بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

مدلسازی و محاسبات سیستم زمین، ولتاژ ریل و جریان‌های سرگردان برای شبکه‌های قطار شهری و ارائه روش‌های بهبود آنها

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت

محمدتقی رئیسی

استاد راهنما

دکتر مهدی معلم

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده برق و کامپیوتر

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی برق – قدرت آقای محمدتقی رئیسی

تحت عنوان

مدلسازی و محاسبات سیستم زمین، ولتاژ ریل و جریان‌های سرگردان برای شبکه‌های قطار شهری و ارائه روش‌های بهبود آنها

در تاریخ ۹۰/۹/۷ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه — دکتر مهدی معلم

۲- استاد مشاور پایان‌نامه — دکتر حمیدرضا کارشناس

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده — دکتر امیر برجی

سپاس بی کران پروردگار یکتا را که هستی مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

خداوند را شاکرم که توانستم این دوره از دوران تحصیلم را به پایان برسانم. از خانواده عزیزم که همواره من را حمایت کردند سپاسگزارم. از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر مهدی معلم که انجام این پایان‌نامه با هدایت و راهنمایی‌های ارزنده ایشان میسر گردید، صمیمانه تشکر می‌نمایم. از جناب آقای دکتر کارشناس، استاد مشاور پایان‌نامه و همچنین جناب آقای دکتر اکبر ابراهیمی و جناب آقای دکتر میرزاییان که داوری پایان نامه را برعهده داشتند تشکر می‌کنم. همچنین از زحمات جناب آقای دکتر امیر برجی سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده و کارمندان محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده و دانشگاه قدردانی می‌نمایم. برای تمام این عزیزان آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به :

روح پاک اولین معلم زندگیم، پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم

و به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر .

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
چکیده ۱
فصل اول: مقدمه
۱-۱ تاریخچه ۴
۱-۲ اهمیت موضوع ۵
۱-۳ روند ارائه مطالب ۷
فصل دوم: سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc
۲-۱ سیستم تغذیه ac ۱۰
۲-۲ سیستم تغذیه dc ۱۳
۲-۳ پارامترهای سیستم حمل و نقل الکتریکی ۱۶
۲-۴ سیستم قطار شهری اصفهان ۲۰
۲-۵ محاسبه خطای اتصال کوتاه ۲۷
فصل سوم: مطالعه سیستم زمین اجرا شده در ایستگاه‌های قطار شهری اصفهان
۳-۱ مفاهیم اساسی ۳۶
۳-۲ روند طراحی سیستم زمین ۴۰
۳-۳ بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم زمین ۵۱
۳-۴ آنالیز سیستم زمین ایستگاه‌های قطار شهری اصفهان ۵۸
۳-۴-۱ ارزیابی عملکرد سیستم زمین بر اساس جریان خطای ۲۰ کیلو آمپر ۵۹
۳-۴-۲ ارزیابی عملکرد سیستم زمین بر اساس جریان خطای ۱۲ کیلوآمپر ۶۵
فصل چهارم: پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc
۴-۱ پتانسیل ریل‌ها و جریانهای سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc ۷۱
۴-۲ انواع روش‌های زمین کردن ریل‌ها ۷۴
۴-۳ مدل کردن مسیر برگشت جریان به منظور بررسی پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان ۷۶
۴-۳-۱ معیارهای سنجش جریانهای سرگردان ۸۱
۴-۴ بررسی تاثیر عوامل مختلف بر پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان ۸۲
۴-۴-۱ ویژگی‌های سیستم حمل و نقل الکتریکی dc مورد بررسی ۸۲
۴-۴-۲ نتایج شبیه‌سازی ۸۴
فصل پنجم: شبیه‌سازی پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در قطار شهری اصفهان
۵-۱ خط یک قطار شهری اصفهان ۹۰
۵-۲ شبیه‌سازی پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در خط یک قطار شهری اصفهان ۹۲
۵-۲-۱ نتایج شبیه‌سازی ۹۶

۵-۲-۲ خطای اتصال خط تغذیه مثبت به ریل‌ها ۱۰۵
۵-۳ بررسی عملکرد سیستم‌های جمع آوری جریان سرگردان ۱۰۶
۵-۴ بررسی عملکرد تجهیزات کنترل ولتاژ و ارائه روش پیشنهادی برای کاهش جریان‌های سرگردان ۱۱۳
۵-۴-۱ روش پیشنهادی به منظور کاهش جریان‌های سرگردان ۱۱۷

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۱
۶-۲ پیشنهادات ۱۲۴

مراجع ۱۲۵

چکیده

امروزه سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی به سرعت در شهرها در حال گسترش هستند و با داشتن مزایایی مثل کاهش ترافیک، کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، یکی از ارکان اصلی حمل و نقل در شهرهای بزرگ محسوب می‌شوند. سیستم حمل و نقل الکتریکی یک سیستم پیچیده است که دارای بخش‌های مختلفی می‌باشد. سیستم زمین یکی از مهم‌ترین بخش‌های برقی شبکه‌های حمل ونقل الکتریکی می‌باشد که در این تحقیق به آن پرداخته می‌شود. در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی وقتی راجع به زمین بحث می‌شود، بایستی به دو موضوع توجه کرد، نخست سیستم زمین که بایستی برای اهدافی مثل جلوگیری از مواجه شدن افراد با خطر شوک الکتریکی در هنگام بروز خطا در سیستم ، عملکرد صحیح تجهیزات حفاظتی و هدایت گذراها و نویز به زمین برای سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی طراحی شود و مساله دیگر، استفاده از ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان در شبکه‌های حمل و نقل الکتریکی dc می‌باشد که باعث ایجاد پتانسیل الکتریکی ریل‌ها نسبت به زمین و نشت جریان‌های سرگردان به زمین می‌شود. پتانسیل الکتریکی ریل‌ها نسبت به زمین می‌تواند باعث ایجاد خطر شوک الکتریکی برای افراد شود و مهم‌ترین اثر جریان‌های سرگردان، خوردگی تاسیسات فلزی مجاور مدفون در زیر خاک مثل لوله‌های فلزی و آرماتورهای تقویت کننده بتن می‌باشد که در صورت عدم کنترل می‌تواند آسیب جدی به زیرساخت‌های شهری وارد کند. بنابراین یکی از اهداف این تحقیق ارائه روش‌های موثر در جهت کاهش اثرات نامطلوب تزریق جریان‌های ac و dc به زمین می‌باشد.

در این پایان‌نامه ابتدا ساختار کلی شبکه‌های الکتریکی که به منظور تغذیه سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی به کار می‌رود مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های بدست آوردن پارامترهای مهم شبکه الکتریکی بیان شده است. پس از محاسبه پارامترهای الکتریکی مورد نیاز شبکه قطار شهری اصفهان، جریان‌های اتصال کوتاه dc و ac در این سیستم با استفاده از شبیه‌سازی بدست آمده است. به منظور بررسی عملکرد سیستم زمین هنگام تزریق جریان خطا، ابتدا اصول طراحی و آنالیز سیستم زمین بیان و تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم زمین بررسی شده است. در نهایت عملکرد سیستم زمین اجرا شده در ایستگاه‌های قطار شهری اصفهان از لحاظ کنترل ولتاژهای خطرناک هنگام بروز خطا مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین روش‌هایی به منظور اصلاح و و بهبود عملکرد سیستم زمین ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین مسایل در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc، پتانسیل الکتریکی ریل‌ها و جریان‌های سرگردان می‌باشد. به منظور مطالعه‌ی این مسایل در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc، ابتدا روش‌های مدلسازی سیستم ریل- زمین بیان و سپس تاثیر پارامترهای مختلف بر پتانسیل الکتریکی ریل‌ها و جریان‌های سرگردان بررسی شده است. در ادامه قطار شهری اصفهان به عنوان یک سیستم عملی در نظر گرفته شده و با استفاده از شبیه‌سازی، پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در این سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تاثیر و کارایی تجهیزات کنترل ولتاژ و شبکه‌های جمع آوری جریان سرگردان در شبکه‌های قطار شهری مورد مطالعه قرار گرفته است. در پایان روش‌هایی به منظور اصلاح و بهبود عملکرد تجهیزات کنترل ولتاژ و شبکه‌های جمع آوری جریان سرگردان در شبکه‌های قطار شهری ارائه شده است.

کلمات کلیدی: ۱- سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی ۲- سیستم زمین ۳- جریان‌های سرگردان ۴- پتانسیل الکتریکی ریل‌ها ۵- ایمنی

فصل اول
مقدمه

امروزه سیستم‌های حمل و نقل ریلی به طور گسترده در بخش حمل مسافر و بار مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیرو محرکه سیستم‌های حمل و نقل ریلی در ابتدا به صورت لوکوموتیوهای بخار بود که به مرور زمان به لوکوموتیوهای دیزلی و برقی تغییر یافت. در سیستم دیزلی به منظور ایجاد گشتاور بیشتر به جای تمرکز نیروی موتور احتراق داخلی دیزلی روی یک بخش، موتور دیزلی یک ژنراتور را چرخانده و انرژی الکتریکی مورد نیاز موتورهای تراکشن[1] را در بخش‌های مختلف فراهم می‌کند.

در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی ، انرژی الکتریکی مورد نیاز موتورها از طریق خطوط بالاسری یا ریل سوم به قطارها انتقال داده می‌شود. پیدایش و پیشرفت تکنولوژی قطارهای برقی از اواخر قرن نوزدهم میلادی شروع شد. البته قبل از این مدل‌هایی از وسایل نقلیه الکتریکی که توسط باتری تغذیه می‌شد توسط افراد مختلف ارائه شده بود. اولین مدل لوکوموتیو برقی در سال در سال ۱۸۷۹ توسط زیمنس[2] در آلمان ساخته شد و اولین خط تراموا نیز توسط خود این شخص در آلمان افتتاح شد.کشورهای بریتانیا و آمریکا فعالیت‌های خود را در این زمینه به ترتیب از سال ۱۸۸۳ و۱۸۸۸ شروع کردند و در سال ۱۸۹۰ اولین خط راه آهن برقی زیرزمینی در لندن افتتاح شد [۱]. این پیشرفت‌ها در زمینه حمل ونقل الکتریکی ادامه داشت تا اینکه امروزه با استفاده از تکنولوژی شناور سازی مغناطیسی[3] قطارهایی با سرعت بیش از ۵۰۰ کیلومتر بر ساعت (مانند MLX01 ژاپن) ساخته شده است.

---

[1] Traction Motor
[2] Werner Von Siemense
[1] Magnetic Levitation

پیشرفت سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی در کشورهای مختلف بسته به شرایط اقتصادی ، سیاسی و جمعیتی متفاوت است . پیشرفت‌های این سیستم را در کشورهای مختلف می‌توان از دو بعد بررسی کرد:

- درصد برقی کردن خطوط ریلی
- پیشرفت تکنولوژی

در بعضی از کشورها درصد زیادی از خطوط ریلی برقی شده اند. در کشوری مثل سوئیس ۱۰۰٪ شبکه ریلی برقی شده است و کشورهای روسیه و چین دارای بیشترین طول خطوط راه آهن برقی می‌باشند اما به عنوان مثال در کشوری مثل آمریکا به‌رغم دارابودن تکنولوژی مورد نیاز، به دلیل شرایط توزیع جمعیتی و در نظرگرفتن مسایل اقتصادی درصد زیادی از شبکه‌های ریلی برقی نشده است[۲] . در زمینه تکنولوژی ساخت قطارهای برقی و برقی کردن خطوط ریلی کشورهایی همچون آلمان، ژاپن و فرانسه پیشرو می‌باشند و دارای تکنولوژی ساخت قطارهای با سرعت بالا می‌باشند.

برخی از مزایا و معایب سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی عبارتند از:
مزایا:

- قابلیت شتابگیری بالا
- کاهش آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی
- افزایش سرعت متوسط
- توان بالاتر در بخش مسافری
- کاهش هزینه‌های نگهداری لوکوموتیو
- امکان ترمز بدون استهلاک همراه با بازیافت انرژی

معایب:

- سرمایه گذاری اولیه زیاد
- وابستگی به شبکه سراسری
- هزینه تعمیرات و نگهداری شبکه
- مشکلات انتقال توان از پست‌های تغذیه به محل قطارها

سیستم‌حمل و نقل الکتریکی شامل بخش‌های مختلفی می‌باشد. هریک از این بخش‌ها دارای قسمت‌های مختلف و پیچیدگی‌های خاص خود می‌باشند. در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc انرژی الکتریکی مورد نیاز سیستم از شبکه الکتریکی ac دریافت شده و پس از یکسوسازی از طریق خطوط بالاسری یا ریل سوم به قطارهای برقی انتقال داده می‌شود و معمولا به دلیل مسایل اقتصادی از ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان استفاده می‌شود. بر

اساس این ساختار و وجود ولتاژهای ac و dc در سیستم حمل و نقل الکتریکی وقتی راجع بـه زمـین بحـث مـی‌شـود، بایستی به دو موضوع توجه کرد:

۱-سیستم زمین ac که بایستی برای اهدافی مثل جلوگیری از مواجه شدن افراد با خطر شوک الکتریکی در هنگام بروز خطا در سیستم ac، عملکرد صحیح تجهیزات حفاظتی و هدایت گذراها و نویز به زمین در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی تعبیه شود.

۲-استفاده از ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان باعث می‌شودکه ریل‌ها و زمین به عنوان بخشی از سیستم الکتریکی مطرح گردند که باعث بوجود آمدن دو مساله در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی شود:

- به دلیل اینکه ریل‌ها کاملا نسبت به زمین عایق نیستند، مقداری از جریان به زمین نشت می‌کند. به این جریان‌ها که مسیری غیر از مسیر تعیین شده برای آنها را طی می‌کنند، جریان‌های سرگردان[۱] گفته می‌شود.
- به دلیل اینکه ریل‌ها دارای مقاومت الکتریکی هستند، با عبور جریان از آنها نسبت به زمین دارای پتانسیل الکتریکی می‌شوند. این پتانسیل می‌تواند باعث ایجاد شوک الکتریکی برای افراد شود.

در این تحقیق هدف مطالعه سیستم زمـین در سیسـتم‌هـای حمـل ونقـل الکتریکـی dc ، بـه منظـور اطمینـان از عملکرد صحیح آن می‌باشد و همچنین با مطالعه و آنالیز سیستم ریل-زمین مساله پتانسیل ریل‌ها و جریان سرگردان در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc مورد بررسی قرار گرفته و روش‌های کنترل پتانسیل ریل‌هـا و جریـان سـرگردان مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۱-۱ تاریخچه

سابقه کار و مطالعه روی سیستم زمین و بررسی رفتار آن هنگام تزریق جریان، با سابقه به کارگیری شبکه‌های الکتریکی برای تغذیه بارهای الکتریکی برابر است. در نتیجه تحقیقات وسیع در رابطه با سیستم زمـین ، اسـتانداردها و مراجع مختلفی توسط کشورها و موسسات علمی منتشر شده است. مرجع [۳] به بررسی و مطالعه رفتار سیستم زمـین هنگام تزریق جریان خطا پرداخته و ملزومات و اصول طراحی سیستم زمـین را بـه منظـور جلـوگیری از خطـر شـوک الکتریکی را بیان کرده است. مرجع [۴] به بررسی و مطالعه سایر مواردی که علاوه بر ایمنی افراد بایستی در طراحی و اجرای سیستم زمین در نظر گرفته شـود پرداختـه اسـت. مرجـع [۵] بـه مسـاله ایمنـی در سیسـتم‌هـای حمـل ونقـل الکتریکی dc می‌پردازد و نحوه طراحـی و آنـالیز سیسـتم زمـین را بیـان مـی‌کنـد. مرجـع [۶] بـه مسـاله تاثیرگـذاری سیستم‌های زمین روی یکدیگر در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc می‌پردازد و نحوه‌ی زمین‌کـردن تجهیـزات را

[۱] Stray Current

به منظور کاهش جریان‌های سرگردان بیان می‌کند. مرجع [۷] به بررسی و مطالعه سیستم زمین اجراشده در یک سیستم حمل ونقل الکتریکی dc عملی پرداخته و عملکرد سیستم زمین را از لحاظ کنترل ولتاژهای خطرناک به هنگام بروز خطا مورد ارزیابی قرار داده است. مرجع [۸] انواع روش‌های زمین کردن ریل‌ها را در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc بیان می‌کند و به بررسی تمهیدات حفاظتی لازم در رابطه با این سیستم‌ها می‌پردازد. مرجع [۹] روش‌های مدلسازی سیستم ریل- زمین را به منظور مطالعه پتانسیل ریل‌ها و جریان سرگردان در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc بیان می‌کند. مرجع [۱۰] به شرح و بررسی ولتاژهای خطرناک در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی پرداخته و حدود مجاز ولتاژها را به منظور حفظ ایمنی افراد بیان می‌کند. مرجع [۱۱] تمهیدات لازم برای کاهش و کنترل جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc را بیان می‌کند. مرجع [۱۲] معیارهایی را برای ارزیابی و مقایسه جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc بیان می‌کنند. مرجع [۱۳] به مطالعه و آنالیز پتانسیل ریل‌ها و جریان سرگردان در یک سیستم عملی پرداخته و نتایج حاصل از شبیه‌سازی دینامیکی و نتایج اندازه‌گیری‌های عملی با هم مقایسه شده‌اند. مرجع [۱۴] به مطالعه‌ی نحوه‌ی شبیه‌سازی دینامیکی عملکرد سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc می‌پردازد. در مرجع [۱۵] یک سیستم حمل ونقل الکتریکی dc نمونه شبیه‌سازی شده و تاثیر عوامل مختلف را بر پتانسیل ریل‌ها و جریان سرگردان بررسی کرده است. مرجع [۱۶] روش‌های به کاررفته برای مانیتورینگ و کنترل جریان‌های سرگردان در یک سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc عملی را بیان می‌کند.

۱-۲ اهمیت موضوع

سیستم زمین یکی از مهم‌ترین بخش‌های سیستم‌های الکتریکی می‌باشد که نقش اساسی در بهبود عملکرد این سیستم‌ها و جلوگیری از خطرات جانی و خسارات مالی دارد. با گسترش و پیچیده‌تر شدن سیستم‌های الکتریکی، نقش سیستم زمین نیز پررنگ‌تر می‌شود. به طور کلی مهم‌ترین اهداف زمین کردن عبارتند از:

- ایمنی
- عملکرد صحیح دستگاه‌های حفاظتی
- ایجاد مسیر مناسب برای هدایت برق آسمان و گذراهای ناشی از سوئیچینگ به زمین وجلوگیری از آسیب رسیدن به تجهیزات و خرابی آنها
- ایجاد پایداری در سیستم قدرت و بدست آوردن نقطه کار ثابت
- بهبود کیفیت توان الکتریکی
- ایجاد نقطه مشترک (نقطه صفر) پایدار برای سیستم‌های الکترونیکی و کاهش نویز و تداخل‌های مغناطیسی در این سیستم ها

- کنترل جریان‌های سرگردان

در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی نیز مانند سایر تاسیسات الکتریکی، سیستم زمین بایستی توانایی لازم برای دفع و هدایت جریان‌های خطا و گذراها به زمین را داشته باشد. در سیستم‌های قطار شهری با توجه به اینکه معمولا حرکت قطارها در داخل تونل‌ها و زیر زمین انجام می‌شود، در راستای ایجاد سیستم زمین مناسب محدودیت‌هایی مثل ساختار نامناسب خاک، محدودیت فضا، مجاورت با سایر سیستم‌ها و تاسیسات، پیچیدگی و فشردگی سیستم‌های الکتریکی وجود دارد. بنابراین بایستی با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌ها سیستم زمین مناسب طراحی شود. در این تحقیق سیستم زمین اجرا شده در ایستگاه‌های قطار شهری اصفهان به عنوان یک سیستم عملی مورد مطالعه و با جمع آوری اطلاعات سیستم، عملکرد آن در دفع جریان خطا مورد ارزیابی قرار گرفته است.

به دلیل ساختار خاص تغذیه سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی که در آن ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان استفاده می‌شوند، مساله پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در رابطه با سیستم ریل –زمین مطرح می‌شود. در این ساختار بین ریل ها و زمین اختلاف پتانسیل الکتریکی بوجود می‌آید. این ولتاژ می تواند باعث ایجاد شوک الکتریکی برای مسافرین و پرسنل شود. بنابراین با توجه به اهمیت و الویت حفظ ایمنی افراد، بایستی مساله پتانسیل الکتریکی ریل‌ها در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی مورد توجه قرار گیرد. از طرف دیگر استفاده از ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان، باعث نشت جریان‌های سرگردان به زمین می‌شود. مهم‌ترین اثر جریان‌های سرگردان، خوردگی تجهیزات فلزی مجاور مدفون در زیر خاک می‌باشد. همچنین جریان‌های سرگردان می‌توانند باعث تداخل در کار سایر سیستم‌ها مثل خطوط ارتباطی و تجهیزات سیگنالینگ شده و عملکرد آنها را تحت تاثیر قرار دهد. مساله‌ی خوردگی تجهیزات فلزی در اثر جریان‌های سرگردان در سال‌های اولیه استفاده از سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی شناخته شده بود ولی با توجه به کوچک بودن سیستم‌ها و ناچیز بودن اثرات جریان‌های سرگردان بر خوردگی فلزات، تدبیر خاصی برای مقابله با این پدیده صورت نمی‌گرفت. با گسترش سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی در شهرها و مجاورت با انواع سازه‌های فلزی و سیستم‌های خدمات شهری مثل لوله‌های آب، گاز، فاضلاب و.. این مساله به طور جدی مطرح شد. براساس بررسی‌های آماری که توسط انجمن خوردگی آمریکا در طول سال‌های ۱۹۹۹ تا۲۰۰۱ در زمینه‌های مختلف صنایع آمریکا صورت گرفته است، هزینه مستقیم خوردگی تاسیسات فلزی ناشی از جریان‌های سرگردان خطوط راه آهن برقی بیش از ۵۰۰ میلیون دلار در سال برآورد شده است. این در حالی است که هزینه غیر مستقیم ناشی از خوردگی فلزات نیز در حدود هزینه مستقیم آن می‌باشد.[۱۷] در این تحقیق مساله پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی به دقت مورد بررسی و تاثیر عوامل مختلف بر آنها با استفاده از شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. در راستای

مطالعه پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc ، قطار شهری اصفهان به عنوان یک سیستم عملی در نظر گرفته شده و با استفاده از شبیه‌سازی، پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در این سیستم ارزیابی و تاثیر عوامل مختلف بر آنها بررسی شده است. در پایان روش‌هایی به منظور کنترل و کاهش جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc ارائه شده است.

۱-۳ روند ارائه مطالب

در فصل دوم انواع روش های تغذیه سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی مورد بررسی قرار گرفته است و پارامترهای سیستم که برای شبیه‌سازی مورد نیاز می‌باشد معرفی و روش‌های بدست آوردن آنها بررسی شده است. در این فصل به منظور آشنایی با سیستم مورد مطالعه (قطار شهری اصفهان) ساختار تغذیه این سیستم به طور کامل معرفی و نحوه تغذیه بار تراکشن و سایر بارهای جانبی بیان شده است. در ادامه پارامترهای سیستم که برای شبیه‌سازی‌های بعدی مورد نیاز می‌باشد، به دست آمده است. در پایان این فصل جریان‌های اتصال کوتاه dc و ac که برای مطالعات فصل‌های بعدی مورد نیاز می‌باشد، با استفاده از شبیه‌سازی به دست آمده است. شبیه‌سازی خطای اتصال کوتاه در این فصل با استفاده از نرم‌افزار pscad انجام شده است.

در فصل سوم به مطالعه و بررسی سیستم زمین اجرا شده در ایستگاه‌های خط یک قطار شهری اصفهان پرداخته شده است. در این فصل ابتدا مفاهیم اساسی در رابطه با سیستم زمین در تاسیسات الکتریکی بیان شده و نحوه طراحی و آنالیز سیستم زمین مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر پارامترهای مختلف بر عملکرد سیستم زمین با استفاده از نرم‌افزار cymgrd بررسی شده است. در پایان عملکرد سیستم زمین اجرا شده در ایستگاه‌های خط یک قطار شهری اصفهان مورد ارزیابی و روش‌هایی به منظور اصلاح و بهبود عملکرد سیستم زمین ارائه شده است.

در فصل چهارم به مطالعه و آنالیز پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc پرداخته شده است. در این فصل انواع روش‌های زمین کردن ریل‌ها و روش‌های کلی برای کنترل پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان بیان شده است. همچنین دو روش اصلی برای مدلسازی سیستم ریل_زمین معرفی شده است. معیارهایی که برای ارزیابی جریان‌های سرگردان استفاده می‌شوند نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتهای این فصل تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی dc بررسی شده است.

در فصل پنجم شبیه‌سازی پتانسیل ریل‌ها و جریان‌های سرگردان در خط یک قطار شهری اصفهان انجام شده است. در این راستا ابتدا مشخصات و جزئیات مورد نیاز برای شبیه‌سازی بیان شده است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی

مورد تحلیل و آنالیز قرار گرفته است. همچنین در این فصل عملکرد شبکه‌های جمع آوری جریان سرگردان مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیرگذاری این شبکه‌ها در افزایش مصونیت سازه‌های فلزی در برابر خوردگی بررسی شده است. در انتهای این فصل روش پیشنهادی به منظور کاهش جریان‌های سرگردان در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc که در آنها از تجهیزات کنترل ولتاژ استفاده می‌شود، معرفی شده و کارایی این روش با استفاده از شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

فصل ششم شامل نتیجه گیری، جمع بندی مطالب و ارائه پیشنهادهایی به منظور ادامه کار می‌باشد.

فصل دوم
سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc

به لحاظ تاریخی برای تغذیه سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی اولیه از ولتاژ dc استفاده می‌شدکه دلیل آن استفاده از موتورهای dc به عنوان نیروی محرکه قطارها بود[۱۸] . موتورهای dc سری استفاده شده در سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی دارای مشخصه گشتاور سرعت مناسب بودند اما در این سیستم‌ها به دلیل عدم وجود تکنولوژی کاهش سطح ولتاژ dc، ولتاژ تغذیه مستقیما به موتورهای تراکشن متصل می‌شد و با توجه به مشکلات عایق کاری موتورها و کلیدهای ac در ولتاژهای بالا استفاده از ولتاژهای dc بزرگ امکان پذیر نبود. در نتیجه در این سیستم‌ها به دلیل افت ولتاژ و تلفات زیاد روی خطوط تغذیه، فاصله پست‌های تغذیه dc بایستی کم باشد. به دلیل مسایل اقتصادی ناشی از عدم توانایی استفاده از ولتاژهای بالا و تغییر سطوح ولتاژهای dc ، روند استفاده از روش تغذیه dc با محدودیت‌هایی مواجه شد و محققان را متوجه استفاده از سیستم تغذیه ac نمود.

امروزه روش تغذیه ac به دلیل قابلیت استفاده از ولتاژهای بالا و در نتیجه افزایش فاصله پست‌های تغذیه، به طور گسترده در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی استفاده می‌شود. با پیشرفت تکنولوژی موتورهای تراکشن و روش‌های کنترل آنها و با توجه به مساله ایمنی، استفاده از روش تغذیه dc برای حمل ونقل شهری و فواصل کوتاه روشی بهینه و اقتصادی می‌باشد اما برای برای حمل ونقل بین شهری و فواصل بلند معمولا از روش تغذیه ac استفاده می‌شود[۱۹].

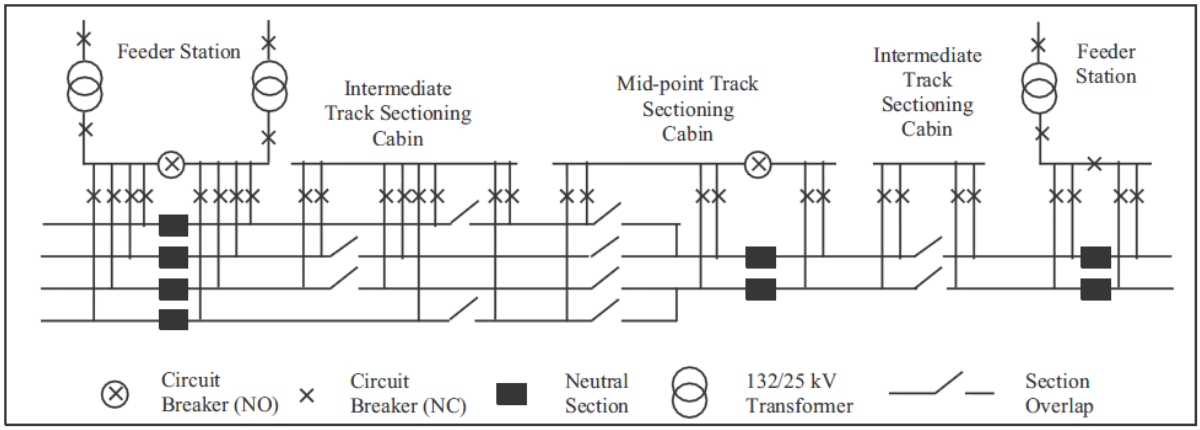
در این فصل به منظور آشنایی با روش‌های تغذیه سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی دو سیستم تغذیه ac و dc معرفی شده است. سپس پارامترهای سیستم‌های حمل ونقل الکتریکی dc که مورد نیاز می‌باشد مورد مطالعه قرار

گرفته است. در ادامه سیستم تغذیه قطار شهری اصفهان و پارامترهای آن بررسی و جریان‌های خطای اتصال کوتاه در این سیستم با استفاده از شبیه‌سازی بدست آمده است.

۲-۱ سیستم تغذیه ac

با توجه به اینکه بار الکتریکی و مکانی قطار در سیستم‌های حمل و نقل الکتریکی به طور پیوسته در حال تغییر است، بایستی در طراحی سیستم تغذیه تمهیداتی اندیشیده شود تا تغذیه قطارها به طور پیوسته در شرایط مختلف ادامه داشته باشد.

ساختار کلی یک سیستم تغذیه ac در شکل ۲-۱ نشان داده شده است:



شکل ۲-۱- سیستم تغذیه ac[۲۰]

همان‌طورکه در شکل ۲-۱ مشاهده می‌شود، در هر پست تغذیه تراکشن، تغذیه از دو قسمت مجزا انجام می‌شود تا در صورت بروز خطا در یکی از قسمت‌ها وخارج شدن آن توسط مدار شکن‌ها[1] تغذیه سیستم از طریق قسمت دیگر انجام شود.همچنین به منظور کاهش اثرات نامطلوب سیستم روی شبکه سراسری برق و رعایت مسایل کیفیت توان الکتریکی معمولا تغذیه سیستم از سطوح بالاتر شبکه سراسری انجام می‌شود.

سیستم‌های acمعمول مورد استفاده به صورت 25Kv,50 Hz و15Kv ,50/3 Hz می‌باشد. تغذیه این سیستم‌ها به صورت تکفاز می‌باشد. جریان مورد نیاز قطارها از طریق خطوط تغذیه بالاسری تامین می‌شود و ریل‌ها به عنوان مسیر برگشت جریان استفاده می‌شوند.

[1] Circuit Breaker

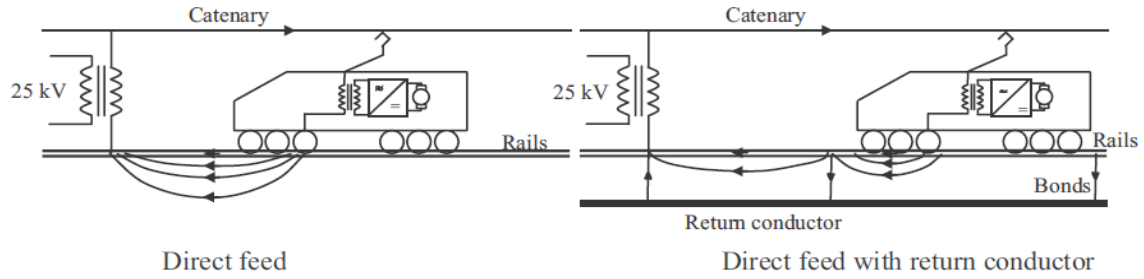
در سیستم‌های ac به دلیل استفاده از ولتاژهای بزرگتر و جریان‌های کوچکتر فاصله ی پست‌های تغذیه نسبت به سیستم‌های dc بیشتر است. بنابراین به طور گسترده در سیستم‌های حمل ونقل بین شهری استفاده می‌شود. برای تغذیه سیستم معمولا از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

۱- تغذیه مستقیم

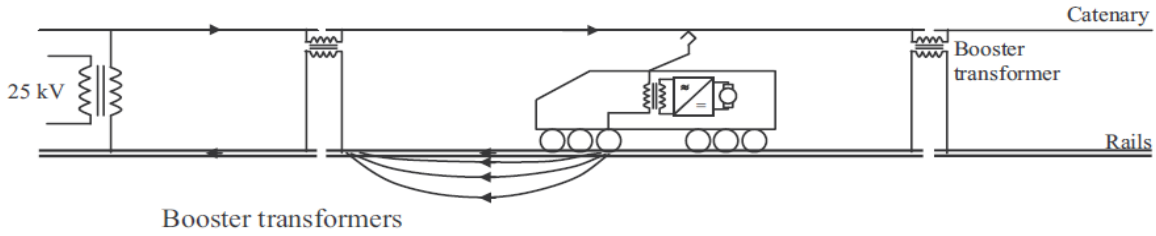
۲- تغذیه با استفاده از ترانسفورمرهای بوستر[1]

۳- تغذیه با استفاده از اتوترانسفورمر[2]

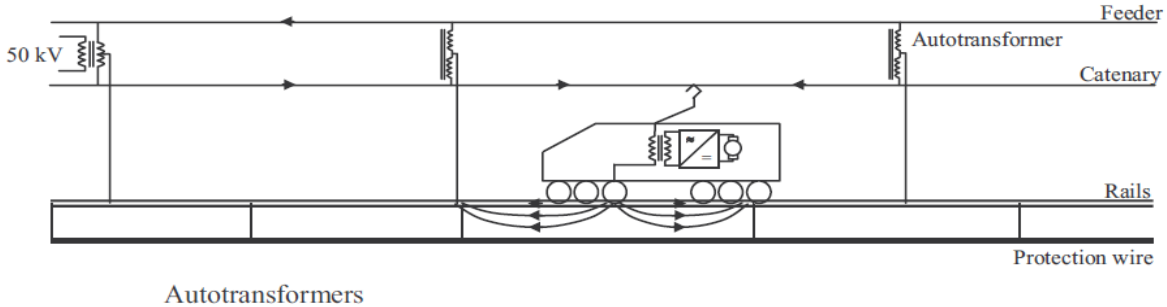
شکل‌های ۲-۲ ، ۲-۳ و ۲-۴ به ترتیب روش تغذیه مستقیم، روش تغذیه با استفاده از ترانسفورمرهای بوستر و روش تغذیه با استفاده از اتوترانسفورمر را نشان می‌دهند.



شکل ۲-۲- سیستم تغذیه مستقیم[۲۰]



شکل ۲-۳- روش تغذیه با استفاده از ترانسفورمرهای بوستر[۲۰]



شکل ۲-۴- روش تغذیه با استفاده از اتوترانسفورمر [۲۰]

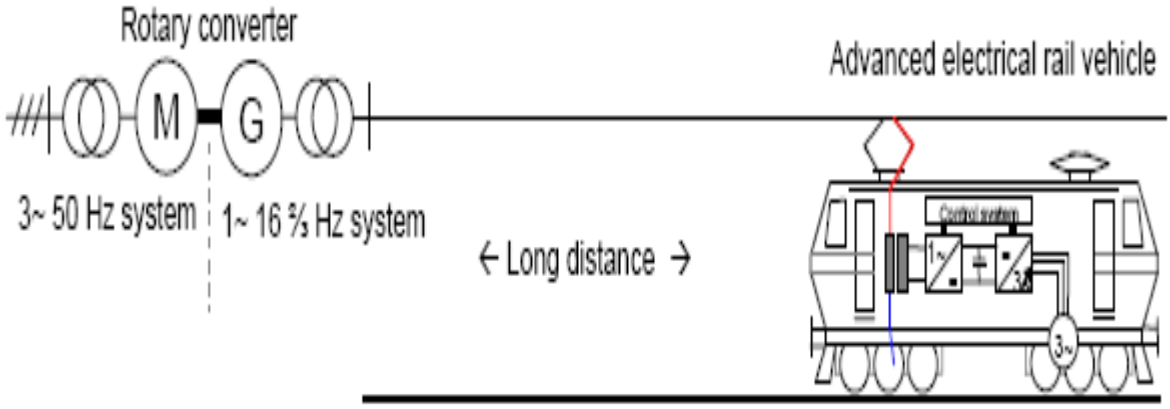
[1]Booster Transformer
[2]Auto Transformer

همان طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌شود برای مقابله با نویز و تداخل جریان برگشتی تراکشن با سیستم‌های سیگنالینگ و مخابراتی از ترانسفورمرهای بوستر استفاده می‌شود. معمولا این ترانسفورمرها به طور متناوب در هر سه کیلومتر نصب می‌شوند[۱۸].

سیستم اتوترانسفورمری به منظورکاهش تلفات و تداخلات استفاده می‌شود. با توجه به ساختار ارائه شده در شکل ۲-۴ ، جریان کشیده شده در این سیستم نصف جریان تراکشن است. بنابراین افت ولتاژ خط انتقال بالاسری نصف شده ودر نتیجه فاصله‌ی بین پست‌های تغذیه را می‌توان افزایش داد واین سیستم برای نواحی که دسترسی به شبکه سراسری مشکل است مناسب است. معمولا این ترانسفورمرها به طور متناوب در هر پنج کیلومتر نصب می‌شوند[۱۸].

در اکثر سیستم‌های ac از روش تغذیه مستقیم استفاده می‌شود ولی از روش‌های اتوترانسفورمری و بوستری هم در کشورهای مختلف استفاده می‌شود. مزیت اصلی سیستم اتوترانسفورمری نسبت به سیستم بوستری، افت ولتاژ کمتر است. ترانسفورمرها در سیستم بوستری تنها وقتی که قطار در آن ناحیه باشد مغناطیس شده وانرژی دارند ولی در سیستم اتوترانسفورمری مستقل از حرکت و موقعیت قطار، ترانسفورمرها انرژی دارند.

سیستم 15KV,50/3 HZ در کشورهایی مثل نروژ وسوئیس استفاده می‌شود. در این سیستم معمولا از مبدل‌های الکترومکانیکی سه فاز به تکفاز استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این سیستم تغذیه در شکل ۲-۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- مبدل الکترومکانیکی سه فاز به تکفاز[۲۱]

همان طور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، این مبدل از یک موتور سه فاز ویک ژنراتور تکفاز تشکیل شده است. در این سیستم موتور از طریق شبکه سه فاز تغذیه شده و با چرخاندن ژنراتور تکفاز ، تغذیه سیستم را تامین