

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

منیره منشی‌زاده، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

محمدعلی صندیدزاده (مسئول مکاتبات)، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

E-mail: sandidzadeh@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۹

چکیده

باند امپدانس تجهیزتی با مقاومت کم و رآکتانس نسبتاً بالا متشکل از یک سیم‌پیچ با هسته آهنی به موازات خازن پولی‌پروپیلن است، که به منظور فراهم آوردن یک مسیر پیوسته برای بازگشت جریان ترکشن در حوالی نقاط ایزوله خط و امکان فعالیت مفاصل در سیستم سیگنالینگ و نیز کمک به انتقال جریان ترکشن به پست‌های الکتریکی به کار می‌رود. در واقع وظیفه اصلی باند امپدانس این است که عبور جریان سیگنالینگ را محدود نماید، اما امکان عبور جریان ترکشن را فراهم سازد؛ از این رو یکی از اجزاء مهم در سیستم های سیگنالینگ و ترکشن خطوط ریلی برقی محسوب می‌شود. در این تحقیق با هدف بهبود کارکرد مدارهای راه سیستم سیگنالینگ که یکی از ابزارهای ضروری در کنترل اتوماتیک قطار در خطوط ریلی مدرن هستند، به تحلیل و ارزیابی ساختمان و عملکرد باندهای امپدانس -مدل B3-4000A- بکارگرفته‌شده بر روی مدارهای راه فرکانس صوتی بدون مفصل در خط دوم متروی تهران پرداخته می‌شود. به این ترتیب که ابتدا مدل کاملی از یک بخش از خط مترو -به عنوان یک نمونه واقعی- با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی و الکتریکی، شامل مدل پست های ترکشن (پست های RS)، ریل های حرکت و ریل سوم، قطار و نیز باندهای امپدانس نصب‌شده بر روی مدارهای راه فرکانس صوتی TI21-M با در نظر گرفتن شرایط نصب ارائه می‌گردد؛ سپس مدل معرفی شده در نرم افزار Pspice شبیه‌سازی شده و اثرات ناشی از تغییر متغیرهای الکتریکی و فیزیکی مختلف، بر باندهای امپدانس و متعاقباً سیستم‌های مدارراه بررسی می‌شود. در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی به همراه مقایسه و نتایج تحلیلی ارائه می‌گردد.

واژه های کلیدی: باند امپدانس، سیستم ترکشن DC، مدارراه فرکانس صوتی، مدارراه TI21-M

۱. مقدمه

الکتريکی سيستم با استفاده از داده‌های واقعی، رفتار آن را به‌درستی مورد مطالعه قرار داده می‌شود.

ساختار این مقاله به این صورت است که در بخش دوم یک مدل الکتريکی از سيستم ترکشن DC در فاصله بين دو پست الکتريکی مربوط به خط دوم متروی تهران به همراه مدارهای راه و باندهای امپدانس نصب شده با در نظر گرفتن پارامترهای الکتريکی و هندسی واقعی و نیز مدل الکتريکی قطار ارائه می‌شود. در بخش سوم با هدف ارزیابی عملکرد باند امپدانس در شرایط مختلف و تأثیر آن بر روی مدارراه فرکانس صوتی شش سناریوی مختلف معرفی می‌گردد و نهایتاً نتایج مربوط به این شبیه‌سازی‌ها در نرم افزار Pspice ارائه می‌گردد. در بخش آخر نیز به جمع‌بندی و ارائه نتایج به‌طور خلاصه پرداخته می‌شود.

۲. معرفی و مدل‌سازی سيستم مورد مطالعه

سيستم مورد مطالعه بخشی از خط دوم متروی تهران به طول دو کیلومتر، در فاصله بين دو پست الکتريکی می‌باشد. ساختار طولی سيستم الکتريکی مرجع شامل پست‌های برق، ریل سوم و ریل‌های حرکت همراه با قطار در شکل ۱ نمایش داده شده‌است.

این سيستم از دو خط موازی -رفت و برگشت- بين دو پست RS^۱ که در موقعیت‌های ۲۷۲ و ۱۷۰۹ متری نسبت به مبدأ فرضی قرار گرفته‌اند، تشکیل شده‌است. ولتاژ سه فاز گرفته شده از شبکه سراسری از طریق پست‌های ترانسفورماتور/یکسوساز ۱۲ یا ۲۴ پالسه به جریان مستقیم در ولتاژ نامی شبکه تبدیل می‌شود [Sandidzadeh, Safarkhani and Heydari, 2013]؛ ولتاژ نامی شبکه برای این سيستم ۷۵۰ ولت DC می‌باشد، که توسط ترانسفورماتورهای قدرت کاهنده از ولتاژ ۲۰ کیلوولت به ۷۵۰ ولت تبدیل شده و کلیدهای ولتاژ پایین را تغذیه می‌کنند. هر یک از این خطوط شامل دو ریل هدایتی، ریل سوم، پنج باند امپدانس B3-4000A (که چهارتای آن‌ها به بازگشت جریان ترکشن به پست RS و یکی از آن‌ها به منظور متعادل‌سازی جریان بازگشتی در دو خط، اختصاص داده شده‌است)، هشت مدارراه فرکانس صوتی TI21-M با جفت

سيستم مدارراه از جمله ابزارهای ضروری در کنترل اتوماتیک قطار در خطوط ریلی مدرن و سيستم‌های راه‌آهن برقی است. این سيستم با هدف اصلی آشکارسازی قطار، از مهم‌ترین زیرسيستم‌های سيستم سیگنالینگ است؛ لذا اطمینان از عملکرد صحیح آن نیز امری اجتناب ناپذیر است. مدارهای راه نصب‌شده در خطوط متروی تهران از نوع مدارراه فرکانس صوتی مدل TI21-M هستند. این نوع از مدارهای راه برای عملکرد بر روی خطوط بدون مفصل طراحی شده‌اند؛ با این وجود در محدوده ایستگاه‌ها و سوزن‌ها، با توجه به پیچیدگی نقشه، نمی‌توان از مدارراه TI21-M به عنوان یک مدارراه بدون مفصل استفاده کرد. یک راه حل استفاده از مفصل‌های مکانیکی در این نواحی است. در این شرایط برای فراهم کردن یک مسیر پیوسته برای بازگشت جریان ترکشن از باندهای امپدانس استفاده می‌شود؛ علاوه بر این با توجه به ساختار، باندهای امپدانس دارای کاربردهای دیگری نظیر کمک به انتقال جریان ترکشن به پست‌ها و متعادل سازی جریان‌های ترکشن دو خط در ریل‌های بدون مفصل نیز هستند. به‌همین جهت عملکرد باندهای امپدانس به عنوان جزئی از سيستم‌های مدارراه و سيستم‌های ترکشن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این‌رو اخیراً تحقیقات گسترده‌ای در این راستا صورت گرفته‌است؛ برای نمونه در [Wu and Li, 2016] و [Yang, Roberts and Chen, 2013] ساختار باند امپدانس نصب شده بر روی مدارراه ZPW-2000 که یک مدار راه بدون مفصل در محدوده ایستگاه‌ها در خطوط ریلی پرسرعت چین بوده، ارزیابی شده‌است.

در سيستم راه‌آهن برقی، زیرسيستم‌های متعددی - شامل سيستم ترکشن، سيستم سیگنالینگ، شبکه تغذیه و ... - وجود دارد که بر یکدیگر و نهایتاً بر کارایی کل سيستم تأثیر می‌گذارند؛ به دلیل پیچیدگی این سيستم، یک راه حل منطقی برای تحلیل درست عملکرد هر یک از اجزاء بر روی خطوط و اطمینان از سازگاری الکتريکی کل سيستم استفاده از تکنیک‌های مبتنی بر شبیه سازی است؛ از این‌رو در این تحقیق ابتدا مدلی از باند امپدانس به همراه مدارراه و مدل خط برای ارزیابی عملکرد مجموع سيستم ارائه می‌گردد. سپس با ترسیم مدار معادل

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

درصد برای یک رنج فرکانسی توسعه داده شده (۵۰ هرتز تا ۵۰ کیلوهرتز) است. خط تغذیه دارای یک ساختار پارامتر توزیع شده در راستای طولی است. مدلسازی MTL نیاز به فرضیات بنیادی زیر دارد [Mariscotti, 2003]:

- خط، یکپارچه بدون هیچ گونه تغییرات قابل توجهی در مشخصات فیزیکی و هندسی هادی‌ها و ابزار پیرامون آنها در جهت محوری است.
- میدان‌های الکترومغناطیسی، ساختار الکترومغناطیسی عرضی دارند، که در سطح مقطع وجود داشته و در راستای محورها اشاعه می‌یابد.
- جمع جبری جریان‌های خط در هر سطح مقطع برابر صفر است. جریان بازگشت شبکه n هادی دیگر در هادی مرجع $n+1$ هادی، به گردش درمی‌آید.
- ابزارهایی که اطراف هادی هستند، باید خطی، همگن باشند.

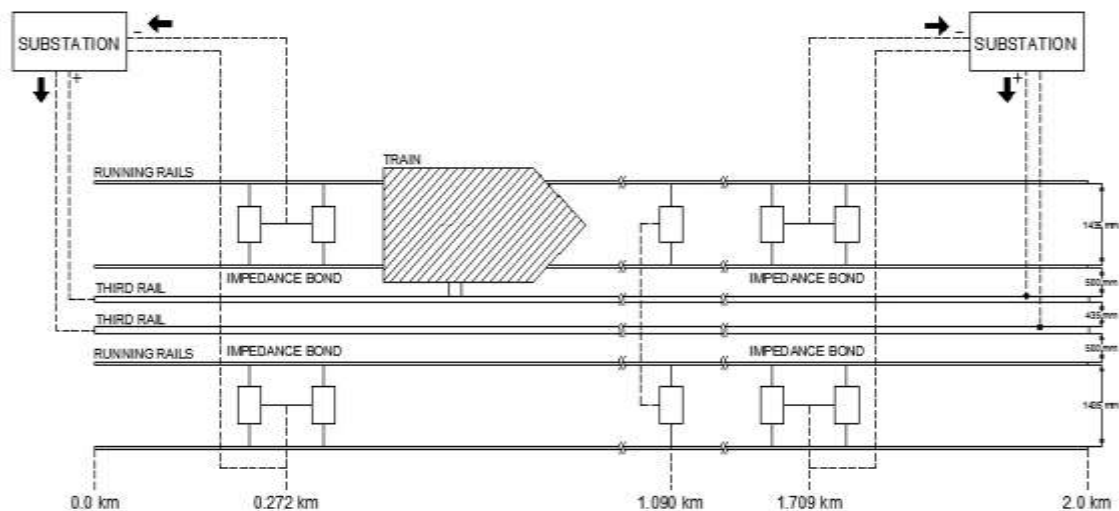
معادلات خطوط انتقال مربوط به یک MTL کلی شامل $n+1$ هادی در [Paul, 1994] به‌طور کامل ارائه شده‌است. مؤلفه‌های سیستم را می‌توان به‌صورت زیر مدل نمود:

فرکانس‌های F1-F2 و F5-F6 مطابق با جدول ۱ به ترتیب در خطوط رفت و برگشت و کابل‌های ارتباطی هستند. قطار در نظر گرفته شده بر روی خط شامل یک لوکوموتیو و شش واگن بوده، لوکوموتیو و هر یک از این واگن دارای ۴ موتور سری ۱۳۲ کیلوواتی - دارد که همگی در حالت عملکرد برای فراهم آوردن نیروی ترکشن هستند.

جدول ۱. فرکانس‌های عملکرد مدارراه [Bombardier, 2008]

فرکانس مدارراه	مقدار نامی	کمینه	بیشینه
F1	۶۱۰۰	۶۰۰۰	۶۲۰۰
F2	۷۷۰۰	۷۶۰۰	۷۸۰۰
F3	۶۹۰۰	۶۸۰۰	۷۰۰۰
F4	۸۵۰۰	۸۴۰۰	۸۶۰۰
F5	۵۷۰۰	۵۶۰۰	۵۸۰۰
F6	۷۳۰۰	۷۲۰۰	۷۴۰۰
F7	۶۵۰۰	۶۴۰۰	۶۶۰۰
F8	۸۱۰۰	۸۰۰۰	۸۲۰۰

تحلیل عملکرد این سیستم با استفاده از مدل خطوط انتقال چندسیمه^۲ خط ترکشن انجام می‌شود. این مدل دارای دقت ۲۰



شکل ۱. ساختار طولی سیستم مرجع

• ریل های حرکت توسط مقاومت و هدایت الکتریکی و ریل سوم با مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی خط انتقال مدل می شوند. پارامترهای ریل های حرکت و ریل سوم مترو تهران با اندازه گیری های صورت گرفته در [Sandidzadeh and Shafipour, 2012 Tehran MetroWebsite] و [Yu-Qiao et al. 2010] بدست آمده اند.

سایر هادی های سیستم الکتریکی یعنی کابل های ارتباطی توسط مقاومت مدل می شوند. مقادیر پارامترهای الکتریکی مورد استفاده در مدل در جدول ۳ گزارش شده اند.

خطوط در دو انتها روی مدار باز خاتمه می یابند. مدار معادل الکتریکی سیستم مورد مطالعه با در نظر گرفتن پارامترها مطابق با شکل ۲ می باشد. در این مدار به ترتیب R و R_G معرف مقاومت و مقاومت معادل هدایت الکتریکی ریل های حرکت و L_C و C_C بیانگر مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی ریل سوم هستند؛ R_{∞} مدل کننده مقاومت انتهای مدار باز بوده که معادل یک مگا اهم در نظر گرفته می شود و کابل های ارتباطی توسط مقاومت های $R_1 \sim R_4$ نمایش داده می شوند.

به ازای سیگنال اغتشاشی تزریق شده از لکوموتیو (یا همان جریان بازگشتی I_{ret} که از طریق محورهای جاری می شود)، درصدی از جریان که در بخش مورد مطالعه از خط جاری می گردد، باید مورد ارزیابی قرار گیرد. دیاگرام ساده جریانها در شکل ۳ نشان داده شده است، که در آن I_{ret} در میان دو جریان خط I_{rl1} و I_{rl2} و I_{rr1} و I_{rr2} (به ترتیب برای خطوط چپ و راست، ریل ۱ و ریل ۲) و جریان های زمین I_{el} و I_{er} متناظر انتشار می یابد [Kusko and Peeran, 1985].

دامنه جریان های خط که به بخش های چپ و راست جاری می شود، به شدت به آرایش مدار بخش های راه چپ و راست وابسته است؛ با در نظر گرفتن این پدیده، در بخش بعد با تغییر آرایش هندسی و پارامترهای الکتریکی باند امپدانس در هر سناریو مقدار جریان در بخش مورد مطالعه ارزیابی و تأثیر آن در مدارراه بررسی می گردد.

• فرستنده و گیرنده سیستم سیگنالینگ به طور ساده به عنوان یک توقف در ریل های حرکت بدون هیچ مؤلفه فشرده (هیچ بارگذاری توسط مدارهای فرستنده و گیرنده صورت نگرفته است) مدل می شوند.

باندهای امپدانس به صورت یک اتوترانسفورماتور با نسبت تبدیل ۱:۱ به موازات یک خازن مدل می گردند؛ ظرفیت خازن متناسب با فرکانس عملیاتی مدارراهی که باند امپدانس بر روی آن نصب شده، انتخاب می شود. مقاومت سیم پیچ های اولیه و ثانویه اتوترانسفورماتور ۵۰ میکرواوم بوده و اندوکتانس سیم پیچ ها با در دست داشتن مقادیر ظرفیت خازنی از رابطه (۱) قابل محاسبه هستند. مقادیر مربوطه در جدول ۲ گزارش شده اند.

$$\omega = 2\pi f = \frac{I}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

جدول ۲. مقادیر اندوکتانس سیم پیچ های باند امپدانس و ظرفیت خازنی واحد تنظیم برای فرکانس های عملیاتی مختلف مدارراه

مدارراه	فرکانس نامی	اندوکتانس (uH)	ظرفیت خازنی (uF)
F1	۶۱۰۰	۲۸/۴	۲۴
F2	۷۷۰۰	۲۸/۵	۱۵
F3	۶۹۰۰	۲۸	۱۹
F4	۸۵۰۰	۲۹/۲	۱۲
F5	۵۷۰۰	۲۸/۹	۲۷
F6	۷۳۰۰	۲۸	۱۷
F7	۶۵۰۰	۲۸/۶	۲۱
F8	۸۱۰۰	۲۷/۶	۱۴

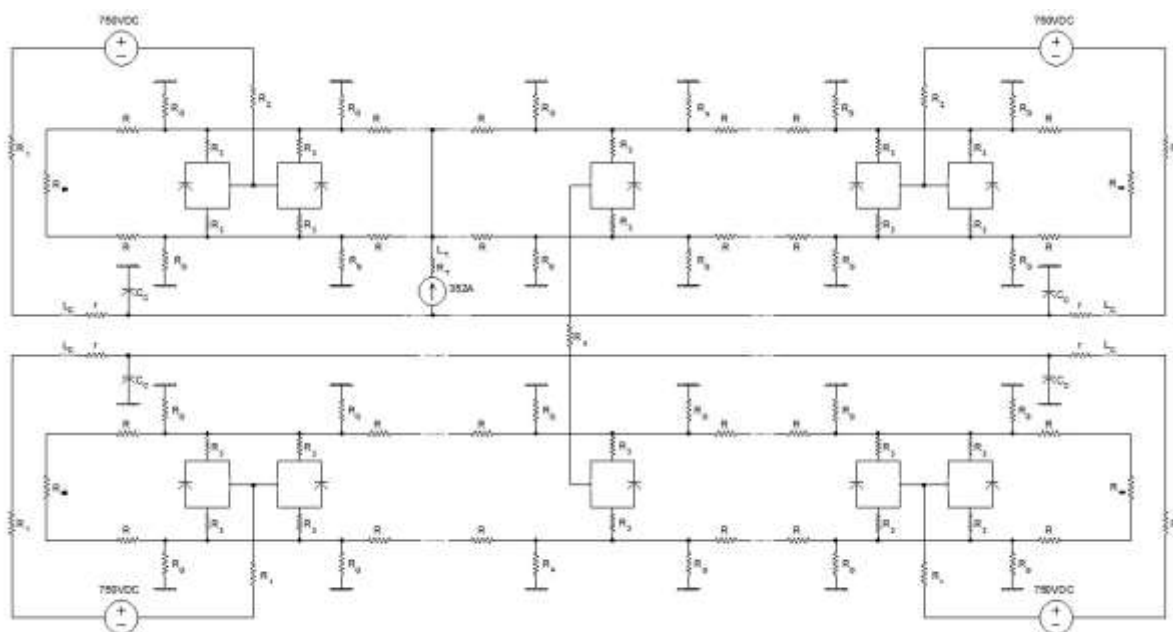
• وسیله نقلیه ریلی به صورت یک مولد جریان مختلط با تزریق جریان ۳۵۲ آمپر DC و ۷ آمپر AC، مقاومت و اندوکتانس معادل ۲۸ موتور DC به کار گرفته شده، مدل می گردد.

• مدار پست منبع تغذیه الکتریکی (RS) با یک منبع ولتاژ DC با ۷۵۰ ولت و یک مقاومت خروجی اندازه گیری شده در نظر گرفته می شود.

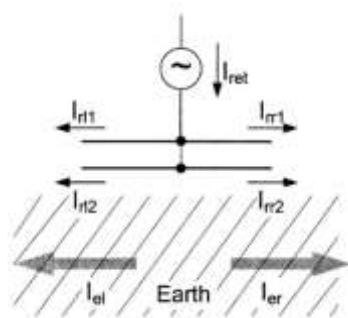
طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

جدول ۳. مقادیر پارامترهای الکتریکی [Zaboli et. Al, 2017]

مقادیر	پارامترها	
۳۵ (mΩ/km)	مقاومت هر یک از ریل‌ها	
۰/۰۱-۲ (S/km)	هدایت الکتریکی ریل به زمین برای هر یک از ریل‌ها	ریل‌های حرکت
۱	تعداد هادی	
۱۵ (mΩ/km)	مقاومت	
۴/۵ (μH/km)	اندوکتانس	ریل سوم
۱۰ (μF/km)	ظرفیت خازنی	
۳۷۵ (VDC)	ولتاژ نامی	
۱۳۲ (kW)	توان نامی	
۰/۰۹۳ (Ω)	مقاومت سیم‌پیچی موتور	موتورهای DC سری
۰/۰۲ (H)	اندوکتانس موتور	
۲۸	تعداد موتورها	
۱۸۰ (mΩ/km)	مقاومت کابل مسی با سطح مقطع ۱۸۵ میلی‌متر مربع	کابل‌های ارتباطی
۱۲۰ (mΩ/km)	مقاومت کابل مسی با سطح مقطع ۲۴۰ میلی‌متر مربع	



شکل ۲. مدار معادل الکتریکی سیستم

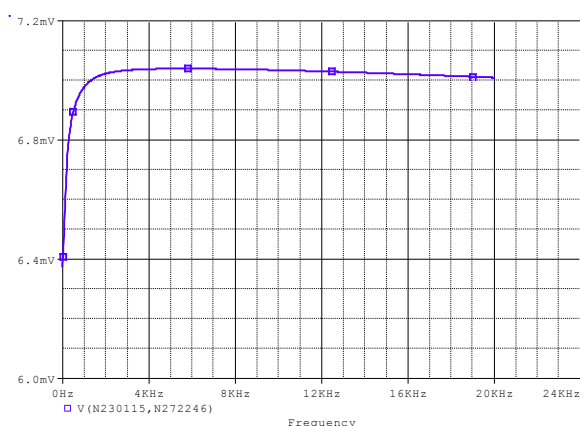


شکل ۳. توزیع جریان بازگشتی از محورهای وسیله نقلیه [Kusko and Peeran, 1985]

۳. نتایج شبیه سازی

۳-۱ بررسی اثر فاصله

برای مطالعه اثر فاصله، مدارراه موجود در موقعیت ۱۷۰۰ متری و باندهای امپدانس نصب شده بر روی آن به عنوان نمونه انتخاب شدند. مدل قطار نیز در نزدیکترین محل نسبت به فرستنده مدارراه قرار داده شد. منحنی ولتاژ دوسر واحد تنظیم گیرنده مدارراه در این حالت مطابق شکل ۴ است.



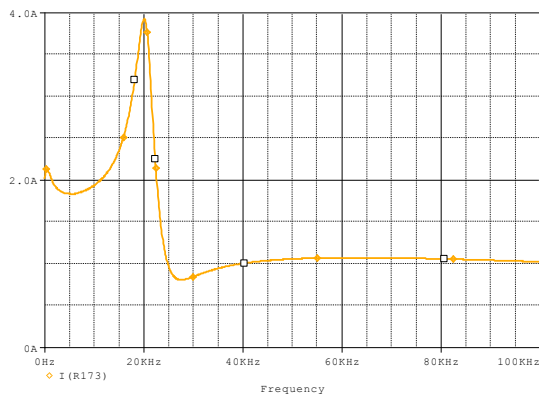
شکل ۴. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در آرایش استاندارد

۳-۱-۱ اثر فاصله باند امپدانس تا مدارراه

در بخش اول باندهای امپدانس مورد مطالعه در ۱۰ موقعیت مختلف از فاصله ۱ متری تا فاصله ۱۸۰ متری از مرکز ناحیه تنظیم مدارراه (به طول ۱۹۰ متر) قرار داده شدند. این کار با تغییر مقاومت بین مرکز ناحیه تنظیم مدارراه و مرکز باندهای امپدانس در مدل الکتریکی نشان داده شده در شکل ۲ صورت پذیرفت. سپس متغیرهای جریان ریل و ولتاژ بین ریل‌های ایزوله شده در محل گیرنده مدارراه به ازای V_{rms} جریان AC خروجی از محورهای قطار (به عنوان منبع تولید اغتشاش) نسبت به فرکانس اندازه گیری شدند؛ نتایج حاصل برای فاصله ۱ و ۱۵۰ متری در شکل‌های ۵ تا ۸ قابل مشاهده است.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در حالت استاندارد ولتاژ ناشی از جریان بازگشتی ترکشن در سر گیرنده مدارراه برای فرکانس‌های زیر ۲۰ کیلوهرتز تقریباً ثابت و برابر مقدار ۷ میلی‌ولت است؛ دامنه این ولتاژ تداخلی به اندازه‌ای کم است که تغییری در مدار گیرنده ایجاد نکرده و در نتیجه تأثیری در عملکرد صحیح مدارراه نخواهد داشت. برای فرکانس‌های بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز این ولتاژ رفته رفته کاهش یافته و نهایتاً به صفر می‌رسد. با در نظر گرفتن این منحنی به عنوان مرجع اثر فاصله بر عملکرد مدارراه بررسی می‌گردد.

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی



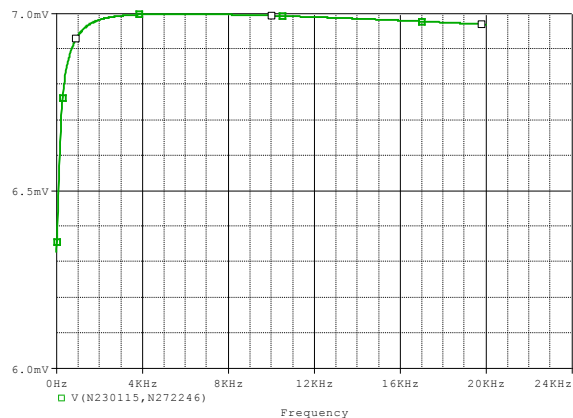
شکل ۸. منحنی جریان ریل در شرایطی که باند امپدانس در فاصله ۱۵۰ متری ناحیه تنظیم مدارراه قرار گرفته است.

با مقایسه منحنی‌های ولتاژ بدست آمده با منحنی استاندارد مشاهده می‌شود که با تغییر فاصله باندهای امپدانس از ناحیه تنظیم، دامنه ولتاژ در فرکانس عملیاتی مدارراه مورد مطالعه (۶/۱ کیلوهرتز) در حدود ۰/۴ میلی‌ولت کاهش می‌یابد؛ این کاهش ولتاژ به میزانی کم است که در عمل هیچ تغییری در عملکرد مدارراه ایجاد نخواهد شد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش فاصله از ناحیه تنظیم روند کاهش ولتاژ - که در آرایش استاندارد تقریباً در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز شروع می‌شود - را تسریع می‌بخشد. این رویه در منحنی‌های جریان ریل نیز قابل مشاهده است. نکته قابل توجه در این منحنی‌ها وجود پیک جریان در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز ناشی از فیلتر LC پایین گذر می‌باشد که بر روی ریل سوم در محل پست الکتریکی قرار گرفته است.

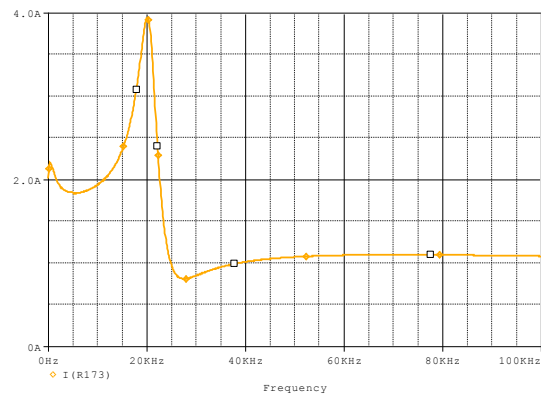
۳-۱-۲ اثر فاصله باندهای امپدانس از یکدیگر

در بخش دوم فاصله بین باندهای امپدانس مفروض از ۱ متر به ۱۰ متر افزایش داده شد؛ به این ترتیب که ۴ رشته کابل تک هسته با سطح مقطع ۱۸۵ میلی‌متر مربع و طول ۱۰ متر با مقاومت معادل ۰/۴۵ میلی اهم بین سر وسط دو باند امپدانس قرارداد شده. سپس متغیرهای تعریف شده مجدداً اندازه‌گیری شدند؛ نتایج حاصل در شکل‌های ۹ و ۱۰ قابل مشاهده است.

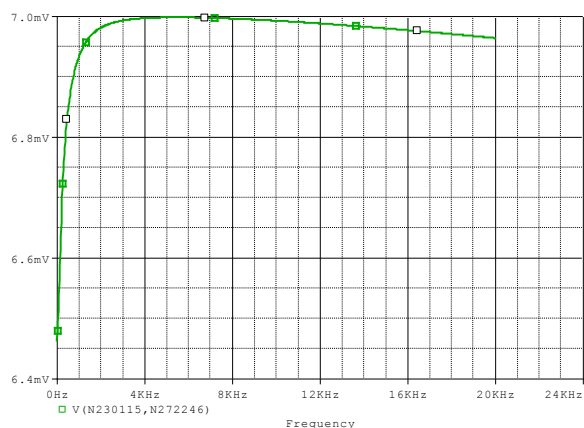
در این مورد نیز نتایج نشان می‌دهند که تغییر فاصله باندهای امپدانس از یکدیگر هیچ‌گونه تأثیر قابل توجهی روی جریان ریل و ولتاژ بین ریل‌ها ندارد.



شکل ۵. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایطی که باند امپدانس در فاصله ۱ متری ناحیه تنظیم مدارراه قرار گرفته است.

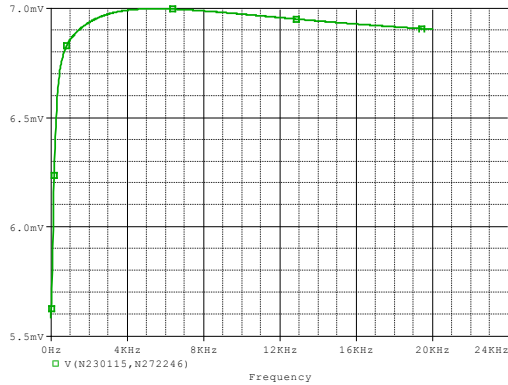


شکل ۶. منحنی جریان ریل در شرایطی که باند امپدانس در فاصله ۱ متری ناحیه تنظیم مدارراه قرار گرفته است.

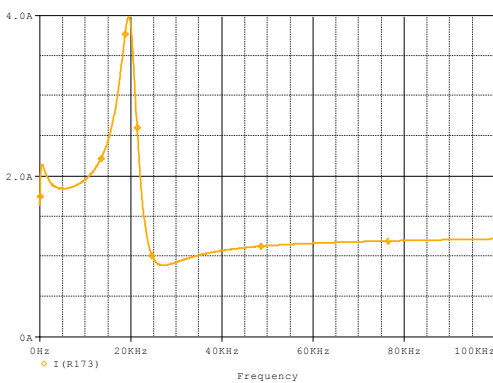


شکل ۷. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایطی که باند امپدانس در فاصله ۱۵۰ متری ناحیه تنظیم مدارراه قرار گرفته است.

گیرنده مدارراه اندازه گیری شد؛ نتایج این اندازه گیری در شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

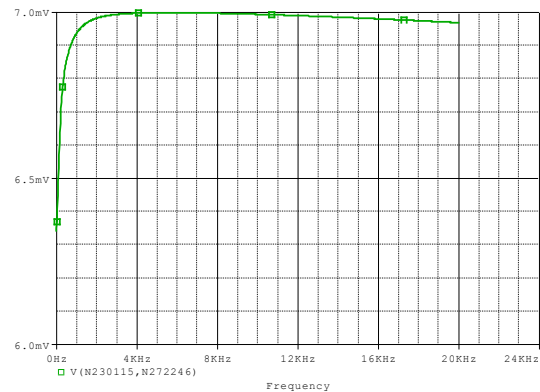


شکل ۱۱. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط افزایش تعداد باند امپدانس

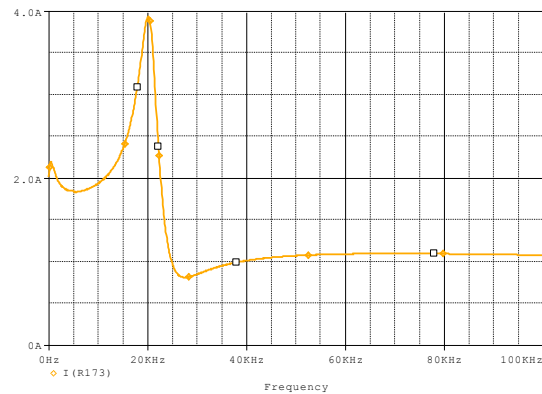


شکل ۱۲. منحنی جریان ریل در شرایط افزایش تعداد باند امپدانس مقایسه منحنی ولتاژ این آرایش با حالت استاندارد نشان می دهد که افزایش تعداد باندهای امپدانس نصب شده بر روی مدارراه، دامنه ولتاژ دو سر گیرنده را در فرکانس عملیاتی به اندازه $0/4$ میلی ولت کاهش می دهد. این مقدار کاهش ولتاژ به عنوان درصدی از مجموع ولتاژ موجود به میزانی کم است که تأثیر قابل توجهی بر کارکرد مدارراه نخواهد داشت. در عمل نصب این تعداد باند امپدانس بر روی مدارراه با توجه با تأثیر بسیار کم آن در بهبود عملکرد مدارراه نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نیست، بلکه با نصب این تعداد باند امپدانس (یعنی ۶ باند) طول مفید مدارراه ۵۳ درصد حالت استاندارد (معادل با ۱۰ متر) خواهد شد.

بنابراین به طور کلی می توان گفت که تغییر فاصله باندهای امپدانس نسبت به ناحیه تنظیم مدارراه و نیز تغییر فاصله باندهای امپدانس از یکدیگر هیچ گونه تأثیر قابل توجهی روی جریان ریل و ولتاژ بین ریل ها در فرکانس عملیاتی مدارراه و نتیجتاً بر عملکرد مدارراه ندارد. بدیهی است که در هر مرحله با تغییر موقعیت باند امپدانس (تغییر مقاومت بین اجزاء مدارراه) دامنه جریان ترکشن DC عبوری نیز تغییر خواهد کرد.



شکل ۹. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایطی که باندهای امپدانس در فاصله ۱۰ متری از یکدیگر قرار گرفته اند.



شکل ۱۰. منحنی جریان ریل در شرایطی که باندهای امپدانس در فاصله ۱۰ متری از یکدیگر قرار گرفته اند.

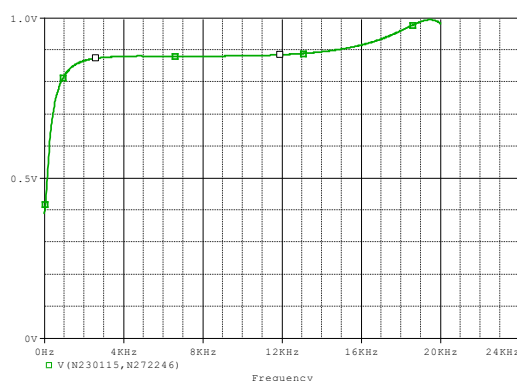
۲-۳ بررسی اثر تعداد باندهای امپدانس

برای مشاهده تأثیر تعداد باندهای امپدانس بر روی عملکرد مدارراه، تعداد باندهای امپدانس نصب شده بر روی مدارراه مورد مطالعه به ۶ عدد افزایش پیدا کرد. سپس متغیرهای تعریف شده شامل ولتاژ بین دو ریل و جریان ریل در محل واحد تنظیم

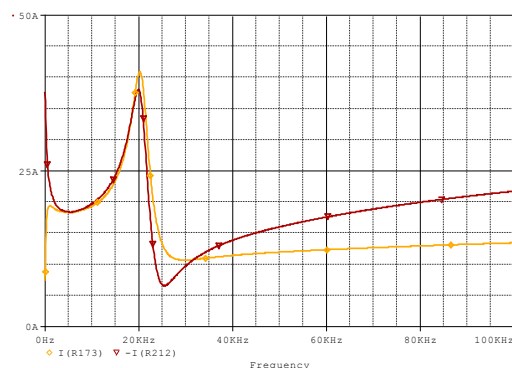
طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

۳-۳ بررسی اثر جریان نامتعادل

برای تحلیل عملکرد باند امپدانس در شرایطی که جریان ترکشن دو ریل بالانس نیست و مشاهده تأثیر آن بر مدارراه، مقاومت یکی از ریل‌های حرکت (ریل بالایی در مدل) در فاصله بین قطار تا باندهای امپدانس مورد مطالعه - واقع در ۱۷۰۹ و ۱۷۱۰ متری از مبدأ فرضی - تغییر داده شد تا شرایط نامتقارنی در طرفین ایجاد شود؛ مقادیر مقاومت مورد نظر به ترتیب برابر ۱/۰۰۱، ۱ و ۱۰۰۰ اهم هستند، سپس مقادیر مربوط به ولتاژ بین ریل‌های ایزوله شده و جریان ریل‌ها در محل واحد تنظیم مربوط به گیرنده مدارراه، به ازای جریان خروجی از قطار نسبت به فرکانس اندازه‌گیری شدند. نتایج مربوطه در شکل‌های ۱۳ تا ۲۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۳. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ میلی اهم



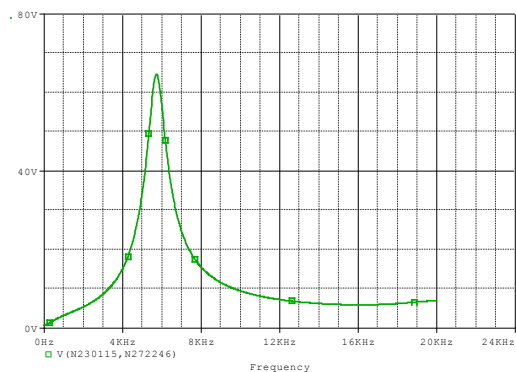
شکل ۱۴. منحنی‌های جریان ریل در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ میلی اهم

مطابق با مشخصات باند امپدانس B3-4000A، چنانچه اختلاف جریان در دوسر باند امپدانس از ۵۰۰ آمپر بیشتر شود، هسته باند اشباع شده و جریان اضافی از گیرنده سیستم مدارراه عبور می‌کند یا به عبارت دیگر از مدارراه بارگیری می‌شود. برای افزایش جریان ترکشن - با توجه به این که جریان ترکشن در مدل اولیه ۳۵۲ آمپر بود - به جای یک قطار تعداد ۱۰ قطار در سیستم مرجع در نظر گرفته شد. به این ترتیب که مدل هر ۱۰ قطار به صورت یکجا شامل یک منبع جریان مختلط با دامنه ۷۰ میلی آمپر AC و ۳۵۲۰ آمپر DC به همراه اندوکتانس و مقاومت معادل ۱۰ قطار، در موقعیتی نزدیک به فرستنده مدارراه در نظر گرفته شد. بدیهی است که در این حالت ولتاژ و جریان ریل‌ها ۱۰ برابر می‌شود.

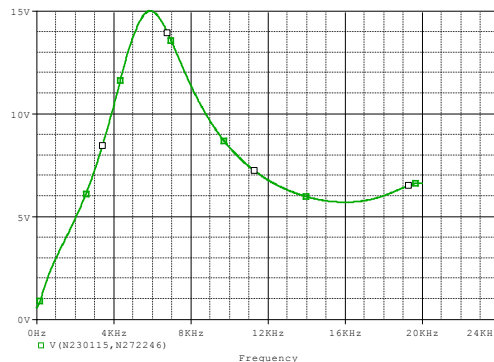
با قراردادن مقاومت بر روی یکی از ریل‌ها، جریان ریل‌ها و نتیجتاً جریان دو سر باند امپدانس نامتعادل می‌شود؛ مقادیر عددی برای جریان ورودی به باند امپدانس از ریل‌ها به ازای مقاومت ۱ میلی اهم به ترتیب ۲/۲۳۰ و ۷/۹۰۶ آمپر است، این مقدار اختلاف برای اشباع هسته باند امپدانس کافی بوده و باعث بارگیری از گیرنده مدار راه می‌شود.

همانطور که در منحنی ولتاژ دو سر گیرنده (شکل ۱۳) مشاهده می‌شود، الگو منحنی (صرف نظر از مقادیر) مشابه با حالت استاندارد است، با این تفاوت که در این حالت دامنه ولتاژ در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز ابتدا افزایش و سپس به تدریج کاهش می‌یابد. مقدار ولتاژ در فرکانس عملیاتی مدارراه یعنی ۶/۱ کیلوهرتز حدود ۹ ولت می‌باشد؛ این ولتاژ در مقایسه با ولتاژ فرستنده مدارراه - که برای این نوع مدارراه بین ۴/۳ تا ۴/۳ ولت می‌باشد - به میزانی زیاد است که سبب عبور جریان بزرگی از مدار گیرنده می‌شود. عبور این جریان سبب می‌شود که حضور قطار در بخش مدارراه به درستی تشخیص داده نشود. در منحنی‌های جریان، منحنی قرمز رنگ جریان ریل پایین و منحنی نارنجی رنگ جریان ریل بالا (با مقاومت بیشتر) را نشان می‌دهد؛ مشاهده می‌شود که به ازای اختلاف مقاومت ۱ میلی اهمی بین دو ریل جریان ریل‌ها برای فرکانس‌های زیر ۲۰ کیلو (شامل فرکانس عملیاتی مدارراه) هرگز تقریباً مشابه یکدیگر هستند. همچنین مشابه با منحنی جریان استاندارد، این منحنی‌ها

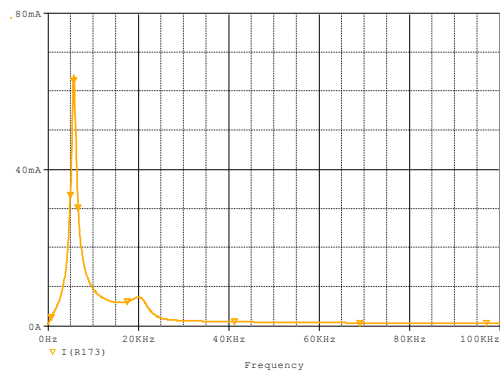
نیز دارای یک ماکزیمم در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز بوده و سپس به یک مقدار ثابت همگرا می‌شوند.



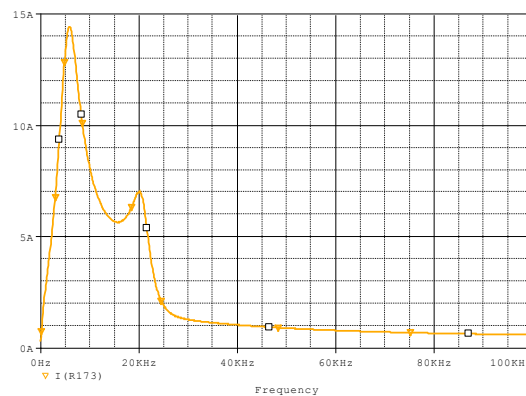
شکل ۱۸. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ کیلو اهم



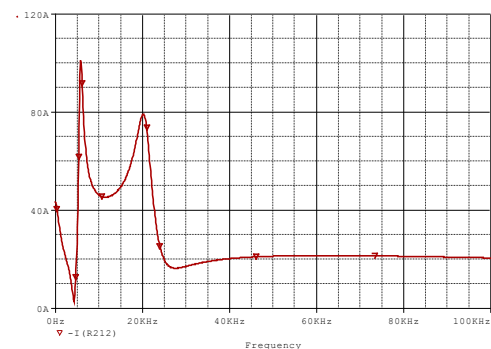
شکل ۱۵. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ اهم



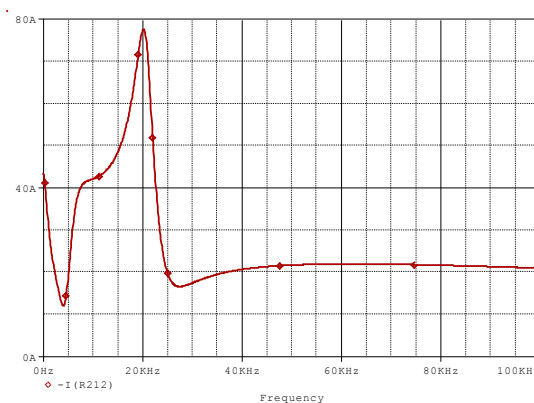
شکل ۱۹. منحنی جریان ریل با مقاومت بیش تر در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ کیلو اهم



شکل ۱۶. منحنی جریان ریل با مقاومت بیش تر در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ اهم



شکل ۲۰. منحنی جریان ریل با مقاومت کم تر در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ کیلو اهم

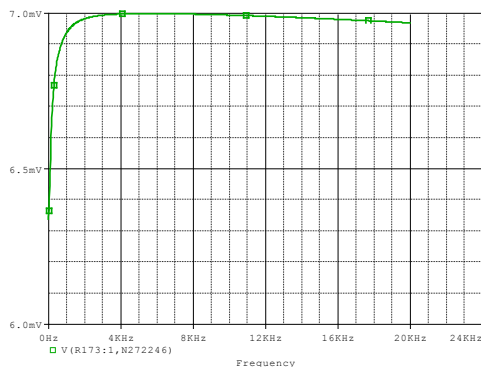


شکل ۱۷. منحنی جریان ریل با مقاومت کم تر در شرایط نامتعادلی جریان ترکشن به ازای مقاومت ۱ اهم

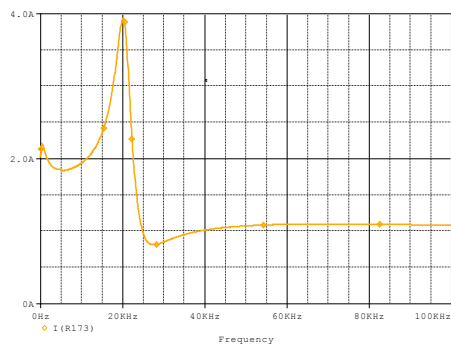
با افزایش مقاومت ریل، اثر افزایش ولتاژ دوسر گیرنده در فرکانس مدارراه بیشتر می‌شود؛ به طوری که منحنی‌های ولتاژ (شکل‌های ۱۵ و ۱۸) در این فرکانس دارای یک ماکزیمم نسبی با دامنه‌های به ترتیب ۱۵ و ۶۰ ولت هستند.

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

کلی ظرفیت خازن متغیر با دماست، اما ظرفیت این نوع خازن‌ها با دما تغییرات چندانی نمی‌کند، به همین دلیل هم از آن‌ها برای مداراتی که احتیاج به ظرفیت خازنی ثابت دارند استفاده می‌شود. بنابراین برای بررسی اثر دما بر عملکرد باندهای امپدانس-با صرفنظر از تغییر مقاومت سایر تجهیزات شامل پایانه‌ها، اتصالات و غیره با دما- تنها می‌توان اثر دما بر مقاومت سیم‌پیچ‌ها را در نظر گرفت. برای این منظور دما از ۲۰ درجه به ۷۰ درجه سانتیگراد (برای مشاهده بیشترین تغییرات) افزایش داده‌شد؛ به این صورت که مقاومت سیم‌پیچ‌های باند در مدل اولیه -که به صورت مقاومت سری با اندوکتانس معادل سیم‌پیچ مدل شده‌اند- مطابق روابط (۲) و (۳) از ۵۰ میکرواهم به ۶۰ میکرواهم افزایش یافت. سپس نتایج مربوط به ولتاژ بین ریل‌ها و جریان ریل‌ها در محل واحد تنظیم مربوط به گیرنده مدارراه، به ازای جریان خروجی از قطار نسبت به فرکانس اندازه‌گیری شدند. این نتایج در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲۱. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط افزایش دما تا ۷۰ درجه سانتیگراد



شکل ۲۲. منحنی جریان ریل در شرایط افزایش دما تا ۷۰ درجه سانتیگراد

بدیهی است که با افزایش مقاومت، منحنی‌های جریان ریل نیز به شدت از یکدیگر فاصله می‌گیرند؛ به طوری که برای دقت بیشتر در دو شکل مجزا ترسیم شده‌اند. همچنین مشابه با منحنی ولتاژ دارای یک ماکزیمم نسبی در فرکانس عملیاتی مدارراه (۶/۱ کیلوهرتز) هستند که دامنه این ماکزیمم نیز با افزایش مقاومت افزایش می‌یابد.

۳-۴ بررسی اثر دما

به طور کلی یکی از اشکالات اساسی مدارهای راه تغییر عملکرد آن‌ها نسبت به شرایط آب و هوایی مختلف است؛ به گونه‌ای که این سیستم‌ها اغلب در شرایط سخت دچار خطا شده و قابلیت اطمینان پایینی خواهند داشت [Huang, Li and Wei, 2017]. یکی از مهم‌ترین فاکتورهای تأثیرگذار دما است. تحقیقات انجام گرفته بر روی یک مدل مدارراه فرکانس صوتی نشان می‌دهد که علی‌رغم این که ولتاژ خروجی فرستنده مدارراه با دما تغییر می‌کند، جریان گیرنده مدارراه که مهم‌ترین بخش یک مدارراه فرکانس صوتی است با تغییرات دمایی تغییر نخواهد کرد [Huang, Li and Wei, 2017]. لذا در این مقاله تنها اثر دما بر باند امپدانس مورد مطالعه قرار گرفته‌است.

هسته باند امپدانس B3-4000A از سیم‌پیچ‌های مسی که بر روی یک هسته آهنی پیچیده شده‌اند، تشکیل شده است. مقاومت این سیم‌پیچ‌ها برای جریان‌های DC، ۵۰ میکرو اهم و برای جریان‌های AC، در فرکانس ۵۰ هرتز، ۳ میلی اهم است. اما همانطور که می‌دانیم، مقاومت‌ها در شرایط دمایی مختلف تغییر می‌کنند. اثر تغییر مقاومت با دما از رابطه ۱ و ۲ قابل محاسبه است:

$$\Delta R = R_0 * \alpha * \Delta \theta \quad (2)$$

$$R = R_0 (1 + \alpha * \Delta \theta) = R_0 (1 + \alpha * (\theta - \theta_0)) \quad (3)$$

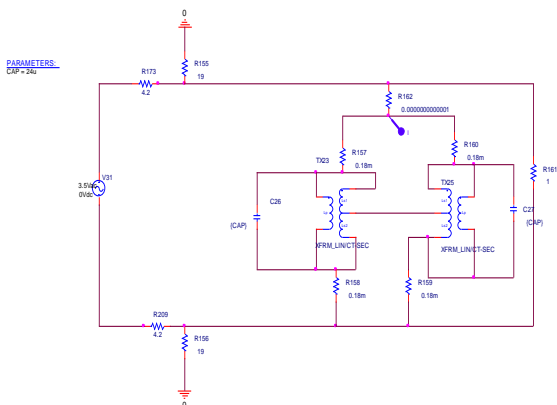
که در این رابطه R و R_0 به ترتیب مقاومت سیم‌پیچ در دماهای θ و θ_0 بوده و α ضریب دمایی مقاومت هادی مسی برابر با ۰/۰۰۳۸۶۲ می‌باشد.

همچنین این سیم‌پیچ‌ها به موازات واحدهای تنظیم که شامل خازن‌های پولی‌پروپیلن^۳ هستند، قرار می‌گیرند؛ در حالت

به ریل نباید از مقدار تعیین شده در این جدول به ازای بلندترین طول مدارراه و فرکانس عملیاتی مدارراه افزایش یابد.

اگر مقداری برای حساسیت گیرنده تعیین نشود، رله این مدارراه برای شانتی بین ۱/۵ تا ۲/۵ اهم در دوسر واحد تنظیم مربوط به گیرنده سقوط می کند.

چنانچه به ازای ولتاژی در محدوده مشخص شده در جدول ۴ و در شرایط خالی بودن تراک، جریان به زیر مقدار ۳۵۰ میلی آمپر افت کند، با فرض این که اشکالی در بالاست و اتصالات سیستم ترکشن وجود نداشته باشد، می توان خطا را به باند امپدانس نسبت داد. با این مفروضات برای مشاهده اثر عدم تنظیم باند امپدانس، مدارراه موجود در موقعیت ۱۷۰۰ متری مورد مطالعه قرار گرفت؛ از آنجا که هدف ارزیابی جریان مدارراه است، مدل جدیدی از مدارراه مذکور و باندهای امپدانس قرارگرفته بر روی آن مستقل از سایر تجهیزات سیستم ترکشن مطابق با شکل ۲۳ ارائه گردید.



شکل ۲۳. مدل مدارراه و باندهای امپدانس قرارگرفته بر روی آن

در این مدل فرستنده مدارراه توسط یک منبع ولتاژ AC با دامنه ۳/۵ ولت و گیرنده آن به شکل ساده به صورت یک مقاومت ۱ اهمی در نظر گرفته شد؛ سپس مقادیر ظرفیت خازنی - با در نظر گرفتن ظرفیت های واقعی موجود - تغییر داده شده و در هر مرحله منحنی های جریان عبوری از باندهای امپدانس و گیرنده مدارراه (مقاومت ۱ اهمی) نسبت به فرکانس ثبت شدند. نتایج شبیه سازی مطابق شکل های ۲۴ و ۲۵ می باشد.

لازم به ذکر است که افزایش دما تا ۷۰ درجه سانتیگراد تنها برای مشاهده تأثیر دما بر روی باند امپدانس در نظر گرفته شده است؛ در عمل گستره دمای قابل تحمل برای تجهیزات کنارخط بین ۲۰- درجه تا ۵۵ درجه سانتیگراد و برای تجهیزات واقع در اتاق کنترل -مانند فرستنده تا گیرنده- بین صفر تا ۴۰ درجه سانتیگراد می باشد؛ به عبارت دیگر اعمال این دما به تجهیزات سیستم از نظر فیزیکی امکان پذیر نمی باشد.

مقایسه منحنی ولتاژ بدست آمده در این سناریو با منحنی اولیه نشان می دهد که تغییر دما اثر قابل توجهی بر ولتاژ دو سر گیرنده ندارد. کوچک بودن مجموع مقاومت سیم پیچ ها نسبت به سایر مقاومت های سیستم مرجع علت اصلی این عدم تغییر می باشد. این موضوع در منحنی های جریان نیز قابل مشاهده است.

۳-۵ بررسی اثر واحد تنظیم

هر باند امپدانس با یک واحد تنظیم -خازن- کوپل شده و تشکیل یک مدار تشدید موازی را می دهد؛ ظرفیت این خازن به گونه ای انتخاب می شود که در فرکانس عملیاتی مدارراه - فرکانس تشدید- از عبور جریان مدارراه از باند امپدانس جلوگیری شود. مقادیر ظرفیت خازنی برای فرکانس های عملیاتی مختلف در جدول ۲ ذکر شده اند. چنانچه این واحد تنظیم آسیب ببیند، باند امپدانس از تنظیم خارج شده و مقدار قابل توجهی از جریان سیگنالینگ را از خود عبور می دهد. این از دست رفتن سیگنال جریان، موجب می شود که جریان در پایانه گیرنده افت کرده و رله مدارراه در معرض سقوط قرار گیرد، در حالی که مدارراه اشغال نشده است.

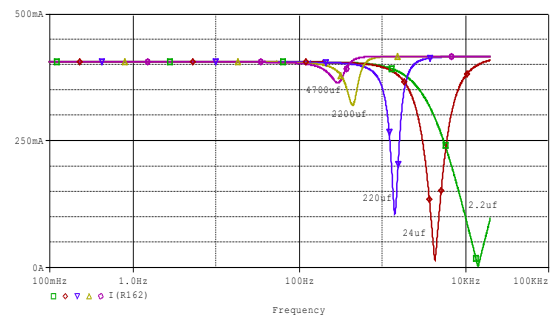
در حالت کلی مدارراه T121-M طوری تنظیم می شود که به ازای اعمال یک ولتاژ مشخص توسط فرستنده به ریل، دامنه جریان در طرف دیگر مدارراه در محل گیرنده حدود ۳۵۰ میلی آمپر گردد. دامنه این ولتاژ بسته به نوع مدارراه -یک طرفه یا دو طرفه بودن- نحوه به کارگیری، طول و فرکانس مدارراه متفاوت است. محدوده این ولتاژ برای یک مدارراه یک طرفه در جدول ۴ گزارش شده است. تحت هیچ شرایطی دامنه ولتاژ تغذیه ریل

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

جدول ۴. ولتاژ ریل به ریل به ازای طول و فرکانس مدارراه [Bombardier, 2008]

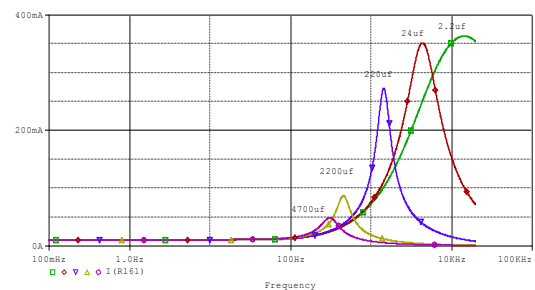
ولت (F8)		ولت (F7)		ولت (F6)		ولت (F5)		ولت (F4)		ولت (F3)		ولت (F2)		ولت (F1)		طول مدارراه (متر)
Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	
۲/۴	۳/۹	۱/۹	۳/۱	۲/۱	۳/۵	۱/۶	۲/۶	۲/۴	۴/۰	۲/۰	۳/۳	۲/۳	۳/۶	۱/۸	۲/۹	۱۰۰ >
۳/۴	۴/۴	۲/۸	۳/۶	۳/۱	۴/۰	۲/۴	۳/۱	۳/۵	۴/۶	۲/۹	۳/۹	۳/۳	۴/۳	۲/۵	۳/۴	۱۰۰ تا ۱۵۰
۴/۴	۵/۵	۳/۶	۴/۵	۴/۰	۵/۰	۳/۱	۳/۹	۴/۶	۵/۹	۳/۹	۴/۸	۴/۳	۵/۴	۳/۴	۴/۳	۱۵۱ تا ۲۰۰
۵/۵	۶/۸	۴/۵	۵/۵	۵/۰	۶/۱	۳/۹	۴/۸	۵/۹	۷/۱	۴/۸	۵/۹	۵/۴	۶/۵	۴/۳	۵/۱	۲۰۱ تا ۲۵۰
۶/۸	۸/۴	۵/۵	۶/۸	۶/۱	۷/۵	۴/۸	۵/۸	۷/۱	۸/۸	۵/۹	۷/۱	۶/۵	۸/۰	۵/۱	۶/۳	۲۵۱ تا ۳۰۰
۷/۴	۸/۹	۵/۹	۷/۲	۶/۶	۸/۰	۵/۱	۶/۲	۷/۷	۹/۵	۶/۳	۷/۷	۷/۰	۸/۶	۵/۵	۶/۶	۳۰۱ تا ۳۵۰

همانطور که در منحنی‌های جریان مشاهده می‌شود، برای مقدار استاندارد ظرفیت خازنی (۲۴ میکروفاراد) باند امپدانس در فرکانس ۶/۱ کیلوهرتز رزونانس کرده، جریان عبوری از آن تقریباً به صفر رسیده و نتیجتاً تمام جریان ارسالی از سوی فرستنده مدارراه از مقاومت ۱ اهمی معادل گیرنده عبور می‌کند؛ به این ترتیب رله مدارراه انرژی‌دار باقی مانده و بخش مورد مطالعه آزاد اعلام می‌گردد.



شکل ۲۴. جریان عبوری از باندهای امپدانس برای مقادیر مختلف ظرفیت خازنی

برای سایر مقادیر ظرفیت خازنی به جز خازن ۲/۲ میکروفاراد، تقریباً تمام جریان ارسالی در فرکانس ۶/۱ کیلوهرتز از باند امپدانس عبور می‌کند؛ این موضوع باعث می‌بشود که جریان عبوری از گیرنده به صفر رسیده و رله مدارراه سقوط کند. برای مقدار خازنی ۲/۲ میکروفاراد بخشی از جریان -حدود ۳۰۰ میلی-آمپر- از باند امپدانس و باقی جریان از گیرنده مدارراه عبور می‌کند. این مقدار جریان برای نگهداشتن رله مدارراه کافی نیست، در نتیجه رله مدارراه خواهد افتاد.



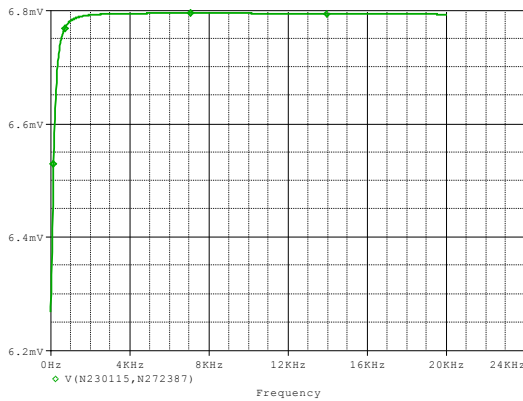
شکل ۲۵. جریان عبوری از گیرنده (مقاومت ۱ اهمی) برای مقادیر مختلف ظرفیت خازنی

در حالت کلی باتوجه به مقاومت ناچیز سیم‌پیچ‌های باند امپدانس نسبت به گیرنده مدارراه، در تمامی فرکانس‌ها به جز فرکانس عملیاتی مدارراه -فرکانس تشدید باند امپدانس- بخش عمده جریان ارسالی از باند امپدانس عبور می‌کند. با افزایش

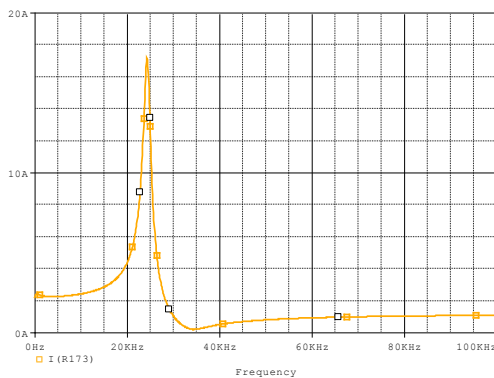
داده شد؛ سپس نتایج هر مرحله اندازه گیری و ثبت شدند، که در ادامه به تشریح آن پرداخته می شود.

۳-۶-۱ تحلیل اثر پارامتر هدایت الکتریکی ریل به زمین بر جریان ترکشن

برای مشاهده اثر پارامتر هدایت الکتریکی ریل به زمین بر جریان سیستم ترکشن در بخش اول مقدار این پارامتر در مدل سیستم ترکشن از 0.01 S/km به 2 S/km افزایش داده شد. آنگاه متغیرهای ولتاژ بین ریل ها و جریان ریل در محل واحد تنظیم مربوط به گیرنده اندازه گیری شدند؛ نتایج مربوطه در شکل های ۲۶ و ۲۷ نمایش داده شده است.



شکل ۲۶. منحنی ولتاژ دوسر گیرنده مدارراه در شرایط افزایش هدایت الکتریکی ریل به زمین (2 S/km)



شکل ۲۷. منحنی جریان ریل در شرایط افزایش هدایت الکتریکی ریل به زمین (2 S/km)

بررسی منحنی ولتاژ (شکل ۲۶) کاهش دامنه ولتاژ به میزان ۲ میلی اهم را نشان می دهد که در مقایسه با منحنی ولتاژ در

ظرفیت خازنی فرکانس تشدید باند امپدانس به مقادیر پایین تر انتقال یافته و اثر آن نیز کاهش می یابد؛ به طوری که برای ظرفیت های خازنی بالاتر از $4700 \mu\text{F}$ میکروفاراد تمام جریان ارسالی در تمامی فرکانس ها از باندامپدانس عبور می کند.

۳-۶-۲ بررسی اثر مشخصات هندسی خط (هدایت الکتریکی ریل به زمین)

به دلیل مقاومت الکتریکی ریل ها و همچنین هدایت الکتریکی ریل به زمین بخشی از جریان برگشتی قطار در مسیر بازگشت به پست وارد زمین می شود، که به آن جریان سرگردان گفته می شود. این جریان مشکلات متعددی از جمله افزایش پتانسیل ریل ها را بوجود می آورد [Zaboli et. Al, 2017]. پارامترهای الکتریکی که عموماً مقدار جریان زمین را تحت تأثیر قرار می دهند، مقاومت ویژه زمین و هدایت الکتریکی ریل به زمین هستند. بعلاوه، پارامتر دوم (هدایت الکتریکی ریل به زمین)، یک پارامتر مهم در تمام سیستم ترکشن خطوط ریلی است، چرا که مقدار جریان خط تزریق شده توسط فرستنده سیگنالینگ که از مدارراه به سمت زمین (قبل از ورود به مدار گیرنده) جاری می شود را، تعیین می کند. لذا، این پارامتر توان مورد نیاز فرستنده و حساسیت گیرنده را تعیین می کند. برای مقادیر خیلی بزرگ پارامتر مذکور، تأثیر موازی شدن محورهای وسیله نقلیه را نمی توان به هیچ وجه، تشخیص داد. این مسئله کران بالایی روی هدایت الکتریکی ریل به زمین ایجاد می کند (این کران معمولاً حدود 2 S/km با مقدار استاندارد حدود 0.01 S/km است). برای تحلیل اثر پارامتر مذکور بر سیستم ترکشن و سیستم مدارراه به ترتیب از دو مدل زیر استفاده شد:

- مدل سیستم ترکشن مرجع شامل مدل خطوط، قطار و باند امپدانس
- مدل یکی از مدارهای راه و باندهای امپدانس نصب شده بر روی آن به طور مجزا (مشابه مدل استفاده شده در سناریوی پنجم)

به این ترتیب در هر مدل یکبار هدایت الکتریکی ریل به زمین برابر مقدار 2 S/km و بار دیگر برابر مقدار 10 S/km قرار

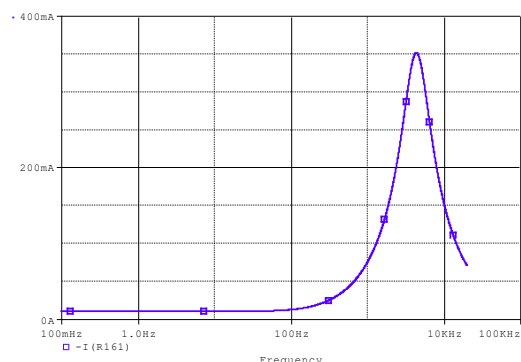
طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

با بررسی منحنی‌های ولتاژ و جریان در این مرحله می‌توان نتیجه گرفت که افزایش هدایت الکتریکی تأثیر قابل توجهی در منحنی‌های ولتاژ و جریان ریل به ازای جریان خروجی از وسیله نقلیه در فرکانس‌های پایین - فرکانس عملیاتی مدارراه - ایجاد نمی‌کند؛ اما در فرکانس‌های بالا دامنه پیک جریان به شدت افزایش پیدا کرده و فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر ایجاد شده در مدل پست الکتریکی نیز به مقدار بالاتری - بیش‌تر از ۲۰ کیلوهرتز - انتقال می‌یابد.

۳-۶-۲ تحلیل اثر پارامتر هدایت الکتریکی ریل به زمین بر

جریان سیستم مدارراه

همانطور که ذکر گردید، برای مشاهده اثر پارامتر هدایت الکتریکی ریل به زمین بر جریان سیستم مدارراه، مدلی از سیستم مدارراه - شامل فرستنده و گیرنده - به همراه باندهای امپدانس موجود بر روی آن، مستقل از سایر تجهیزات سیستم ترکشن مرجع ارائه گردید. در این مدل پارامتر هدایت الکتریکی - که توسط مقاومت‌های موازی مدل شده‌اند - به ترتیب برابر سه مقدار $2,0/0,1$ S/km و 10 قرار داده شد و در هر مرحله جریان عبوری از گیرنده مدارراه به ازای ولتاژ اعمال شده توسط فرستنده - معادل $3/5$ ولت - اندازه‌گیری گردید. نتایج مربوط به این اندازه‌گیری‌ها در شکل‌های ۳۰ تا ۳۲ نشان داده شده‌است.



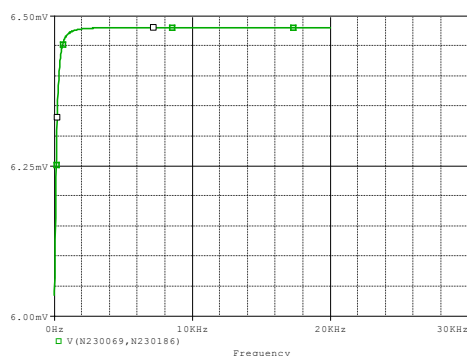
شکل ۳۰. جریان عبوری از گیرنده (مقاومت ۱ اهمی) به ازای

هدایت الکتریکی $0,1/0,1$ S/km

حالت استاندارد مقدار قابل توجهی به شمار نمی‌رود. علاوه بر این همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش پارامتر هدایت الکتریکی شیب منحنی در فرکانس‌های بالا به صفر می‌رسد یا به عبارت دیگر باند گذر فیلتر موجود در پست الکتریکی با این آرایش وسیع‌تر می‌شود.

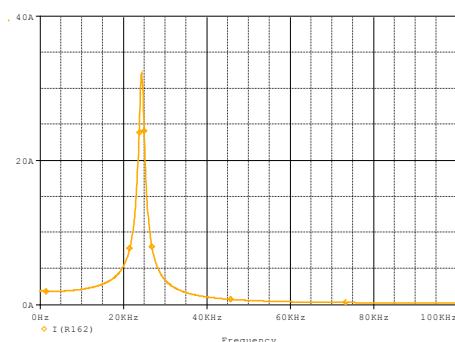
بدیهی است که با افزایش هدایت الکتریکی جریان ترکشن DC عبوری از ریل‌ها کاهش می‌یابد. اما در مورد بخش AC جریان (جریان مخرب سیستم مدارراه) همانطور که در شکل ۲۷ مشاهده می‌شود، دامنه جریان در فرکانس‌های پایین تقریباً مشابه با آرایش استاندارد می‌باشد و برای فرکانس‌های بالا به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که پیک جریان به ۱۷ آمپر می‌رسد (این مقدار برای سیستم مرجع حدود ۴ آمپر می‌باشد).

برای کامل شدن تحلیل‌ها در بخش دوم مقدار پارامتر مذکور در مدل سیستم برابر 10 S/km قرار داده شد. سپس متغیرهای ولتاژ و جریان مجدداً اندازه‌گیری شدند. منحنی‌های حاصل در شکل‌های ۲۸ و ۲۹ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲۸. منحنی ولتاژ دو سر گیرنده مدارراه در شرایط افزایش

هدایت الکتریکی ریل به زمین (10 S/km)



شکل ۲۹. منحنی جریان ریل در شرایط افزایش هدایت الکتریکی

ریل به زمین (10 S/km)

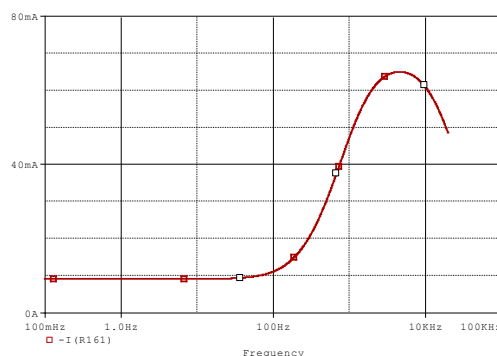
تأثیر تغییر سایر پارامترهای هندسی خط ترکشن (به عنوان مثال ارتفاع و جابجایی افقی هادی‌های هوایی، فاصله افقی بین دو خط مجاور و غیره) در مقاله [D'Addio et al. 1999] در میان رنج قابل قبول برای هر پارامتر تحلیل شده است.

۴. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

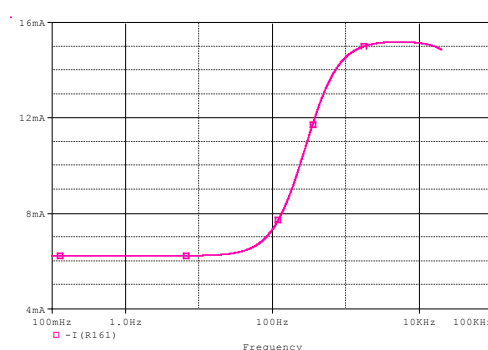
باتوجه به پیچیدگی روز افزون سیستم‌های ریلی و وابستگی اجزا مختلف به یکدیگر، مطالعه و اتخاذ تکنیک‌های مبتنی بر شبیه‌سازی برای اطمینان از سازگاری الکتریکی و همچنین ارزیابی دسترسی‌پذیری کل سیستم امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، در این مقاله به منظور بهبود عملکرد مدارهای راه فرکانس صوتی TI21-M در خطوط متروی تهران، به ارزیابی و تحلیل باندهای امپدانس نصب شده بر روی آن مدل B3-4000A پرداخته شده است.

باند امپدانس نصب شده بر روی مدار راه TI21-M از نوع B3-4000A شرکت بومباردیر است؛ این تجهیز از یک سیم‌پیچ با هسته آهنی به موازات خازن پولی پروپیلن تشکیل شده است که با یکدیگر رزونانس کرده و امپدانس بزرگی در فرکانس مدار راه بوجود می‌آورند [Bombardier, 2005]؛ به این ترتیب از عبور جریان سیگنالینگ جلوگیری می‌کنند. همچنین امپدانس کوچکی در جریان‌های DC و فرکانس پایین ایجاد کرده و امکان عبور جریان ترکشن را فراهم می‌سازند. با این دیدگاه ساختمان، عملکرد، الزامات نصب، نگهداری و بهره‌برداری باندهای امپدانس به عنوان جزئی از سیستم‌های مدار راه که به‌طور واضح به عنوان ابزار مهمی در ایمنی و عملکرد صحیح خطوط ریلی پرسرعت عمل می‌کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با این هدف ابتدا مدل کاملی از خط دوم متروی تهران در فاصله بین دو پست الکتریکی شامل مدل خطوط حرکت و ریل سوم (به عنوان هادی‌های اصلی سیستم ترکشن)، مدل باند امپدانس و نیز مدل قطار (به عنوان عامل اصلی تداخلات در سیستم‌های مدار راه) با در دست داشتن پارامترهای واقعی الکتریکی و هندسی ارائه گردید. سپس به منظور بررسی تأثیر متغیرهای مختلف باند امپدانس بر روی سیستم مدار راه شش سناریوی مختلف تعریف شدند. نهایتاً مدل تعریف شده در نرم افزار



شکل ۳۱. جریان عبوری از گیرنده (مقاومت ۱ اهمی) به ازای هدایت الکتریکی ۲ S/km



شکل ۳۲. جریان عبوری از گیرنده (مقاومت ۱ اهمی) به ازای هدایت الکتریکی ۱۰ S/km

همانطور که در منحنی شکل ۳۰ مشاهده می‌شود، به ازای مقدار نامی ۰٫۰۱ برای هدایت الکتریکی جریان عبوری از گیرنده سیستم مدار راه در فرکانس ۶/۱ کیلوهرتز برابر ۳۵۰ میلی آمپر است؛ این جریان برای نگه‌داشتن رله گیرنده کافی است. بنابراین چنانچه شانتی با مقاومت ۱/۵ تا ۲/۵ اهم (با فرض این‌که هیچ مقداری برای حساسیت گیرنده انتخاب نشده باشد) بر روی مدار راه قرار گیرد به درستی تشخیص داده می‌شود. با افزایش پارامتر مذکور، همانطور که در منحنی‌های جریان شکل‌های ۳۱ و ۳۲ دیده می‌شود، جریان عبوری از گیرنده سیستم مدار راه به شدت کاهش می‌یابد، به طوری که دامنه جریان در فرکانس عملیاتی مدار راه به ترتیب برابر ۶۵ و ۱۵ میلی آمپر می‌گردد. این کاهش جریان سبب می‌شود که رله گیرنده افتاده و مدار راه اشغال اعلام گردد در حالی که خط آزاد است.

طراحی باند امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

سیم پیچ‌های باند امپدانس - که دارای مقاومت بسیار کمی هستند - می‌گردند. این از دست رفتن سیگنال جریان، موجب می‌شود که جریان در پایانه گیرنده افت کرده و ولت‌ها در مدار راه در معرض سقوط قرار گیرد، در حالی که مدار راه اشغال نشده است. بنابراین اطمینان از تنظیم صحیح واحد خازنی باند امپدانس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

✓ هدایت الکتریکی ریل به زمین پارامتر بسیار مهمی در سیستم ترکشن است، این پارامتر نه تنها بر توزیع جریان بازگشتی در هادی‌های سیستم تأثیر می‌گذارد، بلکه میزان توان مورد نیاز فرستنده و حساسیت گیرنده مدار راه را هم تعیین می‌کند. افزایش این مشخصه تأثیر قابل توجهی در منحنی‌های ولتاژ و جریان ریل به ازای جریان ترکشن خروجی از وسیله نقلیه در فرکانس‌های پایین - فرکانس عملیاتی مدار راه - ایجاد نمی‌کند؛ اما دامنه جریان در فرکانس‌های بالا را به شدت افزایش می‌دهد. همچنین با افزایش پارامتر مذکور جریان عبوری از گیرنده سیستم مدار راه به ازای جریان خروجی از فرستنده به شدت کاهش می‌یابد؛ این کاهش جریان سبب می‌شود که رله گیرنده افتاده و مدار راه اشغال اعلام گردد در حالی که خط آزاد است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Rectifier Substation
2. Multi-Conductor Transmission Line
3. Poly-propylene
4. Bi-directional
5. Stray Current

۶. مراجع

-Bombardier Transportation (2008) "Audio frequency track circuit style TI21-M technical manual", Bombardier Transportation.

-Bombardier Transportation (2005) "Impedance bond (type B3-4000A)", Bombardier Transportation.

Pspice شبیه‌سازی شده و به همراه نتایج علمی و تحلیل‌ها ارائه شدند؛ این نتایج را می‌توان به طور کلی به صورت زیر بیان نمود:

✓ تغییر فاصله باندهای امپدانس نسبت به مرکز ناحیه تنظیم مدار راه و نیز تغییر فاصله باندهای امپدانس از یکدیگر تأثیر قابل توجهی روی جریان ریل و ولتاژ بین ریل‌ها در محل گیرنده مدار راه در فرکانس عملیاتی و نتیجتاً بر عملکرد مدار راه ندارد. این تغییرات تنها در فرکانس‌های بالا بر روی متغیرهای مورد نظر تأثیرگذار هستند. بدیهی است که با تغییر موقعیت باند امپدانس (تغییر مقاومت بین اجزاء مدار راه) دامنه جریان ترکشن DC عبوری تغییر خواهد کرد.

✓ افزایش تعداد باندهای امپدانس نصب شده دامنه ولتاژ دوسر گیرنده را در فرکانس عملیاتی به میزان بسیار کمی (در مقایسه با مجموع ولتاژ دو سر گیرنده به ازای جریان ترکشن) کاهش می‌دهد. در عمل نصب این تعداد باند امپدانس بر روی مدار راه با توجه به تأثیر بسیار کم آن در بهبود عملکرد مدار راه نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد بلکه با نصب تعداد زیادی باند امپدانس طول مفید مدار راه کاهش خواهد یافت.

✓ جریان ترکشن نامتعادل به شدت بر عملکرد مدار راه تأثیر می‌گذارد؛ به عنوان مثال با افزایش مقاومت یکی از ریل‌ها به میزان ۱ میلی اهم، اختلاف جریان دو سر باند امپدانس به حدود ۶۵۰ آمپر می‌رسد. این جریان باعث اشباع باند امپدانس و بارگیری از مدار راه می‌شود؛ در این حالت حضور قطار بر روی بخش مدار راه به درستی تشخیص داده نمی‌شود.

✓ افزایش دما - به دلیل کوچک بودن مجموع مقاومت سیم پیچ‌های باند امپدانس نسبت به سایر مقاومت‌های سیستم - اثر قابل توجهی بر ولتاژ دو سر گیرنده مدار راه ندارد.

✓ برهم خوردن تنظیم باند امپدانس باعث عبور بخش عمده جریان ارسالی از فرستنده مدار راه از

- Wu, X. and Li, G. (2016) "Research on immunity to electric impulsive interference of ZPW-2000 track circuit in station", *International Journal of Security and Its Applications*, Vol. 10, No. 1, pp. 257–264.
- Yang, Sh., Roberts, C. and Chen, L. (2013) "Development and performance analysis of a novel impedance bond for railway track circuits", *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 3, Iss. 2, pp. 50–55.
- Yu-qiao W., Wei, L., Xue-feng, Y., Guo, Y., Qi-gao, F. and Li-ping, Zh. (2010) "Modeling and simulation the distribution of metro stray current", in *Proc. ICCASM*, Vol. 1, pp.704–707.
- Zaboli, A., Vahidi, B., Yousefi, S. and Hosseini-Biyouki, M. M. (2017) "Evaluation and control of stray current in DC-electrified railway systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, Issue. 2.
- صندیدزاده، محمدعلی، صفرخانی، شیرین، حیدری، امیر، (۱۳۹۲) "طراحی و شبیه‌سازی شبکه تغذیه ترکشن راه‌آهن شهری همراه با روش عددی برای تسریع حل معادلات وتضمین همگرایی"، فصلنامه علمی پژوهشی حمل و نقل، سال پنجم، شماره دوم، ص. ۲۳۲–۲۱۷.
- Paul, Clayton, R. (1994) "Analysis of multiconductor transmission lines", New York, Wiley.
- D'Addio, G., Fracchia, M., Mariscotti, A. and Pozzobon, P. (1999) "Sensitivity analysis of railway line impedance to variations of electrical and geometrical parameters", in *Proc. World Congress Railway Research*, Tokyo, Japan, p. 262.
- Huang, Z., Li, Sh. and Wei, X. (2017) "Analysis of temperature impact on audio frequency track circuits using linear regression model", *AIP Conference Proceedings*.
- Kusko, A. and Peeran, S. M. (1985) "Tuned filters for traction rectifier sets," *IEEE Transactions on Industrial Application*, Vol. 21, pp. 1571–1579.
- Mariscotti, A. (2003) "Distribution of the traction return current in AC and DC electric railway systems," *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 18, No. 4, pp. 1422–1432.
- Sandidzadeh, M. A. and Shafipour, A. (2012) "Controlling and simulation of stray currents in DC railway by considering the effects of collection mats," in *Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway*, X. Perpinya, and Ed.Rijeka, Croatia: InTech.

طراحی باندها امپدانس برای مدارهای راه فرکانس صوتی در خطوط ریلی

محمدعلی صندیدزاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق الکترونیک را در سال ۱۳۷۰ از دانشگاه تهران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق کنترل در سال ۱۳۷۲ را از همان دانشگاه اخذ نمود. در سال ۱۳۷۹ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی برق کنترل، از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان کنترل و سیگنالینگ راه آهن و قطار بوده و در حال حاضر عضو هیات علمی با مرتبه دانشیار در دانشگاه علم و صنعت ایران است.



منیره منشی زاده، درجه کارشناسی در رشته مهندسی برق قدرت را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه سمنان و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی کنترل و علائم در سال ۱۳۹۶ را از دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ نمود.

