



شکل ۸-۸- اینورتر منبع تغذیه کمکی

فصل ۹- مگلو

اساس مگلو[1] بر تعلیق مغناطیسی (بدون هیچ تماس فیزیکی بین واگن و بستر حرکت) و حرکت به جلو با استفاده از موتورهای خطی نهاده شده است. مگلو از طریق مغناطیسهایی که در مسیر قرار داده شده است مسیر راهنما[2] را دنبال می کند. این قطارها چون بصورت مغناطیسی شناور می شوند[3] مگلو نامیده می شوند.
سیم پیچهای مغناطیسی که در طی مسیر حرکت قطار کار گذاشته شده‌اند، آهنرباهایی کـه در زیـر واگنهـای قطار قرار دارند را دفع می‌کنند که این عمل باعث می‌شود تا قطار چیزی حدود ۱ تا ۱۰ سانتیمتر (بر حسب سیستم بکار رفته) بر روی مسیر راهنما شناور باشد.
هنگامی که قطار شناور می‌شود، انرژی لازم به سیم پیچهای موجود بر دیواره مسیر راهنما انتقال می‌یابـد تـا یک میدان مغناطیسی که سبب کشیده شدن و هل دادن قطار در طی مسیر راهنما می‌شود به وجود آید.
مگلو بر روی یک بالشتک از میدان مغناطیسی شناور است که این عامل باعث حـذف اصـطکاک مـی‌گـردد. عدم وجود اصطکاک و طراحی آیرو دینامیکی بدنه قطار به این وسیله اجازه می‌دهد تا با سـرعتی بیشـتر از ۵۵۰ کیلومتر در ساعت یعنی تقریبا دو برابرسرعت تجاری سریع‌ترین قطار هـای فعلـی حرکـت کنـد. (در مقایسه بایک بوئینگ- ۷۷۷ با سرعت ۹۰۵ کیلومتر در ساعت). اگرچه این رکورد فقط کمی بـیش از رکـورد قطارهای TGV در آزمایشات است اما باید توجه داشت که علیرغم وجود این رکـورد پـس از ۱۵ سـال بـه علل مختلف این سرعت در قطارهای معمولی عملیاتی نشده است.
اولین استفاده تجاری از مگلو در انگلیس با سرعت ۱۶ کیلو متر بر ساعت در یک مسیر ۴۰۰ متری بین دو ترمینال فرودگاه بیرمنگام صورت گرفت. این سیستم به علت مشکلات نگهداری اخیرا کنار گذاشته شده است.
اولین نمونه تجاری مگلو در شانگهای چین و در مسیر مرکز شهر به فرودگاه شانگهای به طول ۳۰ کیلومتر با سرعت ماکزیمم ۴۳۱ کیلومتر بر ساعت و سرعت متوسط ۲۵۰ کیلومتر بر ساعت توسط یک شرکت آلمانی به نام ترنس رپید اینترنشنال ساخته و مورد بهره برداری قرار گرفت.

---

[1] MagLev
[2] guidance tracks or guide way
[3] Magnetically Levitated train

هنوز نمونه های آزمایشی در آلمان و ژاپن و آمریکا در حال بررسی هستند که در این میان پروژه مگلو در آمریکا کمتر مورد توجه است. ژاپن دارای دو خط تست است که به ترتیب در سالهای ۱۹۶۰ و ۱۹۹۶ احداث شده اند. اولین خط فقط برای آزمایشات تئوریک احداث شد اما خط دوم به طول ٤٢/٨ کیلو متر دارای مشخصاتی مشابه خطوط تجاری است و قطارهای MLX01 بر روی آن حرکت می کنند که دارای رکورد سرعت ۵۵۰ کیلومتر بر ساعت در سال ۱۹۹۸ هستند

۹-۱- مزایا و معایب مگلو

۹-۱-۱- مزایای مگلو نسبت به سایر سیستمهای حمل و نقل

بطور کلی مزایای مگلو نسبت به سایر روشهای حمل و نقل عبارتند از:

- با انرژی الکتریکی کار می کند
- آلودگی محیط زیستی ندارد
- راندمان خوبی دارد
- ایمن است
- هزینه سفر کمی دارد
- هزینه نگهداری کمی دارد
- تحت تاثیر شرایط جوی نیست
- طول عمر بالایی دارد

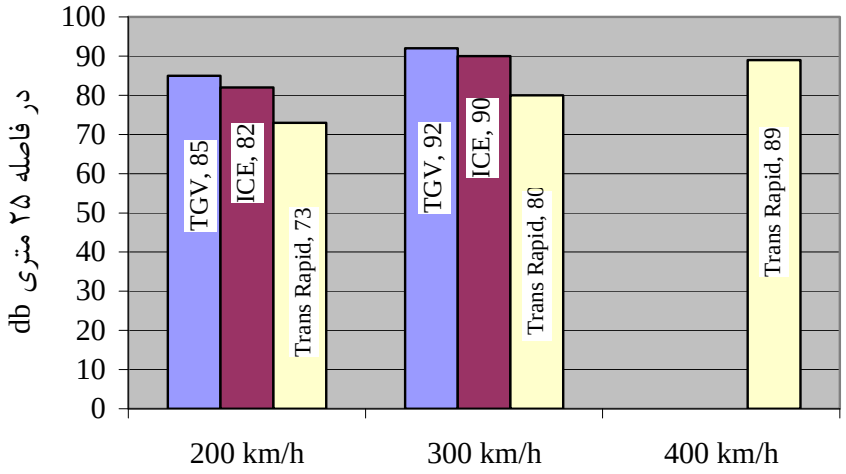
۹-۱-۲- مزایای مگلو نسبت به قطارهای معمولی

مزایای مگلو نسبت به قطارهای معمولی عبارتند از:

- **سایش کمتر**- چون چرخ وجود ندارد ارتباط مکانیکی بین چرخ و ریل هم وجود ندارد درنتیجه سایش مکانیکی وجود ندارد (حداقل در تئوری) بنابراین هزینه نگهداری بسیار کمتر است.
- **اصطکاک کمتر**- به علت استفاده از تعلیق مغناطیسی اصطکاک وجود نخواهد داشت (مقاومت هوا همچنان وجود خواهد داشت)

نویز کمتر- به علت حذف چرخ نویزهای ناشی از حرکت چرخ روی ریل حذف می شود (نویزهای ناشی از جریانهای هوا همچنان وجود خواهد داشت) . نمودار ۹-۱ نمودار مقایسه ای نویز در ترانس راپید و قطارهای سریع السیر را نشان می دهد.

- **شیب پیمائی بیشتر** – مگلو قاد ر است شیبهای بزرگتری را بالا برود.
- **شعاع قوس کمتر**- مگلو قادر است در سرعت برابر در پیچ با شعاع کمتر حرکت کند.



نمودار ۹-۱- نمودار مقایسه ای نویز در ترانس راپید و قطارهای سریع السیر

– **سرعت و شتاب بیشتر** (که از مزایای قبل ناشی شده است)- مگلو سرعتی بیش از قطارهای معمولی دارد علاوه براین دارای شتاب بیشتر (حدود چهار برابر) نیز هست. ترکیب سرعت و شتاب زیاد این قطار به آن اجازه می دهد که براحتی هم در خطوط مترو و قطارهای شهری و سایر خطوطی که ایستگاهها به هم نزدیک هستند و هم در مسیرهای بین شهری با فواصل زیاد کار کند.

– **ایمنی بیشتر** - ایمنی در مگلو بالاست چون ممکن است مانند نمونه ژاپنی قطار توسط دیواره های مسیر راهنما احاطه شده باشد یا مانند نمونه آلمانی (ترانس راپید[۱]) قطار توسط بازوهای زیرین خط را احاطه کرده باشد که در هر دو حالت خروج از خط[۲] غیر ممکن خواهد بود.

از طرف دیگر خطوط مگلو نمی توانند با سایر سیستمهای حمل و نقل (اعم از جاده و ریل) تقاطع هم سطح داشته باشند.

همچنین هر خط برای حرکت در یک جهت ساخته می شود و به علت هدایت از خارج از قطار و کنترل هماهنگ هرگونه تصادف بین قطارها غیر ممکن به نظر می رسد.

در هنگام قطع ناگهانی برق قطار به تجهیزاتی مجهز شده است که نیروی جلو برنده قطار را قطع می کند اما با انرژی ذخیره شده مدتی تعلیق را حفظ نموده و آنرا به آرامی روی زمین می گذارد.

به علت حذف نیروی کشش از درون قطار مخزن سوخت، دیزل ژنراتور، ترانسفورماتور و سایر تجهیزات کشش که خود می توانند منجر به آتش سوزی شوند از قطار خارج می شود.

---

[۱] Transrapid

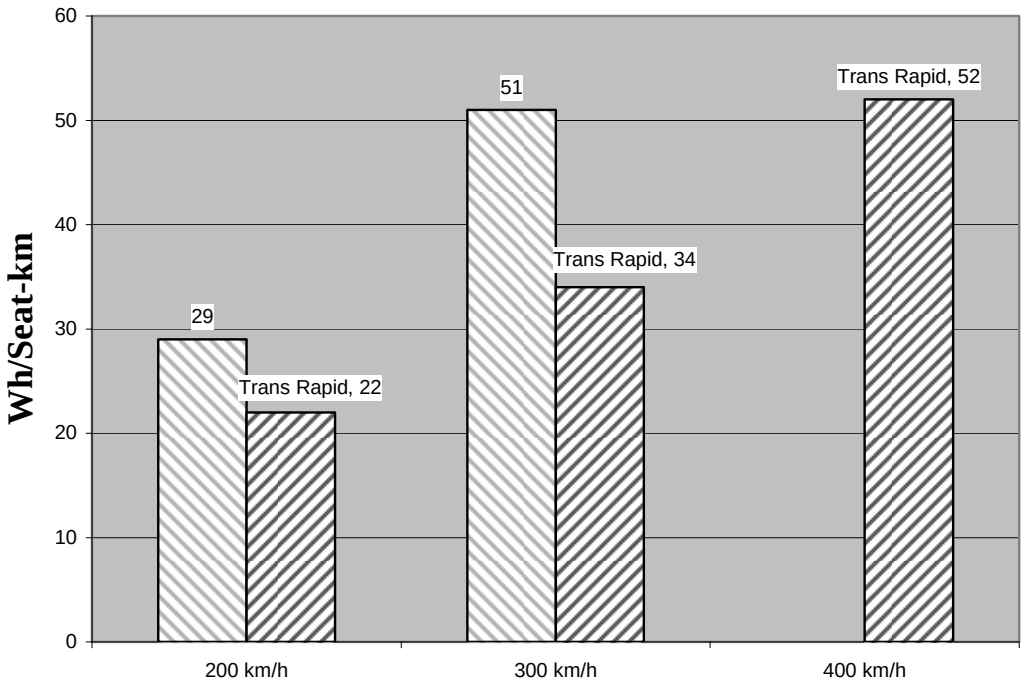
[۲] derailment

- **سازگاری بیشتر با محیط زیست** - به علت نداشتن مقاومت بین چرخ و ریل مگلو دارای راندمانی کمی بهتر از قطارهای معمولی است. همچنین به علت قابلیت شیب پیمائی بیشتر نیاز به فضای کمتری دارد.

مگلو نسبت به سایر روشهای حمل و نقل آثار مخرب کمتری روی محیط زیست دارد. مگلو در سرعت ۳۰۰ کیلومتر برساعت ۳٤ وات ساعت بر صندلی کیلومتر انرژی مصرف می کند که ۳۰ درصد کمتر از قطارهای سریع السیر ICE یک سوم خودروها و یک پنجم هواپیما است. نمودار ۹-۲ نمودار مقایسه ای مصرف انرژی در ترانس راپید و قطارهای سریع السیر را نشان می دهد.

به همین علت مگلو CO_2 کمتری نسبت به سایر روشهای حمل و نقل تولید می کند که مقدار آن تابع سیستم تولید انرژی الکتریکی است.(مثلا ۲۳ گرم بر صندلی کیلومتر در مقایسه با ۳۰ گرم بر صندلی کیلومتر برای ICE، ٦۰ گرم بر صندلی کیلومتر برای خودروها و ۱۹۰ گرم بر صندلی کیلومتر برای هواپیما).

مگلو احتیاج به زمین کمتری دارد. سیستمهائی که بر روی پلهای هوائی حرکت می کنند به ازای هر متر طول خط نیاز به ۲ متر مربع زمین دارند. این رقم در ICE ۱٤ متر مربع و در جاده بسیار بیش از این ارقام است.



۹-۱-۳- معایب مگلو نسبت به قطارهای معمولی

مگلو دارای دو عیب عمده است

- به علت نیاز به مسیر راهنما هزینه احداث مگلو بسیار بالا است
- به علت تفاوت در زیر ساختها نمی تواند در مسیرهای موجود حرکت کند یا با خطوط دیگر در تجهیزات بصورت مشترک استفاده کند.

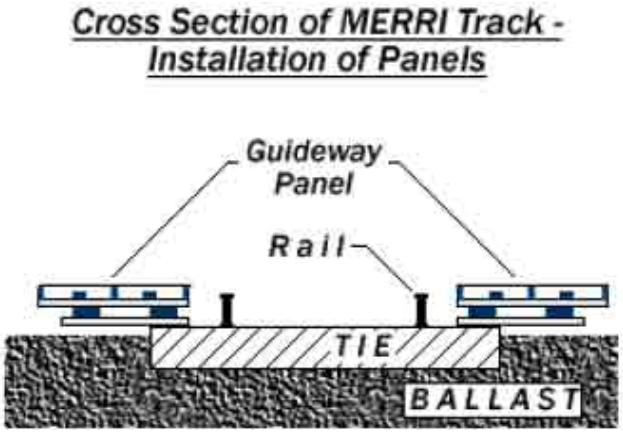
به عنوان مثال در یک مسیر سریع السیر بین دو شهر اصلی می توان در ساعات آزاد خط از آن برای قطارهای عادی بین شهرهای میانی مسیر استفاده نمود. یا یک قطار سریع السیر با کاهش سرعت خود در ادامه مسیر خود می تواند از خطوط عادی استفاده نماید. اما مگلو نمی تواند از هیچیک از امکانات خطوط موجود استفاده کند و متقابلا قطارهای موجود نمی توانند از امکانات مگلو استفاده کنند.

۹-۱-٤- سیستم MERRI[1]

یکی از مشکلات مگلو جدا بودن ساختار آن از راه آهن معمولی و عدم امکان استفاده از مسیرهای مشترک است. در امریکا خطوط زیادی وجود دارد که یا از رده خارج شده اند یا ترافیک آنها بسیار کم است. جهت تسریع در اجرای پروژه های مگلو طرحی ارائه شد که بر اساس آن می توان خطوط مگلو را روی این مسیرهای قدیمی اجرا کرد. در نتیجه مگلوهای بین شهری می توانند در مسیر قطارهای معمولی درون شهری نیز وارد شوند. این سیستم MERRI نامیده شد. در این سیستم مطابق شکل ۹-۱ صفحات مسیر راهنما در دو طرف خطوط با تراورس چوبی موجود نصب می شوند. با حرکت واگن مگلو، نیروی متقابل بین این صفحات و مغناطیسهای داخل واگن باعث ایجاد تعلیق می شوند

۹-۲- ابر رساناها

ظهور ابر رساناها نقش بسیار مهمی در توسعه مگلو دارد. استفاده از ابر رساناها باعث کاهش وزن مغناطیس و انرژی مورد نیاز مگلو و در نتیجه باعث صرفه جوئی در هزینه ها و منابع می شود.



شکل ۹-۱- سیستم MERRI

[1] Maglev Emplacement on Railroad Infrastructure

مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات برحسب درجه حرارت نشان می دهد در دماهای نزدیک صفر کلوین (فقط چند درجه بالاتر ازصفر) خواص الکتریکی فلزات بصورت ناگهانی تغییر کرده و مقاومت آنها افت می کند. این حالت تازه «حالت ابررسانایی» نام گرفت و دمایی که در آن هر گونه مقاومتی در برابر جریان الکتریکی ناپدید می گردد دمای بحرانی نامیده شد.

علاوه بر ناپدید شدن ناگهانی مقاومت ابر رساناها در دمای بحرانی، خاصیت منحصر به فرد دیگری نیز در آنها کشف شد که عبارت است از دفع هر گونه میدان مغناطیسی از قسمت داخلی خود. این خاصیت باعث می شود که هر مغناطیس کوچکی را که به آن نزدیک می شود، دفع کند. خاصیت ابررسانایی از سه طریق از بین می رود.

- اگر دما به بالاتر از دمای بحرانی برود
- میدان مغناطیسی بیش از یک حد معین اعمال شود (حتی در دماهای پایین تر از دماهای بحرانی)
- جریان الکتریکی بیش از یک حد معین از آن عبور کند (حتی در دماهای پایین تر از دماهای بحرانی)

این حدود معین جریان و میدان را به ترتیب جریان بحرانی و میدان بحرانی گویند. ابررسانایی می تواند کاربردهایی مهم داشته باشد. حدود ۱۰ درصد از انرژی الکتریکی در مسیر انتقال از مراکز تولید به مصرف در مقاومت هادیهای انتقال تلف می شود.

اگر برای ابررسانا شدن فلزات دمایی کمتر از ۱/۲ درجه کلوین لازم باشد، کار با آن برای مقاصد عملی چندان ساده نیست. پس ماده ای مورد نیاز است که در دماهایی بالاتر ابررسانا باشد. هیچ فلز خالصی این چنین نیست.

در سال ۱۹٤۸ میلادی، دمای ابررسانایی آلیاژی از نیوبیم و ژرمانیم به ۲٤درجه کلوین رسید. به مدت نیم قرن ماده ای که بالاتر از ۲٤ درجه کلوین ابررسانا شد معرفی نشد.

در پاییز سال ۱۹۸٦ میلادی ماده ای سرامیکی با مخلوطی از اکسیدهای لانتانیم، باریم و مس به دست آمد که در ۲۸ درجه کلوین ابررسانا می شود. در سال ۱۹۸۷ میلادی، سرامیکی تهیه شد که در ۹۰ درجه کلوین ابررسانا بود. چنین سرامیکی در دمای نیتروژن مایع ابررساناست. نیتروژن مایع بسیار آسانتر از هیدروژن مایع به دست می آید، مایع نگه داشتن آن ساده تر است و تقریباً به همان اندازه هلیم مایع بی خطر است. در مه ۱۹۸۷ میلادی گزارشی درباره سرامیکی منتشر شد که در دمای۲۲۵ درجه کلوین(٤۸-درجه سانتیگراد) ابررسانا می شود.

در بهره برداری از این کشف هنوز یک مشکل عملی وجود دارد. مواد سرامیکی موادی شکننده اند و ساختن سیم یا لایه نازک از آنها آسان نیست.

۹-۳- اصول کار مگلو

مگلو براساس بلند کردن قطار و به حرکت درآوردن آن توسط یک میدان مغناطیسی قوی عمل می کند و دیگر نیازی به استفاده از چرخهای فولادی و خطوط راه‌آهن نمی‌باشد. مگلو توسط میدانهای مغناطیسی حدود ۱۰ تا ۱۵۰میلیمتر بالای مسیر راهنما شناور می شود. تمام مگلوهائی که تاکنون ساخته شده اند دارای مغناطیسهای قوی روی واگن هستند. که تحت تاثیر میدانهای مسیر راهنما باعث تعلیق واگن می شوند.

لغت مگلو کوتاه شده دو لغت شناور شده و مغناطیسی می‌باشد و به این معنا است که این قطارها بر روی یک مسیر راهنما با استفاده از اصول اولیه آهنرباها شناور هستند.

تفاوت بزرگی که بین مگلو و یک قطار معمولی وجود دارد این است که مگلو موتور دوار و چرخ (به عنوان تکیه گاه اصلی درهنگام حرکت) ندارد. میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط سیم پیچ های الکتریکی قرار داده شده بر روی دیواره‌های مسیر راهنما و دو طرف قطار باعث حرکت رو به جلوی مگلو می‌شود.

در مگلو نیرو وقتی بوجود می آید که واگن از مقابل سیم پیچهای خط بگذرد. نیروی های دینامیک حاصل باعث ایجاد خستگی[۱] در اجزا سیستم می شود.

مگلو دارای سه سیستم اصلی است که بر اثر نیروی متقابل بین مغناطیسهای ابر رسانای[۲] روی قطار و سیم پیچهای روی مسیر راهنما عمل می کنند. این سیستمها عبارتند از:

۱- سیستم تعلیق[۳]

۲- سیستم هدایتگر جانبی[٤]

۳- سیستم جلوبرنده (کشش)[٥]

ساختار این سه سیستم در سه کشور آلمان، ژاپن و امریکا موضوع تحقیق محققان بسیاری است و در این سه کشور ساختارهای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است

برای تامین این سه قسمت از ۵ تئوری مختلف استفاده می شود

۱- مغناطیس دائم روی واگن و مسیر راهنما جهت ایجاد نیروی دافعه

۲- الکترومغناطیس روی واگن و ریل آهنی روی مسیر راهنما جهت ایجاد نیروی جاذبه کنترل شده

۳- سیم پیچ با جریان متناوب در واگن و صفحات هدایتگر روی مسیر راهنما

٤- مگلو با مغناطیسهای ابر رسانا با میدان ثابت در واگن

۵- تعلیق با میدان خنثی

٦- موتور سنکرون خطی جهت ایجاد نیروی کشش

۷- موتور القائی خطی جهت ایجاد همزمان نیروهای تعلیق و کشش

---

[۱] fatigue
[۲] superconducting magnet
[۳] levitation or suspension
[٤] lateral guidance
[5] propulsion

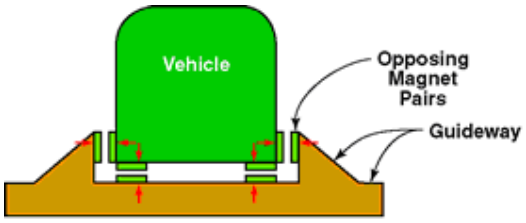
۹-۳-۱- مگلو با مغناطیس دائم روی واگن و مسیر راهنما

در این سیستم مغناطیسهای دائم روی خط و واگن نصب شده اند. مغناطیسهای دائم در طرفین واگن قرارگرفته و با دفع قطبهای مخالف مغناطیسهای روی مسیر راهنما تعلیق و هدایت عرض (جانبی) را بوجود می آورد. این مدل در مقیاسهای کوچک آزمایشگاهی ساخته شده و قیمت آهنربا های دائم مسیر راهنما زیاد است. فاصله هوائی این نوع مگلو حدود یک سانتیمتر است که به علت مشکلاتی از قبیل نیروی باد، حضور برف و یخ در زمستان کاربرد آن در قطارهای سریع السیر غیر ممکن است. این سیستم از نظر تعادل ناپایدار است لذا همیشه یک مسیر راهنما[1] برای هدایت پایدار آن بکار می رود. شکل ۹-۲ ساختار کلی این سیستم را نشان می دهد.

۹-۳-۲- مگلو الکترومغناطیسی

این سیستم بر اساس نیروی جاذبه کار می کند و بسیار ناپایدار است زیرا با کاهش فاصله بین مغناطیسها و ریل نیروی جاذبه بین آنها افزایش می یابد و منجر به کاهش بیشتر فاصله می شود.

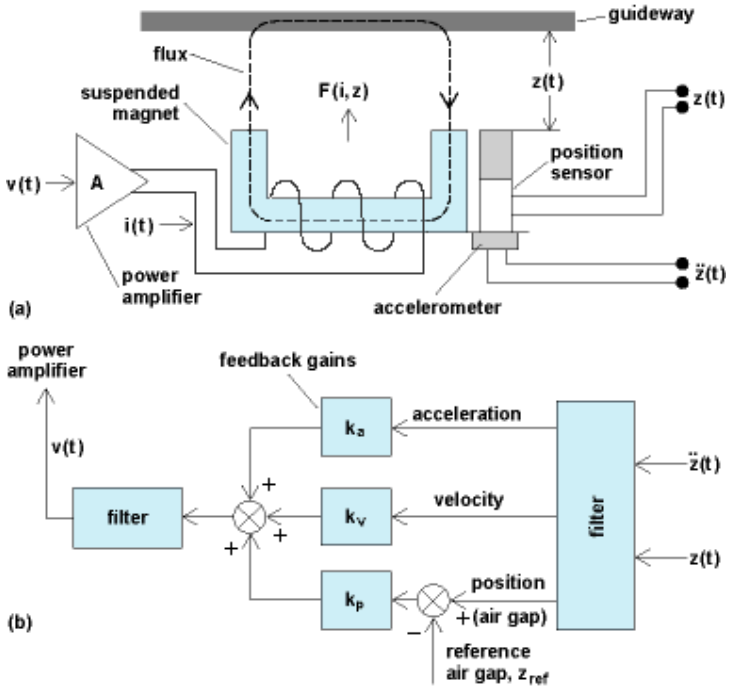
بنابراین برای ایجاد پایداری احتیاج به یک مدار کنترل با فیدبک مشابه شکل ۹-۳ است. این مدار کنترل با کاهش فاصله هوائی جریان مدار مغناطیسی را کم کرده تا نیروی جاذبه کاهش یابد. به علت فاصله هوایی کم در این سیستم مدار کنترل از المانهای پیشرفته و سنسورهای کمپکت ساخته می شود.



شکل ۹-۲- تعلیق بر اساس نیروی دافعه با مغناطیس دائم

اگرچه در این سیستم با جایگزینی مغناطیسهای دائم به وسیله الکترومغناطیس هزینه بسیار زیاد مغناطیسهای دائم روی مسیر راهنما کاهش یافته اما مشکل اساسی این سیستم فاصله هوایی کوچک آن (حدود ۱ سانتیمتر) است. این فاصله هوایی کم باعث می شود تلرانس قابل قبول در این سیستم بسیار کوچک باشد که خود منجر به افزایش هزینه احداث مسیر راهنما می شود. علاوه براین ضریب اطمینان در کارکرد مناسب در شرایط مختلف (برف و یخ، زلزله، تغییرات دما و.....) کم است.

[1]Guide way



شکل ۹-۳- تعلیق کنترل شده توسط نیروی جاذبه بین الکترومغناطیس و صفحه فرومغناطیس

در سیستم جاذبه ای، الکترومغناطیس مسیر راهنما الکترومغناطیس واگن را جذب و واگن را به سمت بالا می کشد. این سیستم تعلیق الکترومغناطیسی[1] (EML) نامیده می شود.

در این سیستم نیروی سمت بالا برابر است با

$$f(i,z,t)=\frac{B^2A}{\mu_0}=\frac{N^2A\mu_0}{4}\left(\frac{i}{z}\right)^2 \qquad (۹-۱)$$

که در آن

i جریان سیم پیچها (تابع زمان)

z فاصله هوایی بین واگن و مسیر راهنما (تابع زمان)

B چگالی فلو

A سطح قطب

μ_0 پرمابلیته هوا

N تعداد دور سیم پیچ

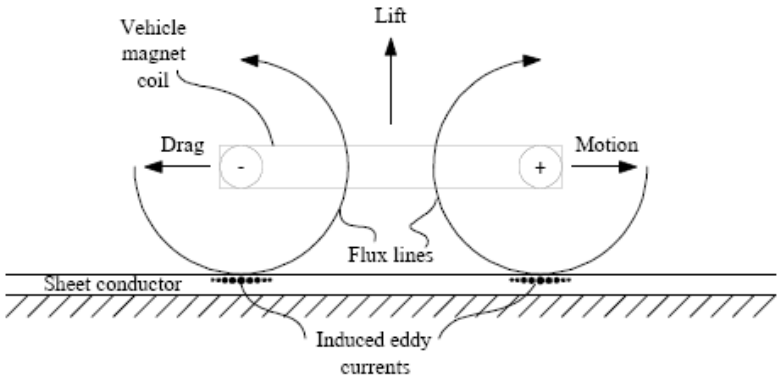
[1] electromagnetic levitation

هستند. در این سیستم معمولا فاصله هوایی بین ۱۰ تا ۱۵ میلیمتر و چگالی فلو بین ۰/۸ الی ۱ تسلا است. همانطور که گفته شد این سیستم ناپایدار است و جهت ایجاد پایداری باید از مدار کنترل مشابه شکل ۹-۳ استفاده شود. در این شکل فیدبک موقعیت فاصله هوایی را تنظیم می کند و فیدبک سرعت و شتاب نوسانات را کنترل می کنند. این سیستم در ترانس راپید اجرا شده است.

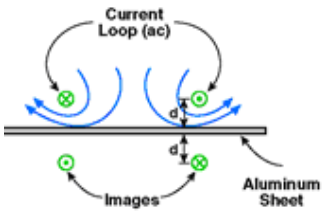
۹-۳-۳- مگلو با صفحات هادی

این سیستم براساس رفتار مغناطیسی متقابل بین یک سیم پیچ با جریان متناوب و جریان القا شده توسط آن در یک صفحه هادی کار می کند. این سیستم مانند سیستم با مغناطیس دائم اساسا پایدار است. زیرا بر اساس نیروی دافعه کار می کند و با کاهش فاصله نیروی دافعه بین صفحه و سیم پیچ افزایش می یابد و منجر به دور شدن آنها از یکدیگر می شود. تعلیق در امتدا عمود کاملا پایدار است و هماهنگی صفحات عرضی در طرفین تعادل عرضی را برقرار می سازد. شکل ۹-٤ جریانها و جهت نیروهای بوجود آمده در این سیستم را نشان می دهد. مطابق شکل ۹-۵ رفتار متقابل سیم پیچ و صفحه مشابه رفتار همان سیم پیچ است با سیم پیچ مجازی که از تصویر سیم پیچ اصلی نسبت به صفحه هادی بدست می آید. جهت جریان در سیم پیچ مجازی و سیم پیچ اصلی عکس یکدیگرند. اگر چه این سیستم تعادل پایدار دارد ولی تلفات در سیم پیچها و مسیر راهنما زیاد است و استفاده از آن عملی نیست.

جهت رفع مشکل تلفات از مغناطیسهای ابر رسانا در واگن استفاده شد. مغناطیسهای ابر رسانا سبک، دارای میدان مغناطیسی قوی و بدون تلفات (به جز توان مورد نیاز برای سیستم خنک کننده ابر رسانا) هستند.



شکل ۹-٤- تعلیق بر اساس نیروی دافعه بین یک سیم پیچ با جریان متناوب و صفحه هادی

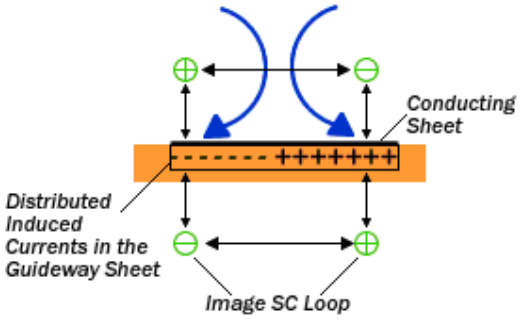


شکل ۹-۵- موقعیت سیم پیچ مجازی و اصلی نسبت به یکدیگر و جهت جریانهای آنها

۹-۳-٤- مگلو ابر رسانا

در این سیستم نیاز به میدانها مغناطیسی بسیار قوی است. برای داشتن مغناطیسهای قوی مواد مختلفی بکار رفته است. مغناطیسهای بکار رفته باید چنان قوی و پایدارباشند تا بتوانند قطار با بار و مسافر را بلند کرده و در مقابل تغییرات یا جابجائی و عدم تعادل در توزیع وزن بتواند میدان را تنظیم کند. مغناطیسهای ابر رسانا مغناطیسی قوی و سبک هستند. با توسعه مغناطیسهای ابر رسانا علاوه بر آنکه می‌توان به سرعتهای بالاتری دست یافت، از هزینه ساخت این قطارها و مصرف انرژی در آنها نیز کاسته خواهد شد.

در این سیستم یک مغناطیس ابر رسانا مطابق شکل ۹-٦ از مقابل صفحه هادی که در طول مسیر راهنما قرار دارد عبور کرده و جریانهای گردابی[۱] را در آن القا می کند. این جریانهای گردابی میدانی را ایجاد خواهند کرد که با عامل بوجود آورنده خود مخالفت خواهند کرد (قانون لنز). با توجه به مخالفت جهت میدان مغناطیس ابر رسانا و صفحه هادی، این دو یکدیگر را دفع خواهند کرد. این نیروی دافعه می تواند باعث تعلیق مغناطیسهای ابر رسانا شود. تعلیق بصورت خودکار با حرکت واگن بوجود می آید و اساسا پایدار است. القا ولتاژ در این سیستم همواره بر اثر حرکت مغناطیس ابر رسانا با جریان مستقیم صورت می گیرد و هیچگاه از جریان متناوب در ابر رسانا استفاده نمی شود زیرا میدان متناوب تلفات هیسترزیس شدیدی در ابر رسانا ها ایجاد می کند.



شکل ۹-٦ – سیستم مگلو با مغناطیس ابر رسانا و صفحه هادی

نیروی بالابرنده ناشی از یک دور سیم برابر است با

[۱] eddy current

$$f(v,i,z,t)=\frac{B^2A}{\mu_0}=\left(\frac{v^2}{v^2+w^2}\right)\frac{\mu_0 i^2}{4\pi z} \qquad (۲-۸۸)$$

که در آن

$$w=\frac{2}{\mu_0\sigma h} \qquad (۳-۸۸)$$

i جریان سیم پیچها (تابع زمان)

z فاصله هوایی بین واگن و مسیر راهنما (تابع زمان)

B چگالی فلو

μ_0 پرمابلیته هوا

v سرعت خطی مغناطیس ابر رسانا

h ضخامت صفحه هادی

σ هدایت الکتریکی صفحه هادی

هستند.

در سرعتهای کم نیروی بالا برنده برای بلند کردن واگن کافی نخواهد بود بنابراین در سرعت کم باید از چرخهای کمکی استفاده شود تا پس از رسیدن واگن به سرعت مناسب تعلیق مغناطیسی آغاز شود. سرعت شروع تعلیق بر حسب مشخصات سیستم و وزن واگن ممکن است متفاوت باشد ولی معمولا حدود ۸۰ کیلومتر بر ساعت است.

مغناطیس ابر رسانا معمولا می تواند میدانهای تا ٤ تسلا را بوجود آورد که واگن را تا فاصله ۱۰ الی ۱۵ سانتیمتر از خط بالا می برد. این سیستم از نظر حفظ تعلیق کاملا پایدار است.

در این سیستم تلفات مسی کوچکی در صفحه هادی بوجود می آید که منجر به ایجاد حرارت و نیروی مقاوم مغناطیسی می شود. علاوه بر این تلفات قسمتی از انرژی ورودی صرف سیستم خنک کننده ابر رسانا می شود. این سیستم در نمونه های آزمایشی در ژاپن با سرعت ۵۸۱ کیلومتر بر ساعت آزمایش شده است.

هادی ساده در مسیر راهنما نیروی مقاوم مغناطیسی زیادی ایجاد می کند زیرا جریان القا شده در هادی مسیر راهنما با جریان القا شده در مغناطیس ابر رسانای داخل واگن قابل قیاس است. تلفات ایجاد شده در هادیهای مسیر راهنما نیروی مغناطیسی مقاوم را ایجاد می کنند. برای این منظور باید جریان القا شده در هادی مسیر راهنما را نسبت به جریان مغناطیسهای ابر رسانا کاهش داد. کاهش جریان در هادی مسیر راهنما باعث کاهش تلفات و نیروی مقاوم ناشی از آن می شود

در اولین گام سیم پیچهای معمولی مانند شکب ۹-۷ جایگزین صفحات هادی شدند.

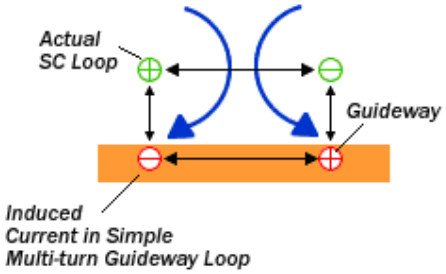
در گام بعدی از دو مفهوم استفاده شد

۱- تعلیق با میدان خنثی[1]

۲- موتور سنکرون خطی[2]

میدان خنثی تلفات ناشی از القا جریان در هادیهای ساده مسیر راهنما را به مقدار خیلی کم کاهش می دهد. در نتیجه نیروی مغناطیسی مقاوم ناشی از ان بسیار کوچک است. تعلیق با این روش کاملا پایدار است و نیروی کافی برای غلبه بر همه نیروهای محیطی (باد، شیب و ....) را دارد.

از آنجا که واگن و مسیر راهنما هیچ تماسی با یکدیگر ندارند، روشهای معمول در تامین نیروی کشش در مگلو قابل استفاده نیست. لذا از موتور سنکرون خطی استفاده می شود.



شکل ۹-۷- سیستم مگلو با مغناطیس ابر رسانا و سیم پیچ معمولی در مسیر راهنما

از آنجا که واگن و مسیر راهنما هیچ تماسی با یکدیگر ندارند، روشهای معمول در تامین نیروی کشش در مگلو قابل استفاده نیست. لذا از موتور سنکرون خطی استفاده می شود.

برای این منظور سیم پیچ دیگری به غیر از سیم پیچ تعلیق جهت تغذیه موتور خطی در مسیر راهنما قرار می گیرد تا مغناطیسهای ابر رسانا را در مسیر راهنما به جلو براند.

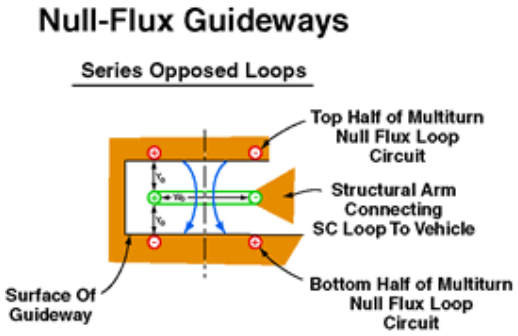
۹-۳-۵- تعلیق با میدان خنثی

در تعلیق به روش میدان خنثی یک زوج سیم پیچ سری به گونه ای در مسیر راهنما قرار می گیرند که میدان حاصل از میدان واگن (به هر طریق که بوجو آمده باشد) یکدیگر را خنثی و برآیند صفر را در دو سیم پیچ ایجاد کنند. میدان خنثی باعث می شود تا جریان کمتر و در نتیجه در نیروی تعلیق یکسان نیروی مقاوم مغناطیسی کمتری بوجود آید. شکل ۹-۸ یک نمونه سیم پیچ با میدان خنثی را نشان می دهد.

جهت جریان القا شده در حلقه یا صفحه هادی مسیر راهنما برعکس جهت جریان در مغناطیس ابر رسانا است و نیروی مغناطیسی تعلیق را ایجاد می کند. با عبور مغناطیس بعدی از مقابل حلقه یا صفحه به علت تغییر پلاریته میدان جهت جریان عوض می شود اما نیروی مغناطیسی از نظر مقدار و جهت ثابت می ماند. فرکانس سیم پیچ متناسب با سرعت است و در سرعت عادی فرکانس به اندازه کافی بزرگ است که

[1] The Null Flux Suspension
[2] The Linear Synchronous Motor (LSM)

مقاومت مدار مسیر راهنما تاثیری بر جریان نگذارد. در این سیستم هادی مسیر راهنما به گونه ای طراحی می شود که جریان القا شده در آن کاهش یابد



شکل ۹-۸ یک نمونه سیم پیچ با میدان خنثی

۹-۳-۵-۱- شکل میدان خنثی

اشکال مختلفی برای میدان خنثی وجود دارد که همه بر یک اصل استوار هستند، هادی مسیر راهنما باید چنان باشد که هنگامیکه واگن در محور تقارن قرار دارد برایند میدان در مدار صفر باشد. از آنجا که برآیند میدان صفر است جریان القا شده در حلقه نیز صفر خواهد بود.

با انحراف واگن از محور تقارن فلو در حلقه غیر صفر می شود و باعث القا جریان در آن می شود. جهت جریان به گونه ای است که نیروی مغناطیسی آن بر مغناطیس واگن، واگن را به حالت تقارن بر می گرداند.

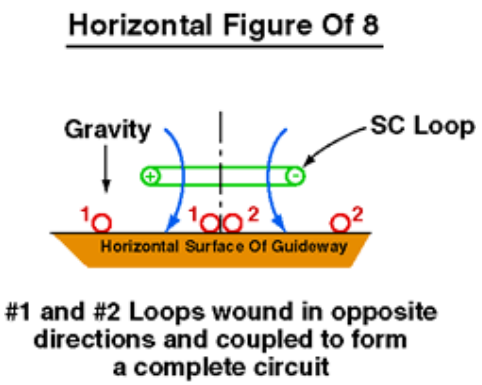
در شکل ۹-۸ وقتی حلقه ابر رسانا درست وسط حلقه بالا وپایین حلقه میدان خنثی مسیر راهنما است، برآیند میدان صفر است، زیرا حلقه بالا و پایین برعکس هم پیچیده شده اند.

اگر حلقه ابر رسانا به سمت پایین (یا بالا) از محور تقارن حرکت کند، جریان القایی و نیروی مغناطیسی ناشی از آن واگن را به سمت بالا (پایین) هل می دهند. در حالت واقعی که وزن قطار صفر نیست قطار در محلی کمی پایین تر از محور تقارن در حالت تعادل قرار می گیرد. در اینحالت جریان القایی در مدار مسیر راهنما نیروی بالا برنده ای ایجاد می کند که برابر وزن واگن است و هر نیروی دیگری که باعث انحراف واگن از محور تقارن شود با جریان القا شده در مدار جبران می شود.

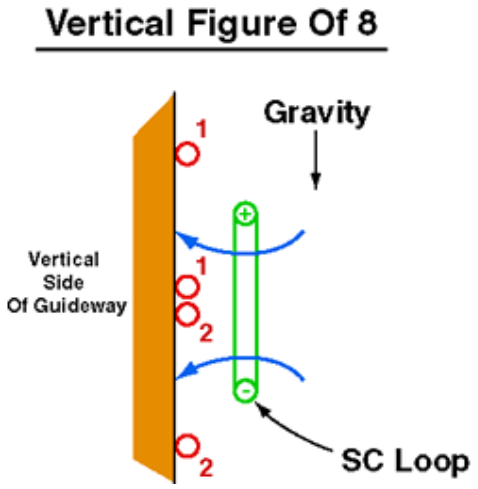
برای یک نیروی مغناطیسی معین جریان القا شده (و تلفات مسی) در روش میدان خنثی خیلی کوچکتر از روشهای دیگر است و در نتیجه ترکیب میدان خنثی اجازه استفاده از مغناطیسهای ابر رسانای قویتر را نسبت به مغناطیسهای ابر رسانای در روش صفحات هادی و حلقه ساده می دهد.

اصولی مشابه آنچه گفته شد در سیم پیچهای با میدان خنثی با شکل 8 انگلیسی حاکم است. این سیم پیچ اگر مانند شکل ۹-۹ بصورت افقی در کف مسیر راهنما قرار گیرد یک نیروی افقی جهت حفظ قطار در حالت تعادل در امتداد افقی ایجاد می کند. وقتی هادی ابر رسانا در مرکز سیم پیچ قرار دارد، میدان برایند در سیم پیچ صفر است. اگر سیم پیچ به سمت چپ یا راست حرکت کند، میدان برآیند جریانی در سیم پیچ القا می کند که مغناطیس را به محور تقارن بر می گرداند.

این سیم پیچ همچنین می تواند مانند شکل ۹-۱۰ بصورت عمودی در طرفین مسیر راهنما قرار گیرد تا نیروی بالا برنده قطار را ایجاد نماید. این سیستم در مگلوهای ژاپنی استفاده شده است.



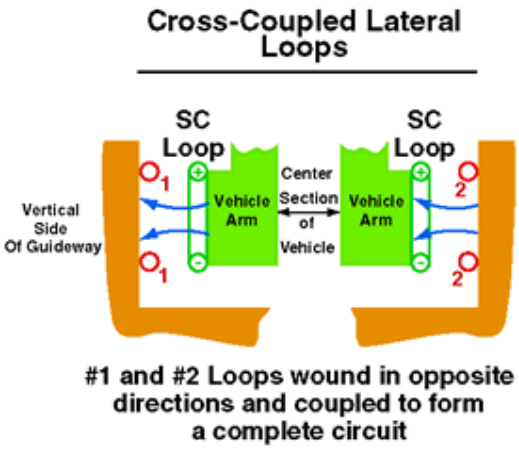
شکل ۹-۹- سیم پیچهای با میدان خنثی با شکل 8 انگلیسی بصورت افقی در کف مسیر راهنما



شکل ۹-۱۰- سیم پیچهای با میدان خنثی با شکل 8 انگلیسی بصورت عمودی در دیواره مسیر راهنما

شکل دیگری که از سیم پیچ میدان خنثی مورد استفاده قرار می گیرد، استفاده از آن مانند شکل ۹-۱۱ به صورت سیم پیچ ۱ و ۲ در طرفین مسیر راهنما است. وقتی مگلو در مرکز مسیر راهنما و بین دو حلقه ۱ و ۲ است برآیند میدان صفر است، اگر یک نیروی خارجی واگن را به سمت چپ یا راست هل دهد و آنرا از محور وسط منحرف کند، جریانی در سیم پیچها القا می شود که میدان ناشی از آن و نیروی حاصل واگن را به محور تقارن بر می گرداند.

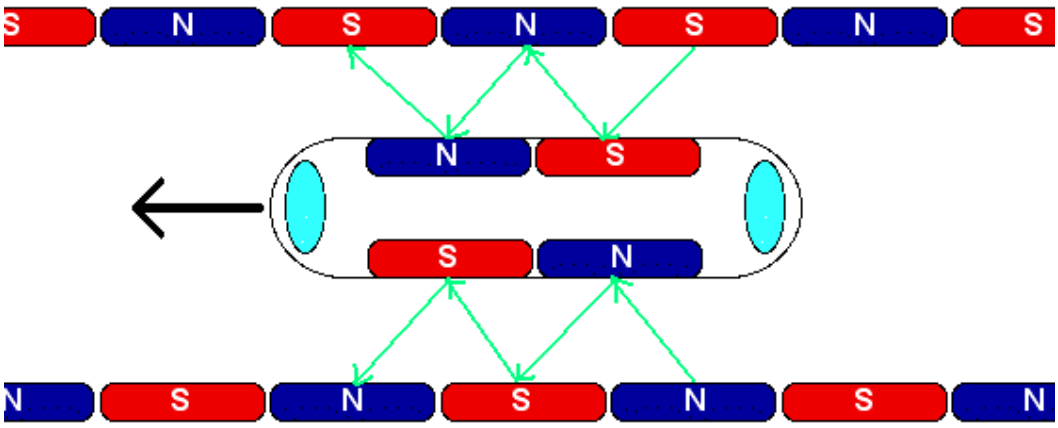
استفاده از روش میدان خنثی نیروی مغناطیسی مقاوم را به میزان قابل مقایسه ای کاهش می دهد. در سرعت ۵۰۰ کیلومتر بر ساعت نیروی مقاوم باد ۵ تا ۱۰ در صد نیروی وزن است در حالیکه نیروی مقاوم مغناطیسی حدود ۱ در صد نیروی وزن است.



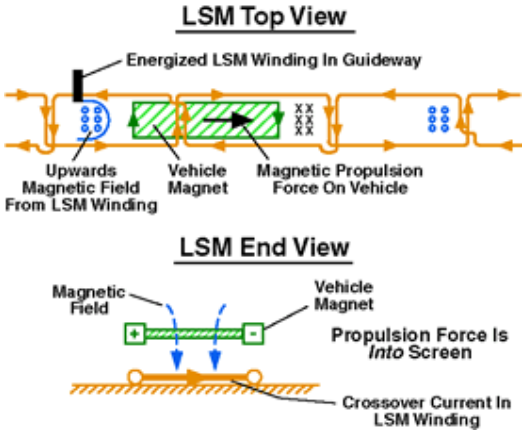
شکل ۹-۱۱- سیم پیچ میدان خنثی صورت سیم پیچ ۱ و ۲ در طرفین مسیر راهنما

۹-۳-۶- موتور سنکرون خطی

یکی از راههای تامین نیروی کشش مگلو استفاده از موتور سنکرون سه فاز خطی است. موتور سنکرون سه فاز خطی مشابه موتور سنکرون سه فاز دوار عمل می کند در این سیستم سیم بندی سه فاز استاتور موتور به صورت گسترده در طول مسیر راهنما توزیع شده و مغناطیسهای (یا الکترومغناطیسهای) سیستم تعلیق یا مغناطیسهای (یا الکترومغناطیسهای) جداگانه به عنوان القا کننده در واگن قرار می گیرد. در اینصورت سیم بندی روی مسیر راهنما قطبهای متوالی N و S را بوجود می آورد. این قطبها بصورت یک موج در طول خط حرکت می کنند. قطبهای این سیم بندی قطبهای هم نام در واگن را دفع و قطبهای همنام را جذب می کنند و با حرکت خود در طول خط واگن را در طول مسیر راهنما به دنبال خود به جلو می رانند. شکل ۹-۱۱ موقعیت قطبهای سیم بندی در مسیر راهنما و قطبهای مغناطیسهای داخل واگن و جهت نیروهای جلو برنده قطار را نشان می دهد. شکل ۹-۱۲ نمونه سیم بندی یک فاز در مسیر راهنما را نشان می دهد

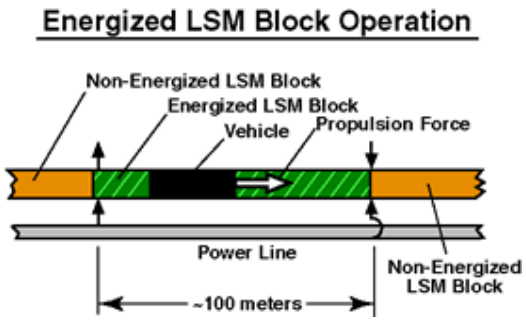


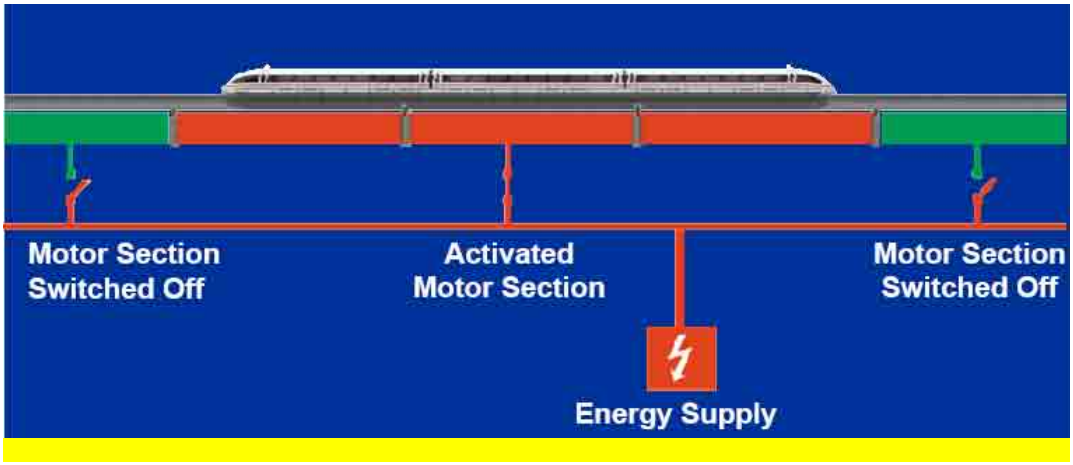
شکل ۹-۱۱ موقعیت قطبهای سیم بندی در مسیر راهنما و قطبهای مغناطیسهای داخل واگن و جهت نیروهای جلو برنده قطار



شکل ۹-۱۲ نمونه سیم بندی یک فاز در مسیر راهنما

سیم پیچ سه فاز موتور سنکرون خطی توسط شبکه سراسری قابل تغذیه است. این ولتاژ سه فاز میدان متحرکی را ایجاد خواهد کرد که مغاطیسهای واگن را به دنبال خود می کشد. سرعت متناسب با فرکانس است لذا مگلوهای مختلف در یک مسیر باید جداگانه تغذیه شوند. جهت صرفه جوئی در انرژی و همچنین جدا کردن مدار برای مگلوهای مختلف در یک مسیر هادی های موتور سنکرون خطی فقط در قسمتی از مسیر راهنما که مگلو در ان قرار دارد برقدار می شود. در اینحالت راندمان سیستم بیش از ۸۰ درصد است. شکل ۹-۱۳ نحوه برقدار کردن سیم پیچ توزیع شده فقط در قسمتی از مسیر راهنما که مگلو در آن قرار دارد را نشان می دهد.





شکل ۹-۱۳- نحوه برقدار کردن سیم پیچ توزیع شده در قسمتی از مسیر راهما که مگلو در آن قرار دارد

۹-٤- تکنولوژی مگلو

بر اساس تئوری های معرفی شده سه تکنولوژی مختلف در مگلو توسط سازندگان بکار رفته است

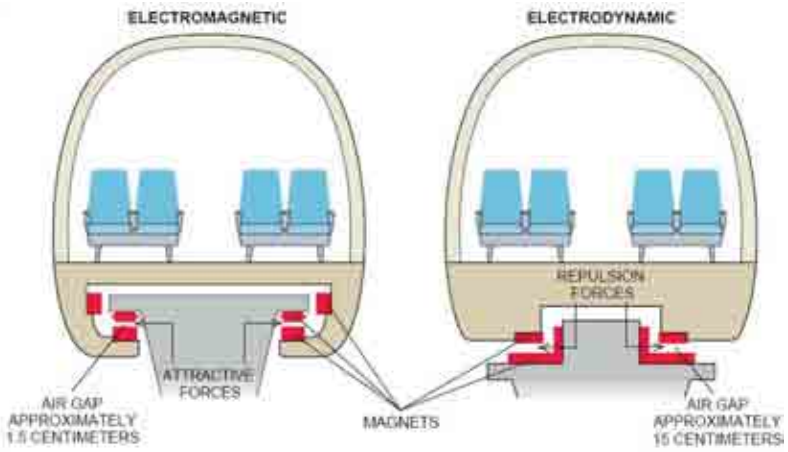
۱- تعلیق الکترو مغناطیسی(EML[1] یا EMS[2])

۲- تعلیق الکترو دینامیکی (EDL[3] یا EDS[4])

۳- Inductrack

شکل ۹-۱٤ ساختار کلی دو تکنولوژی تعلیق الکترو مغناطیسی و تعلیق الکترو دینامیکی را نشان داده و با هم مقایسه می کند

[1] Electromagnetic levitation
[2] Electromagnetic suspension
[3] Electrodynamic levitation
[4] Electrodynamic suspension



شکل ۹-۱٤ ساختار کلی دو تکنولوژی تعلیق الکترو مغناطیسی و تعلیق الکترو دینامیکی

۹-٤-۱- تعلیق الکترو مغناطیسی

تعلیق الکترو مغناطیسی بر اساس نیروی جاذبه مغناطیسها عمل می کند. در این سیستم مغناطیسهای غیر ابر رسانا روی بوژی و زیر ریلهای فرو مغناطیس قرار دارند.

مغناطیسها ریلهای هدایتگر منحنی شکل را جذب و به سمت ریلهای فرومغناطیس بلند می کنند. به این ترتیب واگن به اندازه یک سانتیمتر بلند می شود

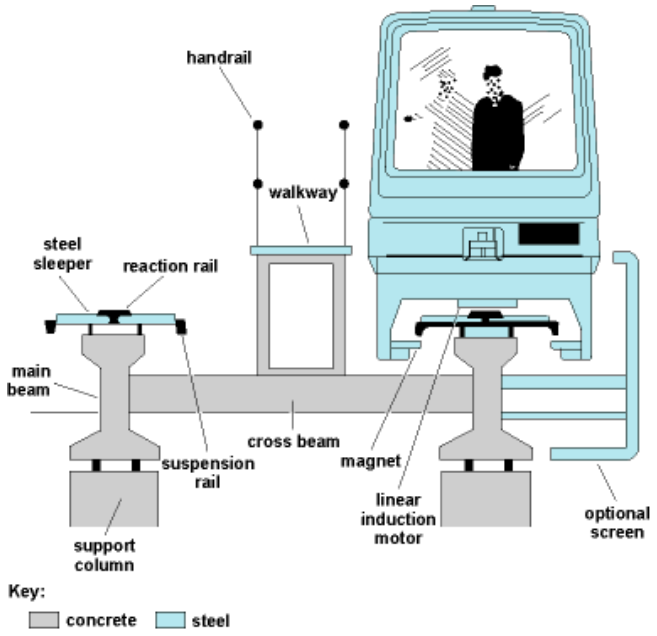
یک سیستم فیدبک کنترل مشابه شکل ۷-۳ مغناطیسها را کنترل می کند. این روش احتیاج به انرژی زیادی برای ایجاد میدان مغناطیسی لازم برای تعلیق دارد به همین علت فاصله هوایی بین واگن و مسیر راهنما در این سیستم بسیار کوچک است (حدود ۱ سانتیمتر این مقدار در سیستم EDL به علت استفاده از مغناطیسهای ابر رسانا به بیش از ۱۰ سانتیمتر می رسد). به علت فاصله هوائی کم تلرانسهای قابل قبول در مسیر راهنما خیلی دقیق هستند و هزینه احداث را بالا می برند. علاوه بر این فاصله هوایی کم هنگام یخبندان مشکلات زیادی را ایجاد می کند..

Transrapid و M-Bahn در آلمان، در بیرمنگام انگلیس و (HSST) در ژاپن از این روش استفاده می کنند. شکل ۹-۱۵ ساختار کلی سیستم بکار رفته در بیرمنگام انگلیس را نشان می دهد.

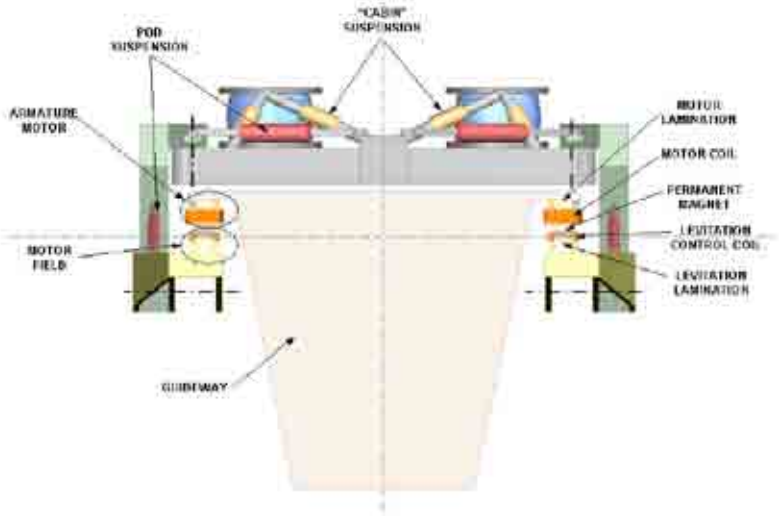
۹-٤-۱-۱- سیستم الکترو مغناطیسی در قطار ترانس راپید

در آلمان، مهندسان در حال ساخت سیستم تعلیق الکترومغناطیسی (EMS) هستند که آن را ترنس رپید می‌نامند. در این سیستم، قسمت تحتانی قطار اطراف یک مسیر راهنمای فولادی را در بر می‌گیرد. الکترومغناطیسهای متصل به قسمت پایینی واگنهای قطار کاملاً بر روی مسیر راهنما قرار دارند و باعث می‌شوند تا قطار در حالتی که بی‌حرکتی است، در فاصله ۱ سانتیمتری بالای مسیر راهنما شناور باشد. سایر آهنرباهای موجود بر روی قطار باعث می‌شوند که قطار در حین سفر کاملاً پایدار و متعادل باشد. شکل ۹-۱٦ ساختار کلی سیستم بکار رفته در ترانس راپید را نشان می دهد. در این سیستم یک موتور خطی القایی

که القا کننده آن (استاتور در ماشین آسنکرون دوار) آن در واگن و سیم بندی القا شونده آن (رتور) روی خط نصب شده است نیروی کشش را تامین می کند.



شکل ۹-۱۵ ساختار کلی سیستم بکار رفته در بیرمنگام انگلیس



شکل ۹-۱۶ ساختار کلی سیستم بکار رفته در ترانس راپید

این سیستم در مسیر مرکزشهر شانگهای چین به فرودگاه این شهر اجرا شده است. شکل ۹-۱۷ مگلو ترانس راپید را در شانگهای نشان می دهد.

۹-٤-۱-۲- مگلو HCCT ژاپن –

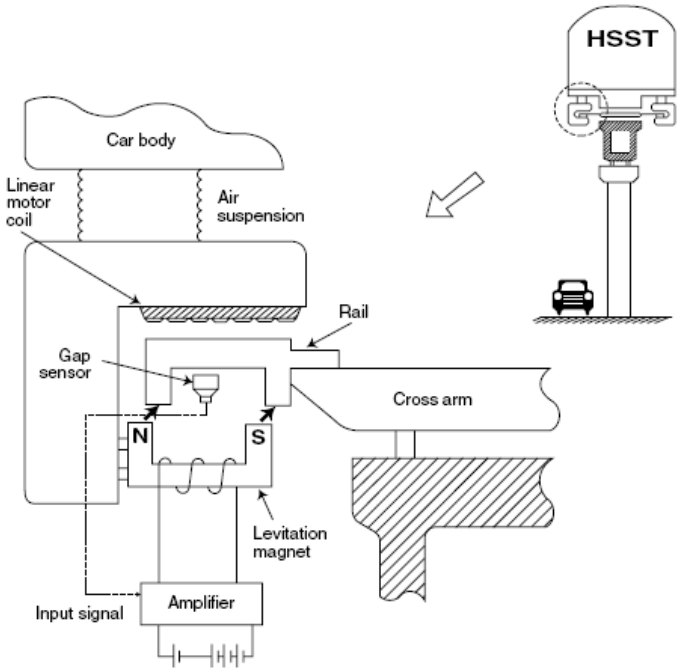
این نوع مگلو با استفاده از نیروی جاذبه مغناطیسی به حال تعلیق در می آید. شکل ۹–۱۸ سیستم تعلیق و جلو برنده این نوع مگلو را نشان می دهد.

در این سیستم عبور جریان از قطعه U شکل آهنربا شده و ریل را جذب می کند و باعث بلند شدن قطار می شود. یک سنسور فاصله هوایی بین ریل و مغناطیس را کنترل می کند.

برای حرکت این مگلو از موتور آسنکرون خطی استفاده شده است که القا کننده آن (استاتور در ماشین آسنکرون دوار معمولی) آن در واگن و سیم بندی القا شونده آن (رتور) روی خط نصب شده است.

این سیستم در نمونه های آزمایشی تا سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت پیموده است. شتاب مثبت و منفی آن ٤/٥ متر بر مجذور ثانیه است.

شکل ۹–۱۷ – مگلو ترانس راپید در شانگهای



–

شکل ۹–۱۸ سیستم تعلیق و جلو برنده مگلو HCCT ژاپن

۹–٤–۲– تعلیق الکترودینامیکی

تعلیق الکترودینامیکی بر اساس نیروی دافعه قطبهای مشابه عمل می کند. در مغناطیسهای قرار داده شده زیر قطار و روی مسیر راهنما قطبهای غیر هم نام همدیگر را دفع و قطار را بلند می کنند. این سیستم در راه آهن ملی ژاپن طراحی شده و در واگنهای RTRI[1] مورد استفاده قرار گرفته است. در تعلیق الکترودینامیکی مغناطیسهای بزرگ ابر رسانا در واگن مورد استفاده قرار می گیرد. این مغناطیس جریانهای گردابی[2] در هادیهای مسیر راهنما ایجاد می کند.

هزینه احداث خط مگلو در راه آهن ژاپن در یک مسیر دو خطه حدود ۲۵ میلیون دلار بر کیلومتر بوده است.

در EDL نیروی تعلیق متناسب با سرعت نسبی بین مغناطیسهای داخل واگن و سیم پیچهای مسیر راهنما است، در سرعتهای کم نیروی بوجود آمده برای بلند گردن واگن کافی نخواهد بود. لذا واگن بصورت هیبرید ساخته می شود و برای سرعتهای کم (مثلا تا km/hr ۸۰) از چرخ برای حرکت استفاده می کند.

به هرحال باید در قطار نکات ایمنی رعایت شده و نیز قابلیت کنترل در حالت اضطراری (مانند قطع برق) را داشته باشد به گونه ای که در حال قطار بتواند در حالات فوق بصورت قابل کنترل و ایمن متوقف شود. برای این منظور از بعضی ساپورتهای مکانیکی استفاده می شود.

سیستمهای EDS حدوداً ۱۰ برابر بیشتر از سیستمهای EMS قطار را از روی زمین بلند می کنند، بنابراین خطر برخورد قطار با خط در این سیستم کمتر است. سیستم تعلیق در EDS کاملا پایدار است اما به هر حال یک سیستم جهت کنترل فاصله هوایی برای کنترل میرایی نوسانات فاصله هوایی مورد نیاز خواهد بود.

اجزا این سیستم در شکل ۹–۱۹ نشان داده شده اند. این اجزا عبارتند از:

الف– سیستم تعلیق

ب– سیستم هدایتگر جانبی

ج– سیستم کشش

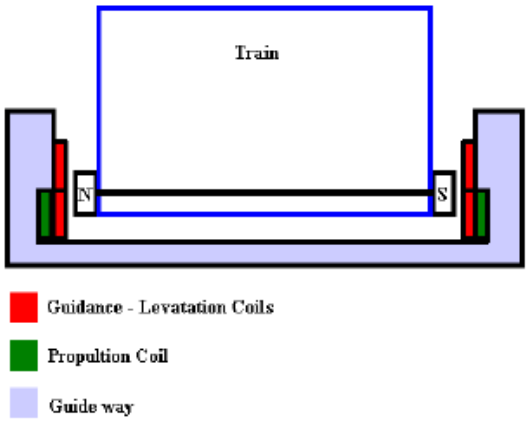
۹–٤–۲–۱– سیستم تعلیق – سیستم تعلیق EDS پیچیده ترین بخش سیستم است که شامل سه قسمت می شود. اولین قسمت روی قطار است و شامل مغناطیسهای ابر رسانا است که روبروی دیوار راهنما قرار گرفته اند.

---

[1] Railway Technical Research Institute

[2] eddy currents

نحوه قرار گرفتن این آهنربا های الکتریکی به گونه ای است که تشکیل یک چهار قطبی(Quadra pole) می دهد. در این ترکیب قطبهای مخالف بصورت متوالی قرار گرفته اند.



شکل ۹-۱۹- اجزا سیستم EDS

قسمت دوم سیستم تعلیق الکترودینامیکی، سیم پیچهای کنترل تعلیق است. تعداد زیادی از این سیم پیچها با شکل 8 انگلیسی در طول مسیر روی یکدیگر قرار داده شده اند. این سیم پیچها مشابه شکل ۹-۱۰ قرار داده شده اند. این سیم پیچها را به این علت مشابه شکل ۹-۱۰ قرار می دهند که در آنها یک طرح شار تهی بوجود آید. منظور از شار تهی آن است که برآیند شار و نیروی حاصل از شار در جهت حرکت روی قطار صفر باشد.

شار سیم پیچهای تعلیق و هدایتی که از میدان مغناطیسی قطار ناشی می شود دارای دو مؤلفه است.

مؤلفه اول شار افقی است که بر اثر متقابل دو قسمت سیم پیچ حذف می شود.

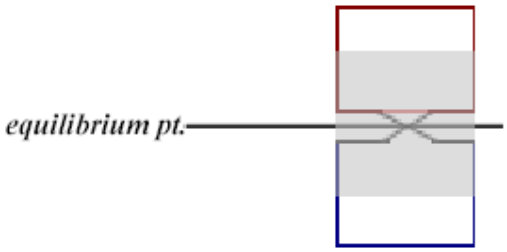
مولفه دوم شار ، عمودی است که باعث ایجاد نیروی بالا برنده می شود.

الف- شار افقی:

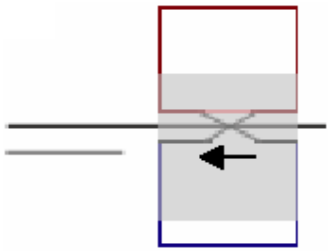
قطار هنگامی در بهترین موقعیت تعادل قرار می گیرد که مغناطیسهای ابر رسانا درست در وسط سیم پیچ تعلیق و هدایت باشند. در چنین نقطه ای شار نیمه بالایی و پایینی سیم پیچ تعلیق یکسان است(شکل ۹-۲۰). در چنین حالتی میدان در دو حلقه بالا و پایین برابر است. این میدان در دو سیم پیچ ولتاژی را القا خواهد کرد که به علت اختلاف در جهت سیم پیچها مخالف هم و به علت برابری میدانها با هم برابرند، در نتیجه برآیند ولتاژ صفر خواهد بود. بنابراین در اینحالت هیچ جریان، میدان و در نتیجه نیروی عرضی وجود نخواهد داشت. اما قطار همیشه روی خط تعادل حرکت نخواهد کرد. جرم قابل توجه قطار و همچنین نیروی جاذبه سبب تولید یک نیروی رو به پایین می شوند که قطار را به مسیر ریل (خط) نزدیک می کند. شکل ۹-۲۱ حالتی را نشان می دهد که محور وسط مغناطیس ابر رسانا پایین تر از محور وسط سیم پیچ تعلیق باشد.

شار افقی در شکل ۹-۲۱ در سیم پیچ پایینی بزرگتر است. وقتی قطار حرکت می کند شار افقی تغییر می کند. تغییرات این شار سبب القاء در هر دو حلقه سیم پیچ می شود اما به علت میدان بزرگتر در سیم پیچ پایینی ولتاژ القا شده در آن بزرگتر از ولتاژ در سیم پیچ بالائی خواهد بود و در نتیجه برآیند ولتاژ در سیم پیچ تعلیق صفر نخواهد بود که منجر به القا جریان در سیم پیچ تعلیق می گردد.

به علت اتصال سری دو حلقه بالا و پایین جریان در دو حلقه مساوی و در نتیجه باز هم میدانها و نیروی افقی صفر خواهد بود.



شکل ۹-۲۰- موقعیت تعادل مغناطیس ابر رسانا نسبت به سیم پیچ تعلیق



شکل ۹-۲۱ حالتی که مغناطیس ابر رسانا پایین تر از محور وسط سیم پیچ تعلیق باشد

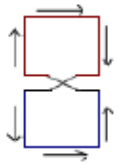
شار عمودی- مؤلفه عمودی شار سبب ایجاد نیرو به سمت بالا و تعلیق قطار می شود.

زمانیکه مغناطیس ابر رسانا پایین تر از محور وسط سیم پیچ است ولتاژ القا شده در نیمه پایینی سیم پیچ بر اثر عبور مغناطیس ابر رسانا از مقابل آن بزرگتر از ولتاژ القا شده در نیمه بالای سیم پیچ و در نتیجه منجر به ایجاد جریان مطابق شکل ۹-۲۲ در سیم پیچ تعلیق می شود. به علت شکل خاص سیم پیچ میدان حاصل از جریان القا شده در دو نیمه سیم پیچ مختلف الجهت خواهد بود و یک نیمه مغناطیس ابر رسانا را جذب و دیگری آنرا دفع خواهد کرد

جریان القایی سبب تولید یک میدان مغناطیسی در نیمه پایینی سیم پیچ می شود که جهت عکس میدان مغناطیسی آهنربای ابر رسانا است. در عوض، همین جریان میدان مغناطیسی تولید می کند که هم جهت با میدان مغناطیسی نیمه بالایی سیم پیچ است. میدان مغناطیسی پایینی باعث می شود که قطار به سمت بالا فشار داده شود و میدان مغناطیسی بالایی سبب می شود قطار به سمت بالا کشیده شود. این دو نیرو قطار را در تمام مدت حرکت در ارتفاع ثابتی شناور نگاه می دارند از آنجا که این نیروها متناسب با سرعت هستند

در ابتدای حرکت و در مدت زمانی که قطار در حال شتاب گرفتن ابتدایی است به علت سرعت کم ولتاژ و جریان القایی در دو نیمه سیم پیچ کوچک هستند و جهت تامین نیروی بالا برنده کافی نیستند و قطار نمی تواند خود را شناور نگاه دارد. برای رفع این مشکل در قطار چرخهای کمکی بکار می رود تا در سرعت کم قطار روی آنها به حرکت خود ادامه می دهد.

این چرخها که در واقع قسمت سوم سیستم تعلیق هستند فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر را بین قطار و مسیر راهنما تامین می کند.



شکل ۹-۲۲- جریان در سیم پیچ تعلیق

در تعیین معادلات ولتاژ و جریان لازم است ابتدا معادلات میدان نوشته شود. عمومی ترین معادله ای که برای یافتن میدان مغناطیسی القایی بکار می رود قانون گوس است

$$\Phi = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} \qquad (۱۵-۹)$$

در این معادله و معادلاتی که بعدا خواهند آمد

B چگالی فلوی مغناطیسی آهنرباهای ابر رسانای روی قطار

Φ چگالی فلوی مغناطیسی آهنرباهای ابر رسانای روی قطار که از سطح A می گذرد

R_l مقاومت سیم پیچ های تعلیق

N_l تعداد دور سیم پیچ تعلیق

Z فاصله بین آهنربا های روی قطار و سیم پیچ های تعلیق

A_b مساحت سیم پیچ پایینی که میدان از آن می گذرد

A_t مساحت سیم پیچ بالایی که میدان از آن می گذرد

w عرض سیم پیچ

h_1 ارتفاع قسمتی از سیم پیچ بالا که فوران از آنها عبور می کند.

h_2 ارتفاع قسمتی از سیم پیچ پایین که فوران از آنها عبور می کند.

هستند.

B ثابت و عمود بر سطح A است لذا می توان آنرا از انتگرال خارج نمود. B نمایشگر میدان مغناطیسی مغناطیس ابر رسانا است. همچنین dA دیفرانسیل سطح است که انتگرال آن روی سطح حلقه بالا و پایین

برابر سطحی از هر یک از دو سیم پیچ بالا A_t و پایین A_b است که میدان از آن می گذرد. اگر Φ_t و Φ_b به ترتیب شار میدان مغناطیسی عبوری از حلقه بالا و پایین باشند می توان نوشت:

$$\Phi_t = BA_t \qquad (۹-۱۶)$$

$$\Phi_b = BA_b$$

A_b و A_t برابرند با

$$A_t = w \times h_1 \qquad (۹-۱۷)$$

$$A_b = w \times h_2$$

$$A = A_b + A_t$$

برای محاسبه تغییرات شار از معادله ۹-۱۶ پس از جایگذاری معادله ۹-۱۷ در آن مشتق گرفته می شود. حاصل مطابق معادله ۹-۱۸ خواهد بود.

$$\frac{d\Phi_t}{dt} = B\frac{dA_t}{dt} = B \cdot \frac{d(w \cdot h_1)}{dt} = B \cdot \left(w\frac{dh_1}{dt} + h_1\frac{dw}{dt} \right) \qquad (۹-۱۸)$$

$$\frac{d\Phi_b}{dt} = B\frac{dA_b}{dt} = B \cdot \frac{d(w \cdot h_2)}{dt} = B \cdot \left(w\frac{dh_2}{dt} + h_2\frac{dw}{dt} \right)$$

که در آنها جملات اول نشاندهنده تغییرات میدان ناشی از جابجایی عمودی واگن و جملات دوم نشاندهنده تغییرات میدان ناشی از جابجایی افقی واگن هستند.

ولتاژ القایی در سیم پیچ تعلیق متناسب با تغییرات فوران نسبت به زمان (معادله ۹-۱۸) است

یعنی ولتاژ القایی در دو حلقه بالا و پایین برابر است با

$$\varepsilon_t = -N_l\frac{d\varphi_t}{dt} = -B.N_l.\left(w\frac{dh_1}{dt} + h_1\frac{dw}{dt} \right) \qquad (۹-۱۹)$$

$$\varepsilon_b = -N_l\frac{d\varphi_b}{dt} = -B.N_l.\left(w\frac{dh_2}{dt} + h_2\frac{dw}{dt} \right)$$

با توجه به اینکه جهت پیچش سیم پیچ تعلیق نسبت به میدان برعکس یکدیگر است برآیند ولتاژ در این دو سیم پیچ که سری شده اند برابر است با

$$\varepsilon = -B \cdot N_l.\left[w(\frac{dh_1}{dt} - \frac{dh_2}{dt}) + (h_1 - h_2)\frac{dw}{dt} \right] \qquad (۹-۲۰)$$

از آنجا که $\frac{dw}{dt}$ برابر سرعت افقی واگن (v) است می توان معادله ۹-۲۰ را بصورت معادله ۹-۱۰ ساده کرد

$$\varepsilon = -B \cdot N_l.\left[w(\frac{dh_1}{dt} - \frac{dh_2}{dt}) + (h_1 - h_2)v \right] \qquad (۹-۲۱)$$

تغییرات h_1، h_2 جابجائی عمودی واگن (مغناطیس ابر رسانا) بستگی دارد با توجه به اینکه ارتفاع مغناطیس ابر رسانا ثابت و برابر h است

$$h = h_1 + h_2$$

در نتیجه

$$\frac{dh}{dt} = \frac{dh_1}{dt} + \frac{dh_2}{dt} = 0$$

$$\varepsilon = -B \cdot N_l . \left[2w \frac{dh_1}{dt} + (h_1 - h_2)v \right] \qquad (۲۲-۹)$$

جریان ناشی از این ولتاژ با تقسیم آن بر مقاومت مدار سیم پیچ تعلیق بدست می آید

$$I = \frac{\varepsilon}{R_l} \qquad (۲۳-۹)$$

$$I = \frac{-B \cdot N_l . \left[2w \frac{dh_1}{dt} + (h_1 - h_2)v \right]}{R_l} \qquad (۲٤-۹)$$

معادله ۹-۲۲ نشان می دهد هر گاه مغناطیس ابر رسانا در محور خنثی قرار داشته باشد $(h_1 = h_2)$ ولتاژ القا شده ناشی از سرعت خطی برابر صفر خواهد بود. با حرکت واگن (مغناطیس ابر رسانا) به سمت بالا $\frac{dh_1}{dt} > 0$ و $h_1 - h_2 > 0$ خواهد بود در نتیجه ولتاژ منفی در حلقه ها القا خواهد شد. این ولتاژ جریانی در سیم پیچ القا می کند که با این جابجائی مخالفت می کند و مغناطیس را به سمت موقعیت اولیه می راند.

با کاهش h_1، همچنان $h_1 - h_2 > 0$ خواهد بود. در نتیجه مقدار ولتاژ همچنان منفی خواهد بود اما $\frac{dh_1}{dt} < 0$ خواهد شد که از مقدار ولتاژ و شدت نوسانات می کاهد.

با عبور مغناطیس ابر رسانا از محور تعادل و حرکت آن به سمت پایین، $h_1 - h_2 < 0$ و $\frac{dh_1}{dt} < 0$ خواهد شد که در نتیجه ولتاژ سیم پیچ مثبت و جریان ناشی از آن واگن (مغناطیس ابر رسانا) را به طرف بالا می راند.

با حرکت واگن به سمت بالا، همچنان $h_1 - h_2 < 0$ خواهد بود. در نتیجه مقدار ولتاژ همچنان منفی خواهد بود اما $\frac{dh_1}{dt} > 0$ خواهد شد که از مقدار ولتاژ و شدت نوسانات می کاهد. بنابراین هرگونه انحراف از محور وسط بصورت خودکار خنثی می شود.

در صورت مشخص بودن مدار مغناطیسی می توان چگالی فلو و نیروهای وارد بر چهار آهنربای روی مگلو را محاسبه کرد.

برای محاسبه نیروی ناشی از جاذبه، براحتی از فرمول $f_g = mg$ می توان استفاده کرد. اگر مگلو دارای k آهنربا باشد، نیروی وارد بر هر آهنربا باید یک k ام نیروی وزن باشد یعنی

$$f_m = \frac{1}{k} f_g \qquad (۲۵-۹)$$

۹-٤-۲-۲- سیستم هدایتگر جانبی - قطارهای مگلو باید در طول خطی به نام مسیر راهنما حرکت کنند. بنابر این سیستمی نیاز است که قطار را از انحراف و برخورد با دیواره مسیر راهنما یا خروج کلی از مسیر

حفظ کند. این سیستم، سیستم راهنما[1] یا هدایتگر جانبی خوانده می شود. شیوه کار سیستم راهنمایی به این صورت است که اگر قطار از مرکز منحرف شود به مجموعه ای از سیم پیچها کنترل شناوری[2] نزدیک می شود. این مجموعه سیم پیچها بخاطر فاصله کمتر از قطار میدان مغناطیسی قوی تری تولید می کنند. همچنین طرفی که از مرکز دور شده است میدان مغناطیسی حاصلش ضعیف تر می شود. اختلاف این دو میدان مغناطیسی سبب ایجاد نیرویی می شود که قطار را دوباره به وضعیت اولش (تعادل) بر می گرداند.

۹-٤-۲-۳- سیستم کشش[3]- در این طرح سیم پیچ های موتور سنکرون خطی در دو طرف مسیر راهنما قرار داده شده است. این سیم پیچها توسط شبکه سه فاز تغذیه می شوند. نیروی محرکه دیوارهای راهنما که با جریان آهنرباهای الکتریکی ابر رسانای روی قطار تغذیه می شود سبب حرکت قطار به سمت جلو می شود.

این میدانها، مغناطیسهای ابر رسانای داخل واگن را جذب و دفع می کنند که سبب به جلو راندن قطار میشود. برای افزایش سرعت قطار باید فرکانس ولتاژ در سیم پیچهای موتور خطی را افزایش داد. این روش می تواند قطار را به سرعتهای بسیار بالا برساند. همچنین منبع نیروی کشش (موتور خطی) در درون قطار نیست که خود سبب کاهش وزن قطار و در نتیجه تعادل بیشتر می شود.

۹-٤-۲-٤- سیستم الکترودینامیک قطار MLX01

مگلو طراحی شده توسط مهندسان ژاپنی شامل ۳ واگن است و هر واگن دارای ٤ سری از سیم پیچهای ابر رسانا (دو تا در هر سمت) است. این سیم پیچها در حال حاضر از ابر رساناهای قدیمی که در دماهای پایین قابلیت ابر رسانایی از خود نشان می‌دهند و باید توسط هلیوم مایع برای رسیدن به دمایی نزدیک صفر مطلق سرد شوند، ساخته شده است. برای اقتصادی‌تر کردن توسعه این قطارها، سیم پیچ های قدیمی باید با آهنرباهای ابر رسانای دائمی دمای بالا تعویض شوند.

این قطار در یک مسیر راهنمای[4] مستحکم که در دو طرف آن سه سیستم متفاوت از سیم پیچ های مسی کار گذاشته است، حرکت می‌کند .سه سیستم برای شناور ساختن قطار، پیش راندن و پایداری جانبی قطار بر روی مسیر راهنما مورد استفاده قرار گرفته است. سیم پیچهای ابر رسانایی که بر روی واگنها سوار هستند، میدان مغناطیسی قوی در حدود ۵ تسلا ایجاد می‌کنند. در سرعتهای نسبتاً بالا (بالای ۱۳۰ کیلومتر در ساعت)، این میدان، یک میدان مغناطیسی در سیم پیچ های مسی ثابت که بر روی دو طرف مسیر راهنما قرار دارند، ایجاد می‌کند که برای پایدار نگه داشتن قطار در طول مسیر خود کافی است.

---

[1] Guidance System
[2] Guidance- Levitation coils
[3] Propulsion
[4] guideway

جریان الکتریکی متناوب که از سیم پیچهای مسی مستقر بر روی مسیر راهنما می‌گذرد، یک میدان مغناطیسی متناوب تولید می‌کند که آهنرباهای ابر رسانای قطار را جذب می‌کند و به حرکت رو به جلوی قطار کمک می‌کند.

سیم پیچهای بکار برده شده برای شناور بودن و هدایت قطار باعث می‌شوند تا قطار در مرکز مسیر راهنما حرکت کند. هنگامی که واگنی از مرکز منحرف شود، یک نیروی جذب‌کننده در طرف دورتر و یک نیروی دفع‌کننده در طرف نزدیک‌تر به وجود می‌آید که واگن را به مرکز مسیر راهنما بر می‌گرداند. با در نظر گرفتن این نکته که فاصله افقی بین سیم پیچ های مسی و سیم پیچ های ابر رسانای تنها ۸ سانتیمتر است و قطار باید به صورت کاملاً امن حتی در سر پیچها (با سرعتی بالای ۵۰۰ کیلومتر ساعت) هدایت شود، دقت عمل این مکانیزم کاملاً خودنمایی می‌کند.

این قطار دارای چندین سیستم ترمز مجزا است. سیستم ترمز آیرودینامیکی که در سرعتهای بالا استفاده می‌شود، ترمز الکترودینامیکی که توسط موتور پیش‌ران خطی کار می‌کند و سیستم ترمز برای کاستن سرعت هنگامی که قطار بر روی چرخهای لاستیکی حرکت می‌کند.

الف- سیستم تعلیق

در این سیستم سیم پیچهایی بصورت عدد ۸ انگلیسی (8) در دیواره های جانبی مسیر راهنما نصب می شود. وقتی مغناطیس ابر رسانا واقع روی قطار با سرعت زیاد از چند سانتیمتری زیر مرکز این سیم پیچ عبور کند، جریانی در این سیم پیچها القا می کند که خود باعث ایجاد میدانی در سیم پیچها می شود. میدان حلقه پایین مغناطیس ابر رسانا را به طرف بالا هل می دهد و میدان حلقه بالا آنرا به طرف بالا می کشد. در نهایت این سیستم منجر به بلند شدن قطار از روی زمین می گردد. شکل ۹-۲۵ عملکرد این سیستم را نشان می دهد

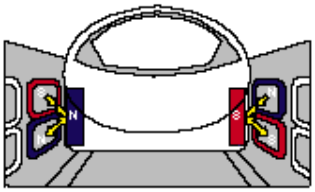
ب- سیستم هدایتگر جانبی

سیم پیچهای تعلیق درمسیر راهنما مقابل هم نصب می شوندو تشکیل یک حلقه را می دهند در اینصورت اگر قطار در حال حرکت جابجائی عرضی داشته باشد، مغناطیس ابر رسانا جریانی در سیم پیچهای تعلیق القا می کند که میدان ناشی از آن در سیم پیچی که از قطار دورتر است نیروی جاذبه و در سیم پیچی که به قطار نزدیکتر است نیروی دافعه ایجاد خواهد کرد. در نتیجه قطار همیشه در مرکز مسیر راهنما قرار خواهد داشت.

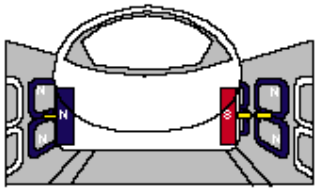
ج- سیستم جلوبرنده

دراین نوع مگلو بجای اینکه موتور داخل قطار آنرا بکشد، یک موتور سنکرون خطی مانند شکل ۹-۱۱آنرا به حرکت در می آورد. میدانهای مغناطیسی در طرفین مسیر راهنما مطابق شکل آنرا بجلو می کشند. نیروی جاذبه و دافعه جلوبرنده توسط سیم پیچهای جلوبرنده که روی دیواره های دو طرف مسیر راهنما

نصب شده اند بوجود می آید. این سیم پیچها توسط ولتاژ سه فاز تغذیه می شوند. با حرکت قطار به سمت جلو پلاریته میدان در مسیر راهنما تغییر کرده و قطار را همچنان به سمت جلو می کشد. همچنین سکشنهای برقدار با حرکت به جلو حرکت می کنند تا فقط سکشنی که قطار روی آن است برقدار باشد.



شکل ۹-۲۵- شکل سیستم تعلیق



شکل ۹-۲۶- شکل سیم پیچ تعلیق هنگامیکه نقش هدایتگر جانبی را دارد

د- مسیر راهنما-

مسیر راهنما شامل سازه های خط و سیم پیچهای تعلیق[1]، جلو برنده[2] و هدایتگر[3] است. در خط تست Yamanashi این سیم پیچها در دو لایه روی هم قرار گرفته اند تا تاثیر میدانهای خارجی روی مغناطیس ابر رسانا کاهش یابد. در این سیستم سیم پیچهای تعلیق روی سیم پیچهای جلو برنده قرار دارند. هردو سیم پیچ از جنس آلومینیم هستند. شکل ۹-۲۷ مسیر راهنما در خط تست Yamanashi و شکل ۹-۲۸ قطار MLX01 را روی این خط تست نشان می دهند.

[1] levitation
[2] propulsion
[3] guiding

شکل ۹-۲۷- مسیر راهنما در خط تستYamanashi

شکل ۹-۲۸-قطار MLX01 روی خط تست

روشهای مختلفی برای ساخت مسیر راهنما تحت بررسی است

۱- روش بیم[1]

۲- روش پانل[2]

۳- روش ضمائم مستقیم[3]

شکل ۹-۲۸ ساختار برش خورده این روشها را نشان می دهد.براساس تجربیات بدست آمده از سه روش قبل ساختار جدیدی با دیواره هایی با شکل T معکوس مطابق شکل ۹-۲۹ معرفی شد. در این سیستم سیم پیچهای تعلیق و جلو برنده بصورت شکلهای ۹-۳۰ و ۹-۳۱ هستند.

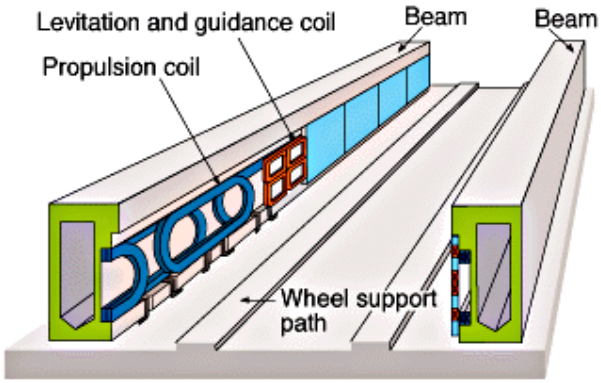
ه- **بوژی**- شکل ۹-۳۲ بوژی یک مگلو و اجزای آن را نشان می دهد. یکی از اجزای اصلی این بوژی مغناطیس ابر رسانای آن است. شکل ۹-۳۳ مغناطیس ابر رسانای قطار MLX01 را نشان می دهد. بر روی

---

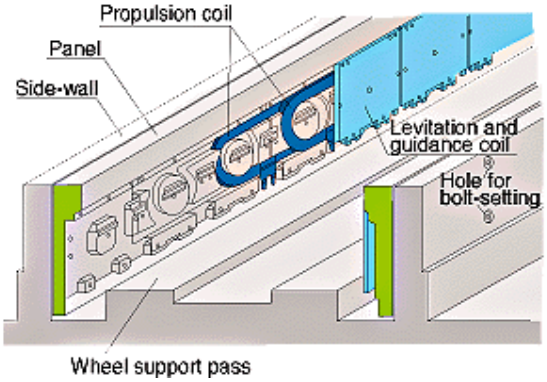
[1] Beam Method
[2] Panel Method
[3] Direct-Attachment Method

هر بوژی دو سری مغناطیس ابر رسانا در امتداد واگن نصب شده اند. هر سری مغناطیس ابر رسانا دارای ٤ سیم پیچ ابر رسانا است

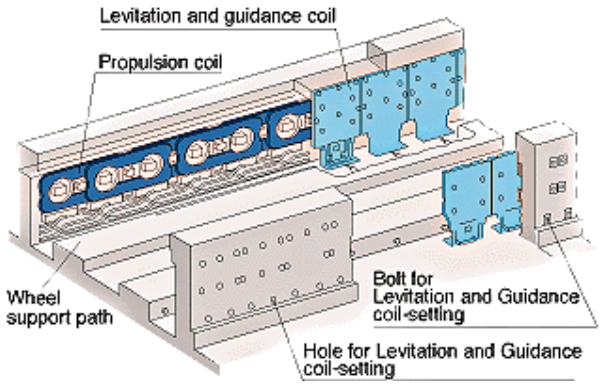
ساختار قطار MLX01– مدل MLX01 که یک مدل آزمایشی است حداکثر از ٥ واگن تشکیل می شود. شکل ٩–٣٤ طرح کلی این قطار را نشان می دهد. واگن جلو در سه طرح مختلف مطابق شکل ٩–٣٥ ساخته شده است. که جدیدترین آن MLX01-901 کمترین مقاومت را در مقابل هوا دارد. همچنین مجهز به ترمز آیرودینامیک مطابق شکل ٩–٣٦ است.



الف– Panel Method

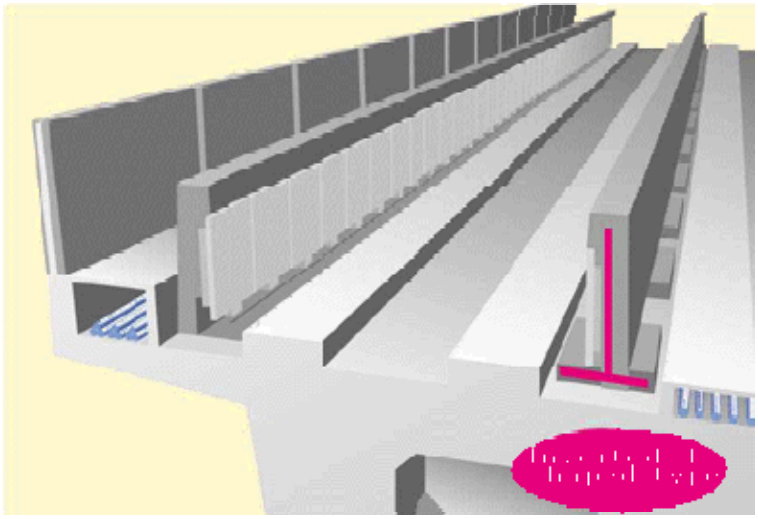


ب- Panel Method

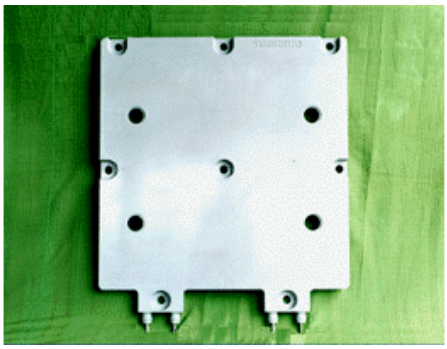


ج- Direct-Attachment Method

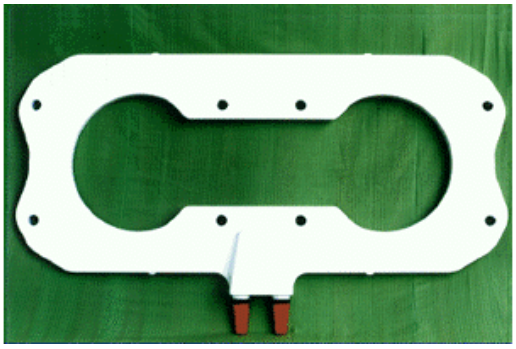
شکل ۹-۲۸ ساختار برش خورده روشهای ساخت مسیر راهنما



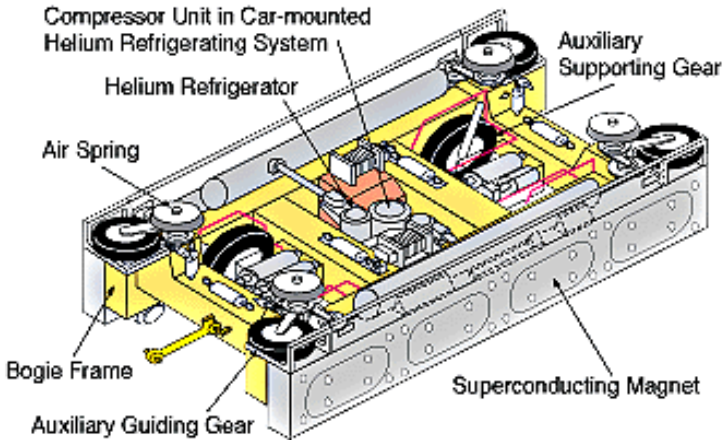
شکل ۹-۲۹- مسیر راهنما با دیواره هایی با شکل T معکوس

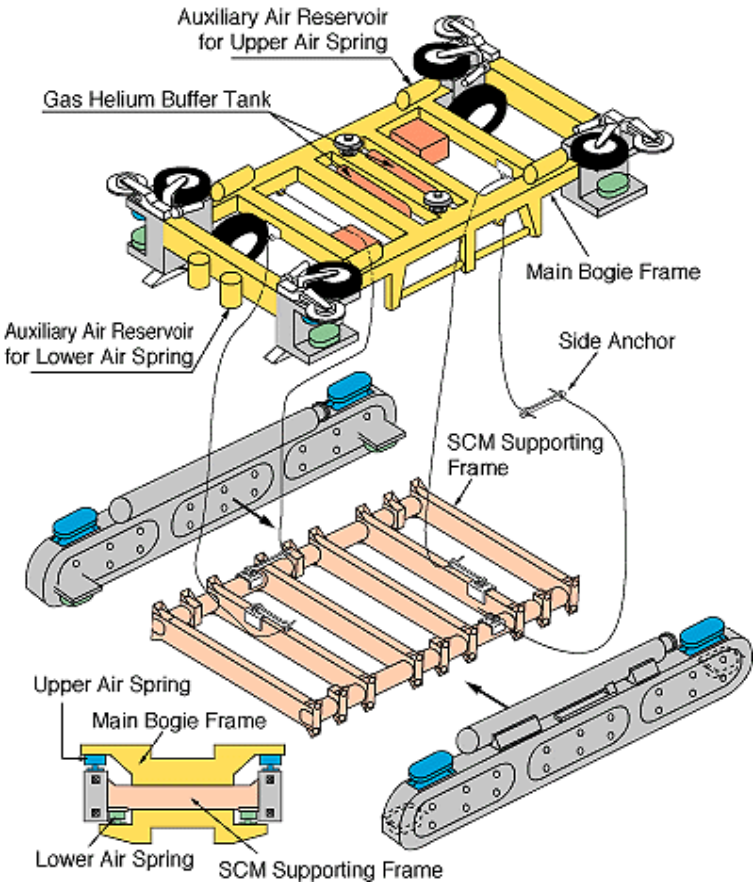


شکل ۹-۳۰- سیم پیچ تعلیق

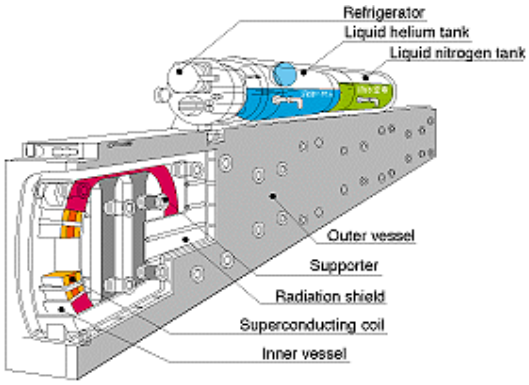


شکل ۹-۳۱- سیم پیچ جلوبرنده





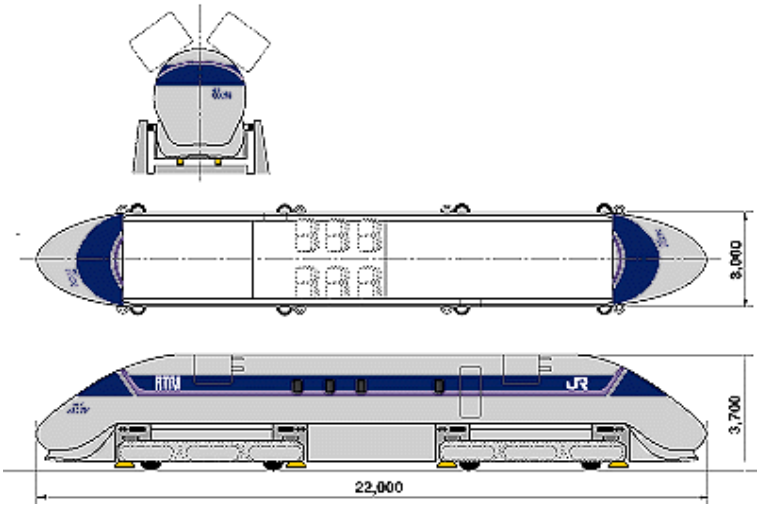
شکل ۹-۳۲ بوژی یک مگلو و اجزای آن



الف- شکل برش خورده مغناطیس ابر رسانا

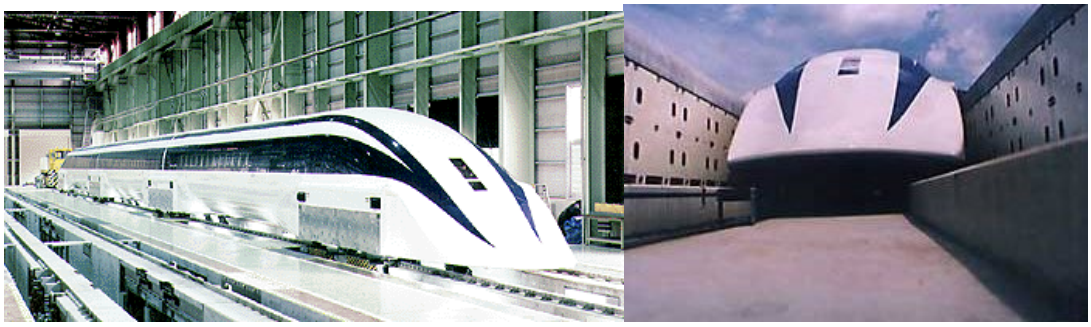
ب- ظاهر بیرونی مغناطیس ابر رسانای قطار MLX01

شکل ۹-۳۳ مغناطیس ابر رسانای قطار



شکل ۹-۳٤ طرح کلی مگلو MLX01

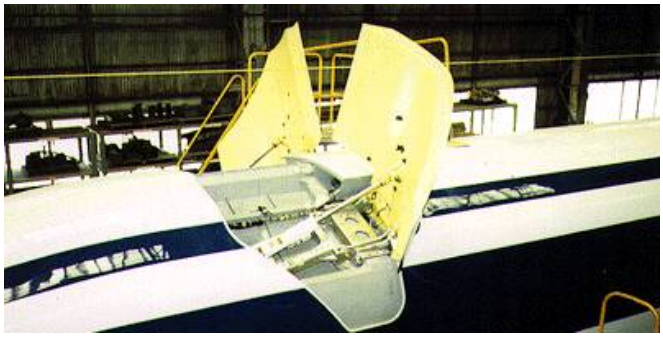
الف - MLX01 aero-wedge



ب- وMLX01 double cusp

ج-

شکل ۹-۳۵- انواع واگن جلو MLX01-901



شکل ۹-۳٦- ترمز آیرو دینامیک

۹-٤-۲-۵-سیستم الکترودینامیکی در قطار M2000

این نوع مگلو در آمریکا طراحی و ساخته خواهد شد. در طراحی این قطار عمدتا از روی پل عبور می کند و فقط در بعضی موارد از قبیل ایستگاهها روی سطح قرار می گیرد بنابر این برای کاهش هزینه پلها دو نوع مسیر راهنمای باریک[1] (برای روی پل) و مسطح[2] (برای روی سطح) برای آن در نظر گرفته شده است. تقریبا ۹۰ درصد مسیر از مسیر راهنمای باریک استفاده شده است. شکل ۹-۳۷ سطح مقطع مسیر راهنمای باریک را در یک مسیر دو خطه نشان می دهد. شکل۹-۳۸ موقعیت واگن و مسیر راهنما را در دو نوع باریک و مسطح نشان می دهد. فاصله هوائی بزرگ (۱۰ سانتیمتر)، کلیرانس بزرگ و پایداری هماهنگ و قوی این سیستم آنرا برای سرعتهای بالا مناسب ساخته است.

جدول ۹-۱ مشخصات دو نوع مگلو M2000 شهری و بین شهری را نشان می دهد.

ظرفیت مسافر	٦۰ نفر
وزن با بار	۱۵۰۰۰ کیلو گرم
فاصله هوایی تعلیق (فاصله واگن و خط)	۱۰ سانتیمتر
سرعت ماکریمم	۲٤۰ کیلومتر بر ساعت (برای بین شهری) ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت (برای درون شهری)
حداقل سرعت با داشتن تعلیق	صفر
حداکثر شتاب	۰/۲g
حداکثر شتاب ترمزی	۰/۲۵g حالت عادی ۰/٤G حالت اضطراری
مسافت توقف	۱۸۰ متر (در حالت عادی) ۹۰ متر (در حالت اضطراری و سرعت ۱۰۰

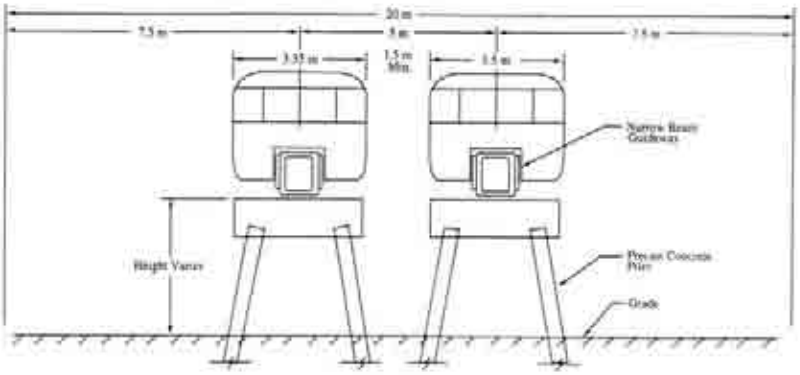
[1] narrow- beam
[2] planar section

	کیلومتر بر ساعت)

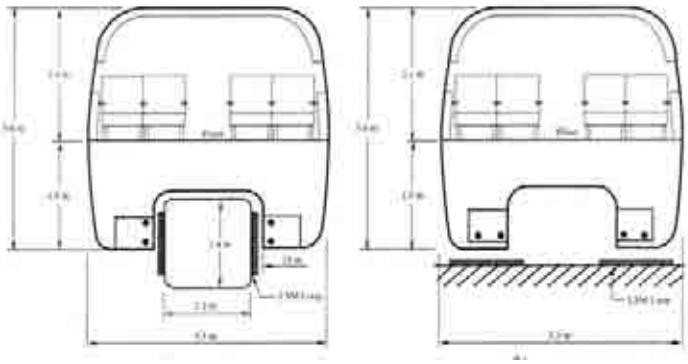
جدول ۹-۱ مشخصات دو نوع مگلو M2000 شهری و بین شهری

مسیر راهنمای باریک مطابق شکل ۹-۳۷ دارای یک سازه با سطح مقطع مستطیل شکل است که قطار با در میان گرفتن آن همیشه در مسیر خود باقی می ماند. سیم بندی آلومینیمی مسیر راهنما در طرفین این سازه نصب می شود. این سیم بندی دارای سه سیم پیچ جداگانه است. شکل ۹-۳۹ سیم پیچهای تعلیق، جلوبرنده و هدایتگر جانبی (پایدار ساز) را نشان می دهد.

سیم پیچ اول با شکل 8 انگلیسی با روش تعلیق با میدان خنثی نیروی عمودی جهت تعلیق پایدار واگن را تامین می کند. این سیم پیچها در تعداد زیاد و بدون اتصال الکتریکی با یکدیگر بصورت غیر پیوسته در کنار هم قرار می گیرند.



شکل ۹-۳۷- سطح مقطع مسیر راهنما در یک مسیر دو خطه



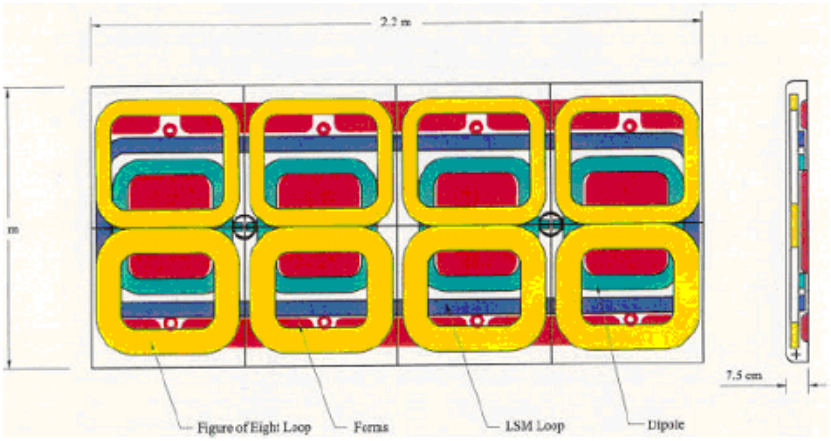
شکل ۹-۳۸- موقعیت واگن و مسیر راهنما در دو نوع باریک و مسطح

سیم پیچ دوم از دو قسمت سری شده تشکیل شده که این دو قسمت در طرفین سازه قرار می گیرند و با ایجاد مدار با میدان صفر نیروی پایدار کننده تعلیق را در امتداد افق تامین می کنند. این سیم پیچها نیز در تعداد زیاد و بصورت غیر پیوسته در کنار هم قرار می گیرند.

سیم پیچ سوم سیم بندی موتور سنکرون خطی است. این سیم پیچ در طول مسیر پیوسته است و جهت برقدار شدن فقط قسمتی که قطار در آن قرار دارد سیم بندی از قسمتهای مجزا تشکیل شده که از طریق کلیدهائی به هم متصل می شوند و بلاک های ۲۸۰ متری تشکیل می دهند.

مسیر راهنمای مسطح دارای سیم بندی مشابه مسیر راهنمای باریک است با این تفاوت که سیم بندی ها در دو طرف میر بصورت افقی قرار گرفته اند. در این حالت عملکرد سیم پیچها تغییر می کند. سیم پیچ به شکل 8 انگلیسی با ایجاد مدار با میدان صفر نیروی پایدار کننده تعلیق را در امتداد افق تامین می کند. سیم پیچ دو قسمتی در طرفین قطار با عمل کردن به صورت سیم بندی ساده (مانند مدار میدان صفر عمل نمی کنند) نیروی عمودی تعلیق را ایجاد می کند. سیم پیچ موتور سنکرون خطی عملکردی مشابه مدار مسیر راهنمای باریک خواهد داشت.

سیستم در سرعتهای بالاتر از ۳۰ کیلومتر بر ساعت پایدار است در سرعتهای کمتر از این مقدار با تغذیه سیسم پیچهای هدایتگر سیستم می تواند همچنان معلق بماند یا بر روی چرخهای کمکی قرار گیرد. همچنین می توان از ترکیب این دو حالت استفاده نمود.

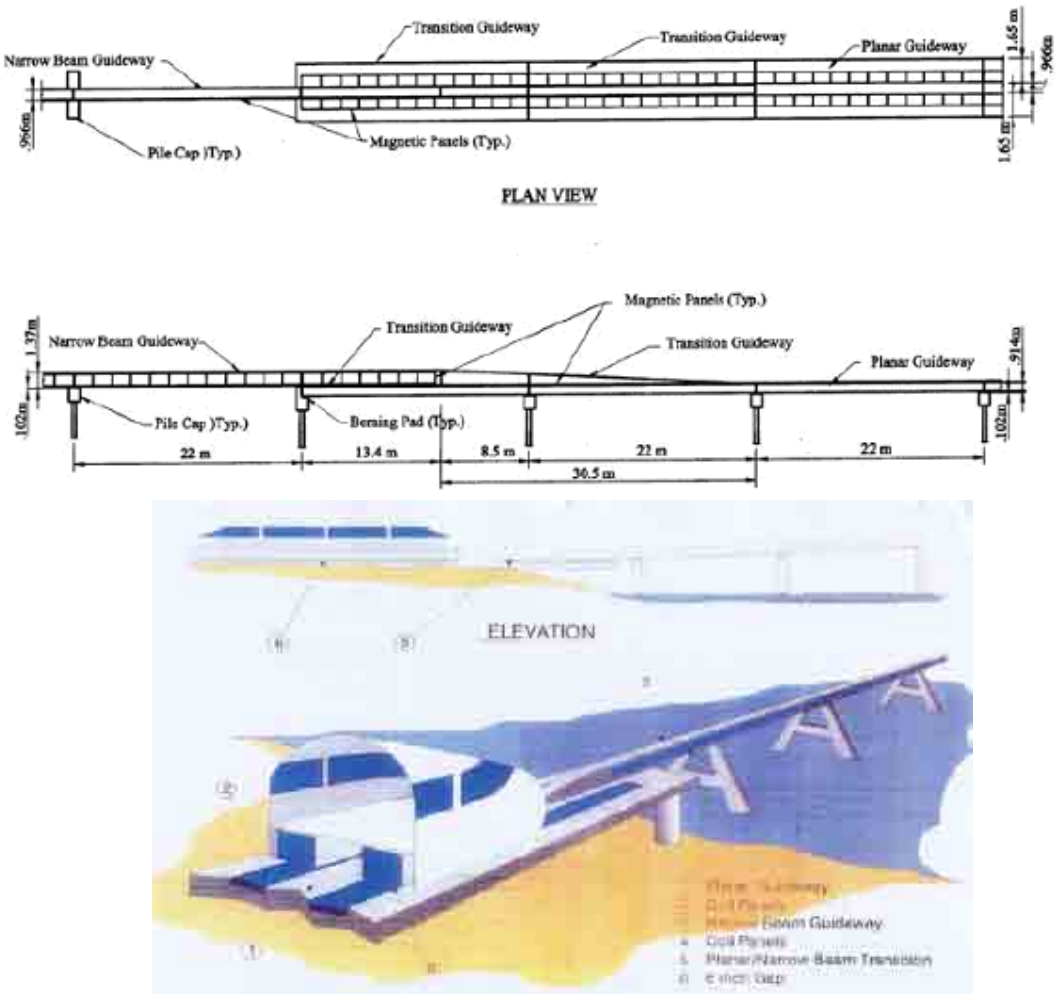


شکل ۹-۳۹ سیم پیچهای تعلیق جلوبرنده و هدایتگر جانبی (پایدار ساز)

با توجه به استفاده از دو نوع مسیر راهنما لازم است انتقال از یک نوع مسیر راهنما به نوع دیگر به آرامی صورت گیرد. شکل ۹-۴۰ انتقال از مسیر راهنمای مسطح به باریک را نشان می دهد.

هزینه احداث یک مسیر دو خطه ۷ میلیون دلار بر کیلومتر پیش بینی می شود.

نیروی کشش در این قطار توسط موتور سنکرون خطی تامین می شود.



شکل ۹-٤۰ انتقال از مسیر راهنمای مسطح به باریک

۹-٤-۳- سیستم Inductrack

سیستم Inductrack جدید تر، ساده تر، مطمئن تر و احتمالا ارزانتر از دو سیستم دیگر است. این سیستم مشابه سیستم الکترودینامیکی است با این تفاوت که بجای مغناطسیهای ابر رسانا از مغناطیسهای معمولی در آن استفاده شده است. این یک سیستم غیر فعال است که احتیاج به الکترومغناطیس یا سیستم کنترل برای حفظ پایداری سیستم تعلیق ندارد.

در گذشته استفاده از مغناطیس دائم در مگلو رایج نبود زیرا میدان این نوع مغناطیسها به اندازه کافی قوی نبود. با معرفی آلیاژهای جدید برای مغناطیسهای دائم امکان داشتن مغناطیسهای قوی مهیا گشت.

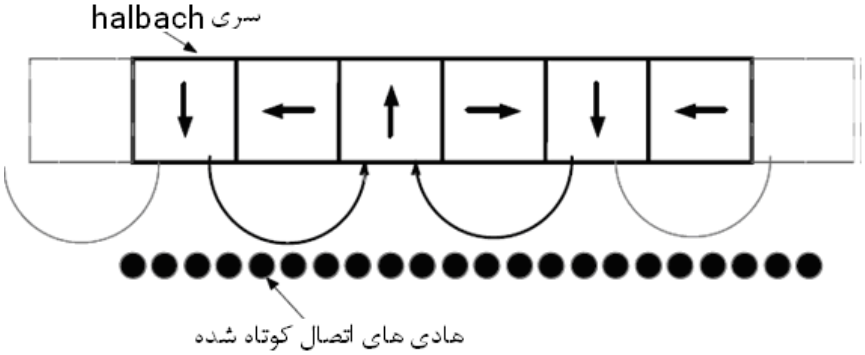
در این سیستم برای ایجاد میدان تعلیق نوع خاصی از مغناطیسهای دائم به نام سری Halbach در زیر واگن استفاده شد. سری Halbach آرایش خاصی از مغناطیسهای دائم است. سری Halbach با تمرکز میدان در

مقابل سری و حذف آن در پشت سری استفاده از مغناطیسها را بهینه می سازد. این امر باعث می شود که میدان در داخل واگن کوچک باشد در نتیجه جهت کاهش آثار میدان مغناطیسی بر مسافران نیازی به شیلد فلزی برای کابین مسافران نیست. میدان در مقابل سری بصورت سینوسی در طول سری تغییر می کند و با فاصله بصورت نمایی کاهش می یابد. در این سیستم احتیاج به مدار مغناطیسی و کفش قطب نیست.

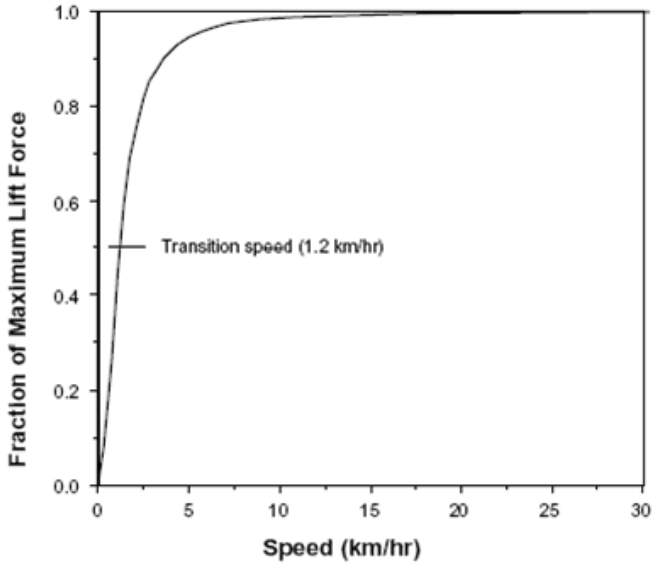
واگن روی یک خط هادی نردبانی شکل که حالت اتصال کوتاه دارند، حرکت می کند. با حرکت قطار میدان متناوب مغناطیسهای سری Halbach مطابق شکل ۹-٤۱ جریانی را در هادی های نردبانی القا می کنند که میدان ناشی از آن مغناطیسهای روی واگن را دفع می کند و باعث تعلیق واگن در فاصله ۲۵ میلیمتری می شود.

سیستم در مقابل قطع قدرت کاملا مطمئن است و ساده تر و ارزانتر از سایر سیستمهای موجود است. این سیستم برخلاف سیستمهای الکترودینامیکی و الکترومغناطیسی احتیاج به هیچ توانی در داخل قطار ندارد. در صورت قطع توان بصورت پایدار از سرعت قطار کاسته می شود به گونه ای که قطار بصورت ایمن روی چرخهای کمکی قرار می گیرد.

با افزایش سرعت نیروی بالابرنده و فاصله هوائی بتدریج افزایش می یابند و در سرعت ۸۰km/hr فاصله هوایی به مقدار نامی ۲۵ میلیمتر می رسد. شکل ۹-٤۲ منحنی تغییرات نیروی بالابرنده نسبت به سرعت و شکل ۹-٤۳ منحنی فاصله هوایی بر حسب سرعت را نشان می دهند.



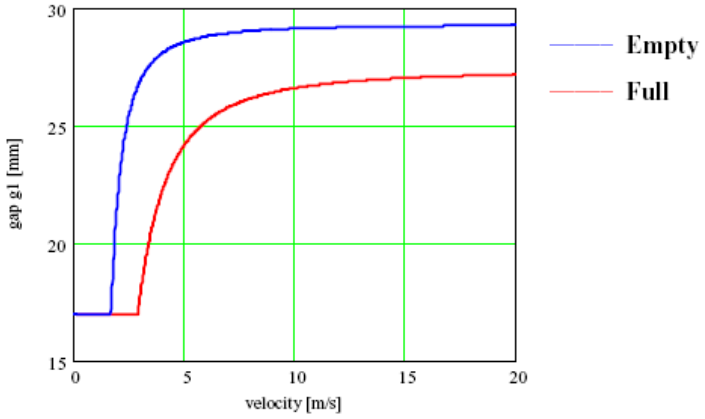
شکل ۹-٤۱ – سری Halbach و سیم پیچهای اتصال کوتاه شده روی مسیر راهنما



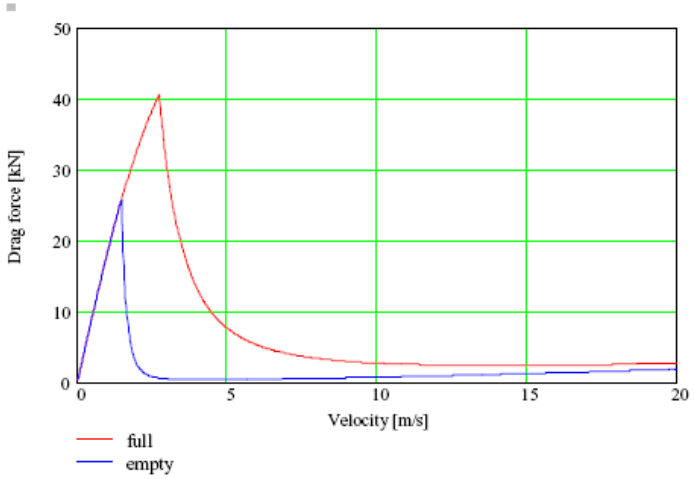
شکل ۹-۴۲- منحنی تغییرات نیروی بالابرنده نسبت به سرعت

نیروی مقاوم مغناطیسی در ابتدا افزایش می یابد اما با شروع تعلیق سریع کاهش می یابد (منحنی دارای مقدار ماکزیمم در نقطه شروع تعلیق خواهد بود). شکل ۹-۴۴ منحنی نیروی مقاوم مغناطیسی را بر حسب سرعت نشان می دهند

از مزایای این سیستم آن است که قطار در سرعتی کمتر از ۱۰ کیلومتر در ساعت (۲/۷ متر بر ثانیه) به حالت تعلیق در می آید که این امر ضریب ایمنی آنرا بالا می برد.



شکل ۹-۴۳ منحنی فاصله هوایی بر حسب سرعت

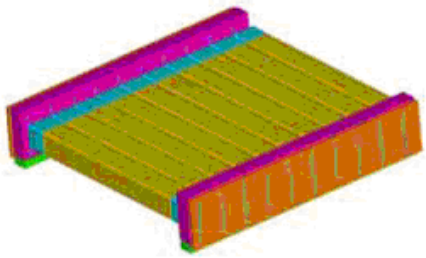


شکل ۹-٤٤ منحنی نیروی مقاوم مغناطیسی را بر حسب سرعت

هادی های مسیر راهنما ممکن است به دو صورت باشند در نوع اول که نردبانی نامیده می شود، میله هایی در عرض خط کنار هم قرار گرفته و دو انتهایشان توسط باسبارهائی به هم متصل می شود (اتصال کوتاه می شود) این مجموعه ممکن است در قابهای فولادی قرار گیرد. در نوع دوم ورقه های مسی یا آلومینیمی که با کامپوزیتهای خاص تقویت شده اند به عنوان هادی مسیر راهنما استفاده می شوند. شکل ۹-٤٥ این نوع هادیها را نشان می دهد.

بعد از اولین نمونه Inductrack طرح Inductrack II با سری دوگانه Halbach جهت افزایش میدان مغناطیسی معرفی شد.در این طرح دو سری Halbach مطابق شکل ۹-٤٦ در بالا و پایین هادیهای نردبانی مسیر راهنما قرار می گیرند.

هادی ورقه ای مسیر راهنما



هادی نردبانی مسیر راهنما

شکل ۹-٤٥- انواع هادی های مسیر راهنما

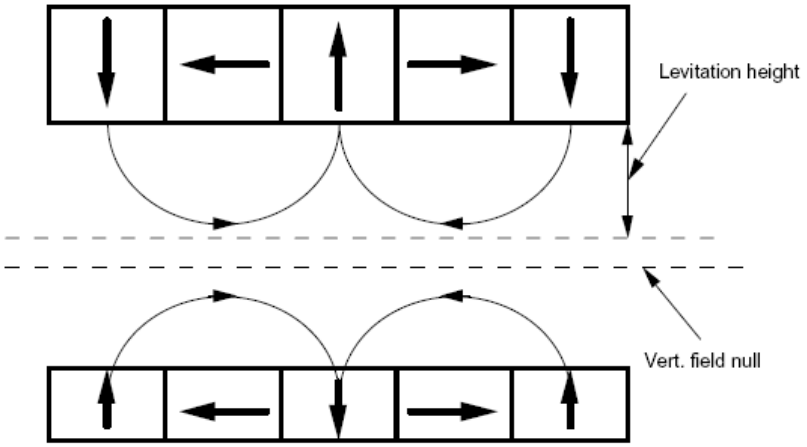
مطابق شکل ۹-٤٦ مولفه افقی دوسری Halbach با هم جمع می شوند در حالیکه مولفه های عمودی یکدیگر را خنثی می کنند. این طرح در وزن و مساحت ثابت نیاز به جریان کمتری (تقریبا نصف) برای تعلیق دارد بنابراین در سرعت کم نیروی مقاوم کمتر (راندمان تعلیق بیشتر) دارد که برای سیستمهای درون

شهری بسیار مناسب است لذا پیش بینی می شود اولین کاربرد عملی Inductrack در مسیرهای درون شهری باشد.

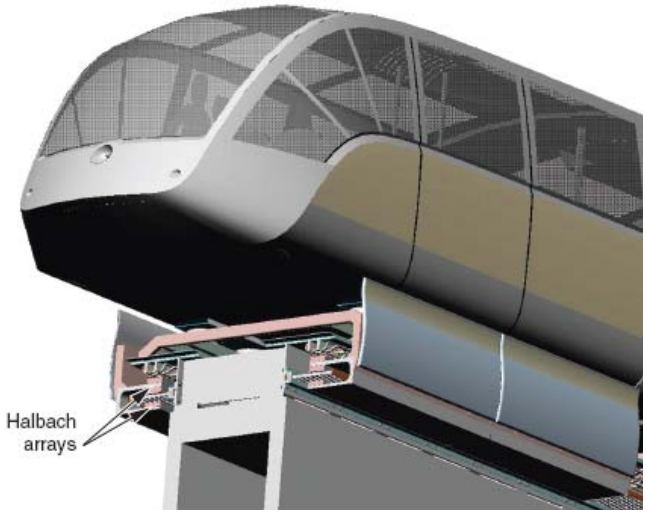
شکل ۹-۴۷ طرح کلی Inductrack II و شکل ۹-۴۸ سیم بندی موتور سنکرون خطی و شکل ۹-۴۹ طرحی از هادیهای نردبانی و سیم بندی موتور سنکرون خطی روی مسیر راهنما را نشان می دهند.

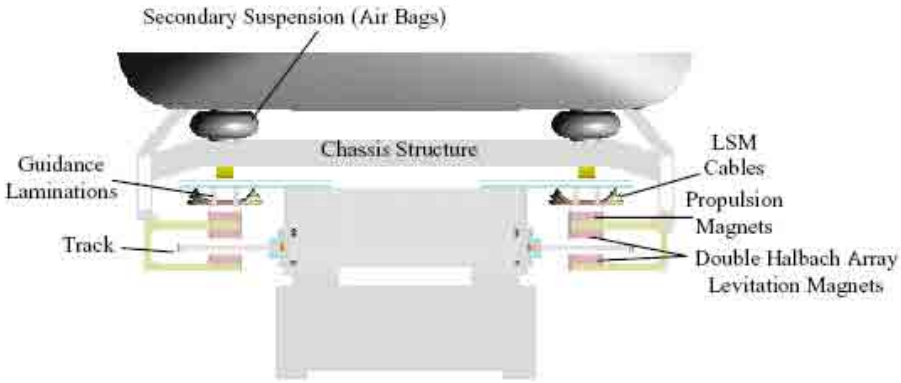
با توجه به اینکه Inductrack فقط برای تعلیق بکار می رود برای به حرکت در آوردن و ترمز قطار نیاز به عامل دیگری است. این عامل می تواند یک موتور سنکرون با آسنکرون خطی یا یک موتور جت باشد. به علت فاصله هوایی زیاد موتور سنکرون خطی کارآیی بهتری نسبت به موتور آسنکرون خطی دارد، علاوه بر این هزینه استفاده از این نوع موتور کمتر خواهد بود.

در این سیستم معمولا موتور سنکرون خطی مورد استفاده قرار گرفته است که در آن مغناطیسهای جداگانه در واگن در حکم القا کننده هستند.

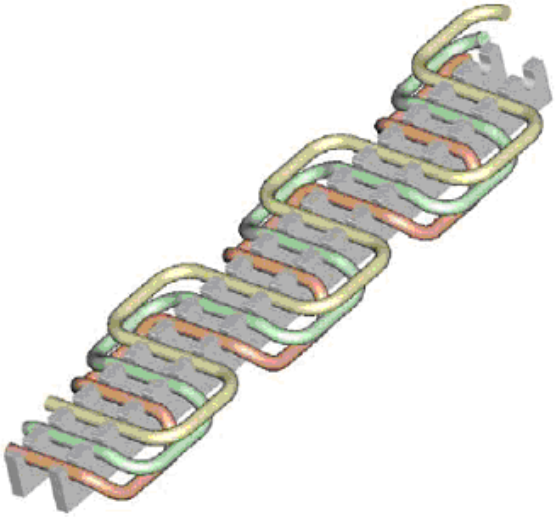


شکل ۹-۴۶ – طرح Inductrack II با سری دوگانه Halbach در بالا و پایین هادیهای مسیر راهنما.

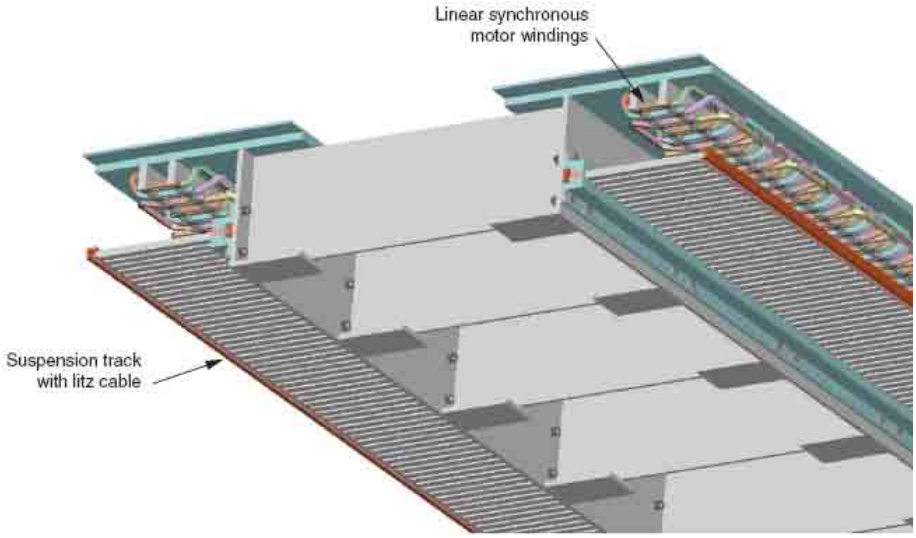




۹-۴۷- طرحی از Inductrack با دو سری Halbach روی خط



شکل ۹-۴۸ سیم بندی موتور سنکرون خطی



۹-۴۹- طرحی از خط Inductrack و هادیهای نردبانی و سیم بندی موتور سنکرون خطی روی خط

۹-٤-٤- مقایسه تکنولوژی های مختلف

۹-٤-٤-۱- مقایسه دو سیستم EDL و EML

آلمان و ژاپن هر دو در حال توسعه فناوری ساخت قطار مشغول آزمایش نمونه‌های ساخته شده از این قطار هستند. اگر چه قطارهای ساخته شده توسط این دوکشور دارای اصول اولیه مشابهی هستند، اما قطارهای آلمانی و ژاپنی تفاوتهای زیادی دارند.

تفاوت کلیدی بین مگلو آلمانی و ژاپنی این است که قطارهای ژاپنی از الکترومغناطیسهای ابر رسانای دمای پایین (ابر رساناهایی که در دمای نزدیک صفر مطلق ماهیت ابر رسانایی از خود نشان می‌دهند) استفاده می‌کنند. این نوع از الکترومغناطیس می‌تواند الکتریسیته را حتی بعد از آنکه انتقال انرژی قطع شد، نیز هدایت کند. در سیستم EMS که از الکترومغناطیسهای استاندارد بهره می‌گیرد، سیم پیچ ها تنها هنگامی که انتقال انرژی برقرار است، می‌تواند الکتریسیته را هدایت نماید.

تفاوت دیگری که بین سیستمهایی که آلمانی‌ها و ژاپنی‌ها در قطارهای خود بکار گرفته‌اند، مشاهده می‌شود این است که قطارهای ژاپنی نزدیک ۱۰ سانتیمتر بالاتر از مسیر راهنما شناور هستند. یک نکته منفی در استفاده از سیستم EDS آن است که این قطارها باید بر روی تایرهای لاستیکی حرکت کنند تا به سرعت ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت برسند. مهندسان ژاپنی معتقدند که این چرخها برای قطار مگلو یک مزیت است. زیرا اگر در انتقال انرژی اشکالی رخ دهد، قطار می‌تواند بر روی چرخهای خود حرکت نماید. اما قطار ترنس‌رپید برای جلوگیری از اشکالات احتمالی از یک باطری انتقال انرژی اضطراری کمک گرفته است.

تفاوت اساسی دیگری که بین دو سیستم EDL و EML وجود دارد آن است که در سیستم EDL سیستم بصورت اتوماتیک پایدار است و احتیاج به سیستم کنترل تعلیق ندارد. در این سیستم هر گونه انحراف از سیستم تعادل در تعلیق نیروی مغناطیسی قویی ایجاد می کند که واگن را به حالت تعادل بر می گرداند. در مقابل در سیستم EML سیستم تعلیق اصولا ناپایدار است و موقعیت سیستم تعلیق باید توسط سیستم کنترلی بسیار سریع که در واگن وجود دارد دائما کنترل و با کنترل جریان سیم پیچها تعلیق تنظیم شود. به عبارت دیگر باید بین واگن و مسیر راهنما تماس جهت انتقال اطلاعات وجود داشته باشد.

یک امتیاز EDL سبک بودن واگن است زیرا فقط احتیاج به مغناطیس های سبک برای تعلیق و حرکت دارد. این سیستم احتیاج به زیر ساختهای سنگین ندارد.

۹-٤-٤-۲-مقایسه سه روش

روشهای Inductrack و الکترودینامیکی فقط برای تعلیق بکار می روند و برای تامین نیروی کشش احتیاج به روش دیگر مانند موتور جت یا موتورهای خطی دارند (مانند موتور خطی در مگلو ژاپنی MLX01)

در روش الکترومغناطیسی یک موتور خطی همزمان برای تعلیق و کشش بکار می رود.

روشهای Inductrack و الکترودینامیکی نمی توانند مگلو را در حالت سکون در حال تعلیق نگهدارند و برای سرعت کم و توقف احتیاج به چرخ دارند، اگرچه Inductrack در سرعت کمتری همچنان دارای نیروی تعلیق است. در حالیکه روش الکترومغناطیسی فاقد چرخ است.

این سه تکنولوژی هریک دارای مزایا و معایب خاص خود هستند جدول ۹-۲ مشخصات این سه تکنولوژی را با هم مقایسه می کند.

.

تکنولوژی	محاسن	معایب
EMS (Electromagnetic)	- براساس نیروی دافعه عمل می کند - به علت سبک بودن می تواند سرعت بالا (۵۰۰ km/h) داشته باشد - شدت میدان در اطراف و داخل قطار ناچیز است - از نظر تجاری دارای تکنولوژی قابل اجرا است - دارای سیستم کامپیوتری قابل اطمینان است	- استاتور در طول مسیر نصب می شود که هزینه احداث مسیر راهنما را بالا می برد
Superconducting EDS (Electrodynamic)	- مغناطیسهای ابر رسانای قوی در داخل واگن رکورد سرعت ۵۸۱ km/h و قابلیت حمل بار زیاد را ممکن ساخته است	- میدان در اطراف و داخل قطار شدید است به گونه ای که روی خیلی از وسایل مانند هارد دیسک کامپیوتر و ... تاثیر منفی دارد - برای سرعت کم احتیاج به چرخ دارد. - هزینه احداث خط زیاد است

Inductrack System (Permanent Magnets)	- تعلیق ایمن و قابل اعتماد - مغناطیس ها احتیاج به منبع انرژی ندارند - در سرعتهای کم (۵ کیلومتر بر ساعت) نیروی کافی برای تعلیق دارد - در صورت قطع ناگهانی انرژی، سرعت واگن بصورت ایمن، پایدار و قابل کنترل تا توقف کامل کم می شود.	- احتیاج به چرخ کمکی دارد - هنوز نمونه صنعتی یا آزمایشی در مقیاس واقعی از آن ساخته نشده است.

جدول ۹-۲ جدول مقایسه ای مشخصات سه تکنولوژی