

خط بالاسری و ولتاژ آن در خطوط برقی راه آهن

محور مقاله: طراحی و انتخاب ناوگان برقی

فراز بدر^۱

چکیده

با توجه به رویکرد جدید راه آهن کشور در گسترش خطوط برقی، لزوم مطالعه و تحقیق در خصوص ابعاد مختلف راه آهن برقی بیش از پیش افزایش یافته است. ولتاژ خطوط برقی در دنیا از گستردگی بالایی برخوردار است که انتخاب نوع (AC یا DC) و مقدار ولتاژ بستگی کامل به شرایط حاکم بر پروژه خواهد داشت. هدف اصلی این مقاله تبیین اصولی جهت انتخاب صحیح نوع و مقدار ولتاژ می باشد. بدین منظور پس از مقدمه ای مختصر، انواع ولتاژ و روشهای بازگشت جریان به منبع معرفی می گردد، در پایان نیز به مقایسه ای کلی بین سیستم های مختلف تغذیه انجام می شود.

کلمات کلیدی

خط بالاسری، ولتاژ خطوط برقی، سیستم تغذیه AC&DC، بازگشت جریان به روش های AT&BT

۱- مقدمه

لکوموتیو و واگن محرک برقی را می توان به عنوان پیشرفتهایی طبیعی پس از موتور بخار در نظر گرفت. شرایط جدید، استانداردهای جدیدی را هم در سفر با خط آهن ایجاد کرد که به عنوان مثال می توان به گسترش سریع خدمات رسانی قطارهای برقی حومه ای به شهرکهای اطراف شهرهای بزرگ اشاره نمود. راه آهن های برقی بطور عمده به دو دسته جریان متناوب و جریان مستقیم تقسیم می شوند. راه آهن برقی در ابتدا با سیستم تغذیه جریان مستقیم آغاز شد که علاوه بر توانایی به حرکت درآوردن موتور DC، از نیروی کشش بالا و کنترل آسان سرعت برخوردار بودند.

مزایای استفاده از جریان متناوب به جای جریان مستقیم، موجب تسریع در انجام آزمایشات (عملی) و کاربردهای ابتدایی شد. با استفاده از جریان متناوب، خصوصاً با ولتاژهای نسبتاً بالای خط بالاسری (۱۰,۰۰۰ ولت یا بالاتر)، ایستگاههای فرعی کمتر و سیم تغذیه کننده جریان بالاسری سبک تر (با طبع تجهیزات نگهدارنده سبک تر) مورد نیاز است که این موضوع می تواند به کم کردن هزینه های خط برقی کمک شایانی کند.

از سوی دیگر از روشهای تغذیه قطار برقی در خطوط برقی راه آهن را می توان به دو دسته کلی تقسیم نمود:

- خط بالاسری
- ریل سوم

تاکید بیشتر این مقاله بر خطوط مجهز به خط بالاسری می باشد.

^۱ کارشناس طراحی محصول - شرکت صنایع ریلی ایران خودرو، Badr@irico.ir، تهران - بلوار آفریقا - خ شهید بابک

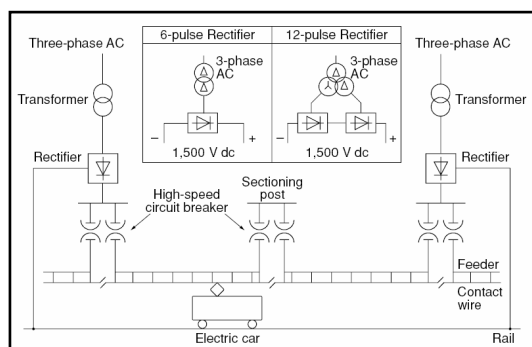
بهرامی - پ ۸۳ و تلفن تماس: ۰۲۱-۸۸۶۵۱۷۳۱

۲- سیستم های مختلف تغذیه در خطوط برقی

۲-۱- سیستم تغذیه DC [7], [9], [12]

همان گونه که اشاره شد خطوط برقی در ابتدا با سیستم تغذیه جریان مستقیم آغاز شد که علاوه بر توانایی به حرکت درآوردن موتور DC، از نیروی کشش بالا و کنترل آسان سرعت برخوردار بودند. از طرفی استفاده از موتورهای DC سری شده با نیاز خودروهایی ریلی (بیشترین گشتاور در ابتدای حرکت و کاهش این گشتاور با افزایش سرعت) نیز مطابقت داشت. از آنجایی که در آن زمان تغییر ولتاژ DC تنها با سری نمودن یک مقاومت با موتور قطار ممکن بود (اتلاف شدید انرژی) لذا مجموع ولتاژهای مورد نیاز قطار را بدون هیچ گونه تغییری از طریق خط برقی بدان می‌رسانند، مثلاً با انتخاب ولتاژ ۱۵۰۰ ولت DC برای خط، دو موتور DC با ولتاژ ۷۵۰ ولت را در لکوموتیو با هم سری می‌نمودند. بدلیل ولتاژ پایین خط جریان بالایی از خود عبور داده و افت ولتاژ افزایش می‌یابد، در نتیجه برای جبران این افت در خطوط DC فاصله ایستگاه ها (شامل یکسو کننده) در طول خط می‌باید کاهش یابد.

در این سیستم از یکسو کننده سیلیکونی سه فاز^۱ برای تبدیل جریان برق متناوب به جریان برق مستقیم استفاده می‌شود. از آنجایی که یکسوکننده سه فازی که از سیستم ۶ پالس استفاده می‌نماید، منجر به کاهش هارمونیکهای AC و ایجاد اختلال در شکل موج ولتاژ و پایین آمدن کیفیت برق می‌شود. برای کاهش هارمونیکها، طرح مدرن تر یکسوکننده استفاده می‌گردد که در آن از یک سیستم ۱۲- پالسی متشکل از ۲ سری مدار یکسو کننده ۶ پالس که فازهای ولتاژ ورودی AC آن در زاویه ۳۰ درجه از یکدیگر قرار دارند و به صورت سری یا موازی به هم متصل می‌شوند. تصویر ۲۱ ساختار مدار تغذیه DC متصل شده به نزدیکترین پست فرعی است.



تصویر ۱- ساختار یک خط تغذیه DC [7]

فاصله بین پستهای فرعی حدود ۵ کیلومتر در خطوط سراسری کلان شهری و ۱۰ کیلومتر در دیگر خطوط است. هرچند این چیدمان برای خطوط شهری و حومه ای مناسب بود (هنوز هم مناسب است) ولی در خطوط بین شهری بدلیل بالا رفتن هزینه نصب تعداد زیاد ایستگاه مشکل ساز بوده و هست. یک راه حل منطقی جهت رفع این مشکل استفاده از ولتاژ بالای AC در خطوط برقی می‌باشد. بدین ترتیب علاوه بر کاهش افت در خط با نصب یک ترانسفورماتور بر روی قطار می‌توان ولتاژ را تا حد دلخواه کاهش داد.

راه آهنهایی که در کشور ژاپن با جریان برق مستقیم کار می‌کنند، ولتاژ دریافتی در پست های فرعی معمولاً ۲۲، ۶۶ یا ۷۷ کیلوولت AC است. سپس این میزان توسط یک ترانسفورماتور به ۱۲۰۰ ولت و پس از آن به وسیله یکسوکننده در ولتاژ ۱۵۰۰ ولت (ولتاژ بی بار ۱۶۲۰ ولت) به جریان برق مستقیم تبدیل می‌شود. در متروها و بعضی راه آهنها از ۶۰۰ یا ۷۵۰ ولت جریان مستقیم استفاده می‌شود.

¹ Three-phase bridged silicon rectifier

۲-۲- سیستم تغذیه AC [6], [5], [12], [3], [11], [10], [7]

موتورهای AC تک فاز اولیه توان کافی برای به حرکت درآوردن قطار را نداشتند در نتیجه در آغاز استفاده از ولتاژ AC برای رساندن توان به قطار، موتور محرک لکوموتیو از نوع DC بود. در این حالت (با وجود موتور DC در قطار برقی) یکی از پروسه های زیر می بایست انجام می پذیرفت:

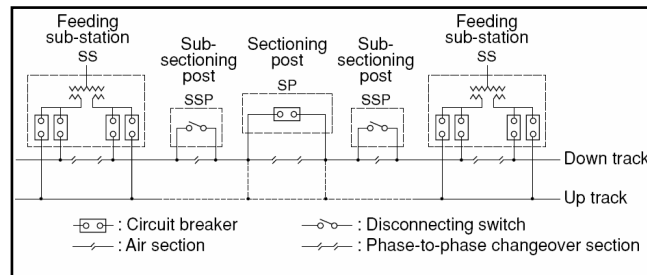
- یکسوم نمودن جریان متناوب توسط یکسوکننده^۱ هایی که بر روی لکوموتیو نصب می گردید. در نتیجه می توانستند بدون هیچ گونه تغییری در سیستم رانش ولتاژ خط را متناوب نمایند.
 - طراحی و ساخت موتورهایی که با جریان متناوب تک فاز کار کند.
- هر دو روش به کار گرفته شد ولی از آنجایی که یکسوکننده های جیوه ای^۲ که در آن زمان در ایستگاه های تغذیه مورد استفاده قرار می گرفتند برای نصب بر روی قطار مناسب نبودند، چند کشور اقدام به طراحی موتورهای AC با مشخصاتی نزدیک به نوع DC آن نمودند. این موتورها با ورودی متناوب فرکانس پایین ($16\frac{2}{3} Hz$ برابر یک سوم ۵۰ هرتز) کار می نمودند. هنوز هم در کشورهای آلمان، سوییس، اتریش، نروژ و سوئد از جریان با فرکانس پایین ($16\frac{2}{3} Hz$ و $25 Hz$) استفاده می شود. این جریان متناوب فرکانس پایین یا توسط شبکه توزیع برق فشار قوی جداگانه ای تامین می شود (آلمان) و یا می باید مبدل های فرکانس (سوئد) در ایستگاه ها نصب گردد.
- پس از آن با پیشرفت های صورت پذیرفته در فناوری کموتاتورهای سیلیکونی^۳ راه برای استفاده از فرکانس شبکه توزیع برق (۵۰ یا ۶۰ هرتز) باز شد و در حال حاضر برق در خطوط ریلی بین شهری و سرعت بالا مستقیماً از شبکه توزیع برق (۲۵ کیلوولت و ۵۰ هرتز) منشعب می گردد. در ژاپن برای خطوط شینکانسن از سیستم ۲۵ کیلوولت و برای خطوط معمولی (تمامی خطوط گیج-باریک JNR/JR، تمامی راه آهنهای غیر JR و شینکانسن آکیتا و یاماگاتا است که بعدها از عرض خط باریک به عرض خط استاندارد تغییر یافتند) از سیستم تغذیه جریان متناوب ۲۰ کیلوولت استفاده می شود.
- با استفاده از جریان متناوب ۲۵ کیلوولت، ۵۰ هرتز علاوه بر اینکه افت توان در خط کاهش می یابد دیگر نیازی به شبکه توزیع برق جداگانه و یا نصب مبدل های فرکانس در ایستگاه ها نخواهد بود. در مقابل جریان فرکانس پایین در موارد معدودی نسبت به جریان با فرکانس ۵۰ هرتز برتری دارد که در این جا به دو مورد آن اشاره می شود:
- در شبکه با فرکانس ۱۶/۶۶ هرتز بدلیل استفاده از موتورهای مخصوص، تنها با نصب یک ترانسفورماتور در قطار و کاهش سطح ولتاژ می توان ورودی مورد نیاز موتورها را تامین نمود ولی در خط با ولتاژ ۲۵ کیلوولت، ۵۰ هرتز علاوه بر پایین آوردن سطح ولتاژ با ترانسفورماتور، این جریان باید به یک جریان مستقیم و یا جریان فرکانس متغیر متناوب تبدیل شود تا بتوان از آن در موتور استفاده نمود. همان گونه که در ادامه خواهد آمد در قطارهایی که از موتور القایی سه فاز استفاده می شود، جریان خط ابتدا DC شده و سپس توسط اینورتر به جریان متناوب سه فاز با ولتاژ و فرکانس متغیر تبدیل می شود.
 - برخلاف سیستم ۱۶/۶۶ هرتزی که شبکه توزیع جدا داشته باشد، در سیستم ۵۰ هرتز می باید ملاحظات لازم جهت جلوگیری از ایجاد عدم توازن در شبکه اصلی (بدلیل استفاده از تنها یک فاز آن) صورت پذیرد.
- در خطوطی که از برق با فرکانس تجاری (۵۰ هرتز) استفاده می کنند، برق مورد نیاز مستقیماً از شبکه توزیع برق شهری دریافت می گردد. بدین منظور توان سه فاز از منبع توان به دو تک فاز جداگانه تبدیل می شود (به منظور نزدیک نمودن ماهیت جریان به سه خط در جریان سه فاز اولیه)، یک فاز جداگانه به هر یک از خطوط بالاسری در مسیر رفت و برگشت تغذیه

¹ Rectifier

² Mercury-arc rectifier

³ Silicon commutator

می‌گردد. تصویر ۲ نشان دهنده اجزای مدار تغذیه جریان برق متناوب AC است. پست های فرعی تغذیه، به وسیله یک ترانسفورماتور دو تک فاز را (که از سه فاز منبع تبدیل شده اند) با اختلاف فاز ۹۰ درجه به خط رفت و برگشت تزریق می‌نمایند.



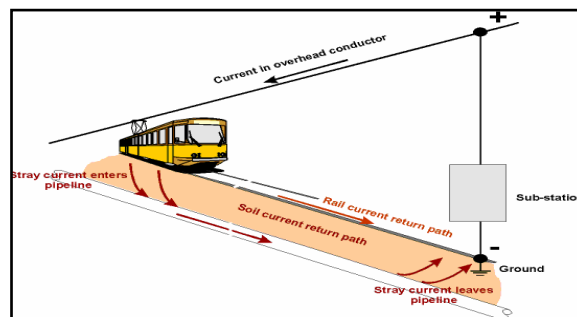
تصویر ۲- ساختار یک خط تغذیه AC [7]

ولتاژ دریافتی برای راه آهنهای دارای برق AC ولتاژ بسیار بالای ۶۶، ۷۷، ۱۰۰ یا ۱۵۴ کیلوولتی است. قطارهای شینکالنسن از برق دریافتی ۷۷، ۲۲۰، ۱۵۴ یا ۲۷۵ کیلوولت استفاده می‌نمایند. باید دقت شود که این ولتاژ جهت رسیدن به قطار کاهش خواهد یافت.

۳- روشهای بازگشت جریان به منبع در خطوط برقی

۳-۱- سیستم تغذیه ساده^۱ بدون تغذیه کننده منفی [7]

در این سیستم (تصویر ۳) جریان از طریق سیم اتصال به قطار برقی ارسال شده و بخشی از جریان بازگشتی در ریل (I_R) و بخشی دیگر در زمین (I_E) جریان می‌یابد.



تصویر ۳- ساختار یک خط تغذیه ساده

۳-۲- سیستم تغذیه ساده با تغذیه کننده منفی [2]

در این حالت یک هادی به نام تغذیه کننده منفی^۲ به سیستم تغذیه ساده اضافه می‌گردد. این هادی به صورت هوایی و در مجاورت سیم اتصال (هر دو روی یک تیر) نصب شده و در نقاطی از مسیر به ریل متصل می‌شود. این ساختار موجب تقسیم جریان قطار بین دو سیم تغذیه کننده منفی و ریل (و بالطبع کاهش نشتی ریل به زمین) می‌گردد. از طرفی مجاورت جریان های تک فاز و مخالف دو هادی هوایی تغذیه کننده منفی و سیم اتصال نیز باعث تضعیف میدان مغناطیسی منتهجه آنها خواهد شد و در نتیجه هر دو اثر محدود کننده تداخل امواج و افت ولتاژ در این حالت کمی بهبود

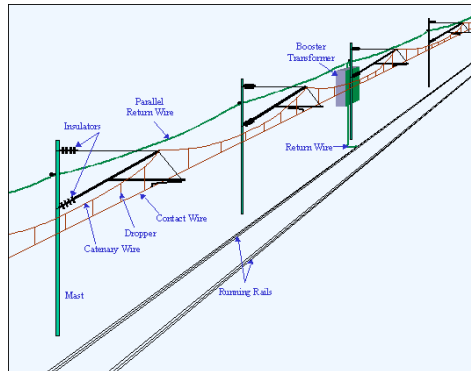
¹ Simple feeding system

² Negative feeder

می یابد. بعلاوه شکستگی یک نقطه از ریل باعث قطع مدار برق رسانی به قطار نیست، به عبارتی دیگر قابلیت اطمینان این شبکه افزایش خواهد یافت. سیم برگشت را می توان در زیر خاک و یا بصورت هوایی نصب نمود لکن باید توجه داشت که مقدار امپدانس خط بالاسری در شرایطی که NF بصورت هوایی نصب شود کمتر می باشد.

۳-۳- سیستم تغذیه (BT) [7]

تصویر ۴ نشاندهنده اجزای یک سیستم تغذیه (BT) Booster Transformer می باشد. این سیستم در هر ۴ کیلومتر از سیم تماس قرار گرفته و کار آن تقویت جریان مدار بازگشت در خط منفی است.

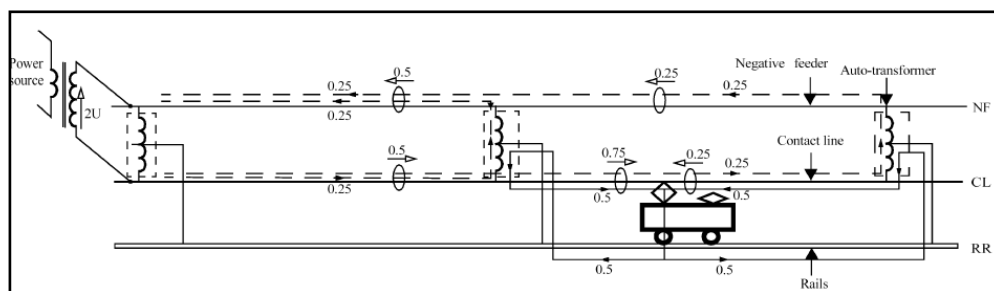


تصویر ۴- ساختار یک خط تغذیه BT با خط برگشت [12]

این طرح باعث کاهش تداخل القایی در خطوط ارتباطی می شود زیرا جریان برق فقط در بخشهای محدود در ریل جریان می یابد. در حالت خاص باید به این نکته اشاره نمود که زمانی که قطار برقی از یک بخش BT می گذرد بار بالای جریان می تواند باعث جرقه های عظیمی شود که می تواند به سیم بالاسری آسیب برساند. لذا به منظور جبران راکتانس و کاهش میزان جریان قطع شده به وسیله پانتوگراف و در نتیجه کاهش جرقه و همچنین ممانعت از افت فشار، اغلب خازن هایی را به طور سری در سیم تغذیه منفی قرار می دهند. در سال ۱۳۶۱ در مسیر تبریز- جلفا حدود ۱۴۶ کیلومتر خط برقی با همین سیستم تاسیس شد.

۴-۳- سیستم تغذیه (AT) [7],[5],[10]

در سیستم تغذیه AT، ولتاژ تغذیه پست فرعی برق دو برابر ولتاژی است که قطار جهت حرکت نیاز دارد. یک AT که هر ۱۰ کیلومتر در طول خط قرار می گیرد ولتاژ سیم بالاسری را تا حدود نیاز پایین می آورد. این امر در کاهش تداخل القایی در خطوط ارتباطی بسیار حائز اهمیت است. تصویر ۶ نشان دهنده اجزای سیستم تغذیه AT است. در ژاپن، AT به نسبت ۱:۱ طراحی شده و ولتاژ تغذیه پست فرعی برق دو برابر ولتاژ سیم بالاسری است. این سیستم برای سرعت های بالا و واگنهای برقی دارای ظرفیت بسیار مناسب است زیرا در هیچ بخشی افت فشار زیاد و یا جرقه وجود ندارد.



تصویر ۵- ساختار یک خط تغذیه AT [5]

خط ۵ متروی تهران با ولتاژ 2×25 کیلوولت AC از همین سیستم استفاده می‌نماید.

۵-۳- مقایسه دو سیستم AT و BT [4], [13], [2]

- فاصله بین دو پست کشش: حداکثر مسافتی که یک پست کششی قادر به تغذیه قطار است توسط دو عامل افت ولتاژ دو سر قطار و اثر تداخل امواج محدود می‌شود و همان گونه که اشاره گردید این مسافت در سیستم اتوترانس بدلیل افزایش ولتاژ خطوط و کاهش دو عامل مذکور، افزایش می‌یابد.
- از طرفی مقاومت امپدانسی خط در سیستم AT کاهش می‌یابد (جدول ۱)

جدول ۱- مقادیر امپدانسی مدار در سیستمهای مختلف بالاسری (راه آهن یک خطه) [2]

سیستم تغذیه	فرکانس	امپدانس
سیستم ساده	۵۰ HZ	$0.24 + j0.493$
سیستم AT	۵۰ HZ	$0.111 + j0.116$
سیستم BT	۵۰ HZ	$0.286 + j0.684$

در جدول زیر مقایسه ای مابین سه نوع سیستم تغذیه در کشور ژاپن، از جهت ولتاژ تغذیه و فاصله بین پستهای فرعی صورت پذیرفته است:

جدول ۲- فاصله پست های فرعی [7]

سیستم تغذیه	ولتاژ تغذیه (kV)		فاصله بین پستهای فرعی (km)	
	قطار برقی عادی	شینکانسن	قطار برقی عادی	شینکانسن
BT	۲۲	-	۳۰ تا ۵۰	-
AT	۴۴	۶۰	۹۰ تا ۱۱۰	۲۰ تا ۶۰

به عنوان مثال برای تغذیه یک مسیر ۱۰۰ کیلومتری به ۳ الی ۴ پست کششی در شبکه بوستر ترانس و تنها یک پست کششی در شبکه اتوترانس احتیاج داریم. بدیهی است که هزینه احداث، تعمیرات و نگهداری هر پست مخارج زیادی را در بر خواهد داشت، در نتیجه شبکه اتوترانس از اینجهت بر هر دو شبکه قبلی برتری دارد.

- فاصله بوستر ترانسها و اتوترانسها:

جدول ۳- فاصله بوستر ترانسها و اتوترانسها [2]

نوع شبکه	فاصله بین بوستر ترانسها و اتوترانسها
BT	۳ الی ۵ کیلومتر
AT	۱۰ الی ۲۵ کیلومتر

بنابراین مخارج مربوط به احداث، تعمیرات و نگهداری پستهای فرعی در شبکه درای اتوترانس کمتر از شبکه دارای بوستر ترانس خواهد بود.

- اثر تداخل امواج بر روی تجهیزات مخابراتی مجاور مسیر: این اثر به دو صورت ایجاد می‌گردد، یا به علت عبور جریان ریل و جریان نشتی از ریل به زمین که بر روی کابلهای مخابراتی اثر می‌گذارد و یا بعلاوه عبور جریان از خطوط بالاسری که بر روی خطوط مجاور مسیر اثر می‌گذارد. معمولاً کاهش اثر اول مهم تر است زیرا در هر نوع مسیری، حتی مسیرهای عبور کننده از مناطق بیابانی ممکن است به مدارها و تجهیزات مخابراتی برای هدایت قطار نیازمند

شویم و در اینصورت این تجهیزات معمولاً در مجاورت ریل بوده و از طریق کابل‌های زمینی به مراکز سیگنالینگ وصل هستند.

آزمایشات انجام شده نشان می‌دهد، در صورتی که فواصل پستها را در سه نوع شبکه مورد نظر (ساده، BT و AT) برای حداکثر افت ولتاژ مجاور دو سر قطار تنظیم کنیم، شبکه تغذیه ساده دارای بیشترین اثر تداخل امواج و شبکه تغذیه دارای بوستر ترانس دارای کمترین اثر تداخل امواج می‌باشد.

در اینحالت شبکه تغذیه دارای اتوترانس گرچه اثر تداخل امواج بیشتری نسبت به شبکه تغذیه دارای بوستر ترانس است ولی این اثر در حد مجاز قرار می‌گیرد. به عنوان مثال فرض کنید که قطاری در یک نقطه از مسیر جریان بار ۲۰۰ آمپر را به ریل تزریق کند. در اینصورت اثر تداخل امواج بر روی کابل‌های القایی مجاور مسیر در شبکه تغذیه دارای بوستر ترانس $\frac{1}{8}$ و در شبکه تغذیه دارای اتوترانس $\frac{1}{5}$ نسبت به شبکه تغذیه ساده کاهش می‌یابد. بنابراین هر دو شبکه تغذیه دارای بوستر ترانس و اتوترانس اثر تداخل امواج را به میزان مطلوبی کاهش می‌دهند.

- هزینه احداث شبکه: تعداد پستهای تغذیه کننده خطوط و سطح مقطع سیم های خطوط دو عامل مهم در تعیین هزینه احداث هر شبکه هستند. بنابراین در سیستم اتوترانس بدلیل افزایش سطح ولتاژ شبکه و کاهش افت ولتاژ خطوط، هر دو عامل فوق کاهش می‌یابند و در سیستم بوستر ترانس بدلیل بالارفتن امپدانس خطوط و اضافه شدن پستهای فرعی، هر دو عامل یاد شده افزایش خواهند یافت. به عنوان مثال اگر هزینه احداث هر کیلومتر از شبکه تغذیه ساده را ۱۰۰ واحد در نظر بگیریم در اینصورت هزینه کلی احداث شبکه اتوترانس ۸۴ الی ۹۵ واحد و هزینه کلی احداث شبکه بوستر ترانس ۱۲۴ الی ۱۲۵ واحد خواهد بود. در نتیجه استفاده از شبکه اتوترانس از نظر اقتصادی مقرون به صرفه خواهد بود.

۴- مزایا و معایب خطوط تغذیه DC در راه آهن برقی [12], [13], [7]

۴-۱- مزایا

- سادگی فن آوری
- عدم نیاز به ساخت یکسوکنده های مقاوم جهت استفاده در سیستم رانش
- عدم ایجاد تداخل در سیستم های مخابراتی
- به طور خاص مناسب برای خطوطی با قطارهای به نسبت کوتاه و سرعتهای نسبتاً پایین

۴-۲- معایب

- بدلیل آنکه در این سیستم ولتاژ از ۳۰۰۰ ولت بالاتر نیست، جریانی که قطارهای سرعت بالا می‌کشند بسیار زیاد خواهد بود (در نتیجه افت بیشتر)
- فاصله ایستگاه ها کمتر شده و سیمهای خط بالاسری ضخیم تر و سنگین تر می‌شوند. به عنوان مثال در خط برقی شیکاگو (نسل دوم) با ولتاژ ۱۵۰۰ ولت DC در هر ۱۰ کیلومتر یک ایستگاه ولی در خطوط ۲۵ کیلو ولت AC این فاصله بین ۲۰ تا ۴۰ کیلومتر می‌باشد.
- به دلیل همین جریان زیاد قطارهای TGV تنها با بلند کردن یک پانتوگراف در خطوط ۲۵ کیلو ولت AC حرکت می‌کنند ولی وقتی به خطوط قدیمی ۱۵۰۰ ولت DC می‌رسند (مثلاً بین تور و بوردو) هر دو پانتوگراف خود را بلند می‌کنند به طوری که یونیت دوتایی TGV-Atlantique به هنگام عبور از این مسیر ۴ پانتوگراف فعال دارد.

- علاوه بر مطالب فوق میزان توانی که ایستگاه های تغذیه به خط می دهند تعیین کننده میزان ترافیکی خواهد بود که خط می تواند تحمل کن (تعداد، سرعت و بار قطارها) این مطلب در خطوط DC با محدودیت بیشتری نسبت به خطوط متناوب مواجه می باشد. در نتیجه خط در برابر تغییرات انعطاف پذیر نیست. به عنوان نمونه در خطوط ۱۵۰۰ ولت DC کشور هلند استفاده از قطارهای بزرگتر و سریعتر مشکل ساز شد، زیرا این قطارها نیاز به توان بالاتری داشتند. این مشکل در دهه ۸۰ میلادی زمانی جدی شد که راه آهن هلند (Nederlandse Spoorwegen) NS به افزایش تعداد قطارها اقدام نمود. هنگامی که تعداد زیادی قطار توسط یک ایستگاه تغذیه می شدند، ولتاژ خط حتی به ۱۰۵۰ ولت هم می رسید.
- خوردگی بالای تجهیزات کنار خط بدلیل وجود جریان های سرگردان

۵- خطوط برقی در دنیا

۱-۵- کشورهای عضو ECO در سال ۲۰۰۴

جدول ۴- آمار مربوط به خطوط برقی کشورهای عضو ECO [1]

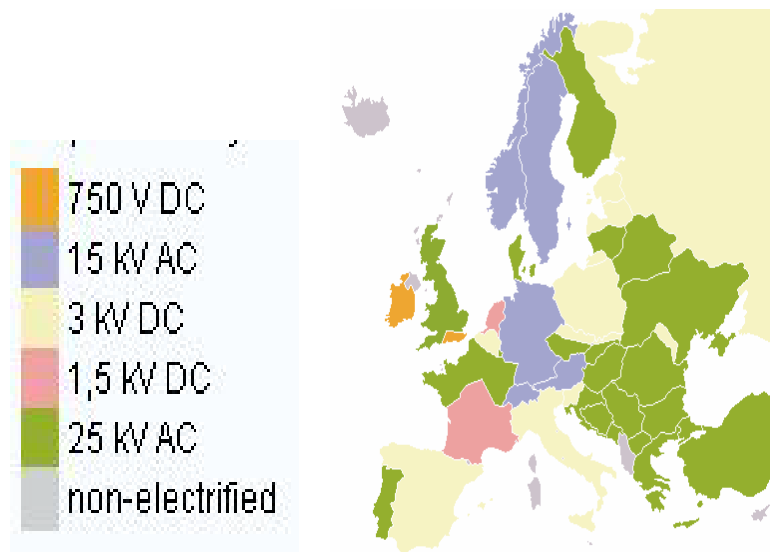
کشور	علامت انحصاری	جمع کل خطوط		در صد خطوط برقی
		کیلومتر		
آذربایجان	AZ	2,122	1,270	59/8
ازبکستان	UTI	4,126	620	15
ایران	RAI	7,300	148	2
پاکستان	PR	11,516	544	4/7
تاجیکستان	TDZ	617	...	-
ترکمنستان	TRK	2,523	...	-
ترکیه	TCDD	8,697	1,920	22/1
قزاقستان	KTZ	13,770	3,865	28/1

۲-۵- اروپا [4], [13]

تصویر ۶ نشان دهنده ولتاژهای مختلف مورد استفاده در اروپا می باشند. ذکر این نکته ضروری می باشد که همان گونه که در جدول ۵ نشان داده شده است، این بدان معنا نیست که مثلاً کشور روسیه تنها از سیستم ۳۰۰۰ ولت DC استفاده می کند. بلکه این ولتاژ بخش عمده خطوط برقی این کشور را تشکیل می دهد.

بواسطه اتخاذ سیستمهای مختلف برقی خطوط آهن (۱۵۰۰ یا ۳۰۰۰ ولت DC یا ۲۵۰۰۰ ولت و ۵۰ هرتز یا ۱۵۰۰۰ ولت ۱۶/۷ هرتز جریان متناوب) عبور و مرور قطارها بدون تغییر لکوموتیو در مرز کشورهای اروپایی پیچیده شده است. به عنوان نمونه قطارهای TGV که از طریق تونل جدید زیرکانال مانس بین لندن، پاریس و بروکسل در حال جابجایی مسافر می باشد، باید قادر به کار با جریان متناوب ۲۵۰۰۰ ولت AC در فرانسه و ۳۰۰۰ ولت DC در بلژیک (هر دو از نوع خط بالاسری) و همچنین- تا زمانی که بریتانیا خط سرعت بالای جدیدی بسازد- ۷۵۰ ولت DC ریل سوم بین دهانه تونل بریتانیایی و لندن باشند.

ثابت نگه داشتن وزن قطار برای دو سیستم برق رسانی، غیر ممکن می باشد. چون خطوط سرعت بالای جدید تماماً با ولتاژ بالا جریان متناوب برق رسانی شده اند، بازدهی با توان کاهش یافته برای فعالیت بر روی (خطوط) جریان مستقیم در ترن ستهای سرعت بالای چند ولتاژی اروپا، قابل قبول می باشد.



تصویر ۶- ولتاژ خطوط برقی اروپا [13]

۳-۵- امریکا [8]

در مقاله ای که در سال ۲۰۰۳ در هشتاد و دومین همایش مطالعات حمل و نقل در واشنگتن ارائه گردید، خطوط برقی حومه ای ایالات متحده به سه نسل تقسیم شده است:

- نسل اول: تا حدود ۱۹۱۰ ساخته شد که از ریل سوم برای رساندن برق ۶۰۰ ولت (یا کمی بالاتر) DC استفاده می‌شد.

- نسل دوم: بین سالهای ۱۹۰۵ و ۱۹۴۰ که از خط بالاسری با ولتاژی بالاتر از ۶۰۰ ولت DC و کمتر از ۲۵ کیلوولت AC با کشش متغیر

- نسل سوم: از سال ۱۹۶۰، جریان تک فاز ۲۵ کیلوولت تک فاز (۶۰) با خط بالاسری و کشش ثابت جدول ۵ نشان دهنده سیستمهای مختلف تغذیه جریان برق در سراسر دنیا و طول خطوط و راه آهنهای برقی است.

جدول ۵- مشخصات سیستم تغذیه خطوط برقی دنیا تا سال ۱۹۹۸ [7]

دنیا (شامل ژاپن)			ژاپن		نوع سیستم	
کشورهای اصلی	%	km	%	km		
آلمان، انگلیس، سوئیس و امریکا	۲	۵۱۰۶	۵	۹۱۵	کمتر از ۱۵۰۰ ولت	
فرانسه، اسپانیا، هلند و استرالیا	۹	۲۲۱۳۸	۶۱	۱۰۴۸۴	۱۵۰۰ تا ۳۰۰۰ ولت (عمدتاً ۱۵۰۰ ولت)	
روسیه، لهستان، ایتالیا، اسپانیا و آفریقای جنوبی	۳۳	۷۸۲۷۶	-	-	۳۰۰۰ ولت یا بیشتر (عمدتاً ۳۰۰۰ ولت)	
فرانسه و امریکا	۰	۲۴۵	-	-	کمتر از ۲۰ kv	Ac تک فاز ۵۰ و ۶۰ هرتز
	۲	۳۷۴۱	۲۲	۳۷۴۱	۲۰ kv	
روسیه، فرانسه، رومانی، هند، چین	۳۶	۸۴۳۷۶	۱۲	۲۰۳۷	۲۵ kv	
آمریکا، کانادا، آفریقای جنوبی	۰	۱۱۷۳	-	-	۵۰ kv	

آمریکا، اتریش، نروژ	۱	۱۴۶۹	-	-	۱۱ kv تا ۱۳ kv (۲۵ هرتز)
سوئیس	۰	۱۲۰	-	-	۱۱ kv
آلمان، سوئد، سوئیس	۱۵	۳۵۴۶۱	-	-	۱۵ kv
سوئیس و فرانسه	۰	۴۳	۰	۳۰	AC سه فاز
فرانسه و قزاقستان	۲	۳۶۶۸	-	-	نامشخص
	۱۰۰	۲۳۵۸۱۶	۱۰۰	۱۷۲۰۷	مجموع

۶- مقایسه سیستم های ولتاژی مختلف

در جدول زیر نقاط ضعف خطوط برقی به همراه دلیل و نتیجه آن، آمده است. علامت مثبت (منفی) نشان دهنده آن است که این سیستم ولتاژی در جهت کاهش (افزایش) این مشکل تاثیر گذار است.

جدول ۶- مقایسه سیستم های ولتاژی مختلف

750 V DC	1.5 kV DC	3 kV DC	15 kV 16 2/3 Hz		25 kV 50/60 Hz	50 kV 50/60 Hz	ولتاژ خط بالاسری		
			DB	SJ					
							موثر در	دلیل	نقطه ضعف
-	+	+	+	+	+	+	هزینه	ریل سوم	نگهداری خط مشکل
-	+	+	+	+	+	+	تاثیر غیر مستقیم	جریان زیاد و در نتیجه افت ولتاژ	ریل سوم واجب
+	+	-	-	-	-	-	بهره برداری	بالا بودن ولتاژ	امکان استفاده از ریل سوم وجود ندارد
	--	-	+	+	+	+	هزینه	جریان زیاد	سطح مقطع بالای خط بالاسری
----	--	-	+	+	+	+	بهره برداری	جریان پایین	توان محدود
---	+	+	+	+	+	+	بهره برداری	ریل سوم	محدودیت سرعت
	--	-	+	+	+	+	بهره برداری	جریان زیاد	
---	--	-	+	+	++	++	هزینه	افت ولتاژ	تعداد ایستگاه های تغذیه

+	+	+	-	+	+	+	هزینه	فرکانس خاص	منبع توان جداگانه
+	+	+	-	+	+	+	هزینه	فرکانس خاص	مدار ولتاژ بالای جداگانه
---	--	-	+	+	++	++	هزینه	تعداد ایستگاه های تغذیه	طول خطوط تغذیه
+	+	+			-	-	هزینه فضای	جریان متناوب	نصب ترانسفورماتور در قطار
			--	--			که ترانسفورماتور اشغال می کند	جریان متناوب & فرکانس پایین	
+	+	+	-	-	--	--	هزینه	جریان متناوب	مقاومت امیدانس خط
-	+	+	+	+	+	+	بهره برداری + هزینه	ریل سوم	عدم امکان استفاده در تقاطعات همسطح ریل و جاده
-	-	-					هزینه	جریان مستقیم	مشکلات در تبادل توان با خط اصلی (توسط ترمز الکتریکی)
			-	+	+	+		جدا بودن شبکه	

۷- نتیجه گیری

همان گونه که در ابتدای بحث اشاره شد انتخاب نوع (AC یا DC)، مقدار ولتاژ و همچنین روش رساندن توان الکتریکی به قطار (خط بالاسری یا ریل سوم) بستگی کامل به شرایط حاکم بر پروژه خواهد داشت. به عنوان مثال در خطوط بین شهری و حومه ای استفاده از ولتاژ DC (بدلیل افت زیاد و لزوم کم کردن فاصله پستها) منطقی نبوده و می باید از ولتاژهای بالای AC استفاده نمود. از طرفی بالا بردن ولتاژ نیز بدلیل محدود شدن گاباری (هرچه قدر ولتاژ بالاتر رود فاصله تجهیزات روی سقف قطار باید فاصله بیشتری از خط بالاسری داشته باشد) و محدودیتهای دیگر، به هر میزان دلخواه مقذور نبوده و ولتاژ ۲۵ کیلوولت AC (با فرکانس ۶۰ هرتز در امریکا و ۵۰ هرتز در اروپا و ایران) به عنوان یک ولتاژ استاندارد در این خطوط شناخته می شود. در برخی کشورهای اروپایی (مانند آلمان، سوئد، سوییس) از ولتاژ AC ۱۵kV با فرکانس ۱۶/۷ هرتز برای خطوط حومه ای و بین شهری خود استفاده می نمایند که با توجه به هزینه ها و محدودیت های حاصله کاربردی برای راه آهن برقی کشورمان ندارد.

از طرفی همان گونه که در جدول ۶ آمده است، بدلیل محدود شدن سرعت، بالا بودن ولتاژ و همچنین عدم امکان اجرا در تقاطعات همسطح (و بخشهای بدون حفاظ خط) استفاده از ریل سوم در خطوط حومه ای و بین شهری معمول نمی باشد.

در خصوص روشهای مختلف بازگشت جریان به منبع نیز با توجه به بخش ۲-۶، استفاده از سیستم AT در خطوط بین شهری و حومه ای توصیه می گردد.

مراجع

- [۱]. آمار عملکرد کشورهای عضو اگو در سال ۲۰۰۴
- [۲]. دکتر صنید زاده، "جزوه درس راه آهن برقی، جزوه شماره ۱"، دانشگاه علم و صنعت
- [3]. Encyclopedia Britannica 2007
- [4]. Bülund, U. Hellström, G. Varju, "Changing From Booster Transformer System to Auto Transformer System In The Kiruna-RAÅsi-Svappavaara Line In Sweden", EMC York 2004
- [5]. G. Varju, "Comparison of the booster transformer and auto transformer railway feeding systems, Feeding features and induction to telecom lines", EMC York 2004, July 1 & 2, 2004
- [6]. H. Lee, G. Kim, K. Oh, G. Jang and S. Kwon, "Harmonic Analysis on the Korean AC Railway System", KIEE International Transactions on Power Engineering, Vol. 5-A, No. 3, pp. 235~243, 2005
- [7]. Japan Railway & Transport Review 16, Jun 1998, "Railway Electric Power Feeding System"
- [8]. John G. Allen, Ph.D., John P. Aurelius, P.E., "COMMUTER RAIL RE-ELECTRIFICATION: IS IT STILL JUSTIFIED?", Presented at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D.C., January 2003
- [9]. Mariscotti, P. Pozzobon and M. Vanti "Distribution of the Traction Return Current in AT Electric Railway Systems", IEEE transactions on power delivery, vol. 20, no 3, July 2005
- [10]. Sezi, T. Menter, F.E. Distribution Autom. Div., Siemens Power Transmission & Distribution, Raleigh, NC; "Protection Scheme for a New AC Railway Traction Power System", Transmission and Distribution Conference, 1999 IEEE
- [11]. U.S. Department of transportation Federal Transit Administration, "Caltrain electrification program (San Francisco to Gilroy)", April 2004 .
- [12]. www.railway-technology.com
- [13]. www.wikipedia.org