



دانشکده مهندسی راه آهن

کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC راه آهن برقی با هدف بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی راه آهن گرایش راه آهن برقی

احسان منصوری زرنندی

استاد راهنما:

دکتر روزبه اسد

اسفند ماه ۱۴۰۰



کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC راه آهن برقی با هدف بهینه سازی هزینه بهره برداری

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی راه آهن گرایش راه آهن برقی

احسان منصوری زرنندی

استاد راهنما:

دکتر روزبه اسد

اسفند ماه ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

نام دانشکده: دانشکده مهندسی راه‌آهن

نام دانشجو: احسان منصوری زرنندی

عنوان پایان‌نامه: کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC راه‌آهن برقی با هدف بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری

تاریخ دفاع: ۱۴۰۰/۱۲/۲۱

رشته: مهندسی راه‌آهن

گرایش: راه‌آهن برقی

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر روزبه اسد	استادیار	دانشگاه علم و صنعت ایران	
۲	استاد مدعو خارجی	دکتر علی زنگنه	دانشیار	دانشگاه شهید رجایی	
۳	استاد مدعو داخلی	دکتر سید محمد موسوی	استادیار	دانشگاه علم و صنعت ایران	

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب احسان منصوری زرنندی به شماره دانشجویی ۹۸۶۳۱۰۷۳ دانشجوی رشته مهندسی راه آهن گرایش راه آهن برقی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤلیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤلیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: احسان منصوری



امضا و تاریخ: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

Scanned with CamScanner

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- بهره‌برداری از این پایان‌نامه برای همگان بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- بهره‌برداری از این پایان‌نامه تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد راهنما: دکتر روزبه اسد

تاریخ: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵

امضا:

تشکر و قدردانی:

وظیفه خود می‌دانم سپاسگزار تمام آنهایی باشم که در این دوره ارزشمند بودنشان و امیدشان راهگشای من بود؛ خانواده و همسر عزیزم که همانند تمام روزهای گذشته با صبر و حوصله در کنارم بودند. اساتید عزیز و گرانقدر دانشکده مهندسی راه‌آهن بخصوص جناب آقای دکتر اسد که با تلاش‌های بی‌شائبه خود نه تنها در انجام این پایان‌نامه بلکه در تمام دوره تحصیل مرا یاری نمودند و به هنگام نیاز برای حل مشکلات اینجانب از هیچ کمکی دریغ نرزدیدند. برای ایشان آرزوی سلامتی، موفقیت و سر بلندی را دارم. کلیه دوستان و هم دوره‌ای های عزیزم که هرچند با وجود شرایط کرونا و دوری از آنها، در طول مدت تحصیل با اینجانب همکاری و همراهی‌های لازم را انجام دادند. همچنین تشکر و قدردانی می‌نمایم از جناب آقای دکتر موسوی و جناب آقای دکتر زنگنه که برای داوری این پایان‌نامه قبول زحمت نمودند و وقت گرانبهای خود را در اختیار اینجانب قرار دادند.

چکیده

با توجه به مزایای قابل توجه شبکه راه‌آهن برقی نسبت به شبکه راه‌آهن سنتی مانند راندمان بالا، سرعت و شتاب بیشتر و آلودگی کمتر صوتی و هوا و ...، توجه به شبکه‌های راه‌آهن برقی روز به روز در حال افزایش می‌باشد. به طور کلی این نوع شبکه‌ها به دو دسته AC و DC با سطح ولتاژهای مختلف، قابل دسته‌بندی می‌باشند. شبکه‌های راه‌آهن برقی AC به نسبت شبکه‌های راه‌آهن برقی DC دارای مشکلات مهمی از جمله افت ولتاژ ناشی از راکتانس هادی‌ها و اثر پوستی و ... هستند. علاوه بر این توان راکتیو و کنترل آن از مسائل مهم در شبکه‌های راه‌آهن برقی AC می‌باشد. در حالی که این توان در شبکه‌های راه‌آهن برقی DC به طور طبیعی حذف می‌شود. بر همین اساس در سال‌های اخیر، تحقیق و توسعه بر روی شبکه‌های راه‌آهن برقی DC شدت گرفته است. یکی از موضوعات مهم در رابطه با شبکه‌های راه‌آهن برقی DC، مسئله کنترل ولتاژ آنان است. در شبکه‌های راه‌آهن برقی AC کنترل ولتاژ به توان راکتیو وابسته بوده و براساس آن فرآیند کنترل ولتاژ صورت می‌گیرد؛ اما در شبکه‌های راه‌آهن برقی DC توان راکتیو صفر می‌باشد و امکان کنترل ولتاژ با کنترل توان راکتیو وجود ندارد. از طرفی با توجه به صفر بودن فرکانس در این شبکه‌ها، نیازی به کنترل فرکانس نیز نخواهد بود. بر همین اساس با توجه به ارتباط تنگاتنگ ولتاژ و توان اکتیو در شبکه‌های راه‌آهن برقی DC، کنترل ولتاژ از طریق کنترل توان اکتیو تولیدی صورت می‌گیرد. در واقع در این شبکه‌ها کنترل توان اکتیو-ولتاژ برقرار است. انتخاب روش مناسب کنترل ولتاژ می‌تواند منجر به بهبود کیفیت ولتاژ، کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان گردد. در این پیلان‌نامه یک روش جدید و قلیل توجه جهت کنترل ولتاژ شبکه راه‌آهن برقی DC به نام روش تقسیم توان بهینه DC (DCOPS) ارائه می‌گردد. تقسیم بهینه توان میان پست‌های کشش، قابلیت اطمینان بالا، مقاوم و مدولار بودن و مقیاس‌پذیری از ویژگی‌های برجسته روش بیان شده می‌باشد. همچنین روش محاسبه قیمت توان گره‌های مختلف شبکه و یک روش پخش بار ساده، سریع، مقاوم و همراه با بازدهی محاسباتی بالا به منظور اجرا بر روی شبکه‌های راه‌آهن برقی DC مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، ارائه شده است. بررسی نتایج حاصل از انجام شبیه‌سازی بر روی یک شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت و سناریوهای مختلف، عملکرد موفق روش تقسیم توان بهینه DC را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کنترل ولتاژ DC، کنترل شیب افقی، تقسیم توان بهینه، منابع تولید پراکنده (DG)، سیستم‌های قدرت کشش (TPS)، سیستم‌های راه‌آهن برقی DC ولتاژ پایین و ولتاژ متوسط، خطوط ریلی با سرعت بالا (HSR)

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه	۱
۱-۱- مقدمه	۲
فصل ۲: مروری بر منابع	۶
۱-۲- مقدمه	۷
۲-۲- اصول کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC	۷
۳-۲- روش‌های کنترل ولتاژ شبکه راه‌آهن برقی DC	۸
۱-۳-۲- کنترل ولتاژ از طریق کنترل مبدل‌های DC	۹
۱-۳-۲-۱- کنترل ولتاژ از طریق یکسوکننده ۱۲ پالسه تمام کنترل‌شده	۹
۲-۳-۲-۱- کنترل ولتاژ از طریق مبدل‌های DC-DC	۱۰
۲-۳-۲-۲- کنترل ولتاژ از طریق روش شیب افقی و روش‌های بهبودیافته آن	۱۲
۱-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی	۱۲
۲-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی به کمک منبع انرژی ثانویه	۱۳
۳-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبودیافته با ساختار سلسله مراتبی	۱۷
۴-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبودیافته به کمک افزایش ولتاژ	۱۹
۵-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبودیافته تطبیقی	۲۰
۴-۲- جمع‌بندی	۲۳
فصل ۳: کنترل ولتاژ شبکه راه‌آهن برقی DC	۲۴
۱-۳- مقدمه	۲۵
۲-۳- روش تقسیم توان بهینه DC	۲۵
۱-۲-۳- روش محاسبه قیمت توان در هر گره	۲۹
۲-۲-۳- تعیین مقادیر مناسب پارامترهای روش تقسیم توان بهینه DC	۳۴
۳-۳- جمع‌بندی	۳۷
فصل ۴: روش حل	۳۸
۱-۴- مقدمه	۳۹
۲-۴- پخش بار شبکه راه‌آهن برقی مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC	۳۹
۱-۲-۴- توصیف روش پخش بار	۴۰
۳-۴- بهینه‌سازی شبکه راه‌آهن برقی DC	۴۷
۴-۴- جمع‌بندی	۴۹
فصل ۵: شبیه‌سازی و تحلیل نتایج	۵۰
۱-۵- مقدمه	۵۱

۵۱	۲-۵- تعریف شبکه راه آهن برقی
۵۳	۳-۵- شبیه سازی
۵۴	۱-۳-۵- حالت (۱) شبیه سازی
۶۱	۲-۳-۵- حالت (۲) شبیه سازی
۶۷	۳-۳-۵- حالت (۳) شبیه سازی
۷۳	۴-۳-۵- حالت (۴) شبیه سازی
۸۱	۴-۵- جمع بندی
۸۲	فصل ۶: نتیجه گیری و پیشنهادها
۸۳	۱-۶- نتیجه گیری
۸۴	۲-۶- پیشنهادها
۸۶	منابع و مراجع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) چگونگی ادغام منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در راه‌آهن برقی MVDC..... ۴
- شکل (۱-۲) ساختار یکسوکننده ۱۲ پالسه کاملاً کنترل‌شده همراه با یکسوکننده افزایشی..... ۱۰
- شکل (۲-۲) ساختار کنترلی روش کنترل ولتاژ از طریق مبدل‌های DC-DC..... ۱۱
- شکل (۳-۲) منحنی ولتاژ-جریان روش کنترل ولتاژ شیب‌افتی..... ۱۳
- شکل (۴-۲) ساختار شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط همراه با منابع انرژی ثانویه..... ۱۴
- شکل (۵-۲) ساختار کنترلی روش شیب‌افتی پیاده‌سازی شده بر روی پست‌های کشش..... ۱۴
- شکل (۶-۲) ساختار کنترلی سیستم فتوولتائیک به منظور تنظیم و تثبیت ولتاژ..... ۱۵
- شکل (۷-۲) ساختار کنترلی سیستم ذخیره انرژی در حالت شارژ..... ۱۶
- شکل (۸-۲) ساختار کنترلی سیستم ذخیره انرژی در حالت دشارژ..... ۱۶
- شکل (۹-۲) ساختار شبکه راه‌آهن برقی DC همراه با یکسوکننده کاملاً دیودی و مبدل برگشت‌پذیر..... ۱۷
- شکل (۱۰-۲) ساختار کنترل سلسله‌مراتبی..... ۱۷
- شکل (۱۱-۲) ساختار کنترل روش شیب‌افتی بهبودیافته به کمک افزایش ولتاژ..... ۱۹
- شکل (۱۲-۲) ساختار کنترل روش شیب‌افتی بهبودیافته تطبیقی..... ۲۲
- شکل (۱-۳) منحنی ولتاژ-جریان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC..... ۲۷
- شکل (۲-۳) نمایش بلوکی سیستم کنترلی روش تقسیم توان بهینه DC..... ۲۸
- شکل (۳-۳) دو گره نمونه در همسایگی یکدیگر..... ۲۹
- شکل (۴-۳) یک گره نمونه متصل به N گره دیگر..... ۳۰
- شکل (۵-۳) تغییرات قیمت توان در گره J با جریان ارسال‌شده از گره I به گره J..... ۳۲
- شکل (۶-۳) ساختار یک شبکه راه‌آهن برقی DC..... ۳۲
- شکل (۱-۴) روندنمای کلی روش پخش بار..... ۴۶
- شکل (۱-۵) شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط نمونه به منظور انجام شبیه‌سازی..... ۵۲
- شکل (۲-۵) شبکه راه‌آهن برقی ولتاژ متوسط DC در حالت (۱) شبیه‌سازی..... ۵۴
- شکل (۳-۵) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۱) شبیه‌سازی..... ۵۷
- شکل (۴-۵) ولتاژ هر یک از منابع و قطارها در حالت (۱) شبیه‌سازی..... ۵۸
- شکل (۵-۵) توان هر یک از منابع و قطارها در حالت (۱) شبیه‌سازی..... ۵۹
- شکل (۶-۵) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۱) شبیه‌سازی..... ۶۰
- شکل (۷-۵) شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۲) شبیه‌سازی..... ۶۱
- شکل (۸-۵) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۲) شبیه‌سازی..... ۶۳
- شکل (۹-۵) ولتاژ هر یک از منابع و قطارها در حالت (۲) شبیه‌سازی..... ۶۴

- شکل (۵-۱۰) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۲) شبیه‌سازی ۶۵
- شکل (۵-۱۱) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۲) شبیه‌سازی ۶۶
- شکل (۵-۱۲) شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۳) شبیه‌سازی ۶۷
- شکل (۵-۱۳) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۳) شبیه‌سازی ۷۰
- شکل (۵-۱۴) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۳) شبیه‌سازی ۷۱
- شکل (۵-۱۵) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۳) شبیه‌سازی ۷۱
- شکل (۵-۱۶) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۳) شبیه‌سازی ۷۲
- شکل (۵-۱۷) شبکه راه‌آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۴
- شکل (۵-۱۸) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۶
- شکل (۵-۱۹) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۷
- شکل (۵-۲۰) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۷
- شکل (۵-۲۱) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۹
- شکل (۵-۲۲) توان تولیدی هر یک از پست‌های کشش در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی ۸۰

فهرست جداول

- جدول (۱-۵) پارامترهای منابع تولید توان در حالت (۱) شبیه‌سازی ۵۴
- جدول (۲-۵) اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در هر خط در حالت (۱) شبیه‌سازی ۵۵
- جدول (۳-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۱) شبیه‌سازی ۵۶
- جدول (۴-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۱) شبیه‌سازی ۵۹
- جدول (۵-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۲) شبیه‌سازی ۶۲
- جدول (۶-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۲) شبیه‌سازی ۶۵
- جدول (۷-۵) اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در هر خط در حالت (۳) شبیه‌سازی ۶۸
- جدول (۸-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۳) شبیه‌سازی ۶۹
- جدول (۹-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۳) شبیه‌سازی ۷۳
- جدول (۱۰-۵) پارامترهای منابع تولید توان در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۴
- جدول (۱۱-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۵
- جدول (۱۲-۵) نتایج حاصله از نرم‌افزار گمز مربوط به منابع شبکه راه‌آهن برقی در حالت (۴) شبیه‌سازی ۷۸

فصل ۱:

مقدمه

۱-۱- مقدمه

مزایای قابل توجه شبکه راه آهن برقی نسبت به شبکه راه آهن سنتی (دیزل-الکتریک) مانند ظرفیت، سرعت، شتاب و راندمان بیشتر، تعمیر و نگهداری، آلودگی هوا و آلودگی صوتی کمتر و قابلیت به کارگیری ترمز احیاکننده^۱ موجب برتری و توجه بیشتر به شبکه‌های راه آهن برقی شده است [۱]، [۲]، [۳] و [۴]. استفاده و بهره‌برداری از سیستم راه آهن برقی برای حمل و نقل درون شهری و برون شهری در اواخر قرن ۱۹ آغاز گردیده است. انواع مختلفی از سیستم راه آهن برقی با توجه به شرایط جغرافیایی و اقتصادی مختلف، در طی زمان ایجاد شده‌اند. به طور کلی، سیستم راه آهن برقی را می‌توان به دو دسته DC و AC دسته‌بندی کرد [۵]، [۶]، [۷] و [۸]. در حال حاضر، بیش از ۲۰۰ هزار کیلومتر از خطوط ریلی در سراسر جهان تحت پوشش سیستم راه آهن برقی DC ۰.۶، ۰.۷۵، ۱.۵ و ۳ کیلوولت و همچنین سیستم راه آهن برقی AC ۱۵ کیلوولت ۱۶.۷ هرتز و ۲۵ کیلوولت ۵۰ یا ۶۰ هرتز می‌باشند [۹] و [۱۰]. با این تفاوت که در مقایسه با راه آهن برقی DC مشکلات مهمی از جمله سازگاری کمتر با سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (ESSs^۲)، منابع انرژی تجدیدپذیر (RESs^۳) و انرژی بازگشتی ترمز احیاکننده، سازگاری کمتر با سیستم کنترل دور ترکشن موتورهای القایی، تلفات و افت ولتاژ بیشتر ناشی از اثر پوستی، جریان راکتیو و راکتانس هادی‌ها و ایجاد نامتعادلی ولتاژ در سیستم قدرت سه فاز در راه آهن برقی AC وجود دارد [۱۱]، [۱۲] و [۱۳].

علاوه بر این، درحالی‌که یکی از مهم‌ترین مسائل و چالش‌های راه آهن برقی AC وجود جریان و توان راکتیو و کنترل آن می‌باشد. جریان و توان راکتیو در راه آهن برقی DC وجود ندارد. به عبارت دیگر، مشکلات توان راکتیو، به علت عدم وجود آن در راه آهن برقی DC اصلاً بروز و ظهور نخواهد داشت [۵]، [۸]، [۱۱]، [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]. به همین دلیل، با هدف جایگزینی راه آهن برقی AC ولتاژ متوسط، تحقیق و توسعه بر روی راه آهن برقی DC با ولتاژ بیش از ۳ کیلوولت در سال‌های اخیر افزایش یافته است. همچنین، توجه و تمایل به ایجاد شبکه‌های DC ولتاژ متوسط (MVDC^۴) مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ برای خطوط ریلی با سرعت بالا (HSR^۵) با توجه به رشد و پیشرفت سریع فناوری الکترونیک قدرت و پیاده‌سازی موفق مبدل‌های

^۱ Regenerative Brake

^۲ Energy Storage Systems

^۳ Renewable Energy Sources

^۴ Medium Voltage DC

^۵ High-Speed Rail

منبع ولتاژ (VSC^1) در شبکه‌های DC ولتاژ بالا مبتنی بر مبدل منبع ولتاژ ($VSC-HVDC^2$)، افزایش گردیده است [۱۷]، [۱۸] و [۱۹]. با توجه به اهداف تحقیق، برای به کارگیری و پیاده‌سازی راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط، محققان مختلف سطح ولتاژهای متفاوتی از ۷.۵ تا ۲۴ کیلوولت را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند [۶]، [۷] و [۱۱].

راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط به طور همزمان مزایای راه آهن برقی DC ولتاژ پایین ($LVDC^3$) و راه آهن برقی AC ولتاژ متوسط ($MVAC^4$) را دارا می‌باشد. مزایای قابل توجه و با اهمیت راه آهن برقی LVDC شامل حذف کامل جریان و توان راکتیو و تمامی مشکلات مربوطه، کاهش قابل توجه جریان به علت حذف جریان راکتیو و افزایش ولتاژ، افزایش قابل توجه فاصله بین پست‌های کشش^۵ به دلیل کاهش جریان و در نتیجه کاهش افت ولتاژ در خطوط، کاهش تلفات و افت ولتاژ ناشی از کاهش جریان و حذف اثر پوستی و راکتانس هادی‌ها، دریافت قدرت بالا بدون ایجاد هیچگونه نامتعادلی در سیستم قدرت سه فاز، ادغام آسان با شبکه AC، افزایش سازگاری با سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی (باتری و ابرخازن)، منابع انرژی تجدیدپذیر و انرژی بازگشتی ترمز احیاکننده، افزایش سازگاری با سیستم کنترل دور ترکشن موتورهای القایی، طراحی ساده‌تر قطار و قابلیت اطمینان بیشتر می‌باشد. مزایای قابل توجه و با اهمیت راه آهن برقی MVAC شامل به کارگیری شبکه تغذیه با هادی دارای سطح مقطع کوچک‌تر، سایش کم هادی تماس، هزینه نصب و نگهداری کمتر، تلفات کمتر در مدار کشش به دلیل ولتاژ بالا، استفاده از قطع‌کننده‌های مدار ساده، جریان برگشتی کم، تعداد کم پست‌های کشش و تعداد کم اتصالات به شبکه قدرت می‌باشد [۶]، [۱۱] و [۲۰].

اتصال و به کارگیری آسان‌تر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و منابع انرژی تجدیدپذیر در راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط در نتیجه سازگاری بیشتر راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط با این سیستم‌ها و منابع صورت می‌گیرد. کاهش آلودگی‌های زیست محیطی، کاهش وابستگی به سیستم قدرت سه فاز و افزایش ظرفیت راه آهن برقی، می‌تواند به کمک استفاده از منابع تجدیدپذیری همچون توربین بادی و فتوولتائیک (PV^6) صورت گیرد. علاوه بر این، در شرایطی که ترافیک شبکه سبک و در نتیجه آن شرایط کم باری در راه آهن برقی برقرار است، توان مازاد در زمان تولید بیش از نیاز منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند در سیستم‌های

¹ Voltage Source Converter

² Voltage Source Converter-High Voltage DC

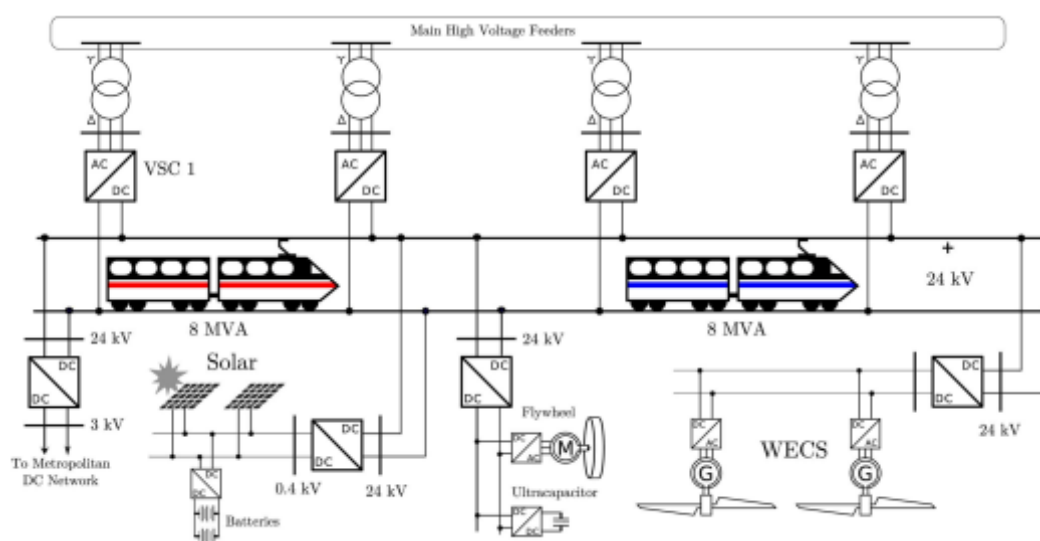
³ Low Voltage DC

⁴ Medium Voltage AC

⁵ Traction Posts

⁶ Photovoltaic

ذخیره‌ساز انرژی، مانند باتری‌ها و ابرخازن‌ها، ذخیره شده و یا توسط مبدل‌های منبع ولتاژ دوطرفه در پست‌های ترکشن برگشت‌پذیر برای استفاده سایر مصرف‌کنندگان به سیستم قدرت سه فاز انتقال داده شود. همچنین، به منظور پیک‌زدایی و هموارسازی منحنی مصرف انرژی در راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط می‌توان از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده کرد [۶]، [۱۱]، [۲۱] و [۲۲]. بلوک دیاگرام چگونگی ادغام منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط در شکل (۱-۱) نشان داده شده است [۹].



شکل (۱-۱) چگونگی ادغام منابع تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در راه آهن برقی MVDC

مانند سایر سیستم‌های قدرت، دستیابی به عملکرد بهینه یکی از مهمترین مسائل در شبکه DC ولتاژ متوسط است. عملکرد بهینه با روش‌های بهینه اشتراک توان^۱، یعنی روش‌هایی برای توزیع بهینه کل توان مصرفی بین منابع برق موجود، از جمله پست‌های کششی، منابع توزیع شده، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و غیره، بر اساس تلفات توان و قیمت‌های منبع برق برآورده می‌شود.

تقسیم بهینه توان بین منابع مختلف، به دلایل متنوعی از جمله حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و منابع تولید پراکنده (DG^۲)، خطوط الکتریکی طولانی، تغییرات همزمان، دائم و زیاد توان و مکان قطارها و انرژی بازگشتی قطارها به یکی از مهمترین چالش‌های راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط تبدیل شده است. صفر بودن فرکانس و توان راکتیو در این نوع راه آهن برقی به علت DC بودن ولتاژ رخ داده و در نتیجه، نیازی

^۱ Optimal Power Sharing

^۲ Distributed Generation

به کنترل این دو متغیر در راه آهن برقی DC نیست. اما به دلیل برقراری یک ارتباط تنگاتنگ بین توان اکتیو و ولتاژ در راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط، همواره کنترل ولتاژ نیز باید به موازات تقسیم بهینه توان اکتیو صورت گیرد [۲۳]. با توجه به جدید بودن مبحث تقسیم بهینه توان در راه آهن برقی DC، تاکنون تحقیقات اندکی در این زمینه صورت گرفته است. در سال‌های اخیر، خصوصاً با اقبال به راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط و همچنین استفاده از مبدل‌های DC با ولتاژ خروجی قابل تنظیم در پست‌های کشش، این زمینه تحقیقاتی به یکی از موضوعات مهم تبدیل شده است. در همین راستا تحقیقاتی که در سال‌های گذشته به منظور کنترل ولتاژ راه آهن برقی DC صورت گرفته، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته اند.

در این پایان‌نامه، یک روش عملی^۱، مدولار^۲، مستقل، خودمختار^۳، ارزان و بهینه یعنی روش کنترل ولتاژ غیرمتمرکز تقسیم توان بهینه DC (DCOPS^۴) ارائه شده است. این روش به منظور بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳] و [۲۴].

تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی انجام شده در این پایان‌نامه ویژگی‌های ذکر شده در روش تقسیم توان بهینه DC را تایید می‌کند. ساختار پایان‌نامه بدین صورت است که در فصل دوم مروری بر روی روش‌های کنترل ولتاژ استفاده شده در راه آهن برقی DC ارائه شده است. در فصل سوم روش تقسیم توان بهینه DC با جزئیات و همچنین روش پخش بار اجرا شده بر روی شبکه‌های راه آهن برقی DC مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم نتایج شبیه‌سازی انجام گرفته بر روی حالت‌های مختلف یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط ارائه شده است. در فصل آخر نیز جمع‌بندی و پیشنهادها ذکر گردیده است.

¹ Practical

² Modular

³ Autonomous

⁴ DC Optimal Power Sharing

فصل ۲: مروری بر منابع

۲-۱- مقدمه

شبکه تغذیه راه آهن برقی از سالیان بسیار دور به دو صورت AC و DC مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. در سال‌های اخیر با توجه به گسترش شهرها و خطوط راه آهن برقی بین شهری، نیاز به افزایش سطح ولتاژ شبکه‌های تغذیه راه آهن برقی حس شده است. بنابراین شبکه‌های تغذیه AC با سطح ولتاژ ۱۵ تا ۲۵ کیلوولت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما مشکلاتی مانند افت ولتاژ القایی، نیاز به استفاده از جبران‌کننده عدم تعادل ولتاژ و وجود بخش‌های خنثی در طول خطوط تغذیه قطارها که منجر به آسیب دیدن و فرسودگی قطع‌کننده‌های مدار، کاهش سرعت و طولانی شدن زمان سفر می‌شود، باعث افزایش تمایل به استفاده از شبکه‌های تغذیه DC ولتاژ بالا به جای شبکه‌های تغذیه AC ولتاژ بالا شده است. بر همین اساس با توجه به پیشرفت‌های گسترده در زمینه الکترونیک قدرت و توانایی ساخت سیستم‌های حفاظتی و قطع‌کننده‌های مدار DC، شبکه‌های تغذیه DC ولتاژ بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱۴]، [۱۵] و [۱۶]. استفاده از شبکه‌های تغذیه DC ولتاژ بالا به نسبت شبکه‌های تغذیه AC ولتاژ بالا مزیت‌هایی مانند سادگی پست‌ها، عملکرد متعادل ذاتی، قابلیت ادغام منابع تجدیدپذیر توزیع شده با شبکه تغذیه و همچنین قابلیت استفاده از ترمز احیاکننده و تبادل انرژی دو طرفه را فراهم می‌کند [۱۵].

با توجه به DC بودن ولتاژ این نوع از راه آهن برقی، فرکانس و توان راکتیو صفر بوده و در نتیجه، نیازی به کنترل این دو متغیر نیست. ولی به دلیل ارتباط تنگاتنگ توان اکتیو و ولتاژ در راه آهن برقی DC، به موازات تقسیم بهینه توان اکتیو همواره باید کنترل ولتاژ نیز صورت گیرد. در ادامه این فصل، در قسمت دوم اصول کنترل ولتاژ شبکه‌های تغذیه DC، در قسمت سوم روش‌های کنترل ولتاژ موجود شبکه راه آهن برقی DC و در قسمت آخر نتیجه‌گیری مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۲- اصول کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC

در شبکه تغذیه DC راه آهن برقی، توان راکتیو صفر می‌باشد. از طرفی با توجه به DC بودن ولتاژ این شبکه‌ها، فرکانس نیز صفر بوده و در نتیجه نیازی به کنترل توان راکتیو و فرکانس شبکه نیست؛ اما برای تأمین تغذیه مناسب بارهای موجود در این شبکه، باید اندازه ولتاژ در سرتاسر شبکه در محدوده مجاز معینی قرار گیرد. اولین قدم برای کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC تعیین عوامل تأثیرگذار بر عدم تنظیم ولتاژ این

شبکه است. برخی از این عوامل تأثیرگذار، عدم تعادل در توان اکتیو مصرفی و تولیدی (عدم تعادل توان)، عدم کنترل ولتاژ مناسب توسط منابع انرژی و واحدهای ذخیره‌ساز، عدم هماهنگی بین منابع انرژی در کنترل ولتاژ و افت ولتاژ در خطوط می‌باشند.

جهت حفظ اندازه ولتاژ باید همواره مقدار توان اکتیو مصرفی و تولیدی برابر و یا اصطلاحاً تعادل توان در شبکه تغذیه DC راه آهن برقی برقرار باشد. با توجه به تعیین مقدار توان اکتیو مصرفی توسط مصرف‌کنندگان، جهت کنترل ولتاژ شبکه تغذیه DC راه آهن برقی باید نسبت به تنظیم مقدار توان اکتیو تولیدی اقدام نمود. از طرفی جهت تأمین مناسب توان اکتیو مصرفی مصرف‌کنندگان، می‌توان از اندازه ولتاژ کمک گرفت؛ بنابراین در شبکه تغذیه DC راه آهن برقی، کنترل توان اکتیو-ولتاژ و یا بار-ولتاژ مطرح است؛ به عبارت دیگر برای کنترل ولتاژ باید نسبت به تنظیم توان اکتیو تولیدی و برای تضمین تأمین لحظه‌به‌لحظه توان اکتیو موردنیاز مصرف‌کنندگان، باید نسبت به کنترل ولتاژ شبکه اقدام نمود. بدین ترتیب با افزایش و کاهش توان اکتیو مصرفی مصرف‌کنندگان، ولتاژ شبکه تغذیه DC راه آهن برقی به ترتیب کاهش و افزایش یافته و با کاهش و افزایش ولتاژ شبکه، توان اکتیو تولیدی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد [۲۳] و [۲۵].

۲-۳- روش‌های کنترل ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC

با توجه به جدید بودن مبحث تقسیم بهینه توان در راه آهن برقی DC، تاکنون تحقیقات اندکی در این زمینه صورت گرفته است. در سال‌های اخیر، خصوصاً با اقبال به راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط و همچنین استفاده از مبدل‌های DC با ولتاژ خروجی قابل تنظیم در پست‌های کشش، این زمینه تحقیقاتی به یکی از موضوعات مهم تبدیل شده است. همچنین یکی دیگر از روش‌های پرکاربرد در کنترل ولتاژ راه آهن برقی DC، روش کنترل ولتاژ شیب افقی می‌باشد که در آن به هر پست کشش یک منحنی ولتاژ-جریان اختصاص داده می‌شود؛ اما این روش دارای معایبی مختلفی می‌باشد که محققان با ارائه راهکارها و پیشنهاداتی سعی در بهبود عملکرد آن دارند.

بنابراین روش‌های کنترل ولتاژ راه آهن برقی DC را می‌توان به دو دسته کلی، کنترل ولتاژ به کمک مبدل‌های DC و کنترل ولتاژ به کمک روش شیب افقی و روش‌های بهبود یافته آن، تقسیم‌بندی کرد. در ادامه تعدادی از روش‌های کنترل ولتاژ راه آهن برقی DC مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲-۳-۱- کنترل ولتاژ از طریق کنترل مبدل‌های DC

در این دسته از روش‌های کنترل ولتاژ راه آهن برقی DC، فرآیند کنترلی از طریق فرمان دادن به مبدل‌های DC صورت می‌گیرد. در واقع به منظور کنترل ولتاژ، تمرکز بر روی کنترل مبدل‌های موجود در شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد.

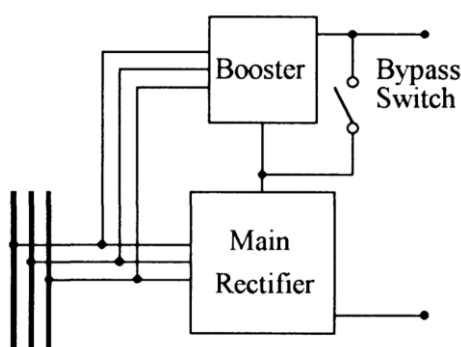
۲-۳-۱-۱- کنترل ولتاژ از طریق یکسوکننده ۱۲ پالسه تمام کنترل‌شده

با توجه به استفاده از یکسوکننده‌های کنترل‌نشده دیودی در منابع تغذیه (پست‌های کشش) شبکه‌های اولیه راه آهن برقی DC به منظور تغذیه خط کشش، هیچگونه کنترلی بر روی توان تزریقی به قطارها و در واقع تقسیم توان بین پست‌ها وجود ندارد. این مسئله باعث افزایش افت ولتاژ در نقاط مختلف خط کشش با توان مصرفی بالا نسبت به نقاط با توان مصرفی پایین و در نتیجه منجر به تنظیم ولتاژ نامناسب در پست‌های کشش شده است. در یک سیستم راه آهن برقی، تنظیم نامناسب ولتاژ DC در پایانه‌های هر پست کشش (و در نتیجه افت ولتاژ در اطراف خط کشش) می‌تواند منجر به تقسیم توان نامناسب بین پست‌های کشش و کاهش ظرفیت نیروگاه و بهره‌برداری شود. بنابراین، تنظیم ولتاژ اغلب به منظور ارتقای عملکرد پست‌های کشش موجود در حالت افزایش بار و ترافیک، بهینه‌سازی پروفیل ولتاژ خط کشش، تقسیم توان مناسب و حداکثر بهره‌برداری از نیروگاه‌ها انجام گرفته و در حالت کاهش فاصله زمانی بین قطارها (یا افزایش تعداد قطارهای فعال در خط) مناسب است. ساده‌ترین راه برای انجام تنظیم ولتاژ در سمت DC واحدهای تبدیل ولتاژ AC به DC، استفاده از تپ چنجر اتوماتیک در سیم‌پیچ‌های اولیه ترانسفورماتور است. این روش گاهی اوقات مورد استفاده قرار گرفته است، اما فقط می‌تواند تنظیم ولتاژ را به صورت گسسته و با دینامیک بسیار کند انجام دهد. این دو محدودیت، باعث می‌شود که روش پیشنهادی چندان مناسب و کاربردی نباشد.

در همین راستا در واحدهای تبدیل ولتاژ AC به DC، از یکسوکننده ۱۲ پالسه کاملاً کنترل‌شده (تمام تریستوری) به همراه یک یکسوکننده افزایشی^۱ با ساختار نشان داده شده در شکل (۲-۱)، به منظور تنظیم ولتاژ و ثابت نگه داشتن ولتاژ DC استفاده شده است. در ساختار نشان داده شده در شکل (۲-۱) از یک کلید

¹ Boost Rectifier

بای پس^۱ استفاده شده که در صورت خرابی یکسوکننده افزایشی، قابلیت کارکرد پست کشش با قابلیت اطمینان کمتر را فراهم می‌کند.



شکل (۱-۲) ساختار یکسوکننده ۱۲ پالسه کاملاً کنترل شده همراه با یکسوکننده افزایشی

در نتیجه استفاده از ساختار بیان شده به منظور کنترل ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC، کمترین اعوجاج هارمونیک^۲ جریان DC و بهترین ریپل ولتاژ^۳ DC فراهم شده و فرآیند کنترل ولتاژ به خوبی انجام گرفته است. از معایب این روش، محدود بودن میزان تغییرات بار، عدم کارایی مناسب در هنگام تغییرات بارها و در نتیجه انعطاف پذیری کم روش پیشنهادی می‌باشد [۲۶].

۲-۱-۳-۲- کنترل ولتاژ از طریق مبدل‌های DC-DC

در این قسمت با فرض اینکه یک سیستم ذخیره انرژی از طریق یک مبدل DC-DC به شبکه راه آهن برقی متصل شده است، یک روش خاص به منظور تنظیم ولتاژ ارائه شده است. سیستم ذخیره انرژی به دو دلیل مورد استفاده قرار می‌گیرد: الف) کاهش مصرف انرژی ب) تنظیم ولتاژ. با توجه به اطلاعات شبکه راه آهن برقی DC به منظور تعیین مقدار ظرفیت سیستم ذخیره انرژی مورد نیاز از رابطه (۱-۲) استفاده می‌شود.

¹ Bypass Switch

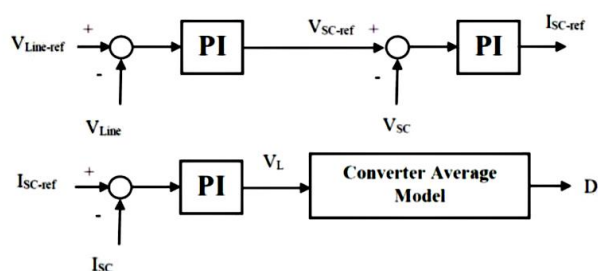
² Harmonic Distortion

³ Voltage Ripple

$$C = \frac{M_{eq} \cdot v^2}{U_{max}^2 - U_{min}^2} \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲) مقدار ظرفیت خازن استفاده شده در سیستم ذخیره انرژی، M_{eq} مقدار کل جرم قطار، v سرعت قطار و U_{min} و U_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل ولتاژ مجاز سیستم ذخیره انرژی می‌باشد. روش کنترل ولتاژ ارائه شده در این قسمت بدین صورت است که ابتدا ولتاژ DC خط کشش اندازه‌گیری شده ($U_{Line-ref}$) و با مقدار ولتاژ نامی سیستم (U_{line}) که به عنوان ولتاژ مرجع در نظر گرفته می‌شود، مقایسه می‌شود. سپس نتیجه بدست آمده از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی^۱ (PI) عبور کرده و مقدار ولتاژ مرجع برای عملکرد سیستم ذخیره انرژی (U_{SC-ref}) محاسبه می‌شود. مقدار ولتاژ مرجع بدست آمده برای سیستم ذخیره انرژی با مقدار ولتاژ DC اندازه‌گیری شده سیستم ذخیره انرژی (U_{SC}) مقایسه شده و با عبور از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی دیگر، مقدار جریان القایی مرجع سیستم ذخیره انرژی (I_{SC-ref}) محاسبه می‌گردد. این جریان القایی مرجع بدست آمده با مقدار جریان القایی اندازه‌گیری شده (I_{SC}) از سیستم ذخیره انرژی مقایسه شده و با عبور از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی دیگر، مقدار ولتاژ القایی (U_L) مورد نیاز محاسبه شده و به کمک آن از طریق رابطه (۲-۲) مقدار دیوتی سایکل (D) برای فرمان‌دهی مبدل DC-DC بدست می‌آید. بر همین اساس فرمان مورد نیاز جهت شارژ یا دشارژ شدن سیستم ذخیره انرژی ایجاد می‌شود. در شکل (۲-۲) ساختار کنترلی روش کنترل ولتاژ بیان شده، نشان داده شده است.

$$D = 1 + \frac{U_L - U_{SC}}{U_{ESSbus}} \quad (2-2)$$



شکل (۲-۲) ساختار کنترلی روش کنترل ولتاژ از طریق مبدل‌های DC-DC

¹ Proportional-Integral

به عبارت دیگر، این روش از طریق کنترل مبدل DC-DC بین شبکه راه‌آهن برقی و سیستم ذخیره انرژی، تنظیم ولتاژ را انجام داده است. با توجه به محدودیت در ظرفیت و سرعت پایین شارژ و دشارژ سیستم ذخیره انرژی، این روش در کنترل ولتاژ راه‌آهن برقی DC کاربرد محدودی دارد. همچنین، در صورت رخ دادن خطا در سیستم ذخیره انرژی و عدم کارکرد مناسب آن، هیچگونه فرآیند کنترلی دیگر جهت تنظیم ولتاژ راه‌آهن برقی DC وجود نخواهد داشت. بنابراین، قابلیت اطمینان این روش نیز پایین می‌باشد [۲۷].

۲-۳-۲- کنترل ولتاژ از طریق روش شیب افقی و روش‌های بهبودیافته آن

در این دسته از روش‌های کنترل ولتاژ راه‌آهن برقی DC، فرآیند کنترلی با استفاده از روش کنترل ولتاژ شیب افقی مرسوم و روش‌های بهبودیافته آن صورت می‌گیرد.

۲-۳-۲-۱- کنترل ولتاژ شیب افقی

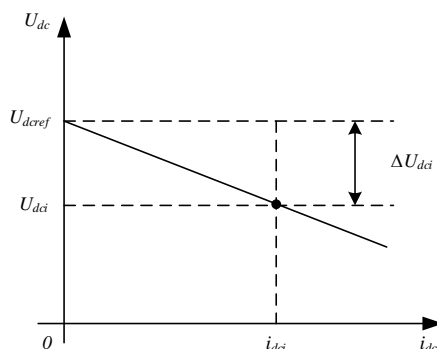
روش شیب افقی^۱ یکی از روش‌های بسیار کاربردی است که به منظور کنترل ولتاژ راه‌آهن برقی DC پیشنهاد می‌گردد. این روش از طریق اختصاص یک منحنی ولتاژ-جریان با شیب منفی (افقی) مشخص، همانند شکل (۳-۲)، به هر منبع، میزان توان تولیدی منابع را تنظیم کرده و بدین صورت فرآیند کنترل ولتاژ را انجام می‌دهد. این روش کنترل ولتاژ معمولاً نیاز به سیستم ارتباطی نداشته و در نتیجه، قابلیت اطمینان بالایی دارد.

درواقع مقدار ولتاژ هر منبع با توجه به جریان خروجی آن منبع و شیب افقی و ولتاژ مرجع آن منبع براساس رابطه (۳-۲) تعیین می‌شود. روش کنترل شیب افقی اولویت‌بندی منابع را در نظر نمی‌گیرد و منابع بر اساس ظرفیت نامی و ولتاژشان تنظیم ولتاژ را انجام می‌دهند.

$$U_o = U_{ref} - R_D i_o \quad (3-2)$$

¹ Droop Method

U_{ref} ولتاژ مرجع منابع، R_D شیب افقی منابع، i_o جریان خروجی منابع و U_o ولتاژ خروجی منابع می‌باشد. شیب افقی منابع مهم‌ترین پارامتر هر منبع می‌باشد و تنظیم ولتاژ منابع بر اساس آن انجام می‌گیرد.



شکل (۳-۲) منحنی ولتاژ-جریان روش کنترل ولتاژ شیب افقی

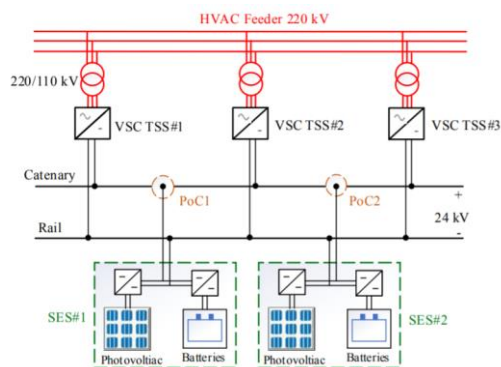
مطابق با شکل (۳-۲)، در روش شیب افقی با کاهش ولتاژ DC ترمینال منبع، جریان یا توان منبع به صورت خطی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، این روش از افت ولتاژ شبکه برای تنظیم توان تولیدی منابع کمک می‌گیرد. علت افت ولتاژ شبکه نیز مقاومت خطوط کشش می‌باشد. همچنین، در این روش تقسیم توان میان منابع، علاوه بر به مقدار شیب افقی منابع، به مقدار مقاومت خطوط کشش نیز وابسته است. بنابراین، روش شیب افقی دارای دو مشکل بزرگ افت ولتاژ شبکه نسبت به مقدار نامی ولتاژ و تقسیم نامناسب توان میان منابع مختلف، از جمله پست‌های کشش، می‌باشد [۸]، [۱۱]، [۲۸]، [۲۹]، [۳۰] و [۳۱]. با توجه به محدودیت‌های روش کنترل شیب افقی، محققان تحقیقات و مطالعاتی را به منظور بهبود عملکرد این روش در شبکه راه آهن برقی DC انجام داده‌اند.

۲-۲-۳-۲- کنترل ولتاژ شیب افقی به کمک منبع انرژی ثانویه

روش کنترل ولتاژ ارائه شده در این قسمت، بدون تغییر در ساختار روش کنترل ولتاژ شیب افقی، بهبود عملکرد کنترل ولتاژ را از طریق کنترل تبادل انرژی یک منبع انرژی ثانویه^۱ صورت می‌دهد. این منبع انرژی ثانویه متشکل از انرژی‌های تجدیدپذیر و سیستم‌های ذخیره انرژی، قرار گرفته در فاصله میانی دو پست

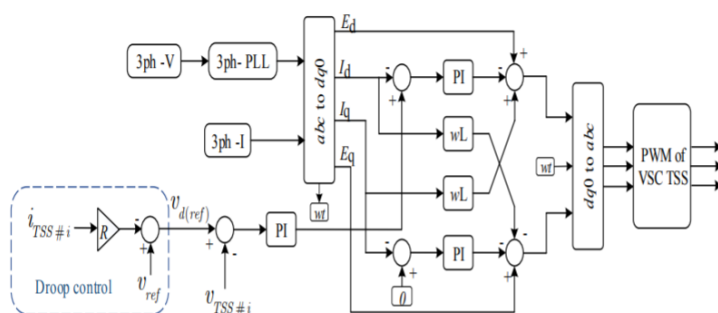
^۱ Secondary Energy Source

کشش، می‌باشد. منابع انرژی ثانویه از طریق مبدل‌های دو طرفه به شبکه راه آهن برقی DC متصل می‌شوند. روش پیشنهادی بر روی یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط با ساختاری به صورت شکل (۲-۴)، اعمال می‌شود.



شکل (۲-۴) ساختار شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط همراه با منابع انرژی ثانویه

مطابق با شکل (۲-۴)، هر یک از پست‌های کشش (TSS^1) و منابع انرژی ثانویه دارای یک سیستم کنترلی مشخص می‌باشند. روش کنترلی پیاده‌سازی شده بر روی پست‌های کشش روش کنترل ولتاژ شیب افقی بدون هیچ تغییرات خاصی، با ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل (۲-۵)، می‌باشد.



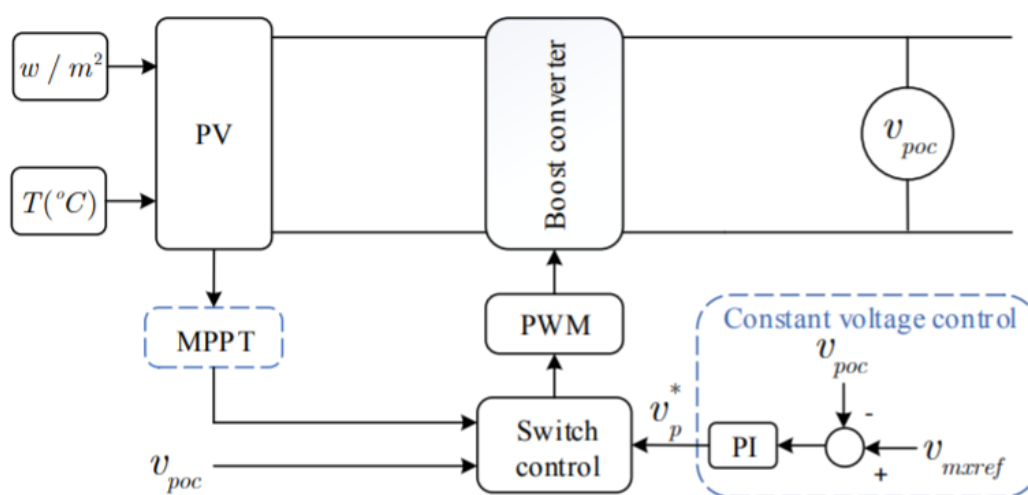
شکل (۲-۵) ساختار کنترلی روش شیب افقی پیاده‌سازی شده بر روی پست‌های کشش

همانطور که بررسی شد، روش کنترل ولتاژ شیب افقی دارای دو عیب بزرگ می‌باشد و به کارگیری آن منجر به افت ولتاژ در طول خطوط کشش و تنظیم ولتاژ نامناسب می‌شود. بنابراین تنظیم و تثبیت ولتاژ در

¹ Traction Substation

طول خطوط کشش از طریق کنترل منابع انرژی ثانویه که شامل انرژی تجدیدپذیر (فتوولتائیک) و سیستم ذخیره انرژی می‌باشد، صورت می‌گیرد.

کنترل سیستم فتوولتائیک براساس ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل (۶-۲) و مطابق با رابطه (۴-۲) انجام می‌گیرد. روند کنترل بدین صورت است که ابتدا ولتاژ نقطه اتصال (PoC^1) بین شبکه راه آهن برقی و سیستم فتوولتائیک اندازه‌گیری و با حداکثر ولتاژ مجاز شبکه مقایسه می‌شود. سپس با عبور از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مقدار ولتاژ مرجع، جهت دادن فرمان مورد نیاز به مبدل به منظور تنظیم و تثبیت ولتاژ، محاسبه می‌گردد. بر همین اساس سیستم فتوولتائیک با ایجاد یک ولتاژ ثابت، منجر به تثبیت ولتاژ در خطوط کشش می‌شود.



شکل (۶-۲) ساختار کنترلی سیستم فتوولتائیک به منظور تنظیم و تثبیت ولتاژ

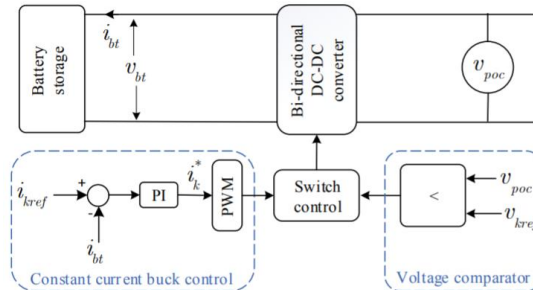
$$U_p^* = k_p (U_{ref,max} - U_{poc}) + k_i \int (U_{ref,max} - U_{poc}) dt \quad (4-2)$$

در رابطه (۴-۲)، مقدار ولتاژ مرجع، U_p^* ، k_p و k_i به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده انتگرالی-تناسبی، $U_{ref,max}$ حداکثر ولتاژ مجاز شبکه و U_{poc} ولتاژ نقطه اتصال می‌باشند.

عملکرد و ساختار کنترل سیستم ذخیره انرژی به منظور تنظیم ولتاژ، با توجه به مقدار ولتاژ در نقطه اتصال متفاوت می‌باشد. در حالت شارژ مبدل متصل کننده سیستم ذخیره انرژی به شبکه راه آهن برقی به

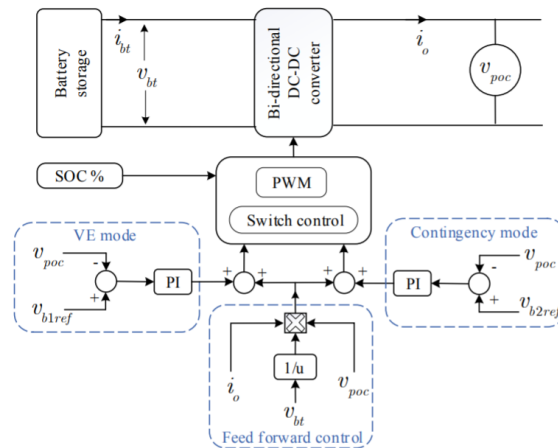
¹ Point of Connection

صورت باک با جریان ثابت عمل کرده و فرآیند ذخیره انرژی براساس ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل (۷-۲) صورت می‌گیرد.



شکل (۷-۲) ساختار کنترلی سیستم ذخیره انرژی در حالت شارژ

فرآیند دشارژ شدن سیستم ذخیره انرژی و تغذیه شبکه راه آهن برقی، براساس ساختار کنترلی نشان داده شده در شکل (۸-۲) صورت می‌گیرد.

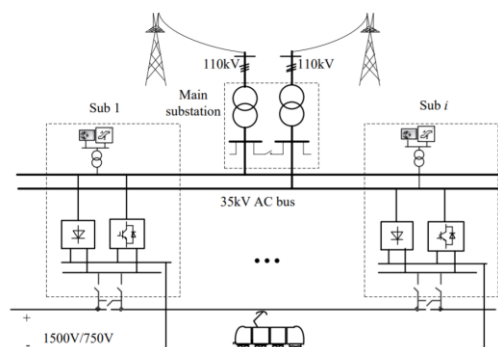


شکل (۸-۲) ساختار کنترلی سیستم ذخیره انرژی در حالت دشارژ

بنابراین به طور کلی فرآیند کنترلی در این روش، با استفاده از میزان تبادل انرژی منبع ثانویه با توجه به اندازه ولتاژ نقطه اتصال بین راه آهن برقی DC و منبع انرژی ثانویه صورت گرفته و بدین ترتیب اندازه ولتاژ راه آهن برقی کنترل می‌شود. از معایب این روش می‌توان به نیاز به سیستم ارتباطی جهت تبادل اطلاعات مربوط به اندازه ولتاژ نقطه اتصال و قابلیت اطمینان پایین آن اشاره کرد [۳۲].

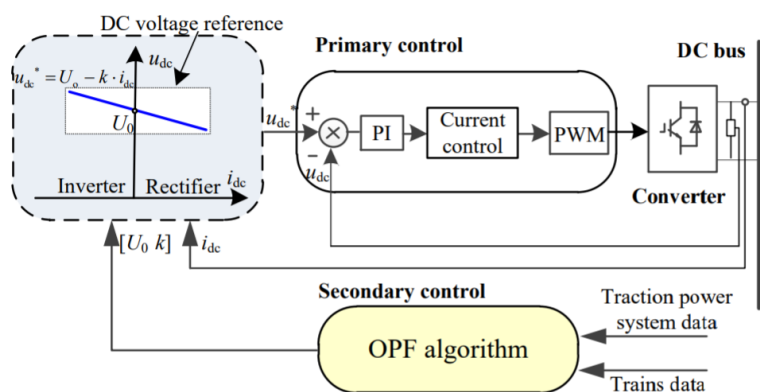
۲-۳-۲-۳- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبود یافته با ساختار سلسله مراتبی

در این قسمت یک طرح کنترل ولتاژ برای شبکه راه آهن برقی DC با به کارگیری یک یکسوکننده کاملاً دیودی و یک مبدل برگشت پذیر در هر پست کشش، همانند ساختار نشان داده شده در شکل (۲-۹)، ارائه گردیده است.



شکل (۲-۹) ساختار شبکه راه آهن برقی DC همراه با یکسوکننده کاملاً دیودی و مبدل برگشت پذیر

مطابق با شکل (۲-۹)، پست‌های اصلی از شبکه‌های برق محلی به شبکه ۱۱۰ کیلو ولت متصل می‌شوند و برق ۳۵ کیلوولت AC را به پست‌ها ارائه می‌کنند. یکسوکننده‌های دیودی و مبدل‌های برگشت پذیر به صورت موازی در پست‌های کشش متصل می‌شوند. این طرح دارای یک ساختار کنترل سلسله مراتبی^۱ با دو سطح کنترل (اولیه و ثانویه) می‌باشد. ساختار این کنترل سلسله مراتبی در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۰) ساختار کنترل سلسله مراتبی

^۱ Hierarchical Control Structure

در سطح کنترل ثانویه یک الگوریتم پخش بار بهینه (OPF¹) استفاده شده که براساس اطلاعات شبکه و قطارها و برنامه زمانی حرکتی آنها در هر لحظه مشخص نقطه کار (ولتاژ بی‌باری) بهینه شبکه را محاسبه می‌کند. الگوریتم پخش بار بهینه به طور گسترده در صنعت برق برای تعیین اقتصادی‌ترین حالت عملکرد شبکه با توجه به محدودیت‌های عملیاتی خاص استفاده می‌شود. در این قسمت به منظور حداقل رساندن مصرف توان شبکه، یک تابع هدف به صورت رابطه (۵-۲) تعریف می‌شود.

$$\text{Minimize } f(x) = \text{Minimize } \sum_{i=1}^M \int_0^T P_i(t) dt \quad (5-2)$$

$$x = [\delta \ U \ \delta_c \ \delta_d \ U_c \ U_d \ U_{dc} \ U_{d0} \ k]^T$$

که T زمان شبیه‌سازی است. $P_i(t)$ توان مثبت لحظه‌ای ترانسفورماتور i در پست اصلی در زمان t ، M تعداد ترانسفورماتورهای پست اصلی است. بردار x نشان دهنده متغیرهای بهینه‌سازی است. این الگوریتم پخش بار بهینه در هر لحظه به منظور کنترل ولتاژ اجرا شده و اطلاعات مربوطه به کارکرد بهینه شبکه را به سطح کنترل اولیه ارسال می‌کند.

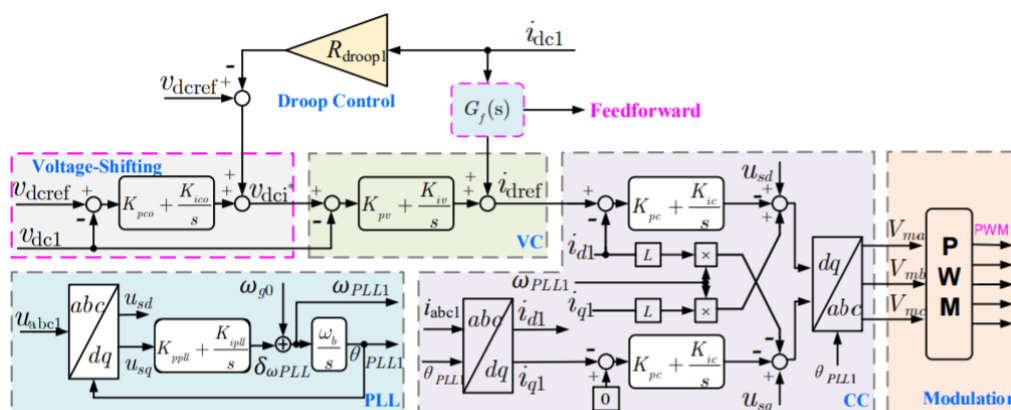
در سطح کنترل اولیه، روش کنترل ولتاژ شیب افقی به صورت محلی برای ردیابی مراجع محاسبه شده توسط الگوریتم پخش بار بهینه اجرا می‌شود. بر همین اساس به کمک جریان اندازه‌گیری شده شینه DC و رابطه موجود در روش شیب افقی، مقدار ولتاژ DC مرجع برای شبکه تغذیه راه آهن برقی محاسبه می‌شود. سپس ولتاژ مرجع محاسبه شده با ولتاژ DC اندازه‌گیری شده مقایسه و براساس آن فرمان مناسب جهت تنظیم ولتاژ به مبدل برگشت‌پذیر ارسال می‌شود.

بنابراین به طور کلی، در کنترل سطح اولیه، کنترل ولتاژ شیب افقی اجرا می‌شود و در سطح کنترل ثانویه پارامترهای روش شیب افقی بر اساس الگوریتم پخش بار بهینه محاسبه می‌شود. از معایب این روش می‌توان به محاسبات سنگین و زمان‌بر، نیاز به سیستم‌های ارتباطی به منظور تبادل اطلاعات و در نتیجه، قابلیت اطمینان پایین اشاره کرد [۳۳].

¹ Optimal Power Flow

۲-۳-۲-۴- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبودیافته به کمک افزایش ولتاژ^۱

در رویکردی دیگر به منظور بهبود عملکرد روش شیب افقی در راه آهن برقی DC، روشی پیشنهاد شده است که هدف اصلی آن بهبود کیفیت ولتاژ می‌باشد. در رویکرد مذکور، جهت جبران مقدار افت ولتاژ ایجاد شده ناشی از روش شیب افقی، یک جبران کننده انتگرالی-تناسبی در هر پست کشش به کار برده شده است. ساختار کنترلی روش بیان شده در شکل (۱۱-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۲) ساختار کنترل روش شیب افقی بهبودیافته به کمک افزایش ولتاژ

در این روش کنترلی، جبران کننده انتگرالی-تناسبی در هر پست کشش یک مقدار تغییرات ولتاژ (افزایش ولتاژ) را تولید کرده و با جمع شدن در رابطه روش کنترل ولتاژ شیب افقی، مطابق با رابطه (۶-۲)، انحراف ولتاژ ایجاد شده در این روش را جبران می‌کند.

$$U_{doi}^* = U_{dcref} - i_{dci} R_{droopi} + \underbrace{\left(K_{pco} + \frac{K_{ico}}{s} \right) (U_{dcref} - U_{dci})}_{\text{Voltage-Shifting Term}} \quad (6-2)$$

مطابق با رابطه (۶-۲)، مقدار مرجع ولتاژ خروجی در هر پست کشش، U_{dcref} مقدار ولتاژ مرجع شبکه راه آهن برقی، i_{dci} جریان خروجی هر پست کشش، R_{droopi} شیب افقی مربوط به هر پست کشش و K_{pco} و K_{ico} به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی جبران کننده انتگرالی-تناسبی می‌باشند.

^۱ Voltage-Shifting

همچنین، این روش به منظور افزایش سرعت پاسخ و دینامیک شبکه در تنظیم و کنترل ولتاژ، از کنترل کننده فیدفورارد جریان بار^۱ نیز استفاده می‌کند. تمام محاسبات و کنترل‌ها به صورت محلی و بدون هیچ‌گونه ارتباط با سایر پست‌های کشش صورت می‌گیرد. از این رو دارای قابلیت اطمینان مناسبی می‌باشد. از طرفی از معایب این روش، سیستم کنترلی نسبتاً پیچیده و عدم تقسیم دقیق و مناسب توان بین پست‌های کشش می‌باشد [۱۱].

۲-۳-۲-۵- کنترل ولتاژ شیب افقی بهبودیافته تطبیقی

در روش کنترل ولتاژ شیب افقی در شبکه‌های راه آهن برقی DC، با توجه به اینکه محل بارها متغیر می‌باشد و همچنین خطوط شبکه راه آهن برقی دارای مقاومت می‌باشند، فرآیند تقسیم توان و در نتیجه کنترل ولتاژ به درستی انجام نخواهد گرفت (برای تقسیم جریان مناسب باید شیب افقی را افزایش داد که این موضوع باعث افزایش افت ولتاژ و عملکرد نامناسب کنترل ولتاژ می‌شود). در شبکه‌های راه آهن برقی DC مجهز به روش کنترل ولتاژ شیب افقی، بیشترین افت ولتاژ در نقاط میانی بین دو پست کشش، که به آن نقطه بحرانی^۲ می‌گویند، رخ می‌دهد. بر همین اساس، در این قسمت روش شیب افقی بهبودیافته تطبیقی ارائه شده است که به منظور بهبود تقسیم توان بین پست‌های کشش از میانگین جریان تولیدی آن‌ها استفاده می‌کند. به منظور محاسبه میانگین جریان تولیدی پست‌های کشش، اطلاعات جریان تولید شده توسط هر پست کشش باید با تمام پست‌های کشش دیگر به اشتراک گذاشته شود. در همین راستا، وجود یک پیوند ارتباطی قابل اعتماد بین پست‌های کشش جهت تبادل اطلاعات جریان پست‌های کشش الزامی می‌باشد. میانگین جریان تولیدی پست‌های کشش براساس رابطه (۷-۲) محاسبه می‌شود.

$$I_{avg} = \sum_{i=1}^n I_{TSS\#i} / n \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)، $I_{TSS\#i}$ جریان تولیدی هر پست کشش و n تعداد پست‌های کشش موجود در شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد. سپس به منظور محاسبه و تعیین یک مقدار جدید شیب افقی برای هر یک از

¹ Load Current Feedforward Control

² Critical Point

پست‌های کشش، مطابق با رابطه (۸-۲)، نسبت جریان تولیدی هر یک از پست‌های کشش به میانگین جریان تولیدی توسط آن‌ها محاسبه می‌شود.

$$u = I_{TSS\#i} / I_{avg} \quad (۸-۲)$$

در رابطه (۸-۲)، $I_{TSS\#i}$ جریان تولیدی هر پست کشش و I_{avg} میانگین جریان تولیدی پست‌های کشش می‌باشد. اگر نسبت برابر با یک باشد، به این معنی است که جریان تولیدی آن پست کشش برابر با میانگین جریان تولید شده توسط همه آن‌ها در شبکه راه آهن برقی است، که یک سناریوی تقسیم توان ایده آل است. براساس نسبت بدست آمده برای هر یک از پست‌های کشش، مطابق با رابطه (۹-۲)، مقدار شیب افقی جدید هر یک از منابع به منظور بهبود فرآیند تقسیم توان محاسبه می‌شود.

$$R = e^{u'} - x \quad (۹-۲)$$

در رابطه (۹-۲)، R شیب افقی جدید هر یک از پست‌های کشش، u نسبت جریان هر یک از پست‌های کشش به جریان میانگین تولیدی توسط آن‌ها، r ضریب تسریع و x مقدار در واحد نسبت جریان برای تنظیم مقدار پایه ضریب شیب افقی می‌باشد. در صورتی که نسبت به دست آمده از رابطه (۸-۲) برای یک پست کشش به ترتیب بزرگ‌تر و یا کوچک‌تر از یک باشد، به منظور بهبود تقسیم توان، مقدار شیب افقی جدید محاسبه شده از رابطه (۹-۲) برای آن پست کشش نسبت به مقدار اولیه آن به ترتیب افزایش و یا کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، آن پست کشش به ترتیب تمایل به افزایش و یا کاهش مقدار شیب افقی خود داشته و در نتیجه منجر به کاهش و یا افزایش ولتاژ خروجی آن پست کشش می‌شود.

همانطور که گفته شد، محاسبه و تعیین شیب افقی جدید برای پست‌های کشش منجر به تغییرات ولتاژ خروجی در آن‌ها می‌شود. بر همین اساس برای محدود کردن تغییرات ولتاژ خروجی، یک تنظیم‌کننده ولتاژ نقطه بحرانی^۱ در ساختار کنترل روش بیان شده، گنجانده شده است. عملکرد تنظیم‌کننده ولتاژ نقطه بحرانی به صورت ریاضی در رابطه (۱۰-۲) بیان شده است.

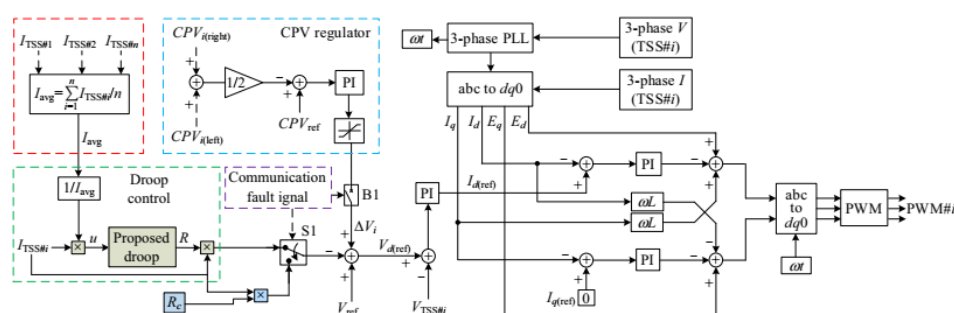
$$\Delta U_i = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left[CPV_{ref} - \frac{(CPV_{i(left)} + CPV_{i(right)})}{2} \right] \quad (۱۰-۲)$$

^۱ Critical Point Voltage

در رابطه (۱-۲)، CPV_{ref} حداقل ولتاژ مجاز شبکه راه آهن برقی DC، $CPV_{i(left)}$ و $CPV_{i(right)}$ به ترتیب ولتاژ نقاط بحرانی در سمت چپ و راست هر پست کشش و K_P و K_I به ترتیب ضرایب انتگرالی و تناسبی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی می‌باشند. هر پست کشش داده‌های مربوط به ولتاژ نقطه بحرانی در مکان‌های چپ و راست مجاور خود را دریافت می‌کند و میانگین آن‌ها را با مقدار مرجع ولتاژ نقطه بحرانی مقایسه می‌کند. در نتیجه یک مقدار ΔV_i برای هر یک از پست‌های کشش محاسبه می‌شود و سپس مطابق با رابطه (۱-۲)، در رابطه روش کنترل ولتاژ شیب افقی جمع شده و منجر به بهبود تنظیم ولتاژ در پست‌های کشش می‌شود.

$$U_{d(ref)} = U_{ref} - R I_{TSS\#i} + \Delta U \quad (11-2)$$

ساختار کنترلی روش بیان شده، در شکل (۱۲-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲-۲) ساختار کنترل روش شیب افقی بهبود یافته تطبیقی

شایان ذکر است که اگر مقدار مرجع ولتاژ نقطه بحرانی (حداقل ولتاژ مجاز شبکه) زیاد در نظر گرفته شود، ساختار کنترلی این روش از کاهش ولتاژ خروجی کمتر از آن مقدار جلوگیری کرده و منجر به جلوگیری از افزایش زیاد شیب افقی جدید پست‌های کشش می‌شود. به عبارت دیگر، فرآیند تقسیم توان پست‌های کشش بدتر می‌شود.

بنابراین به طور کلی، در روش کنترل ولتاژ شیب افقی بهبود یافته تطبیقی به منظور بهبود تقسیم توان بین منابع از میانگین جریان پست‌های کشش استفاده شده و براساس آن یک مقدار جدید شیب افقی برای هر یک از پست‌های کشش تعیین می‌گردد. این فرآیند باعث می‌شود که شیب افقی بعضی از آن‌ها افزایش یا کاهش و در نتیجه جریان تولیدی آن‌ها کاهش یا افزایش یابد. البته این افزایش یا کاهش شیب افقی منجر به مختل شدن فرآیند کنترل ولتاژ پست‌های کشش گردیده که به منظور برطرف کردن آن از یک

کنترل کننده ولتاژ نقطه بحرانی استفاده و افت ولتاژ بوجود آمده جبران می‌شود. از معایب این روش می‌توان به نیاز به سیستم ارتباطی سریع جهت تبادل اطلاعات و قابلیت اطمینان پایین آن اشاره کرد [۲۸].

۲-۴- جمع‌بندی

شبکه‌های راه آهن برقی به دو دسته AC و DC قابل دسته‌بندی می‌باشند. شبکه‌های راه آهن برقی AC در مقایسه با شبکه‌های راه آهن برقی DC، با مشکلات مهمی از جمله افت ولتاژ ناشی از راکتانس هادی‌های خطوط، افزایش تلفات و افت ولتاژ ناشی از اثر پوستی و ایجاد عدم تعادل ولتاژ در سیستم قدرت سه فاز مواجه هستند. علاوه بر این، درحالی که توان راکتیو و کنترل آن یکی از مهم‌ترین موضوعات شبکه‌های AC است، این توان در شبکه‌های DC وجود ندارد. به عبارت دیگر، مشکلات توان راکتیو با حذف طبیعی آن در شبکه‌های DC با توجه به DC بودن ولتاژ، کاملاً برطرف می‌شود.

یکی از مسائل بسیار مهم در شبکه‌های راه آهن برقی DC، مسئله کنترل ولتاژ آن‌ها می‌باشد. در مورد کنترل ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC همانطور که گفته شد، ارتباط تنگاتنگی بین ولتاژ و توان اکتیو در شبکه‌های تغذیه DC راه آهن برقی وجود داشته و همواره کنترل ولتاژ و توان اکتیو در این شبکه‌ها باید به صورت هم‌زمان و یکپارچه صورت پذیرد. همچنین، به دلیل افت ولتاژ در خطوط و عدم یکسان بودن اندازه ولتاژ در شبکه راه آهن برقی DC، از اندازه ولتاژ، برخلاف آنچه در رابطه با فرکانس در شبکه‌های AC صادق است، نمی‌توان به سادگی برای هماهنگی بین منابع انرژی، جهت تزریق میزان مناسب توان اکتیو و کنترل اندازه ولتاژ در کل شبکه راه آهن برقی DC، استفاده نمود.

تعداد روش‌های موجود به منظور کنترل ولتاژ در شبکه‌های راه آهن برقی DC بسیار محدود می‌باشند؛ از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی و منابع تجدیدپذیر به منظور کنترل ولتاژ و همچنین تعدادی از روش‌های بهبودیافته روش کنترل ولتاژ شیب افقی اشاره کرد. اما روش‌های بیان شده معایب مختلفی مانند حساسیت به میزان تغییرات بار و انعطاف‌پذیری کم، زمان بر و سنگین بودن محاسبات، به کارگیری سیستم‌های کنترلی نسبتاً پیچیده، نیاز به سیستم‌های ارتباطی جهت تبادل اطلاعات و قابلیت اطمینان پایین را دارند که باعث عملکرد نامناسب آن‌ها می‌شود. در فصل بعد روش تقسیم توان بهینه DC به منظور تحقق بهینه‌سازی هزینه برداری از شبکه، معرفی و بیان می‌گردد که به طور مفصل در فصل مربوطه بررسی خواهد شد.

فصل ۳:

کنترل ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC

۳-۱- مقدمه

همانطور که گفته شد با پیشرفت صنعت الکترونیک قدرت و ایجاد فناوری‌های جدیدی از جمله مبدل‌های الکترونیک قدرت در شبکه‌های راه آهن برقی آینده، شبکه‌های راه آهن برقی با تغذیه DC دارای جایگاه مهم غیرقابل انکاری خواهند بود. مانند سایر شبکه‌های قدرت، یکی از مهمترین مسائل شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط دستیابی به عملکرد بهینه است. عملکرد بهینه با روش‌های بهینه اشتراک توان، یعنی روش‌هایی برای توزیع بهینه کل توان مصرفی بین منابع برق موجود، از جمله پست‌های کشش، منابع توزیع شده، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و غیره، بر اساس تلفات توان و قیمت‌های منبع برق برآورده می‌شود. این امر باید توسط یک روش کنترل ولتاژ مناسب انجام گیرد.

در فصل قبل همانطور که مشاهده کردید اکثر روش‌های کنترل ولتاژ ارائه شده برای راه آهن برقی DC دارای معایب مختلفی مانند حساسیت به میزان تغییرات بار و انعطاف پذیری کم، زمان بر و سنگین بودن محاسبات، به کارگیری سیستم‌های کنترلی نسبتاً پیچیده، نیاز به سیستم‌های ارتباطی جهت تبادل اطلاعات و قابلیت اطمینان پایین هستند. بر همین اساس به منظور عملکرد بهینه شبکه، روش تقسیم توان بهینه DC مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳] و [۲۴]. در ادامه این فصل ابتدا روش تقسیم توان بهینه DC با جزئیات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲- روش تقسیم توان بهینه DC

روش تقسیم توان بهینه DC یکی از بهترین روش‌های کنترل ولتاژ می‌باشد که فرآیند تقسیم بهینه توان بین منابع موجود را با توجه به قیمت توان منابع و کل تلفات توان شبکه انجام می‌دهد. روش تقسیم توان بهینه DC یک روش کاربردی، مدولار، با قابلیت اطمینان بالا، خودمختار، غیرمتمرکز، بهینه و مقاوم می‌باشد که می‌تواند در شبکه‌های مختلف راه آهن برقی DC با تعداد مختلف پست کشش مورد استفاده قرار گیرد. این روش علاوه بر کنترل ولتاژ شبکه تغذیه راه آهن برقی باعث تحقق یافتن تقسیم بهینه کل توان مورد نیاز، از جمله تلفات توان، شده است و در نهایت باعث به حداقل رسیدن هزینه کل توان شبکه تغذیه راه آهن برقی می‌شود. برای بیان واضح‌تر، ویژگی‌های بارز روش پیشنهادی که منجر به تبدیل آن به یک روش قابل توجه برای شبکه‌های راه آهن برقی DC شده است، عبارتند از:

۱- عدم نیاز به اطلاعات شبکه راه‌آهن برقی: در روش تقسیم توان بهینه DC آگاهی هریک از منابع از قیمت ارزان‌ترین منبع شبکه راه‌آهن برقی کافی است تا بتوان فرآیند کنترل ولتاژ انجام گیرد. به عبارت دیگر، در این روش اجزاء شبکه راه‌آهن برقی هیچ نیازی به آگاهی از اطلاعات توان مصرفی بارها، ظرفیت تولید منابع، مکان بارها و منابع و اطلاعات شاخه‌ها و گره‌های شبکه راه‌آهن برقی ندارند.

۲- مدولار بودن: در شبکه‌های راه‌آهن برقی DC مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC اضافه، حذف یا جایگزین کردن منابع مختلف می‌تواند به سادگی و بدون نیاز به اعمال تغییر خاصی در منابع موجود انجام گیرد.

۳- سادگی، پیاده‌سازی ارزان و قابلیت اطمینان بالا: روش تقسیم توان بهینه DC محاسبات بسیار اندک و همچنین دارای سیستم کنترلی ساده‌ای می‌باشد. به علاوه، این روش کنترلی یک روش غیرمتمرکز بوده که به جای استفاده از سیستم‌های مخابراتی، از ولتاژ شبکه راه‌آهن برقی DC استفاده می‌کند؛ در واقع ولتاژ وسیله ارتباطی این روش می‌باشد. موارد مذکور موجب سادگی، پیاده‌سازی آسان و قابلیت اطمینان بالا روش تقسیم توان بهینه DC می‌گردد.

۴- تحقق تقسیم توان بهینه: روش تقسیم توان بهینه DC، تقسیم بهینه کل توان مورد نیاز از جمله تلفات توان را تضمین کرده و در نتیجه منجر به حداقل شدن هزینه کل توان در انواع شبکه‌های راه‌آهن برقی DC با تعداد مختلف منابع انرژی می‌شود.

۵- مقاوم بودن: عواملی مانند تغییر توان بارها، تغییر در آرایش و توسعه شبکه راه‌آهن برقی DC، هیچ تاثیری بر روی این روش نمی‌گذارند و در نتیجه عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC را دچار اختلال نمی‌کنند.

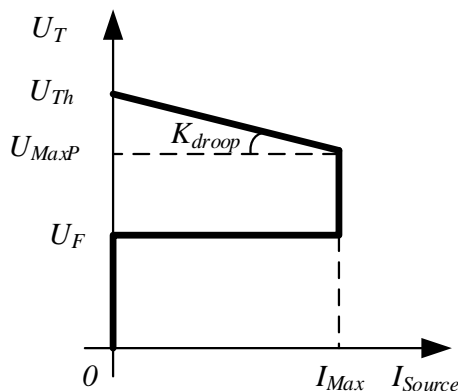
تحلیل‌ها و شبیه‌سازی‌های مختلف انجام‌شده در این پایان‌نامه ویژگی‌های فوق‌الذکر را در روش تقسیم توان بهینه DC تأیید خواهند کرد [۲۴].

در روش تقسیم توان بهینه DC، هر منبع دارای یک منحنی ولتاژ-جریان، به صورت شکل (۱-۳) می‌باشد. محور عمودی و افقی منحنی ولتاژ-جریان نشان داده شده در شکل (۱-۳) به ترتیب بیانگر ولتاژ پایانه و جریان تزریقی منبع می‌باشند. پنج پارامتر مهم در منحنی ولتاژ-جریان هر منبع، یعنی ولتاژ آستانه (U_{Th})، شیب افقی (K_{droop})، ولتاژ توان ماکزیمم (U_{MaxP})، حداکثر جریان تزریقی (I_{Max}) و ولتاژ خطا (U_F) وجود دارد. با توجه به شکل (۱-۳)، با کاهش و افت ولتاژ پایانه منبع به زیر مقدار ولتاژ آستانه، آن منبع شروع به تزریق جریان و تولید توان می‌کند. با کاهش و افت بیشتر ولتاژ پیلینه منبع، توان تولیدی و جریان تزریقی

منبع نیز افزایش می‌یابد. تا زمان رسیدن منبع به حداکثر توان تولیدی خود (P_{Max}) در مقدار ولتاژ توان ماکزیمم، این روند ادامه خواهد یافت. مقدار جریان تزریقی منبع (I_{source})، در این بازه کاری توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$I_{source} = \frac{(U_T - U_{Th})}{K_{droop}} \quad (1-3)$$

جریان تزریقی منبع ثلثت و برابر با حداکثر مقدار خود قرار خواهد گرفت تا زمانی که ولتاژ پایانه منبع بین مقدار ولتاژ توان ماکزیمم و ولتاژ خطا قرار داشته باشد. با رسیدن ولتاژ پایانه منبع به کمتر از مقدار ولتاژ خطا، منبع خاموش خواهد گردید.



شکل (۱-۳) منحنی ولتاژ-جریان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC

دو پارامتر ولتاژ آستانه (U_{Th}) و شیب افقی (K_{droop}) باید پیش از شروع فرآیند کنترل ولتاژ تعیین شوند که در قسمت‌های بعد نحوه تعیین مقادیر مناسب آن‌ها بیان می‌شود. با توجه به وابستگی مقدار ولتاژ خطا به مشخصات شبکه راه آهن برقی DC، مقدار ولتاژ خطا همه منابع برابر با حداقل ولتاژ مجاز شبکه راه آهن برقی DC در نظر گرفته می‌شوند. تعیین مقدار دو پارامتر ولتاژ توان ماکزیمم (U_{MaxP}) و حداکثر جریان تزریقی (I_{Max}) توسط روابطی که در ادامه آمده است، صورت می‌گیرد:

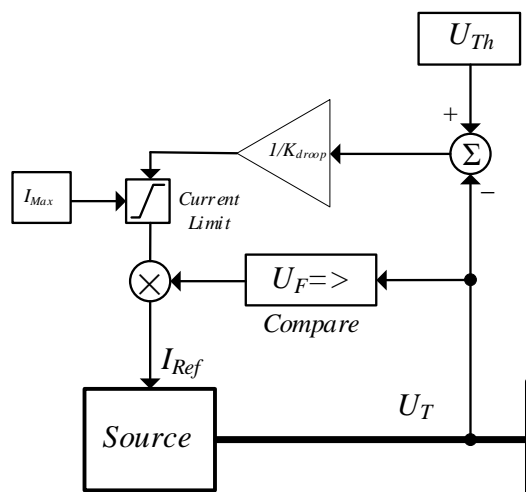
$$I_{Max} = \frac{P_{Max}}{U_{MaxP}} \quad (2-3)$$

$$U_{MaxP} = U_{Th} - K_{droop} I_{Max} \quad (3-3)$$

ولتاژ توان ماکزیمم (U_{MaxP}) ولتاژ پایانه‌ای است که در آن جریان تزریقی منبع حداکثر می‌گردد. بنابراین با ترکیب روابط (۲-۳) و (۳-۳)، خواهیم داشت:

$$U_{MaxP}^2 - U_{Th} U_{MaxP} + K_{droop} P_{Max} = 0 \quad (4-3)$$

در شکل (۲-۳) نمایش بلوکی سیستم کنترلی روش تقسیم توان بهینه DC نشان داده شده است. بنابراین، افزایش کاربرد، افزایش قابلیت اطمینان و کاهش هزینه پیاده‌سازی در نتیجه ساده بودن سیستم کنترلی این روش که یکی از مزایای روش تقسیم توان بهینه DC می‌باشد، محقق می‌گردد [۲۳] و [۲۴].

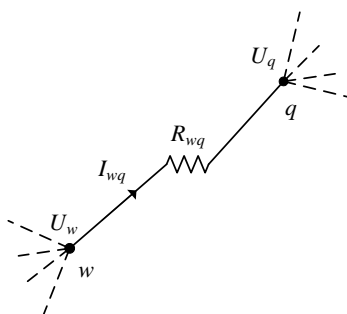


شکل (۲-۳) نمایش بلوکی سیستم کنترلی روش تقسیم توان بهینه DC

نکته قابل توجه این است که با توجه به وجود ارتباط تنگاتنگ بین توان اکتیو و ولتاژ در شبکه‌های راه آهن برقی DC، در روش تقسیم توان بهینه DC علاوه بر فرآیند کنترل ولتاژ، فرآیند کنترل توان اکتیو تولیدی منابع نیز صورت می‌گیرد. در واقع با استفاده از سیستم و قانون کنترلی که به منابع اعمال می‌گردد، به نوعی محدودیت‌های ولتاژی برای هر یک از آنها براساس ولتاژ آستانه هر یک تعیین می‌شود و در نتیجه، منجر به عملکرد منابع جهت تولید توان اکتیو براساس مقدار ولتاژ می‌شود. بنابراین می‌توان گفت که روش پیشنهادی علاوه بر کنترل ولتاژ، کنترل توان اکتیو تولیدی را نیز انجام می‌دهد. در ادامه به منظور تعیین ولتاژ آستانه هر یک از منابع روش محاسبه قیمت توان در هر گره مورد بررسی قرار می‌گیرد [۲۳] و [۲۴].

۳-۲-۱- روش محاسبه قیمت توان در هر گره

در این قسمت روش محاسبه قیمت توان در هر گره، به کار برده شده در شبکه‌های شعاعی DC، جهت استفاده در شبکه‌های راه آهن برقی DC به منظور تعیین مقدار ولتاژ آستانه هر یک از منابع معرفی می‌گردد [۳۴] و [۳۵]. با در نظر گرفتن دو گره نمونه در همسایگی یکدیگر، نشان داده شده در شکل (۳-۳)، فرض کنید گره q از گره w توان دریافت کند. در این حالت قیمت توان ارسال شده به گره q از رابطه (۵-۳) بدست می‌آید:



شکل (۳-۳) دو گره نمونه در همسایگی یکدیگر

$$Price_{P_{wq, receive}} = (P_{wq, send} Price_w) / P_{wq, receive} \quad (۵-۳)$$

از طرف دیگر روابط زیر برقرار است:

$$P_{wq, receive} = P_{wq, send} - P_{loss_{wq}} \quad (۶-۳)$$

$$P_{wq, send} = U_w I_{wq} \quad (۷-۳)$$

$$P_{loss_{wq}} = R_{wq} I_{wq}^2 \quad (۸-۳)$$

با استفاده از روابط (۵-۳) تا (۸-۳)، رابطه (۹-۳) به دست می‌آید:

$$Price_{P_{wq, receive}} = \left(\frac{U_w}{U_w - R_{wq} I_{wq}} \right) Price_w \quad (۹-۳)$$

با توجه به قانون ولتاژ کیرشهف رابطه (۱۰-۳) برقرار است:

$$U_q = U_w - R_{wq} I_{wq} \quad (10-3)$$

در اینصورت طبق رابطه (۹-۳) و (۱۰-۳) خواهیم داشت:

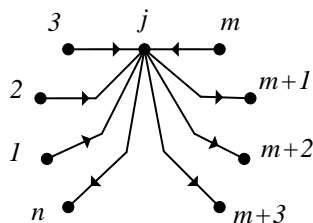
$$Price_{P_{wq, receive}} = (U_w / U_q) Price_w \quad (11-3)$$

در حالت کلی، در شبکه‌های راه آهن برقی DC پست‌های کشش مختلفی وجود دارند که به عنوان گره منبع در نظر گرفته می‌شوند. این گره‌های منابع بر روی خطوط کشش که محل اتصال قطارهای مختلف هستند و به عنوان گره‌های بار در نظر گرفته می‌شوند، قرار دارند. گره‌های منابع ممکن است به برخی از گره‌های بار توان ارسال کرده و یا ممکن است به علت کمبود ظرفیت یا در حالت بازگشت توان از گره‌های دیگر توان دریافت کنند. حال گره j با n گره همسایه، نشان داده شده در شکل (۴-۳)، را در نظر بگیرید. با فرض اینکه m عدد از گره‌های همسایه به گره j توان ارسال می‌کنند، قیمت توان در گره j را می‌توان از رابطه (۱۲-۳) بدست آورد:

$$Price_j = \frac{\sum_{i=1}^m (P_{ij, receive} Price_{P_{ij, receive}})}{\sum_{i=1}^m P_{ij, receive}} \quad (12-3)$$

که در آن i تعداد گره‌هایی می‌باشد که به گره j توان ارسال می‌کنند. از طرف دیگر، براساس رابطه (۱۱-۳)، قیمت توان رسیده به گره j از گره i برابر است با:

$$Price_{P_{ij, receive}} = (U_i / U_j) Price_i \quad (13-3)$$



شکل (۴-۳) یک گره نمونه متصل به n گره دیگر

بنابراین قیمت توان در گره j ام به صورت رابطه (۱۴-۳) خواهد شد:

$$Price_j = \frac{1}{U_j} \frac{\sum_{i=1}^m (P_{ij, receive} U_i Price_i)}{\sum_{i=1}^m P_{ij, receive}} \quad (14-3)$$

با توجه به رابطه (۱۴-۳)، محاسبه قیمت توان در گره j بدون نیاز به مشخصات و طول خطوط الکتریکی بین گره j و گره‌های همسایه آن صورت می‌گیرد. در صورت برابر بودن قیمت همه توان‌های رسیده به گره j ، یعنی:

$$Price_{P_{ij, receive}} = \text{Constant} \quad \forall i = 1 \text{ to } m \quad (15-3)$$

که در آن Constant یک عدد ثابت مثبت می‌باشد، همچنین:

$$Price_j = Price_{P_{ij, receive}} \quad \forall i = 1 \text{ to } m \quad (16-3)$$

رابطه (۱۴-۳) را می‌توان به صورت رابطه (۱۷-۳) بازنویسی کرد:

$$Price_j = (U_i / U_j) Price_i \quad (17-3)$$

که در آن i می‌تواند شماره هر یک از گره‌هایی باشد که به گره j توان ارسال می‌کند. رابطه (۱۶-۳) نشان می‌دهد که قیمت توان در گره j برابر با قیمت هر یک از توان‌های رسیده به این گره می‌باشد. همچنین، رابطه (۱۷-۳) نشان می‌دهد که قیمت توان در گره j به سادگی توسط ولتاژ و قیمت توان در هر یک از گره‌های ارسال‌کننده توان به گره j قابل محاسبه است.

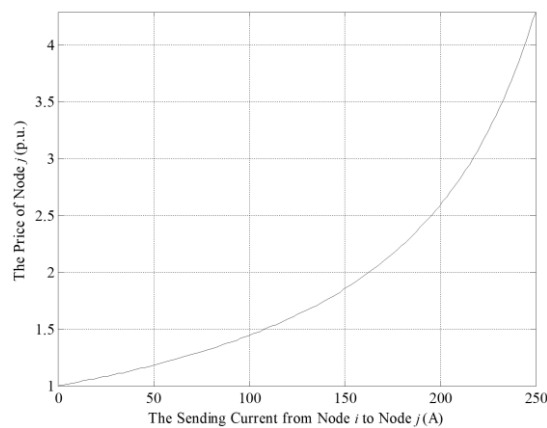
به دلیل برقراری رابطه (۱۸-۳)، رابطه (۱۹-۳) را می‌توان از رابطه (۱۷-۳) استخراج نمود:

$$U_i - U_j = R_{ij} I_{ij} \quad (18-3)$$

$$Price_j = \left(1 + \frac{R_{ij} I_{ij}}{U_i - R_{ij} I_{ij}}\right) Price_i \quad (19-3)$$

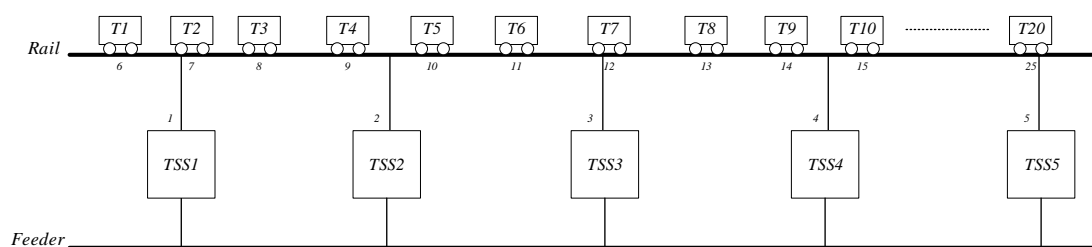
که در آن i می‌تواند شماره هر یک از گره‌هایی باشد که به گره j توان ارسال می‌کند. به منظور بررسی رابطه قیمت توان در گره j با جریان ارسالی به این گره، با اختصاص دادن مقادیر مشخصی به مقاومت، ولتاژ و قیمت گره i منحنی تغییرات قیمت توان در گره j ($Price_j$) با جریان ارسال شده از گره i به گره j (I_{ij}) بدست آمده که در شکل (۵-۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۵-۳) قیمت توان در گره j با افزایش جریان ارسالی و یا به عبارت دیگر توان ارسالی از گره i به گره j افزایش می‌یابد.

یک نکته قابل توجه و مهم، قابلیت مدل کردن هر منبع متصل به یک گره به صورت یک گره مجازی با ولتاژ، توان ارسالی و قیمت برابر با منبع مربوطه می‌باشد. بدین ترتیب، روابط (۱۲-۳) و (۱۷-۳) را می‌توان برای گره‌های متصل به یک یا چند منبع نیز استفاده نمود.



شکل (۵-۳) تغییرات قیمت توان در گره j با جریان ارسال شده از گره i به گره j . ($U_i=750\text{ V}$, $Price_i=1\text{ p.u.}$, $R_{ij}=1\ \Omega$)

شکل (۶-۳) یک شبکه راه آهن برقی DC با ۵ عدد پست کشش نشان می‌دهد. رابطه بین قیمت‌های توان در دو گره مختلف، برای مثال گره ۱ و گره ۹، با فرض اینکه قیمت توان‌های رسیده به هر یک از گره‌های شبکه راه آهن برقی DC مذکور یکسان است، طی روند ذکر شده بدست می‌آید.



شکل (۶-۳) ساختار یک شبکه راه آهن برقی DC

با توجه به رابطه (۳-۱۷)، اگر پست کشش اول به قطار چهار، در واقع گره ۱ به گره ۹، توان ارسال کند.

$$Price_9 = (U_1/U_9) Price_1 \quad (۳-۲۰)$$

از طرفی دیگر، اگر گره ۹ به گره ۱ توان ارسال کند،

$$Price_1 = (U_9/U_1) Price_9 \quad (۳-۲۱)$$

بدیهی است که رابطه (۳-۲۱) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۲۰) بازنویسی کرد. بنابراین، مستقل از جهت جریان توان، رابطه بین گره ۱ و گره ۹ توسط رابطه (۳-۲۰) قابل بیان است. به صورت مشابه، می‌توان روابط زیر را استخراج نمود:

$$Price_2 = (U_9/U_2) Price_9 \quad (۳-۲۲)$$

$$Price_{11} = (U_2/U_{11}) Price_2 \quad (۳-۲۳)$$

$$Price_3 = (U_{11}/U_3) Price_{11} \quad (۳-۲۴)$$

$$Price_{14} = (U_3/U_{14}) Price_3 \quad (۳-۲۵)$$

با توجه به روابط (۳-۲۱) تا (۳-۲۵)، رابطه بین قیمت‌های توان در گره ۱ و ۱۴ به صورت (۳-۲۶) می‌باشد:

$$Price_{14} = (U_1/U_{14}) Price_1 \quad (۳-۲۶)$$

بنابراین به روش مشابه، می‌توان حاکم بودن رابطه کلی یکسانی بین قیمت‌های توان در گره‌های مختلف شبکه راه آهن برقی DC شکل (۳-۶) را اثبات کرد. رابطه کلی مذکور به صورت رابطه (۳-۲۷) می‌باشد:

$$Price_i = (U_j/U_i) Price_j \quad (۳-۲۷)$$

که در آن i و j می‌توانند شماره هر یک از گره‌های شبکه راه آهن برقی DC مذکور باشند. رابطه (۳-۲۷) مستقل از نوع و طول خطوط الکتریکی و جهت جاری شدن توان می‌باشد. همچنین، رابطه (۳-۲۷) در شبکه راه آهن برقی DC با هر آرایشی و تعداد گره، شاخه و پست کشش قابل استفاده می‌باشد [۳۴] و [۳۵].

۳-۲-۲- تعیین مقادیر مناسب پارامترهای روش تقسیم توان بهینه DC

یک شبکه راه آهن برقی DC دارای m منبع را در نظر بگیرید. به منظور بهره‌برداری بهینه، منبع با ارزان‌ترین قیمت، که در اینجا منبع مرجع نامیده می‌شود، باید نخستین منبع تامین‌کننده توان مورد نیاز بارها باشد. در ابتدا فرض کنید منبع مرجع به تنهایی قادر به تأمین توان مصرفی شبکه راه آهن برقی می‌باشد. در این حالت یک مقدار بسیار ناچیز غیر صفر به شیب افقی (K_{droop}) این منبع اختصاص داده می‌شود. همچنین، ولتاژ آستانه منبع مرجع برابر با ولتاژ نامی شبکه انتخاب می‌گردد. در این حالت به دلیل وجود تنها یک منبع و در نتیجه ارسال توان به هر گره، رابطه (۳-۲۷) در این شبکه راه آهن برقی صادق خواهد بود. بنابراین، محاسبه قیمت توان در هر گره از شبکه راه آهن برقی مورد نظر می‌تواند توسط قیمت و ولتاژ گره منبع مرجع صورت گیرد. به عبارت دیگر:

$$Price_i = (U_{S_i} / U_i) Price_{S_i} \quad (3-28)$$

با توجه به شکل (۳-۱)، به دلیل اختصاص مقدار بسیار ناچیز به شیب افقی (K_{droop}) منبع مرجع، ولتاژ آستانه منبع مرجع می‌تواند جایگزین ولتاژ گره منبع مرجع (U_{S_i}) شود. بنابراین:

$$Price_i = (U_{Th_i} / U_i) Price_{S_i} \quad (3-29)$$

بهره‌برداری بهینه شبکه تنها در صورتی محقق می‌شود که شروع تولید توان منبع بعدی زمانی باشد که قیمت توان در گره متصل به آن (گره w) افزایش و با قیمت توان تزریقی آن (منبع i) به گره برابر گردد. یعنی،

$$Price_w = Price_{P_{S_{w, receive}}} \quad (3-30)$$

چون منابع به گره‌ها متصل می‌باشند،

$$Price_{P_{S_{w, receive}}} = Price_{S_i} \quad (3-31)$$

بنابراین، رابطه (۳-۳۰) را می‌توان به صورت رابطه (۳-۳۲) بازنویسی کرد:

$$Price_w = Price_{S_i} \quad (32-3)$$

از طرف دیگر، با در نظر گرفتن رابطه (3-27)، قیمت توان در گره w برابر است با:

$$Price_w = (U_{Th_i} / U_w) Price_{S_i} \quad (33-3)$$

با توجه به روابط (3-32) و (3-33)، ولتاژ گره از رابطه (3-34) بدست خواهد آمد:

$$U_w = (Price_{S_i} / Price_{S_i}) U_{Th_i} \quad (34-3)$$

بنابراین، در صورت محاسبه ولتاژ آستانه همه منابع توسط رابطه (3-35)، هر منبع به صورت خودکار زمانی شروع به تولید توان خواهد کرد که قیمت توان در گره متصل به آن برابر با قیمت آن منبع شود [24].

$$U_{Th_i} = (Price_{S_i} / Price_{S_i}) U_{Th_i} \quad (35-3)$$

در صورت افزایش کل توان مصرفی شبکه راه آهن برقی DC مورد نظر، که در ابتدا تنها منبع مرجع تأمین کننده توان مصرفی آن بود، ولتاژ گره‌ها کاهش و افت ولتاژ در شاخه‌های مختلف افزایش می‌یابد. بدین ترتیب، هنگامی که ولتاژ پایانه منبعی برابر با ولتاژ آستانه محاسبه شده از رابطه (3-35) گردد، اقدام به تولید توان خواهد کرد. با توجه به رابطه (3-19)، با افزایش میزان توان ارسال شده از گره‌های دیگر به گره منبع جدیدالورود قیمت توان ارسال شده افزایش می‌یابد. از طرفی، با افزایش توان تولیدی، قیمت منبع جدیدالورود ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه، به منظور تحقق بهره‌برداری بهینه از شبکه، نباید تغییری در توان ارسال شده از گره‌های همسایه به گره منبع جدیدالورود رخ دهد و منبع مذکور باید تأمین کننده هر گونه افزایش توان ارسال شده از گره خود به گره‌های همسایه دیگر باشد. بدین ترتیب قیمت توان تزریق شده منبع جدیدالورود و قیمت تمامی توان‌های رسیده به گره منبع مذکور برابر باقی خواهند ماند. در صورتی که منبع جدیدالورود یک منبع ولتاژ ثابت باشد، این اتفاق رخ خواهد داد. با اختصاص یک مقدار بسیار ناچیز به شیب افقی منبع جدیدالورود، منبع مذکور یک منبع ولتاژ ثابت خواهد گردید [24].

بدیهی است که یک منبع ولتاژ ثابت، ولتاژ گره خود را ثابت نگه داشته و در نتیجه، هیچ افزایش توان مصرفی در ناحیه‌های دیگر، متصل به گره‌های دریافت کننده توان از گره منبع جدیدالورود، توسط ناحیه‌هایی از شبکه راه آهن برقی DC مورد نظر متصل به گره‌های ارسال کننده توان به گره منبع جدیدالورود، تشخیص

داده نمی‌شود. بنابراین، تغییری در توان ارسالی به گره منبع جدیدالورود از طرف گره‌های همسایه ایجاد نخواهد شد. همچنین، جهت ثابت نگه‌داشتن ولتاژ گره خود، منبع جدیدالورود باید هرگونه افزایش تقاضای توان گره‌های همسایه را پاسخ دهد.

بنابراین در رابطه با تعیین شیب افقی منبع جدیدالورود همانطور که توضیح داده شد، یک مقدار بسیار ناچیز به شیب افقی آن‌ها اختصاص داده می‌شود. خاطر نشان می‌شود که مقدار شیب افقی نباید برابر با صفر باشد. منابع با شیب افقی صفر حتی اختلاف بسیار ناچیز بین ولتاژ پایانه و ولتاژ آستانه خود را تحمل نمی‌کنند. بنابراین، یک تغییر ولتاژ معمولی در شبکه راه آهن برقی DC موجب خواهد شد که همه منابع شبکه راه آهن برقی به صورت همزمان با افزایش و کاهش بی‌وقفه توان تولیدی خود جهت حذف اختلاف ولتاژ تلاش کنند. در نتیجه، منابع در فرآیند کنترل ولتاژ یکدیگر اختلال ایجاد کرده و شبکه راه آهن برقی DC سریعاً ناپایدار خواهد شد. بنابراین، در روش تقسیم توان بهینه DC، یک مقدار بسیار ناچیز غیر صفر به شیب افقی همه منابع شبکه‌های راه آهن برقی DC اختصاص داده می‌شود. جهت تحقق بهره‌برداری بهینه، ولتاژ آستانه فعال شدن منابع بعدی که یکی پس از دیگری با افزایش کل توان مصرفی شبکه راه آهن برقی DC اقدام به تولید توان می‌کنند نیز باید توسط رابطه (۳-۳۵) محاسبه نمود [۲۴].

با توجه به آنچه گفته شد، تحقق بهره‌برداری بهینه در شبکه راه آهن برقی DC با تعداد مختلف گره، شاخه و منابع انرژی و خطوط الکتریکی با انواع و طول‌های متفاوت تنها با تعیین مقادیر ولتاژ آستانه و شیب افقی منابع به صورت فوق صورت می‌گیرد. نکته قابل توجه این است که روش تقسیم توان بهینه DC با توجه به روابط و مشخصات بیان شده، به صورت خودکار تلفات توان را در فرآیند بهینه‌سازی خود لحاظ می‌کند. همچنین، روش تقسیم توان بهینه DC دارای محاسبات ساده و اندکی است؛ در واقع با توجه به رابطه (۳-۳۵)، منابع دیگر به منظور تعیین و محاسبه ولتاژ آستانه خود تنها نیاز به آگاهی از قیمت منبع مرجع دارند. بنابراین، تنها از طریق یک ارتباط یک طرفه حداقلی به سادگی، با قابلیت اطمینان بالا و هزینه پیاده‌سازی اندک روش تقسیم توان بهینه DC قابل پیاده‌سازی می‌باشد. استفاده از ارتباط یک طرفه به صورت چشمگیری باعث افزایش سادگی و قابلیت اطمینان و کاهش هزینه پیاده‌سازی روش مذکور می‌شود. از مزایای مهم دیگر روش تقسیم توان بهینه DC، مدولار بودن می‌باشد. به عبارت دیگر، در شبکه راه آهن برقی DC مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC اضافه، حذف یا جایگزین کردن منابع مختلف به سادگی و بدون نیاز به اعمال تغییر خاصی در منابع موجود می‌تواند صورت بگیرد. تنها نکته‌ای باید به آن توجه کرد، این است که ولتاژ آستانه منابع جدید اضافه‌شده نیز باید از رابطه (۳-۳۵) محاسبه شوند. همچنین، شیب

افتی این منابع باید مشابه سایر منابع برابر با یک مقدار ناچیز غیر صفر قرار داده شود. ویژگی بارز دیگر روش تقسیم توان بهینه DC مقاوم بودن این روش است. به بیان دیگر، عملکرد موفق روش تقسیم توان بهینه DC در اثر تغییر توان بارها، تغییر در آرایش و توسعه شبکه راه آهن برقی DC دچار اختلال نمی‌شود. در حقیقت، با توجه به رابطه (۳-۳۵)، ولتاژ آستانه و شیب افتی منابع در نتیجه تغییر توان بارها، تغییر در آرایش و توسعه شبکه راه آهن برقی DC هرگز دچار تغییر نشده و همچنان روش تقسیم توان بهینه DC، تقسیم بهینه تأمین توان در شبکه‌های راه آهن برقی DC را بدون تغییر در تنظیمات محقق می‌سازد.

با توجه به مباحث فوق، روش تقسیم توان بهینه DC یک روش کاربردی، مدولار، با قابلیت اطمینان بالا، خودمختار، غیرمتمرکز، بهینه و مقاوم می‌باشد که می‌تواند باعث بهره‌برداری بهینه در شبکه‌های راه آهن برقی DC با تعداد مختلفی از پست‌های کشتش گردد [۲۴].

۳-۳- جمع‌بندی

با توجه به اینکه هدف مدنظر ما بهره‌برداری بهینه از شبکه‌های راه آهن برقی DC می‌باشد؛ در این پایان‌نامه از روش تقسیم توان بهینه DC استفاده می‌شود. از ویژگی‌های برجسته این روش می‌توان به عدم نیاز به اطلاعات شبکه راه آهن برقی، قابلیت اطمینان بالا، پیاده‌سازی ارزان، مقاوم بودن و مدولار بودن و ... اشاره کرد. در این روش کنترل ولتاژ به هر یک از منابع موجود در شبکه راه آهن برقی مدنظر یک منحنی ولتاژ-جریان اختصاص داده می‌شود که طبق این منحنی و میزان ولتاژ، فرآیند تقسیم توان صورت می‌گیرد. در ادامه روش محاسبه قیمت گره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است؛ بر همین اساس قیمت گره‌ها طبق رابطه‌ای برحسب ولتاژ آن‌ها تعیین می‌گردد. سپس همانطور که گفته شد از آنجا که به هر منبع یک منحنی ولتاژ-جریان اختصاص داده شده، پارامترهای مربوط به آن‌ها باید مطابق با روش تقسیم توان بهینه DC تعیین شوند. اساس روش کنترل ولتاژ پیشنهادی بر پایه قیمت تولید توان منابع است؛ در واقع از قیمت تولید توان منابع استفاده کرده تا زمان روی کار آمدن و تولید توان منابع مختلف را تعیین کند. روند کنترل ولتاژ روش پیشنهادی بدین صورت است که ابتدا یک منبع که دارای کمترین هزینه تولید توان می‌باشد به عنوان منبع مرجع و ولتاژ آستانه فعال شدن آن منبع برابر با ولتاژ نامی شبکه در نظر گرفته می‌شود. سپس براساس رابطه بدست آمده برحسب قیمت تولید منابع، ولتاژ آستانه فعال شدن منابع دیگر تعیین می‌گردد و بدین ترتیب یک فرآیند کنترل ولتاژ مناسب که فقط نیاز به دانستن قیمت تولید منابع دارد انجام می‌گردد.

فصل ۴: روش حل

۴-۱- مقدمه

به منظور بررسی عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در شبکه‌های راه آهن برقی DC نیاز است که از طریق یک روش پخش بار مناسب، فرآیند پخش بار انجام گرفته و به تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته شود. همچنین، به منظور اثبات بهینه بودن نتایج به دست آمده از روش تقسیم توان بهینه DC، باید نتایج عملکرد بهینه شبکه راه آهن برقی DC را از طریق یک روش بهینه‌سازی دیگر محاسبه کرد. سپس با مقایسه کردن نتایج روش پیشنهادی با نتایج روش بهینه‌سازی، بهینه بودن عملکرد روش پیشنهادی را بررسی کرد.

۴-۲- پخش بار شبکه راه آهن برقی مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC

به طور معمول در شبکه‌های راه آهن برقی DC از روش‌های پخش بار شبکه توزیع AC متداول، با اندکی تغییرات، استفاده می‌شود [۳۶] و [۳۷]. سهم توان تولیدی هر منبع انرژی، جهت اجرای این روش‌های پخش بار، باید از قبل تعیین شده باشد. اما در روش تقسیم توان بهینه DC، با توجه به اینکه سهم توان تولیدی هر منبع تابعی از ولتاژ پلایانه آن بوده و از طرف دیگر، ولتاژهای پایانه منابع باید از طریق اجرای یک روش پخش بار مشخص شوند؛ تعیین سهم توان تولیدی این منابع قبل از اجرای پخش بار میسر نمی‌باشد. بر همین اساس، یک روش پخش بار، استفاده و بررسی شده در ریزشبکه‌های DC، با اعمال تغییراتی جهت اجرا بر روی شبکه‌های راه آهن برقی DC مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش پخش بار نیازی به دانستن سهم توان تولیدی منابع انرژی نیست و همچنین، نیازی به در نظر گرفتن منبع شناور^۱ ندارد [۳۸]. به بیان واضح‌تر، ویژگی‌های برجسته روش پخش بار مذکور، به شرح زیر می‌باشند:

- ۱) حداقل اطلاعات ورودی مورد نیاز: تنها اطلاعات مورد نیاز در روش پخش بار مذکور اطلاعات متداول مربوط به شاخه‌ها و گره‌ها می‌باشد و نیازی به آگاهی از سهم توان تولیدی منابع ندارد.
- ۲) عدم نیاز به منبع شناور: روش پخش بار مذکور، نیازی به در نظر گرفتن منبع شناور نداشته و تلفات توان شبکه را به صورت صحیح و دقیق بین تمامی منابع تقسیم می‌کند. در نتیجه، با توجه به اینکه در روش‌های پخش بار شبکه توزیع متداول، برخلاف واقعیت، تلفات توان شبکه به طور کامل تنها به

¹ Slack Source

یک منبع، اختصاص داده می‌شود؛ دقت روش پخش بار بیان شده بیشتر از روش‌های پخش بار شبکه توزیع متداول می‌باشد.

۳) ساده، سریع، مقاوم و دارای بازده بالای محاسباتی^۱: با به‌کارگیری شیوه مستقیم ارائه شده در [۳۹]، یک ماتریس ساده و ضرب ماتریسی معمولی جایگزین تجزیه LU^۲ و جایگذاری پیشرو-پسرو^۳ ماتریس جاکوبین^۴ یا ماتریس ادمیتانس Y می‌شود. همچنین، روش پخش بار مذکور از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی ساده، سهم جریان تزریقی تمامی منابع را محاسبه می‌نماید. کاهش قابل توجه زمان محاسبات و حافظه مورد نیاز و عدم وقوع شرایط بدساختار^۵ که معمولاً ناشی از تجزیه LU ماتریس جاکوبین یا ماتریس ادمیتانس Y می‌باشد، از جمله مزایایی هستند که موارد مذکور موجب آن می‌گردند. بنابراین، پیاده‌سازی روش پخش بار مذکور آسان خواهد بود [۳۸].

۴-۲-۱- توصیف روش پخش بار

داده‌های مورد نیاز به منظور انجام و اجرا روش پخش بار مذکور به صورت زیر می‌باشند:

۱- توان مصرفی بارها

۲- پارامترهای منحنی ولتاژ-جریان منابع، یعنی U_{Th} , K_{droop} , U_{MaxP} , I_{Max} و U_F .

مقادیر تمامی پارامترهای مذکور، با توجه مطالب ذکرشده در شرح روش تقسیم توان بهینه DC، جهت استفاده در محاسبات پخش بار معین و در دسترس می‌باشند. با توجه به شکل (۳-۱)، رابطه کلی بین جریان تزریقی و ولتاژ پایانه یک منبع، برای نمونه منبع i ، به صورت رابطه (۴-۱) قابل بیان می‌باشد:

$$I_{Si} = \begin{cases} (U_{Th,Si} - U_{Si}) / K_{droop,Si} & U_{Th,Si} \geq U_{Si} > U_{MaxP,Si} \\ I_{Max,Si} & U_{MaxP,Si} \geq U_{Si} > U_F \\ 0 & U_F \geq U_{Si} \text{ OR } U_{Si} > U_{Th,Si} \end{cases} \quad (1-4)$$

۳- اطلاعات شبکه.

¹ Computationally Efficient

² LU Decomposition

³ Forward/Backward Substitution

⁴ Jacobian Matrix

⁵ Ill-Conditioned

در روش پخش بار ارائه شده، ماتریس¹ BIBC و ماتریس² BCBV از طریق الگوریتم ساده ذکر شده در [۳۹]، تنها با استفاده از اطلاعات متداول مربوط به شاخه‌ها و گره‌های شبکه تولید می‌شوند. جریان‌های شاخه‌ها و اختلاف ولتاژهای بین گره مرجع و گره‌های دیگر شبکه راه آهن برقی DC را به آسانی می‌توان با به‌کارگیری ماتریس‌های BIBC و BCBV، به صورت زیر محاسبه نمود [۳۹]:

$$[B] = [BIBC][I] \quad (۲-۴)$$

$$[\Delta U] = [DLF][I] \quad (۳-۴)$$

که در آن

$$[DLF] = [BCBV][BIBC] \quad (۴-۴)$$

و

$$[\Delta U] = [U] - [U_{Base}] \quad (۵-۴)$$

باید توجه کرد که در نظر گرفتن یک گره ریشه^۳ در الگوریتم تولید دو ماتریس مذکور الزامی می‌باشد. تعیین این گره به صورت کاملاً آزادانه بوده و نیازی به اتصال به یک منبع ندارد. در این پایان‌نامه، گره ریشه گره مرجع نامیده خواهد شد.

در روش پخش بار مذکور، ابتدا فرض می‌شود که ولتاژ تمامی گره‌ها برابر با ولتاژ نامی شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد. هر تکرار از روش پخش بار مذکور شامل سه گام می‌باشد. این گام‌ها در تکرار k ام به شرح ذیل می‌باشند:

گام اول (جریان‌های دریافت‌شده توسط همه بارها از رابطه (۴-۶) محاسبه می‌گردد):

$$I_{Li}^k = -P_{Li} / U_{Li}^k \quad \forall i = 1 \text{ to } \ell \quad (۶-۴)$$

که در آن ℓ تعداد کل بارها می‌باشد.

¹ Bus-Injection to Branch-Current (BIBC) Matrix

² Branch-Current to Bus-Voltage (BCBV) Matrix

³ Root Node

گام دوم) محاسبه سهم جریان تزریقی و یا به عبارت دیگر سهم توان تولیدی هر یک از منابع به صورت دقیق انجام می‌گیرد. محاسبه اشتباه یا غیر دقیق سهم جریان تزریقی منابع ممکن است موجب فاصله گرفتن از نقطه جواب و در نتیجه واگرایی پخش بار شود. برقراری دو شرط جهت تعیین صحیح سهم جریان تزریقی منابع الزامی می‌باشد.

(۱) ارضا شدن رابطه بین جریان تزریقی و ولتاژ پایانه منابع.

(۲) صفر شدن جمع جبری جریان‌های جذب‌شده توسط بارها و جریان‌های تزریقی منابع.

به عبارت دیگر، سهم جریان تزریقی منابع در شبکه راه آهن برقی DC از طریق حل دستگاه معادلات خطی بدست آمده از روابط (۱-۴) و (۷-۴)، محاسبه می‌باشد:

$$\sum_{i=1}^s I_{Si}^k + \sum_{i=1}^{\ell} I_{Li}^k = 0 \quad (7-4)$$

که در آن s و ℓ به ترتیب تعداد کل منابع و بارها می‌باشند. دستگاه معادلات فوق دارای $s+1$ معادله و ولتاژ پایانه و جریان تزریقی منابع مجهولات آن می‌باشند. در نتیجه، تعداد مجهولات این دستگاه معادلات برابر با $2s$ می‌باشد. با توجه به موارد بیان‌شده، دستگاه معادلات خطی مورد بحث با توجه به بیشتر بودن تعداد مجهولات از تعداد معادلات، قابل حل نخواهد بود. با توجه به رابطه (۳-۴)، می‌توان رابطه (۸-۴) را استخراج نمود:

$$\Delta U_{Si}^k = [\text{DLF}]_{(j,:)} \times [I]^k \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (8-4)$$

که در آن $[\text{DLF}]_{(j,:)}$ زامین سطر، یعنی سطر متناظر با گره منبع i ام، ماتریس DLF می‌باشد. $[I]^k$ یک بردار ستونی متشکل از جریان‌های تزریقی همه گره‌ها از جمله گره‌های منابع شبکه راه آهن برقی DC در تکرار k ام می‌باشد. همچنین، با توجه به رابطه (۵-۴)،

$$\Delta U_{Si}^k = U_{Si}^k - U_{\text{Base}}^k \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (9-4)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۸-۴)، رابطه (۹-۴) را می‌توان به صورت رابطه (۱۰-۴) بازنویسی کرد:

$$U_{Si}^k = [\text{DLF}]_{(j,:)} \times [I]^k + U_{\text{Base}}^k \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (10-4)$$

با به‌کارگیری روابط (۴-۱) و (۴-۷) تا (۴-۱۰)، در دستگاه معادلات ولتاژهای پایانه تمامی منابع، یعنی s عدد از مجهولات، حذف و یک مجهول جدید، یعنی ولتاژ گره مرجع، اضافه می‌شود. در نتیجه، دستگاه معادلات خطی با $s+1$ معادله و $s+1$ مجهول به صورت زیر بدست خواهد آمد:

(۴-۱۱)

$$I_{Si}^k = \begin{cases} (U_{Th,Si} - U_{Base}^k - [DLF]_{(j,:)} \times [I]^k) / K_{droop,Si} & U_{Th,Si} \geq U_{Si}^k > U_{MaxP,Si} \\ I_{Max,Si} & U_{MaxP,Si} \geq U_{Si}^k > U_F \\ 0 & U_F \geq U_{Si}^k \text{ OR } U_{Si}^k > U_{Th,Si} \end{cases} \quad \forall i=1 \text{ to } s$$

$$\sum_{i=1}^s I_{Si}^k + \sum_{i=1}^{\ell} I_{Li}^k = 0 \quad (۴-۱۲)$$

با استفاده از دستگاه معادلات فوق، محاسبه ولتاژ گره مرجع و سهم جریان‌های تزریقی تمامی منابع انجام خواهد گرفت. به منظور حل دستگاه معادلات مذکور، در ابتدا تمامی منابع به صورت فعال، با شرایط تولید توان کمتر از حداکثر ظرفیت خود، در نظر گرفته می‌شوند. در این شرایط، ولتاژ پایانه هر منبع بین ولتاژ آستانه و ولتاژ توان ماکزیمم متناظر با آن منبع خواهد بود [۳۸]. بنابراین، ساده‌سازی شده دستگاه معادلات مورد بحث به صورت زیر خواهد بود:

$$U_{Th,Si} - U_{Base}^k - [DLF]_{(j,:)} \times [I]^k - K_{droop,Si} I_{Si}^k = 0 \quad \forall i=1 \text{ to } s \quad (۴-۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^s I_{Si}^k + \sum_{i=1}^{\ell} I_{Li}^k = 0 \quad (۴-۱۴)$$

از آنجایی که با توجه به دلایل اقتصادی تقریباً همه خطوط راه آهن برقی به صورت دو خط مورد بهره برداری قرار می‌گیرند، شرایطی را باید در نظر گرفت که یک پست کشش به صورت همزمان دو خط شبکه را تغذیه می‌کند. بر همین اساس معادله زیر برقرار است:

$$I_{Si} = I_{S1i} + I_{S2i} \quad \forall i=1 \text{ to } s \quad (۴-۱۵)$$

بنابراین با توجه به معادله (۴-۱۵) تعداد $2s$ مجهول و s معادله به تعداد معادلات و مجهولات اضافه شده

است. در نتیجه دستگاه معادلات مورد بحث به صورت زیر خواهد بود:

$$U_{Th,Si} - U_{Base_1}^k - [DLF]_{(j,:)_1} \times [I]_1^k - K_{droop,Si} I_{Si}^k = 0 \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (16-4)$$

$$\sum_{i=1}^s I_{S_1 i}^k + \sum_{i=1}^{\ell} I_{L_1 i}^k = 0 \quad (17-4)$$

$$\sum_{i=1}^s I_{S_2 i}^k + \sum_{i=1}^{\ell} I_{L_2 i}^k = 0 \quad (18-4)$$

با توجه به روابط (۱۶-۴) تا (۱۸-۴)، تعداد $2s+2$ معادله و $3s+2$ مجهول وجود دارد. همچنین، با توجه به این موضوع که ولتاژ گره‌های متصل به منابع برابر می‌باشند. پس می‌توان نوشت:

$$U_{Base_1}^k - [DLF]_{(j,:)_1} \times [I]_1^k = U_{Base_2}^k - [DLF]_{(j,:)_2} \times [I]_2^k \quad (19-4)$$

از این رو تعداد معادلات با تعداد مجهولات برابر و دستگاه قابل حل خواهد شد. در صورتی که سهم جریان تزریقی محاسبه شده برخی منابع، منفی یا بیشتر از I_{Max} مربوطه باشد، این منابع به ترتیب خاموش یا با حداکثر ظرفیت خود در حال تزریق توان می‌باشند. بنابراین در این حالت این منابع در دستگاه معادلات به صورت منابع جریان ثابت به ترتیب با جریان صفر یا I_{Max} مربوطه مدل خواهند گردید و معادلات مربوط به آن‌ها از دستگاه معادلات حذف می‌شود:

$$I_{Si}^k = 0 \quad (20-4)$$

یا

$$I_{Si}^k = I_{Max} \quad (21-4)$$

سپس دستگاه معادلات خطی جدید مجدداً حل خواهد شد. این روند تا جایی که سهم جریان تزریقی هیچ یک از منابع منفی یا بیشتر از I_{Max} مربوطه بدست نیاید، ادامه می‌یابد.

گام سوم) جریان‌های تزریقی تمامی گره‌ها، یا به عبارت دیگر $[I]^k$ ، با محاسبه جریان‌های جذب‌شده توسط

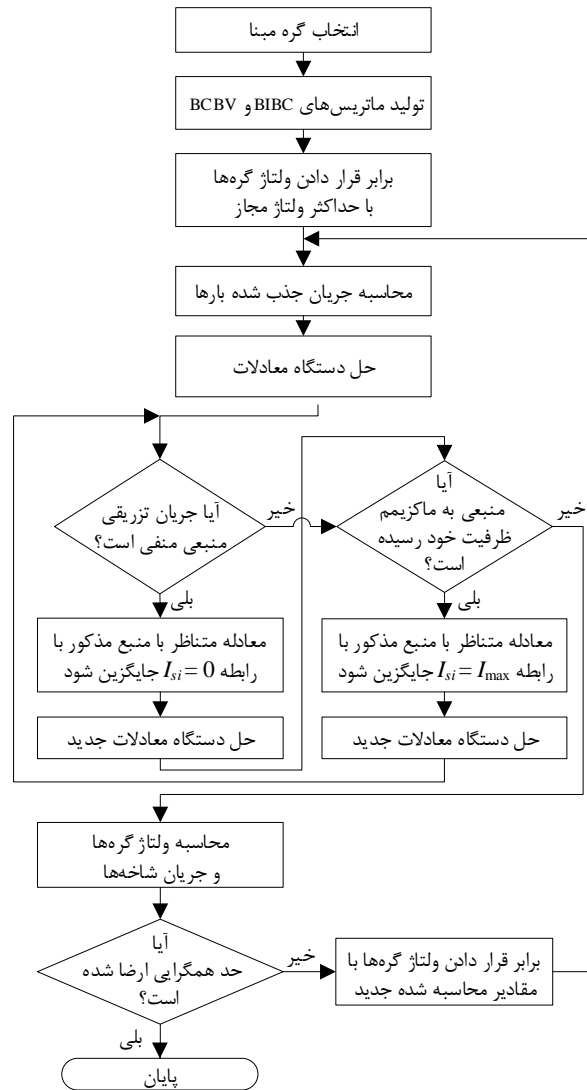
بارها و جریان‌های تزریقی منابع، بدست می‌آید. در نتیجه، محاسبه ولتاژهای گره‌های شبکه راه آهن برقی DC به سادگی توسط روابط (۲۲-۴) و (۲۳-۴) قابل انجام می‌باشد.

$$[\Delta U]^k = [DLF][I]^k \quad (22-4)$$

$$[U]^k = U_{Base}^k + [\Delta U]^k \quad (23-4)$$

بدین ترتیب، تکرار k ام روش پخش بار مذکور به پایان می‌رسد. تکرار بعد با به کارگیری ولتاژهای گره جدید بدست آمده، با روند مشلبه اجرا خواهد گردید. روش پخش بار مذکور زمانی با موفقیت به پایان می‌رسد که حداکثر اختلاف ولتاژ گره محاسبه شده در دو تکرار پیاپی کمتر از حد همگرایی^۱ مطلوب گردد. هنگامی که پخش بار پایان یافت، جریان‌های شاخه‌های شبکه راه آهن برقی DC به راحتی توسط رابطه (۲-۴) محاسبه خواهند گردید. روندنمای کلی روش پخش بار مذکور در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. با توجه به مطالب فوق‌الذکر، ویژگی برجسته روش پخش بار مذکور استفاده از حداقل داده‌های ورودی است. اطلاعات متداول مربوط به شاخه‌ها و گره‌ها تنها اطلاعات مورد نیاز در این روش می‌باشد که توسط اغلب شرکت‌های برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، ویژگی برجسته دیگر روش پخش بار مذکور عدم نیاز به آگاهی از سهم توان تولیدی منابع می‌باشد و این مورد را در طی اجرا شدن محاسبه خواهد نمود. همچنین، روش پخش بار مذکور نیازمند در نظر گرفتن منبع با ولتاژ معین یا منبع شناور نمی‌باشد. در نتیجه، روش مذکور دقیق‌تر از روش‌های پخش بار شبکه توزیع متداول می‌باشد [۳۸].

¹ Convergence Tolerance



شکل (۴-۱) روندنمای کلی روش پخش بار

با به‌کارگیری شیوه مستقیم ارائه‌شده در [۳۹]، ماتریس ساده DLF و ضرب ماتریسی معمولی، جایگزین تجزیه LU و جایگذاری پیشرو-پسرو ماتریس جاکوبین یا ماتریس ادمیتانس Y می‌شود. همچنین، در روش پخش بار مذکور از طریق حل یک دستگاه معادلات خطی ساده، یعنی روابط (۴-۱۳) و (۴-۱۴)، سهم جریان تزریقی تمامی منابع محاسبه می‌شود. موارد مذکور از وقوع شرایط بدساختار که معمولاً ناشی از تجزیه LU ماتریس جاکوبین یا ماتریس ادمیتانس Y می‌باشد، جلوگیری کرده و همچنین باعث کاهش قابل توجه زمان محاسبات و حافظه مورد نیاز می‌گردند. با توجه به آنچه گفته شد، روش پخش بار مذکور یک روش مقاوم، دقیق، ساده، سریع، دارای بازده بالای محاسباتی و کاربردی می‌باشد [۳۸].

۴-۳- بهینه‌سازی شبکه راه آهن برقی DC

شبکه‌های راه آهن برقی DC نمونه‌ای از مدارهای الکتریکی محسوب می‌شوند. بر همین اساس روابط حاکم بر مدارهای الکتریکی که شامل چهار دسته کلی، یعنی روابط بارها، روابط منابع، قوانین جریان و ولتاژ کیرشهف^۱ (KVL و KCL) هستند، در شبکه‌های راه آهن برقی DC نیز قابل اعمال می‌باشند.

جهت اعتبارسنجی بهینه بودن نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی باید از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی استفاده شود. به منظور انجام فرآیند بهینه‌سازی در شبکه‌های راه آهن برقی DC توسط نرم‌افزارهای بهینه‌سازی کافی است که در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار مورد نظر، علاوه بر تعریف صحیح تابع هدف، تمامی روابط حاکم بر شبکه راه آهن برقی DC نیز به عنوان قیدهای بهینه‌سازی به درستی تعریف شوند [۴۰]. در این پایان‌نامه، از یک ابزار مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی سطح بالا یعنی نرم‌افزار گمز (GAMS) به عنوان نرم‌افزار بهینه‌سازی استفاده می‌شود [۴۱]. روابط حاکم بر شبکه راه آهن برقی DC، به عنوان قیدهای بهینه‌سازی، به صورت زیر در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی می‌شوند:

الف) روابط قطارهای شبکه راه آهن برقی DC به صورت رابطه (۴-۲۴) در نرم‌افزار گمز پیاده‌سازی می‌گردند:

$$I_{Li} = -P_{Li} / U_{Li} \quad \forall i = 1 \text{ to } \ell \quad (۴-۲۴)$$

ب) روابط پست‌های کشش به صورت روابط زیر در نرم‌افزار گمز اعمال می‌شوند:

$$P_{Si} = U_{Si} I_{Si} \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (۴-۲۵)$$

$$0 \leq P_{Si} \leq P_{\max, Si} \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (۴-۲۶)$$

$$0 \leq I_{Si} \leq I_{\max, Si} \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (۴-۲۷)$$

$$U_{\min} \leq U_{Si} \leq U_{\max} \quad \forall i = 1 \text{ to } s \quad (۴-۲۸)$$

¹ Kirchhoff's Current and Voltage Laws

(ج) با توجه به قانون جریان کیرشهف، جمع جبری جریان‌های تزریقی برابر با صفر می‌باشد:

$$\sum_{j=1}^p I_{ji} = 0 \quad \forall i = 1 \text{ to } n \quad (29-4)$$

که در آن p و n به ترتیب تعداد جریان‌های تزریقی به گره i و تعداد گره‌های شبکه راه آهن برقی DC می‌باشند.

(د) قانون ولتاژ کیرشهف از طریق رابطه بین ولتاژ گره‌ها در دو انتهای هر شاخه شبکه راه آهن برقی DC اعمال می‌گردد:

$$U_r = U_q + R_{Bi} I_{Bi} \quad \forall i = 1 \text{ to } b \quad (30-4)$$

که در آن b تعداد شاخه‌های شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد. همچنین، U_r و U_q ولتاژهای گره‌های در دو انتهای شاخه i می‌باشند.

با توجه به اینکه هدف اصلی در این پایان‌نامه کنترل ولتاژ به همراه بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری از شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد، تابع هدفی که در نرم‌افزار گمز باید حداقل گردد، به صورت رابطه (۴-۳۱) تعریف می‌شود:

$$J = \sum_{i=1}^m P_{S_i} Cost_{S_i} \quad (31-4)$$

که در آن m تعداد منابع شبکه راه آهن برقی می‌باشد. همچنین، P_{S_i} و $Cost_{S_i}$ به ترتیب توان تولیدی و هزینه تولید توان منبع i هستند. پس از تعریف قیود و تابع هدف، برای حل مسئله بهینه‌سازی شبکه راه آهن برقی DC، از روش حل BARON نرم‌افزار گمز استفاده می‌شود [۲۳] و [۲۴].

۴-۴- جمع‌بندی

در این فصل به منظور بررسی صحت و درست بودن فرآیند کنترل ولتاژ پیشنهادی نیاز به انجام پخش بار و مشاهده نتایج مربوط به آن وجود دارد. بر همین اساس از یک روش پخش بار استفاده شده که به حداقل اطلاعات شبکه نیاز دارد، بسیار سریع و دارای بازدهی بالاست و نیاز به تعیین منبع شناور ندارد. روش پخش بار تنها نیاز به دو ماتریس ساده BIBC و BCBV که طبق ساختار شبکه محاسبه می‌شوند، دارد. همانطور که گفته شد فرآیند پخش بار پیشنهادی دارای سه مرحله و گام می‌باشد که به طور کامل بررسی شدند.

در انتهای این فصل به منظور بررسی بهینه بودن عملکرد روش کنترل ولتاژ پیشنهادی، به بررسی روش بهینه‌سازی شبکه‌های راه آهن برقی DC پرداخته شده است. بر همین اساس از نرم‌افزار بهینه‌سازی سطح بالا گمز استفاده شده است. در این نرم افزار ابتدا قیود مسئله بهینه‌سازی که بر اساس روابط حاکم بر مدارهای الکتریکی بدست می‌آیند، تعریف می‌شوند. سپس با توجه به اینکه هدف از این پایان‌نامه بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری از شبکه راه آهن برقی DC می‌باشد، تابع هدفی که باید در فرآیند بهینه‌سازی حداقل شود، تعریف می‌شود. در نهایت به منظور حل مسئله بهینه‌سازی مطرح شده از روش حل BARON استفاده می‌شود. در فصل بعد به منظور بررسی عملکرد صحیح روش کنترل ولتاژ پیشنهادی، شبیه‌سازی بر روی یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط نمونه در حالی که روش کنترل ولتاژ پیشنهادی بر روی آن پیاده شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین به منظور بررسی کارکرد صحیح روش پیشنهادی در شرایط مختلف، سناریوهای مختلفی تعیین و پیاده‌سازی شده تا روش پیشنهادی را به چالش کشیده و عملکرد آن در شرایط مختلف را بررسی کند.

فصل ۵:

شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

۵-۱- مقدمه

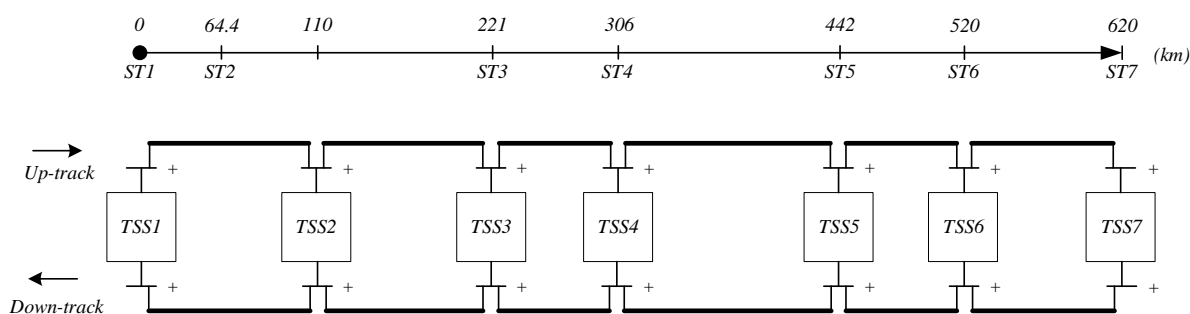
بر اساس موارد بیان شده در فصل سوم، از طریق روش تقسیم توان بهینه DC عملکرد بهینه شبکه راه آهن برقی تحقق می‌یابد. این روش یک روش عملی، مدولار، مستحکم، مستقل، خودمختار، بهینه و با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد که می‌توان از آن در انواع مختلف شبکه‌های تغذیه DC راه آهن برقی استفاده نمود. در این فصل، اثبات کارآمدی و عملکرد مناسب روش پیشنهادی به منظور کنترل ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC همراه با بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در همین راستا یک شبیه‌سازی بر روی یک شبکه DC راه آهن برقی نمونه انجام گرفته است. شبکه نمونه در نظر گرفته شده دارای دو خط (خط رفت و خط برگشت) به طول ۶۲۰ کیلومتر می‌باشد. به منظور تامین توان مورد نیاز قطارها در فواصل مختلف این شبکه، تعداد هفت عدد پست کشش که تحت بهره‌برداری و مالکیت شبکه بالادست می‌باشند، در نظر گرفته شده است.

همچنین به منظور اثبات عملکرد مناسب و بهینه روش پیشنهادی، سناریوها و حالت‌های مختلفی در نظر گرفته شده است. در حالت (۱)، عملکرد شبکه با در نظر گرفتن ده عدد قطار در هر خط بررسی شده است. در حالت (۲)، رخ دادن خطا در یکی از منابع موجود در نظر گرفته شده و عملکرد روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در حالت (۳)، عملکرد پربراری شبکه با در نظر گرفتن پانزده عدد قطار در هر خط بررسی شده، در حالت (۴) قابلیت به‌کارگیری منابع انرژی تولید پراکنده تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی و باد و ... و همچنین تاثیر آن‌ها بر بهبود عملکرد شبکه در حالت (۳) بررسی شده است. در ادامه به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت‌های بیان شده خواهیم پرداخت.

۵-۲- تعریف شبکه راه آهن برقی

روش تقسیم توان بهینه DC به شبکه راه آهن برقی نمونه نشان داده شده در شکل (۵-۱) اعمال می‌شود. شبکه نمونه در نظر گرفته شده، یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط است که دارای دو خط (یک خط رفت و یک خط برگشت) به طول ۶۲۰ کیلومتر می‌باشد. این شبکه راه آهن برقی از خط ریلی پرسرعت بین شهرهای مادرید و بارسلونا الگو گرفته شده است [۹].



شکل (۵-۱) شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط نمونه به منظور انجام شبیه‌سازی

این شبکه دارای هفت عدد پست کشش می‌باشد. ولتاژ نامی این شبکه نمونه ۲۴ کیلوولت می‌باشد. همچنین حداکثر و حداقل ولتاژ مجاز این شبکه به ترتیب ۲۰ درصد بیشتر و ۲۵ درصد کمتر از ولتاژ نامی آن یعنی ۲۹ و ۱۸ کیلوولت می‌باشد. به علاوه مقاومت هادی‌ها برابر با ۰.۱۲۶ اهم بر کیلومتر در نظر گرفته می‌شود.

تمامی منابع موجود در شبکه نمونه از جمله پست‌های کشش و منابع تولید پراکنده (حالت ۴ شبیه‌سازی) مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC هستند. بر همین اساس، تمام منابع موجود باید از سیستم کنترلی روش تقسیم توان بهینه DC که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، استفاده کنند و منحنی ولتاژ-جریان آنان مشابه شکل (۳-۱) خواهند بود.

شیب افقی (K_{droop})، ولتاژ خطا (U_F)، جریان ماکزیمم (I_{Max}) و ولتاژ توان ماکزیمم (U_{MaxP}) هر منبع نیز بر اساس روابط بیان شده در فصل سوم تعیین می‌گردد. به منظور بررسی بهینه‌بودن عملکرد روش پیشنهادی به آگاهی از قیمت تولید توان هر یک از منابع موجود نیاز است. بر همین اساس در جدول (۵-۱) مکان، ولتاژ آستانه (U_{Th})، شیب افقی (K_{droop})، ولتاژ خطا (U_F)، جریان ماکزیمم (I_{Max})، ولتاژ توان ماکزیمم (U_{MaxP})، حداکثر ظرفیت تولیدی (P_{Max}) و قیمت تولید توان هر منبع موجود در شبکه راه آهن برقی آورده شده است. با توجه به اینکه هدف اصلی در این پایان‌نامه، ارزیابی و بررسی عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در شبکه‌های راه آهن برقی DC می‌باشد و از آنجایی که مدل‌سازی پست‌های کشش به صورت دقیق و کامل انجام نگرفته است، از ذکر اطلاعات و جزئیات کامل آن‌ها صرف نظر شده است. در صورت نیاز به دانستن این اطلاعات می‌توان به اطلاعات موجود در مرجع [۹] مراجعه کرد.

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که بارهای موجود در شبکه راه آهن برقی در موقعیت‌های مختلف، با توجه به زمان‌بندی حرکت، سرعت، شیب مسیر و موارد دیگر، دارای توان مصرفی متفاوتی

هستند. در صورتی که یک قطار در حال نزدیک شدن به ایستگاه باشد، توان مصرفی آن نسبت به حالت کارکرد عادی کمتر و در صورتی که یک قطار در حال خارج شدن از ایستگاه و شتاب‌گیری باشد، توان مصرفی آن نسبت به حالت کارکرد عادی بیشتر خواهد بود. به همین دلیل است که بارهای موجود در شبکه راه آهن برقی را بارهای متغیر نسبت به زمان و مکان در نظر می‌گیرند؛ اما در اینجا به منظور اثبات عملکرد مناسب روش کنترل ولتاژ پیشنهادی، قطارهای موجود در شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط به صورت بار توان ثابت و در یک لحظه مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرند.

مطابق با آنچه که در فصل چهارم بیان شد، در روش کنترل ولتاژ پیشنهادی از یک روش پخش بار خاص استفاده می‌شود که نیاز به تعیین شینه مرجع ندارد. در این روش پخش بار دو ماتریس BIBC و BCBV براساس ساختار شبکه محاسبه شده و پخش بار با استفاده از آنها صورت می‌گیرد. بنابراین با توجه به نحوه محاسبه این دو ماتریس که در مرجع [۳۹] بیان شده است، برای محاسبه این دو ماتریس نیاز به تعیین یک گره مرجع داریم. اگر هریک از منابع موجود و قطارهای موجود در شبکه راه آهن برقی نمونه را به عنوان یک گره در نظر بگیریم در اینصورت گره مربوط به پست کشش اول به عنوان گره مرجع در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به اینکه در ساختار روش کنترل ولتاژ پیشنهادی به هریک از منابع یک آستانه ولتاژ فعال شدن اختصاص داده می‌شود، به منظور تعیین این آستانه‌های ولتاژ نیاز به انتخاب یک منبع مرجع داریم. همانطور که در فصل سوم گفته شد، منظور از ولتاژ آستانه فعال شدن منابع این است که هنگامی که ولتاژ گره مربوط به منبع مورد نظر از آستانه تعیین شده کمتر شود، آن منبع شروع به تولید توان می‌کند. انتخاب منبع مرجع بدین صورت است که منبعی که کمترین هزینه تولید توان را دارا می‌باشد به عنوان منبع مرجع انتخاب شده و ولتاژ آستانه فعال شدن این منبع برابر با ولتاژ نامی شبکه نمونه (۲۴ کیلوولت) می‌باشد. سپس با توجه به رابطه بیان شده در فصل سوم برای محاسبه ولتاژ آستانه هریک از منابع به غیر از منبع مرجع، ولتاژ آستانه منابع دیگر محاسبه می‌گردد. همچنین جریان ماکزیمم و ولتاژ توان ماکزیمم هر منبع نیز براساس روابط بیان شده در فصل سوم محاسبه می‌شوند.

۵-۳- شبیه‌سازی

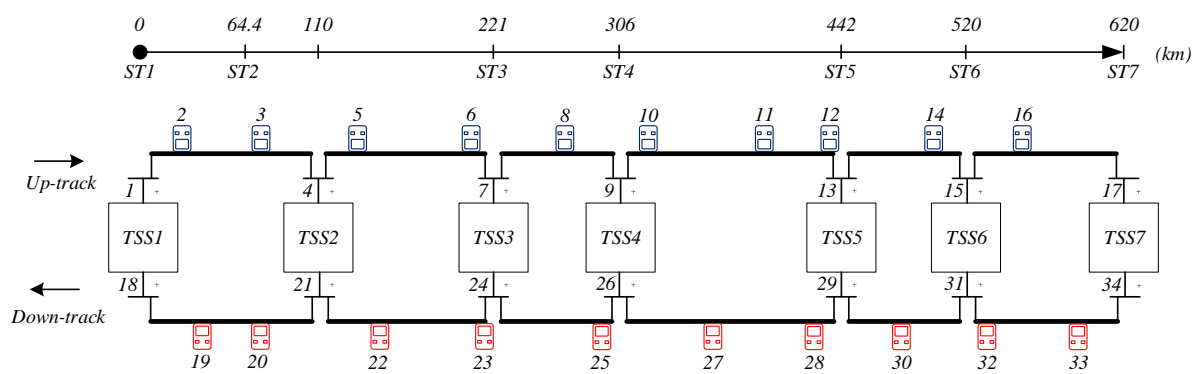
در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر و ارزیابی بهتر روش کنترل ولتاژ پیشنهادی، به شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب (MATLAB) و تحلیل چهار حالت مختلف برای شبکه نمونه بیان شده، پرداخته می‌شود.

جدول (۱-۵) پارامترهای منابع تولید توان در حالت (۱) شبیه‌سازی

شماره منابع	مکان (کیلومتر)	قیمت تولید توان (دلار بر مگاوات)	توان ماکزیمم (مگا وات)	ولتاژ آستانه (کیلوولت)	شیب افقی (ولت بر آمپر)	ولتاژ خطا (کیلوولت)	ولتاژ توان ماکزیمم (کیلوولت)	جریان ماکزیمم (آمپر)
۱	۰	۱۲۳	۳۰	۲۳.۲۱۹۵	۰.۰۰۰۲۹۰۲	۱۸	۲۳.۲۱۹۱	۱۲۹۲.۰۳
۲	۱۱۰	۱۱۹	۳۰	۲۴	۰.۰۰۰۳	۱۸	۲۳.۹۹۹۶	۱۲۵۰.۰۱
۳	۲۲۱	۱۲۵	۳۰	۲۲.۸۴۸	۰.۰۰۰۲۷۶۸	۱۸	۲۲.۸۴۷۶	۱۳۱۳.۰۴
۴	۳۰۶	۱۲۱	۳۰	۲۳.۶۰۳۳	۰.۰۰۰۲۷۷۱	۱۸	۲۳.۶۰۲۹	۱۲۷۱.۰۲
۵	۴۴۲	۱۲۸	۳۰	۲۲.۳۱۲۵	۰.۰۰۰۲۷۲۲	۱۸	۲۲.۳۱۲۱	۱۳۴۴.۵۵
۶	۵۲۰	۱۲۳	۳۰	۲۳.۲۱۹۵	۰.۰۰۰۲۸۲۲	۱۸	۲۳.۲۱۹۱	۱۲۹۲.۰۳
۷	۶۲۰	۱۳۰	۳۰	۲۱.۹۶۹۲	۰.۰۰۰۲۸۵۲	۱۸	۲۱.۹۶۸۸	۱۳۶۵.۵۷

۵-۳-۱- حالت (۱) شبیه‌سازی

در حالت اول شبیه‌سازی، عملکرد شبکه با تعداد ۱۰ عدد قطار در هر خط، نشان داده شده در شکل (۲-۵)، در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۲-۵) اطلاعات مربوط به شماره گره هر یک از منابع و قطارها نیز نشان داده شده است.



شکل (۲-۵) شبکه راه آهن برقی ولتاژ متوسط DC در حالت (۱) شبیه‌سازی

همانطور که گفته شد در حالت (۱) تعداد ۱۰ عدد قطار در هر خط شبکه راه آهن برقی در نظر گرفته شده که با توجه به ویژگی‌های مکانی که در آن قرار گرفته‌اند، دارای توان مصرفی مشخصی می‌باشند. اطلاعات مربوط به موقعیت و توان مصرفی قطارها در جدول (۲-۵) آورده شده است. بر همین اساس می‌توان مشاهده کرد که کل ظرفیت تولید نصب شده و کل توان مصرفی قطارهای شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ

متوسط در حالت (۱) به ترتیب ۲۱۰ و ۹۹.۷ مگاوات است. نکته‌ای که در تعیین موقعیت قطارهای موجود در خط رفت و برگشت شبکه راه آهن برقی شبیه‌سازی شده باید به آن توجه کرد این است که، در هر خط شماره گره‌ها و مکان قطارها از دید ناظر در ابتدای خط رفت تعیین می‌شوند. همچنین توان مصرفی قطارهایی که در حالت ترمزگیری و بازگشت توان دارند، منفی در نظر گرفته شده است.

جدول (۲-۵) اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در هر خط در حالت (۱) شبیه‌سازی

خط برگشت			خط رفت		
مکان (کیلومتر)	توان مصرفی (مگاوات)	شماره گره	مکان (کیلومتر)	توان مصرفی (مگاوات)	شماره گره
۳۵	۴.۸	۲	۲۰	۶	۲
۷۵	۵	۳	۷۵	۷.۳	۳
۱۵۰	۵.۲	۵	۱۳۰	۵.۵	۵
۲۲۰.۵	۷.۶	۶	۲۱۰	۲.۸	۶
۲۹۰	۷.۴	۸	۲۶۵	۴.۸	۸
۳۶۰	۴.۹	۱۰	۳۲۰	۶.۳	۱۰
۴۲۵	۶.۳	۱۱	۳۹۰	۳.۴	۱۱
۴۸۰	۴.۳	۱۳	۴۴۰	-۱	۱۲
۵۳۰	۲.۵	۱۵	۵۰۰	۵	۱۴
۵۹۰	۵.۹	۱۶	۵۶۰	۵.۷	۱۶

پس از انجام شبیه‌سازی و اجرا پخش بار بر روی شبکه راه آهن برقی در نظر گرفته شده مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، مقادیر مربوط به ولتاژ پلایانه، جریان تزریقی، توان تولیدی و هزینه مربوط به تولید توان برای هر یک از منابع مطابق جدول (۳-۵) بدست می‌آید.

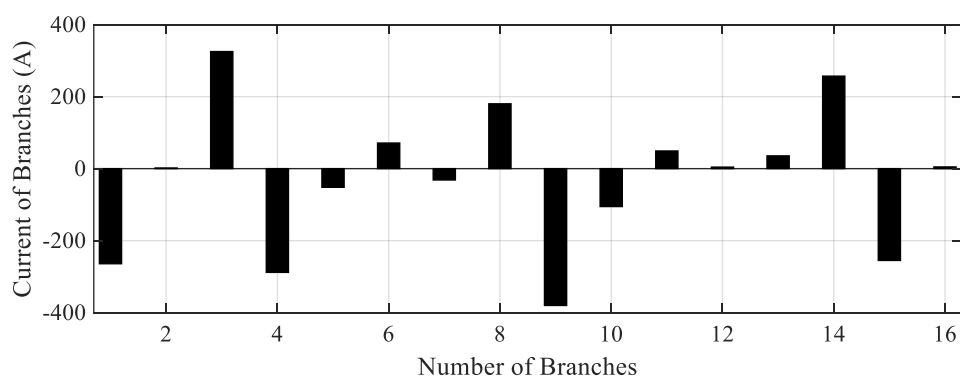
جدول (۳-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۱) شبیه‌سازی

شماره منابع	روش تقسیم توان بهینه DC		
	جریان منابع (آمپر)	توان منابع (مگاوات)	ولتاژ منابع (کیلوولت)
۱	۴۲۳.۱۳	۹.۸۲۴۹۱	۲۳.۲۱۹
۲	۱۱۱۶.۶۷	۲۶.۷۹۹۸۲	۲۳.۹۹۹
۳	۴۲۴.۰۷	۹.۶۸۹۳۰	۲۲.۸۴۷
۴	۱۱۳۸.۹۹	۲۶.۸۸۳۵۹	۲۳.۶۰۲
۵	۲۴۲.۴۵	۵.۴۰۹۸۷	۲۲.۳۱۲
۶	۹۷۸.۰۳	۲۲.۷۰۹۲۸	۲۳.۲۱۹
۷	۱۰۷.۸۵	۲.۳۶۹۳۸	۲۱.۹۶۹
مجموع			۱۲۶۵۵.۴۴

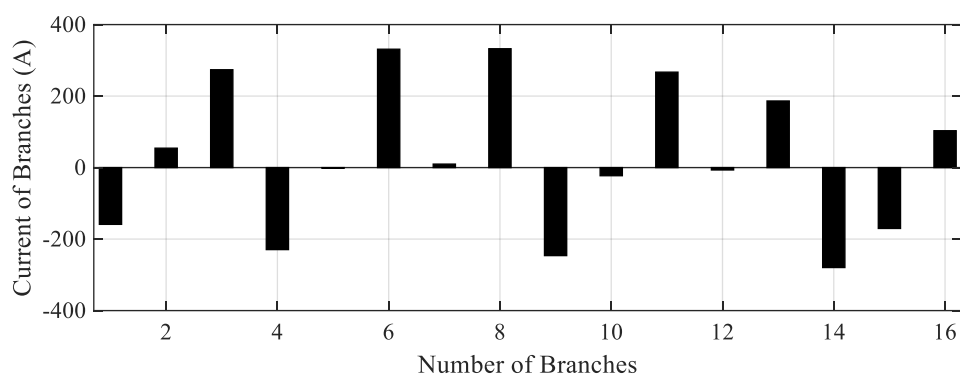
با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۳-۵)، مشاهده می‌شود که منابع با قیمت تولید توان کمتر سهم بیشتری در تغذیه قطارها داشته‌اند. به عبارت دیگر، توان از ناحیه منابع با قیمت کمتر، به سمت ناحیه منابع با قیمت بیشتر منتقل شده است. البته در این رابطه استثناهایی نیز وجود دارد. با توجه به اینکه خطوط شبکه‌های راه آهن برقی دارای مقاومت و در نتیجه دارای تلفات هستند، در صورتی که فاصله میان یک قطار تا منبع ارزان قیمت به حدی زیاد باشد که باعث زیاد شدن تلفات توان و در نتیجه مقرون به صرفه نبودن انتقال توان از منبع ارزان قیمت به قطار مربوطه شود و همچنین در صورتی که توان مصرفی قطارهای اطراف یک منبع ارزان قیمت از ظرفیت کل آن منبع بیشتر باشد، در این دو حالت منابع با قیمت بالاتر به ناچار مجبور به تولید توان و تغذیه قطارهای موجود در ناحیه منبع ارزان قیمت می‌شوند. در واقع توان از ناحیه منابع گران قیمت به سمت ناحیه منابع ارزان قیمت منتقل می‌شود.

شکل (۳-۵) که مربوط به جریان هریک از شاخه‌های موجود در هر خط شبکه راه آهن برقی می‌باشد، نشان‌دهنده این موضوع است که بیشتر توان مصرفی قطارها توسط منابع با قیمت تولید توان کمتر تامین شده و همچنین با توجه به زیاد بودن فاصله برخی قطارها از منابع ارزان قیمت، به ناچار توان برخی قطارها از منابع گران قیمت تامین شده است.

به عنوان مثال جریان‌های شاخه‌های ۲ و ۳ در خط رفت مثبت می‌باشند؛ این بدین معناست که بیشتر توان مورد نیاز قطار دوم خط رفت توسط منبع دوم که قیمت کمتری دارد تامین شده است.



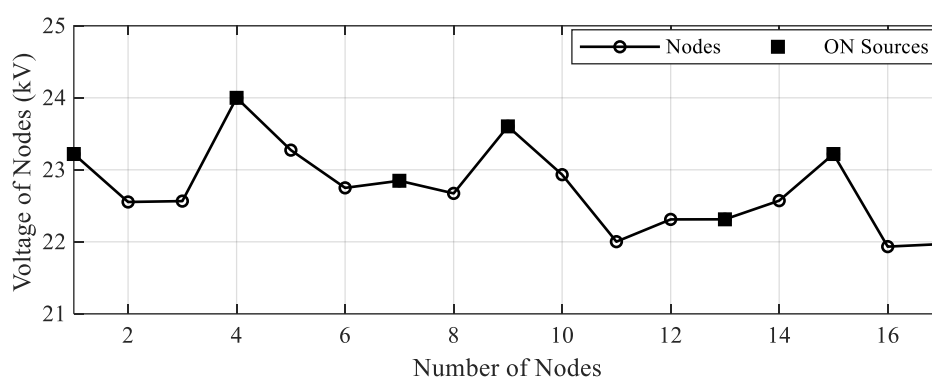
(الف)



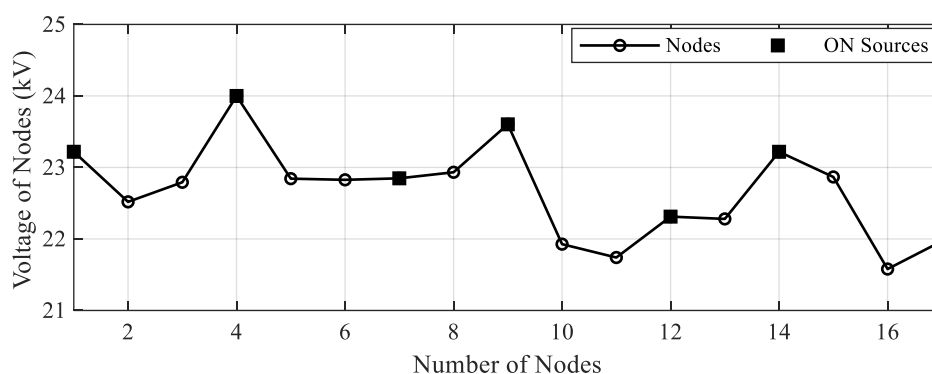
(ب)

شکل (۳-۵) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۱) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب آمپر

در شکل (۴-۵) و شکل (۵-۵)، به ترتیب ولتاژ و توان مربوط به هر یک از گره‌ها (منابع و قطارها) در حالت (۱) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۴-۵) که پروفیل ولتاژ شبکه را در این حالت نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که با توجه به اینکه هیچ یک از منابع به حداکثر ظرفیت تولید توان خود نرسیده (منابع رسیده به حداکثر ظرفیت با نماد لوزی نمایش داده می‌شود) و همچنین خاموش نشده‌اند (منابع خاموش با نماد ستاره نمایش داده می‌شود)، ولتاژ تمامی گره‌های مربوط به آن‌ها در محدوده عملکرد عادی که براساس شیب افقی تعیین می‌شود، قرار دارند. علاوه بر این ولتاژ تمامی گره‌های بارها در محدوده مجاز هستند که نشان از عملکرد مناسب روش کنترل ولتاژ پیشنهادی دارد.



(الف)

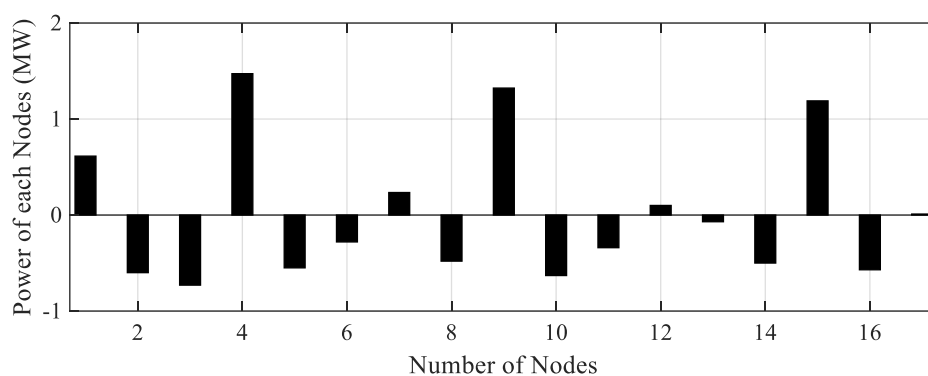


(ب)

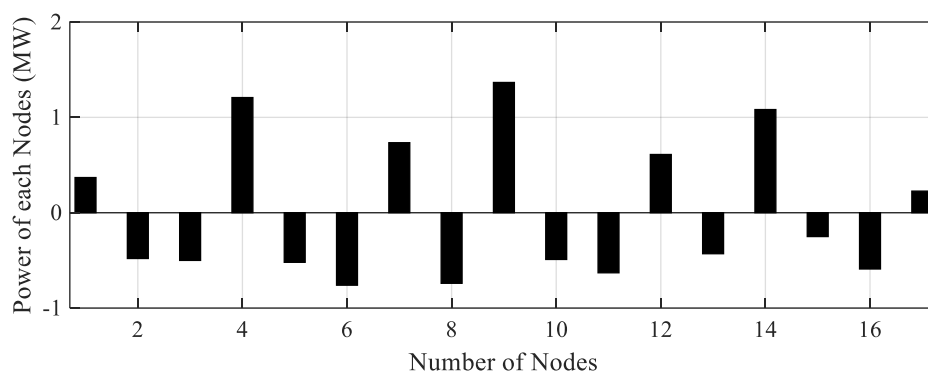
شکل (۴-۵) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۱) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب کیلوولت

اعتبارسنجی الگوریتم و روش: به منظور بررسی صحت و اعتبارسنجی روش پیشنهادی در فرآیند کنترل ولتاژ و بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری شبکه راه آهن برقی DC همانطور که در فصل قبل گفته شد از یک ابزار مدل‌سازی مسئله بهینه‌سازی سطح بالا یعنی نرم‌افزار گمز (GAMS) استفاده می‌شود.

در جدول (۴-۵) نتایج حاصله از نرم‌افزار گمز برای هریک از منابع موجود در حالت (۱) نشان داده شده است. بر همین اساس، کل هزینه تولید توان منابع محاسبه شده توسط نرم‌افزار گمز برابر با ۱۲۶۰۷.۱۹ دلار است. از طرفی، کل هزینه تولید توان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC برابر با ۱۲۶۵۵.۴۴ دلار می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تفاوت بین هزینه‌های محاسبه شده از طریق دو روش بسیار ناچیز و حدود ۰.۳۸ درصد است. یعنی همانطور که در فصل سوم به صورت تحلیلی نشان داده شد، روش تقسیم توان بهینه DC مورد نیاز قطارها را به صورت بهینه تامین کرده و در نتیجه عملکرد بهینه شبکه راه آهن برقی را محقق می‌کند.



(الف)



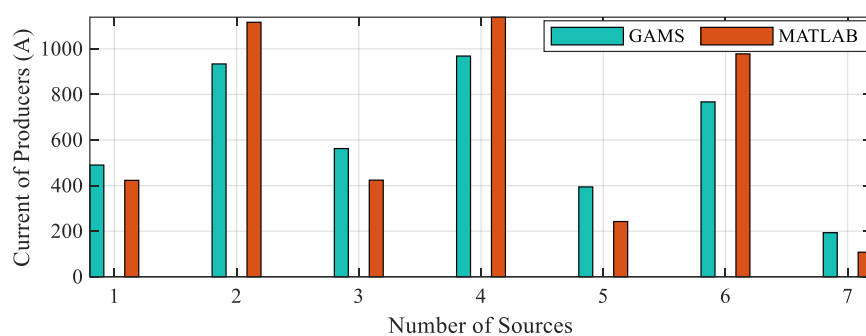
(ب)

شکل (۵-۵) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۱) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب مگاوات

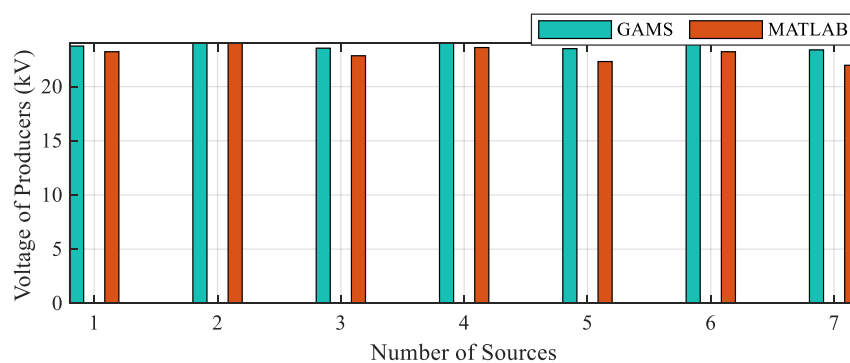
جدول (۴-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۱) شبیه‌سازی

روش بهینه‌سازی (گمز)				شماره منابع
هزینه تولید توان (دلار)	ولتاژ منابع (کیلوولت)	توان منابع (مگاوات)	جریان منابع (آمپر)	
۱۴۳۱.۷	۲۳.۷۳۹	۱۱.۶۳۹۹	۴۹۰.۳۱	۱
۲۶۶۷.۱۴	۲۴	۲۲.۴۱۳۱	۹۳۳.۸۷	۲
۱۶۵۵.۹	۲۳.۵۴۶	۱۳.۲۴۷۲	۵۶۲.۶	۳
۲۸۱۲.۵۸	۲۴	۲۳.۲۴۴۶	۹۶۸.۵۲	۴
۱۱۸۶.۱	۲۳.۵۰۳	۹.۲۶۶۵۱	۳۹۴.۲۷	۵
۲۲۶۵.۱	۲۴	۱۸.۴۱۵۵	۷۶۷.۳۱	۶
۵۸۸.۶۱	۲۳.۳۹	۴.۵۲۷۷۸	۱۹۳.۵۷	۷
۱۲۶۰۷.۱۹				مجموع

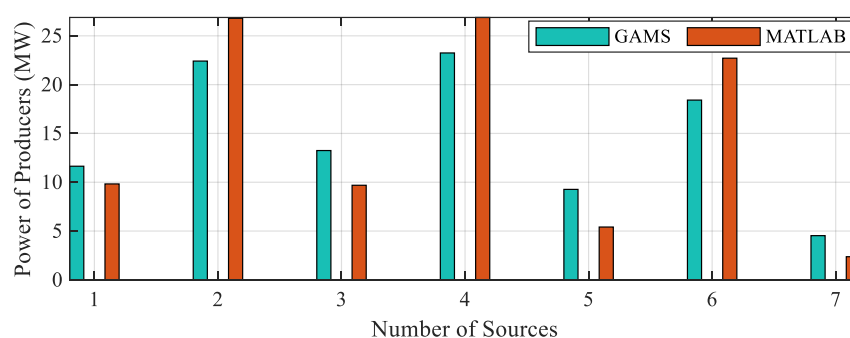
در شکل (۵-۶) جریان، ولتاژ و توان بدست آمده برای هر یک از منابع در دو روش بیان شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بر همین اساس می‌توان گفت که روش پیشنهادی عملکرد بهینه شبکه راه‌آهن برقی را فراهم کرده است. در نتیجه می‌توان دریافت که روش تقسیم توان بهینه DC، بدون هیچگونه محاسبات سنگین و بدون نیاز به ارتباطات به چنین دستاورد مهمی رسیده است. همانطور که در فصل سوم توضیح داده شد، در روش تقسیم توان بهینه DC هر منبع با استفاده از منحنی ولتاژ-توان مربوط به خود، سهم تولید توان بهینه را براساس اندازه ولتاژ ترمینال خود تعیین می‌کند و در نهایت عملکرد بهینه شبکه را فراهم می‌کند.



(الف)



(ب)

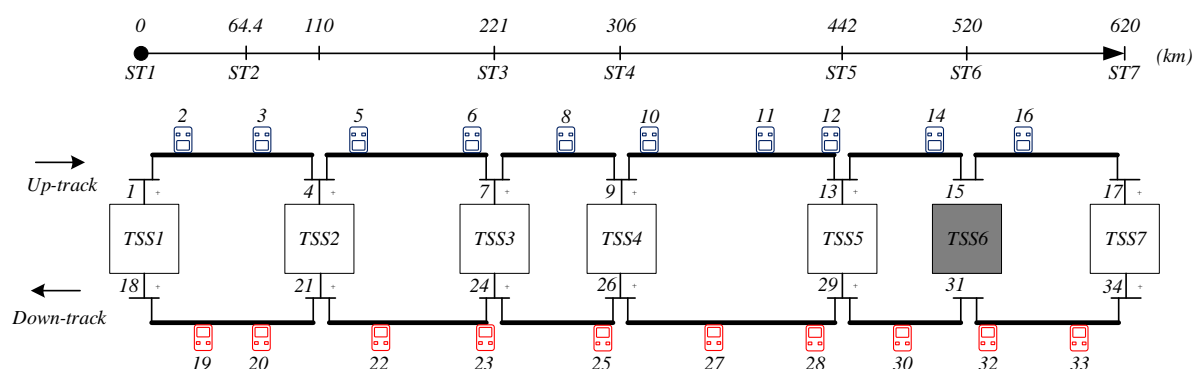


(ج)

شکل (۵-۶) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۱) شبیه‌سازی: (الف) جریان تزریقی منابع، (ب) ولتاژ منابع، (ج) توان تولیدی منابع

۵-۳-۲- حالت (۲) شبیه‌سازی

در این حالت شبیه‌سازی، عملکرد شبکه راه آهن برقی با تعداد ۱۰ عدد قطار در هر خط، هنگامی که در یک منبع تغذیه خطایی رخ داده و تولید توان نمی‌کند، بررسی می‌شود. ساختار شبکه راه آهن برقی در حالت (۲) شبیه‌سازی در شکل (۵-۷) نشان داده شده است. بر همین اساس به منظور ایجاد بیشترین چالش برای روش پیشنهادی، فرض می‌شود که منبع موجود در پست کشش ششم با قیمت تولید توان نسبتاً پایین (۱۲۳ دلار بر مگاوات)، دچار خطا و از مدار خارج شده است. در این حالت کل ظرفیت تولید نصب شده شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط با حدود ۱۴ درصد کاهش برابر با ۱۸۰ مگاوات و کل توان مصرفی قطارها بدون تغییر برابر با ۹۹.۷ مگاوات است. با توجه به نتایج بدست آمده، در حالت (۱) حدود ۲۲ مگاوات توان توسط منبع موجود در پست کشش ششم تامین شده است. در نتیجه پس از رخ دادن خطا و خارج شدن آن از مدار، منابع موجود در پست‌های دیگر باید توان کسر شده به دلیل حذف این منبع را فراهم و تامین کنند. روش تقسیم توان بهینه DC به طور خودکار و هوشمند تامین این مقدار توان مورد نیاز را میان منابع مختلف تقسیم می‌کند تا شبکه راه آهن برقی مورد بررسی بهینه‌ترین عملکرد را داشته باشد.



شکل (۵-۷) شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۲) شبیه‌سازی

به منظور انجام شبیه‌سازی در این حالت، اطلاعات مربوط به منابع همانند جدول (۵-۱) می‌باشند با این تفاوت که منبع ششم از مدار خارج شده و توان تولیدی آن صفر است. اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در خط رفت و برگشت همانند جدول (۵-۲) می‌باشند. پس از انجام شبیه‌سازی و اجرا پخش بار بر روی شبکه راه آهن برقی در نظر گرفته شده مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، مقادیر مربوط به ولتاژ پایانه، جریان تزریقی، توان تولیدی و هزینه مربوط به تولید توان برای هر یک از منابع مطابق جدول (۵-۵) بدست

می‌آید. با توجه به اینکه منبع ششم تولید توان انجام نمی‌دهد مقدار ولتاژ گره آن در خطوط رفت و برگشت با یکدیگر متفاوت خواهد بود و توسط شبکه تعیین می‌گردد.

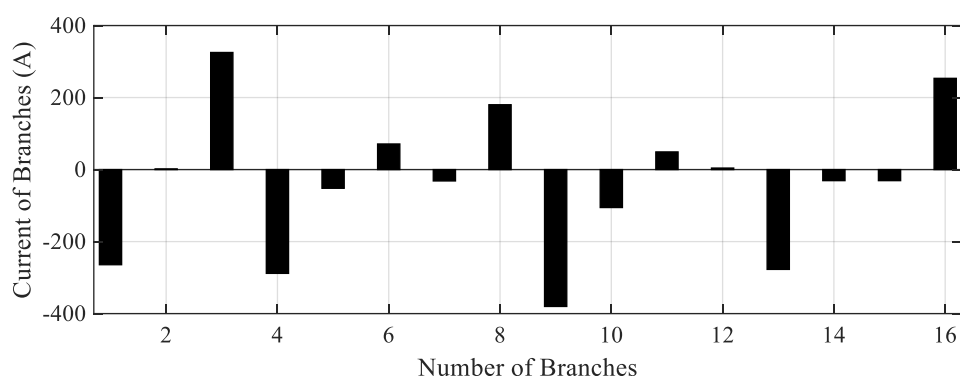
جدول (۵-۵) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۲) شبیه‌سازی

شماره منابع	روش تقسیم توان بهینه DC		
	جریان منابع (آمپر)	توان منابع (مگاوات)	ولتاژ منابع (کیلوولت)
۱	۴۲۳.۱۳	۹.۸۲۴۹۸	۲۳.۲۱۹
۲	۱۱۱۶.۶۷	۲۶.۷۹۹۹۲	۲۳.۹۹۹
۳	۴۲۴.۰۷	۹.۶۸۹۳۱	۲۲.۸۴۷
۴	۱۱۳۹.۰۱	۲۶.۸۸۴۱۳	۲۳.۶۰۲
۵	۸۳۵.۱۳	۱۸.۶۳۳۷۶	۲۲.۳۱۲
۶	۰	۰	**
۷	۵۷۹.۰۳	۱۲.۷۲۰۸۶	۲۱.۹۶۹
مجموع			۱۲۹۰۰.۶۴

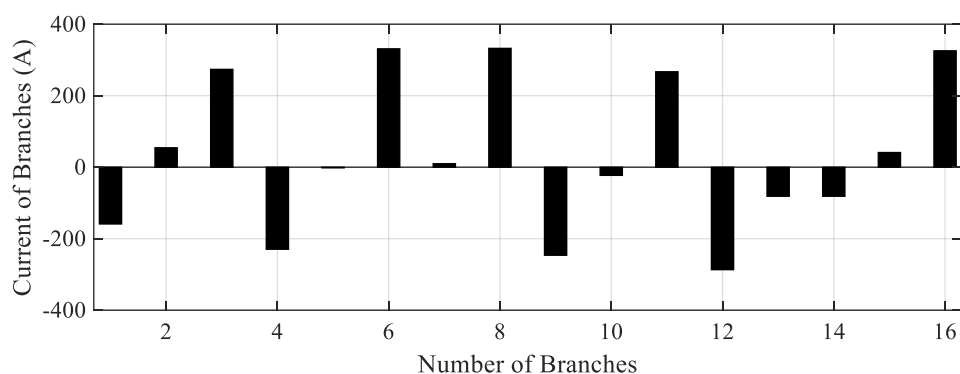
** ولتاژ گره منبع ۶ در خط رفت و برگشت به ترتیب: ۲۰.۲۰۸ کیلوولت و ۲۰.۵۳۰ کیلوولت

براساس نتایج بدست آمده در جدول (۵-۵) مشاهده می‌شود که توان تولید شده توسط منبع ششم در حالت (۱)، پس از رخ دادن خطا در آن، توسط دو منبع اطراف آن تامین شده است؛ در واقع تامین توان قطارهای موجود در نزدیکی این منبع به علت فاصله زیادی که با منابع ارزان قیمت تر دارند، توسط منابع ارزان قیمت از نظر اقتصادی و هزینه مقرون به صرفه نخواهد بود. روش تقسیم توان بهینه DC به طور خودکار و هوشمند تامین این مقدار توان مورد نیاز را میان منابع مختلف تقسیم می‌کند تا شبکه راه آهن برقی مورد بررسی بهینه‌ترین عملکرد را داشته باشد.

شکل (۵-۸) که مربوط به جریان هریک از شاخه‌های موجود در هر خط شبکه راه آهن برقی در حالت (۲) می‌باشد، نشان‌دهنده این موضوع است که پس از رخ دادن خطا در منبع ششم جریان دو شاخه اطراف منبع ششم به شدت کاهش و جریان شاخه‌های اطراف منبع پنجم و هفتم افزایش یافته است. در واقع قطارهای اطراف منبع ششم توسط منابع پنج و هفت تغذیه شده اند.



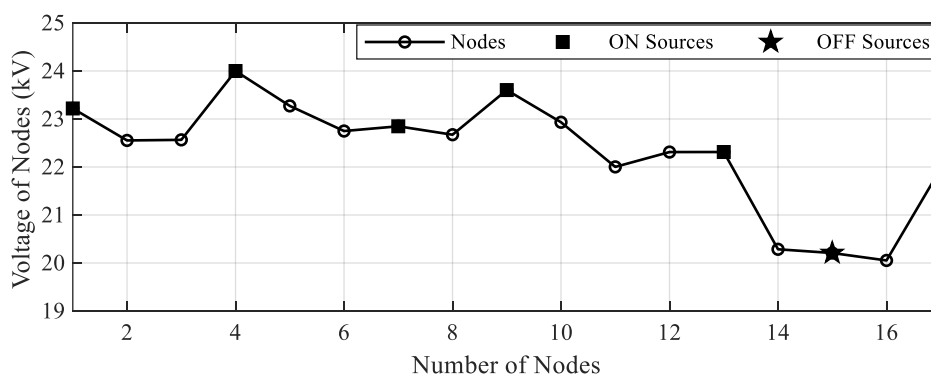
(الف)



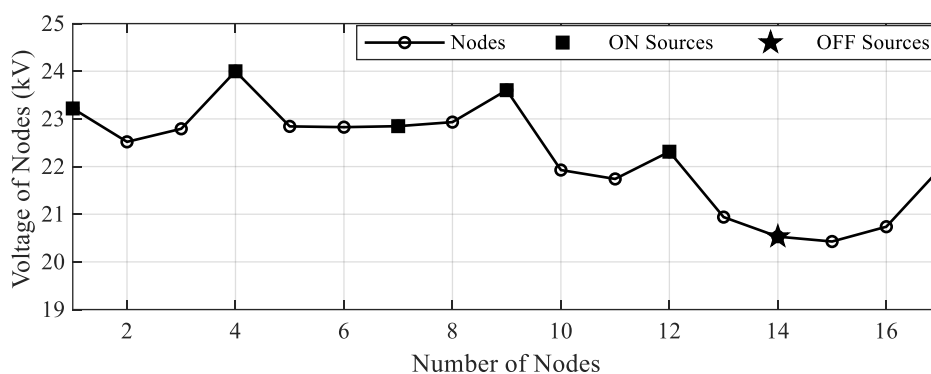
(ب)

شکل (۵-۸) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۲) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب آمپر

در شکل (۵-۹) و شکل (۵-۱۰)، به ترتیب ولتاژ و توان مربوط به هر یک از گره‌ها (منابع و قطارها) در حالت (۲) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۵-۹) که پروفیل ولتاژ شبکه را در این حالت نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که با توجه به وقوع خطا در منبع شش، این منبع تولید توان نداشته و همین موضوع باعث افت ولتاژ گره مربوط به این منبع و گره‌های بار اطراف آن شده است؛ اما همچنان ولتاژهای بدست آمده در محدوده مجاز قرار دارند و نشان از عملکرد مناسب روش تقسیم توان بهینه DC دارد.



(الف)

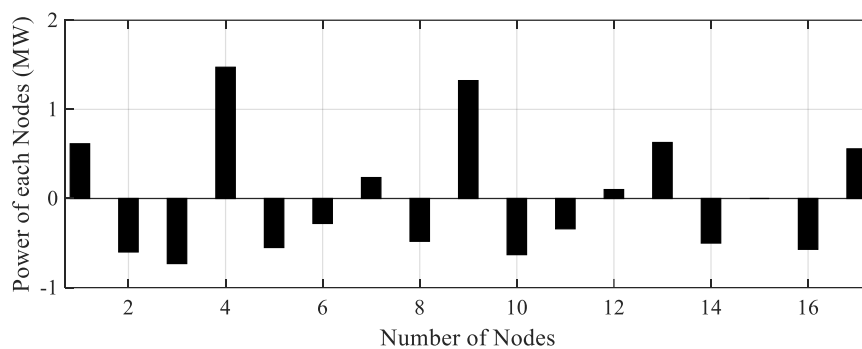


(ب)

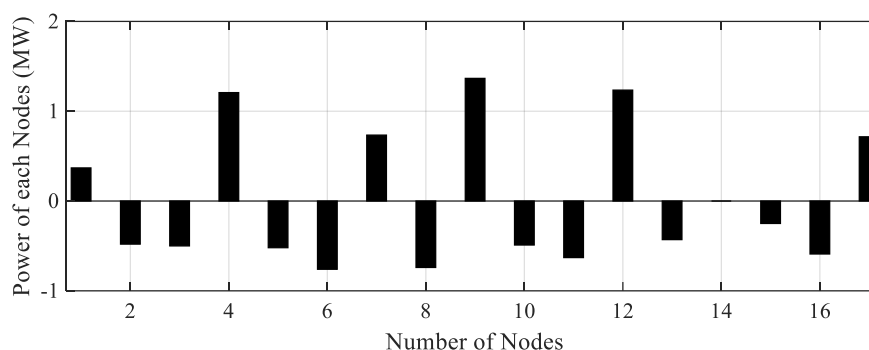
شکل (۵-۹) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۲) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب کیلوولت

همانند حالت (۱) به منظور بررسی بهینه بودن عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در این حالت، از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز استفاده شده است. در جدول (۵-۶) نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز برای منابع موجود در شبکه راه آهن برقی در حالت (۲) نشان داده شده است.

بر همین اساس، کل هزینه تولید توان منابع محاسبه شده توسط نرم‌افزار گمز برابر با ۱۲۸۳۴.۳۷ دلار است. از طرفی، کل هزینه تولید توان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC برابر با ۱۲۹۰۰.۶۴ دلار می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تفاوت بین هزینه‌های محاسبه شده از طریق دو روش بسیار ناچیز و حدود ۰.۵۱ درصد است. بنابراین با توجه به نتایج حاصله می‌توان نتیجه گرفت که روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۲) عملکرد بهینه شبکه راه آهن برقی را محقق کرده است.



(الف)



(ب)

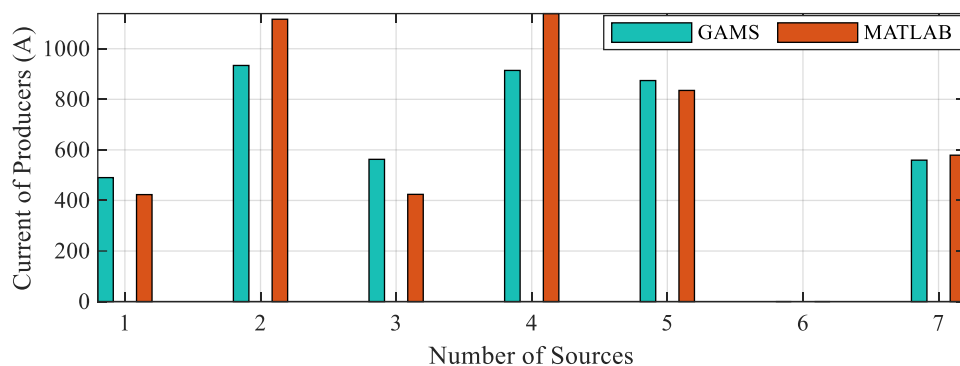
شکل (۵-۱۰) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۲) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب مگاوات

جدول (۵-۶) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۲) شبیه‌سازی

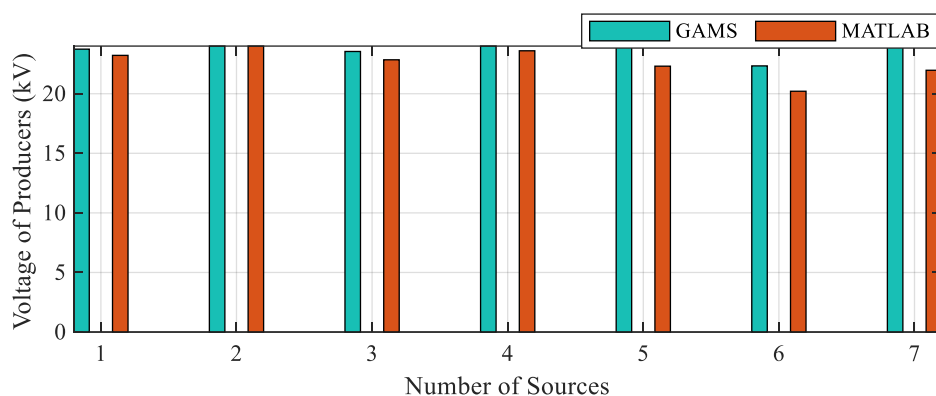
روش بهینه‌سازی (گمز)				شماره منابع
هزینه تولید توان (دلار)	ولتاژ منابع (کیلوولت)	توان منابع (مگاوات)	جریان منابع (آمپر)	
۱۴۳۱.۶۹	۲۳.۷۳۹	۱۱.۶۳۹۸	۴۹۰.۳۱	۱
۲۶۶۷.۱۶	۲۴	۲۲.۴۱۳۱	۹۳۳.۸۷	۲
۱۶۵۵.۹۲	۲۳.۵۴۶	۱۳.۲۴۷۳	۵۶۲.۶	۳
۲۶۵۵.۰۶	۲۴	۲۱.۹۴۲۶	۹۱۴.۲۷	۴
۲۶۷۹.۳	۲۳.۹۴۳	۲۰.۹۳۲۱	۸۷۴.۲۳	۵
.	**	.	.	۶
۱۷۴۵.۲۴	۲۴	۱۳.۴۲۴۹	۵۵۹.۳۷	۷
۱۲۸۳۴.۳۷				مجموع

** ولتاژ گره منبع ۶ در خط رفت و برگشت به ترتیب: ۲۲.۳۳۶ کیلوولت و ۲۲.۷۴۳ کیلوولت

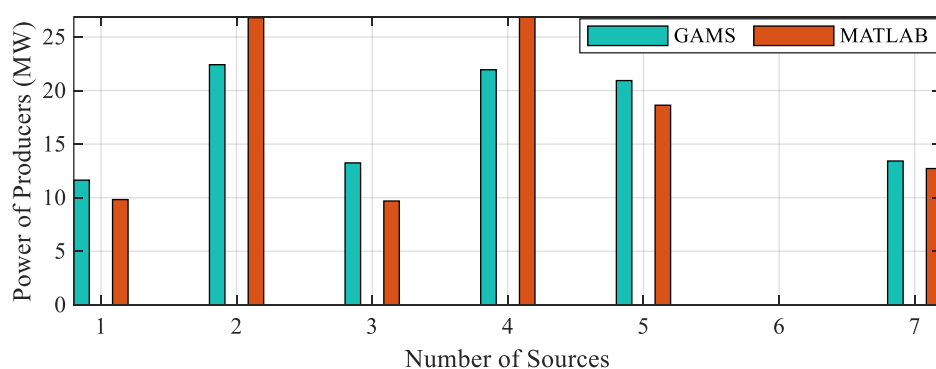
در شکل (۵-۱۱) جریان، ولتاژ و توان بدست آمده برای هر یک از منابع در دو روش بیان شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



(الف)



(ب)

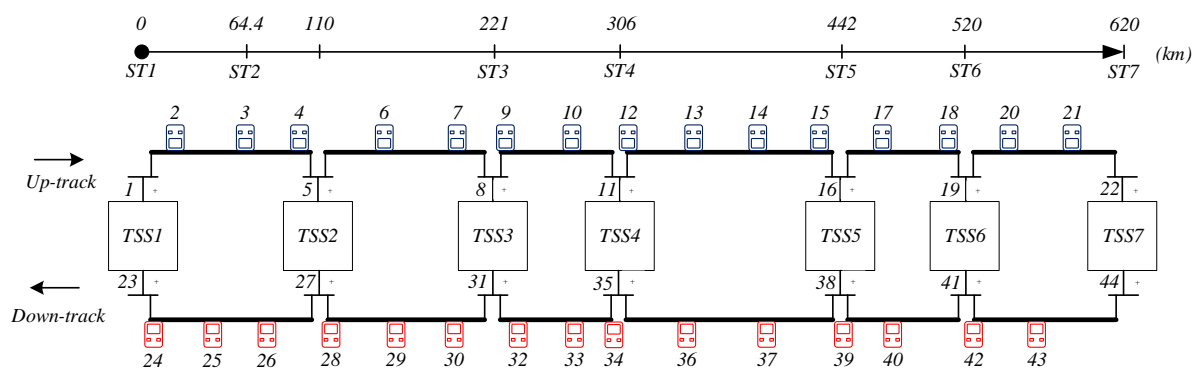


(ج)

شکل (۵-۱۱) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۲) شبیه‌سازی: (الف) جریان تزریقی منابع، (ب) ولتاژ منابع، (ج) توان تولیدی منابع

۵-۳-۳- حالت (۳) شبیه‌سازی

در این حالت شبیه‌سازی، عملکرد روش کنترل ولتاژ پیشنهادی در ساعات پرتراфик و شرایط پرباری شبکه راه آهن برقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. بر همین اساس تعداد قطارهای موجود در هر خط به ۱۵ عدد افزایش پیدا کرده و فاصله زمانی میان آن‌ها با توجه به افزایش ترافیک کاهش یافته است. ساختار شبکه راه آهن برقی در حالت (۳) شبیه‌سازی در شکل (۵-۱۲) نشان داده شده است. در این حالت کل ظرفیت تولید نصب شده شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط بدون تغییر برابر با ۲۱۰ مگاوات و کل توان مصرفی قطارها با حدود ۴۸ درصد افزایش برابر با ۱۴۷.۷ مگاوات است.



شکل (۵-۱۲) شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۳) شبیه‌سازی

در این حالت منابع و اطلاعات مربوط به آن‌ها تغییری نکرده و مطابق با اطلاعات جدول (۵-۱) می‌باشند. اما با توجه به افزایش تعداد قطار و تغییر فاصله زمانی آن‌ها، اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در هر خط در حالت (۳) تغییر کرده که در جدول (۵-۷) این اطلاعات قابل مشاهده است. پس از انجام شبیه‌سازی و اجرا پخش بار بر روی شبکه راه آهن برقی در نظر گرفته شده مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، مقادیر مربوط به ولتاژ پلایانه، جریان تزریقی، توان تولیدی و هزینه مربوط به تولید توان برای هر یک از منابع مطابق جدول (۵-۸)، بدست می‌آید.

جدول (۷-۵) اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در هر خط در حالت (۳) شبیه‌سازی

خط برگشت			خط رفت		
مکان	توان مصرفی	شماره	مکان	توان مصرفی	شماره
(کیلومتر)	(مگاوات)	گره	(کیلومتر)	(مگاوات)	گره
۱۰	۳	۲	۲۰	۵	۲
۵۰	۵	۳	۶۴.۵	۷.۵	۳
۸۳	۳.۸	۴	۱۰۰	۳.۱	۴
۱۲۰	۲.۵	۶	۱۵۵	۵.۳	۶
۱۶۵	۵.۱	۷	۲۰۰	۵.۵	۷
۲۰۰	۶	۸	۲۳۰	۶.۹	۹
۲۴۰	۴.۵	۱۰	۲۷۰	۵.۱	۱۰
۲۸۰	۳.۳	۱۱	۳۱۰	۷.۶	۱۲
۳۰۵	۸.۳	۱۲	۳۵۰	۶.۱	۱۳
۳۵۰	۳	۱۴	۳۹۰	۵.۶	۱۴
۴۰۰	۶	۱۵	۴۳۰	۵	۱۵
۴۴۵	-۳	۱۷	۴۷۰	۶.۸	۱۷
۴۸۰	۵.۸	۱۸	۵۱۰	۵.۲	۱۸
۵۳۰	۳.۵	۲۰	۵۵۰	۶.۸	۲۰
۵۷۰	۴	۲۱	۵۹۰	۵.۴	۲۱

براساس نتایج بدست آمده در جدول (۷-۸) مشاهده می‌شود که به علت افزایش تعداد قطارها و در نتیجه افزایش تقاضای توان در دو خط، توان تولیدی منابع به مقدار زیادی افزایش یافته است و حتی توان تولیدی تعداد قابل توجهی از منابع به حداکثر ظرفیت رسیده است.

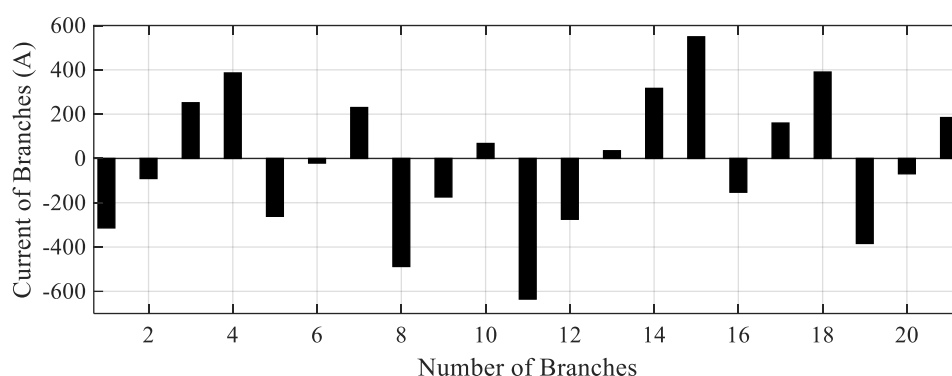
شکل (۷-۱۳) که مربوط به جریان هریک از شاخه‌های موجود در هر خط شبکه راه آهن برقی در حالت (۳) می‌باشد، نشان‌دهنده این موضوع است که جریان شاخه‌ها نسبت به حالت (۱) به شدت افزایش یافته است.

در شکل (۷-۱۴) و شکل (۷-۱۵)، به ترتیب ولتاژ و توان مربوط به هر یک از گره‌ها (منابع و قطارها) در حالت (۳) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۷-۱۴) که پروفیل ولتاژ شبکه را در این حالت نشان

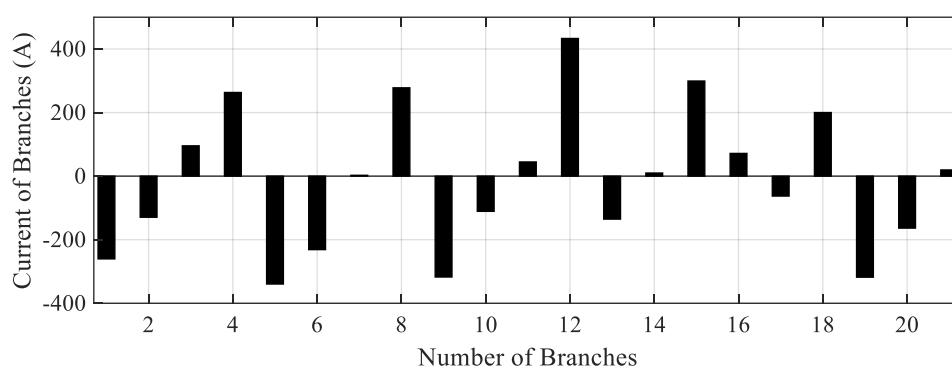
می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که به علت افزایش توان مصرفی و در نتیجه رسیدن تعدادی از منابع به حداکثر ظرفیت تولیدی خود ولتاژ گره‌ها نسبت به حالت (۱) کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است. در واقع به علت رسیدن تعدادی از منابع به حداکثر ظرفیت تولیدی خود، جریان تولیدی آن‌ها به حداکثر مقدار خود رسیده و مطابق با منحنی ولتاژ-جریان مختص به هریک از منابع، ولتاژ دیگر یک رابطه خطی براساس شیب افقی با جریان تولیدی آن‌ها ندارد. در این حالت نقطه کار آن‌ها وارد ناحیه جریان ثابت شده است که در آن، بدون تغییر جریان تولیدی منابع، ولتاژ منابع با افزایش توان مصرفی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر شبکه مقدار ولتاژ منابع را تعیین می‌کند.

جدول (۵-۸) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۳) شبیه‌سازی

شماره منابع	روش تقسیم توان بهینه DC		
	جریان منابع (آمپر)	توان منابع (مگاوات)	ولتاژ منابع (کیلوولت)
۱	۵۷۴.۰۹	۱۳.۳۳۰۰۸	۲۳.۲۱۹
۲	۱۲۵۰.۰۱	۲۹.۴۱۴۷۴	۲۳.۵۳۱
۳	۱۳۱۳.۰۴	۲۹.۵۹۵۶۷	۲۲.۵۳۹
۴	۱۲۷۱.۰۲	۲۷.۲۲۰۷۳	۲۱.۴۱۶
۵	۹۲۹.۳۶	۲۰.۷۳۶۱۲	۲۲.۳۱۲
۶	۱۲۹۲.۰۳	۲۹.۸۰۹۰۹	۲۳.۰۷۱
۷	۲۰۴.۰۸	۴.۴۸۳۶۷	۲۱.۹۶۹
مجموع			۱۹۰۳۶.۷۴



(الف)

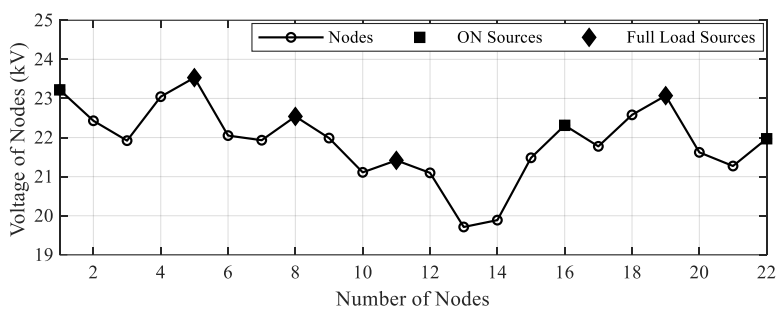


(ب)

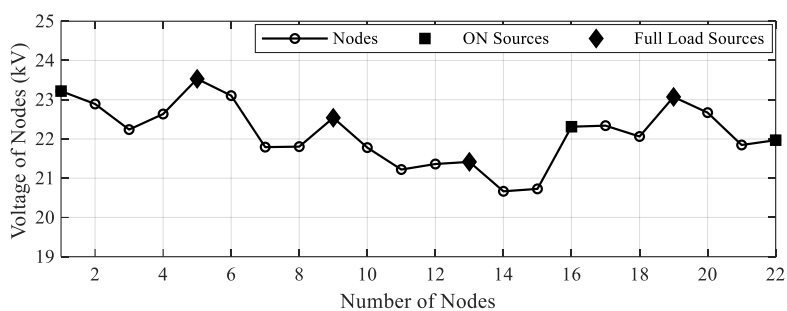
شکل (۵-۱۳) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۳) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب آمپر

همانند حالت (۱) به منظور بررسی بهینه بودن عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در این حالت، از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز استفاده شده است. در جدول (۵-۹) نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز برای منابع موجود در شبکه راه آهن برقی در حالت (۳) نشان داده شده است.

برهمن اساس، کل هزینه تولید توان منابع محاسبه شده توسط نرم‌افزار گمز برابر با ۱۸۹۱۱.۹۷ دلار است. از طرفی، کل هزینه تولید توان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC برابر با ۱۹۰۳۶.۷۴ دلار می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تفاوت بین هزینه‌های محاسبه شده از طریق دو روش بسیار ناچیز و حدود ۰.۶۵ درصد است. در نتیجه می‌توان گفت که روش تقسیم توان بهینه DC در این حالت نیز عملکرد بهینه را برآورده کرده است.

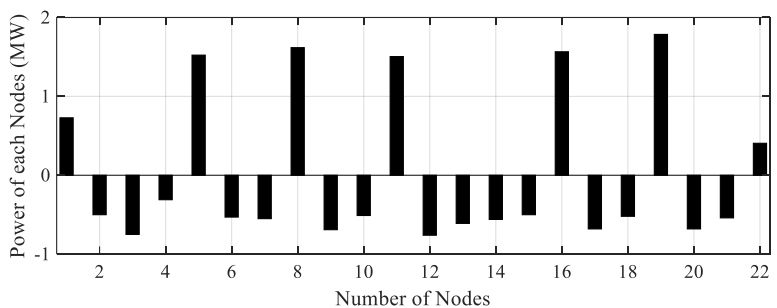


(الف)

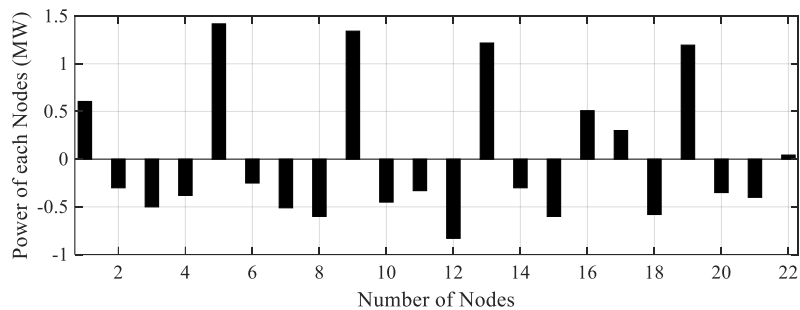


(ب)

شکل (۵-۱۴) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۳) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب کیلوولت



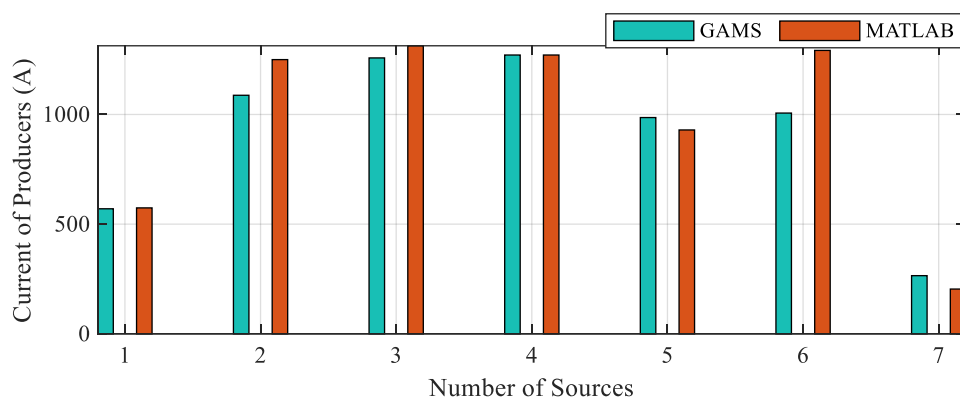
(الف)



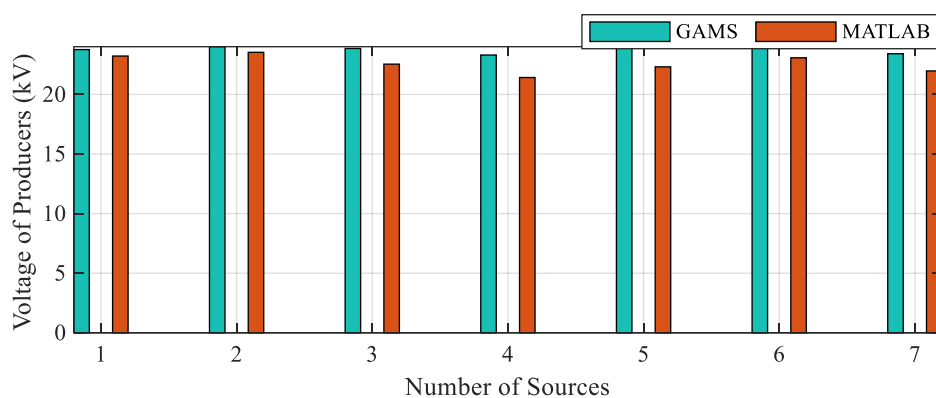
(ب)

شکل (۵-۱۵) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۳) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب مگاوات

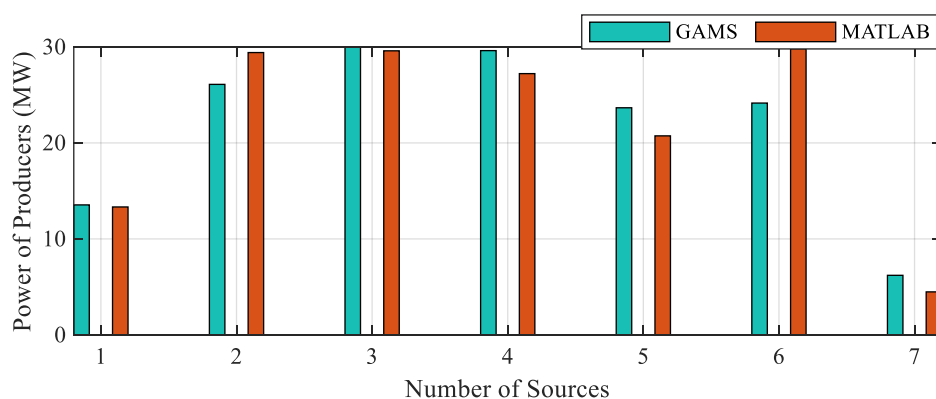
در شکل (۵-۱۶) جریان، ولتاژ و توان بدست آمده برای هر یک از منابع در دو روش بیان شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۵-۱۶) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۳) شبیه‌سازی: (الف) جریان تزریقی منابع، (ب) ولتاژ منابع، (ج) توان تولیدی منابع

جدول (۵-۹) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از نرم‌افزار گمز در حالت (۳) شبیه‌سازی

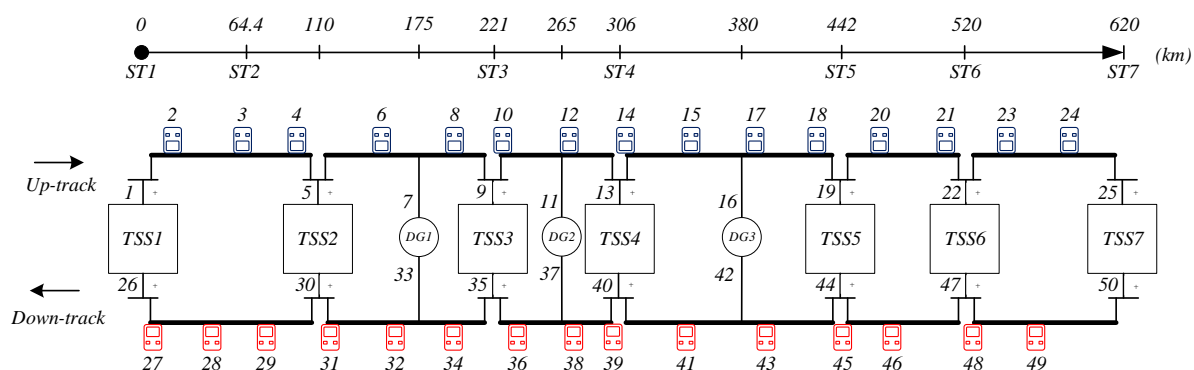
روش بهینه‌سازی (گمز)				شماره منابع
هزینه تولید توان (دلار)	ولتاژ منابع (کیلوولت)	توان منابع (مگاوات)	جریان منابع (آمپر)	
۱۶۶۵.۸۸	۲۳.۷۶۰	۱۳.۵۴۳۸	۵۷۰.۰۲	۱
۳۱۰۵.۸۲	۲۴	۲۶.۰۹۹۴	۱۰۸۷.۴۷	۲
۳۷۵۰	۲۳.۸۵۳	۳۰	۱۲۵۷.۷۲	۳
۳۵۸۳.۵۵	۲۳.۳۰۱	۲۹.۶۱۶۱	۱۲۷۱.۰۳	۴
۳۰۲۸.۷۵	۲۴	۲۳.۶۶۲۱	۹۸۵.۹۲	۵
۲۹۷۰.۸۲	۲۴	۲۴.۱۵۳	۱۰۰۶.۳۷	۶
۸۰۷.۱۵	۲۳.۴۱۴	۶.۲۰۸۹۲	۲۶۵.۱۸	۷
۱۸۹۱۱.۹۷				مجموع

۵-۳-۴- حالت (۴) شبیه‌سازی

همانطور که مشاهده کردید در حالت (۳) شبیه‌سازی، تعداد قطارهای موجود در خطوط رفت و برگشت و در واقع تقاضای توان افزایش یافته بود. به همین علت توان تولیدی توسط منابع مختلف افزایش پیدا کرده و تعداد قابل توجهی از آن‌ها به حداکثر ظرفیت تولیدی خود رسیده‌اند. در این حالت قابلیت اطمینان شبکه راه آهن برقی به شدت کاهش یافته است.

یکی از مزیت‌های روش کنترل ولتاژ پیشنهادی در شبکه‌های راه آهن برقی DC مدولار شدن شبکه با استفاده از این روش است. به عبارت دیگر، با کمک این روش کنترلی به راحتی می‌توان در نقاط مختلف شبکه راه آهن برقی DC منبعی را اضافه و یا کم کرد. در همین راستا، به منظور بررسی عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در صورت اضافه شدن تعدادی منبع تولید پراکنده به شبکه راه آهن برقی، فرض می‌شود که یک منبع تولید پراکنده انرژی خورشیدی، یک منبع تولید پراکنده انرژی باد و یک منبع تولید پراکنده دیزل ژنراتور به ترتیب با قیمت‌های ۱۱۹، ۱۲۱ و ۱۲۷ دلار بر مگاوات ساعت، در نقاط پربار شبکه راه آهن برقی در حالت (۳) قرار گرفته‌اند. این منابع تولید پراکنده می‌توانند مالک خصوصی داشته و قیمت تولید توان آن‌ها توسط مالکان تعیین گردد. در این حالت کل ظرفیت تولید نصب شده شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط

با حدود ۴ درصد افزایش برابر با ۲۱۹ مگاوات و کل توان مصرفی قطارها با حدود ۴۸ درصد افزایش برابر با ۱۴۷.۷ مگاوات است. ساختار شبکه راه آهن برقی در حالت (۴) شبیه‌سازی در شکل (۵-۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱۷) شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط در حالت (۴) شبیه‌سازی

در این حالت اطلاعات مربوط به منابع با توجه به اینکه سه عدد منبع تولید پراکنده به شبکه راه آهن برقی مربوطه اضافه شده است، دچار تغییراتی شده که در جدول (۵-۱۰) اطلاعات مربوطه به آن‌ها در حالت (۴) قابل مشاهده است. اما در این حالت اطلاعات مربوط به قطارهای موجود در خطوط رفت و برگشت نسبت به حالت (۳) تغییری نکرده و مطابق با اطلاعات جدول (۵-۷) می‌باشند.

جدول (۵-۱۰) پارامترهای منابع تولید توان در حالت (۴) شبیه‌سازی

شماره منابع	مکان (کیلومتر)	قیمت تولید توان (دلار بر مگاوات)	توان ماکزیمم (مگاوات)	ولتاژ آستانه (کیلوولت)	شیب افقی (ولت بر آمپر)	ولتاژ خطا (کیلوولت)	ولتاژ توان ماکزیمم (کیلوولت)	جریان ماکزیمم (آمپر)
۱	۰	۱۲۳	۳۰	۲۳.۲۱۹۵	۰.۰۰۰۲۹۰۲	۱۸	۲۳.۲۱۹۱	۱۲۹۲.۰۳
۲	۱۱۰	۱۱۹	۳۰	۲۴	۰.۰۰۰۳	۱۸	۲۳.۹۹۹۶	۱۲۵۰.۰۱
۳	۱۷۵	۱۲۷	۳	۲۲.۴۸۸۱	۰.۰۰۰۲۷۵	۱۸	۲۲.۴۸۸۱	۱۳۳.۴
۴	۲۲۱	۱۲۵	۳۰	۲۲.۸۴۸	۰.۰۰۰۲۷۶۸	۱۸	۲۲.۸۴۷۶	۱۳۱۳.۰۴
۵	۲۶۵	۱۲۱	۳	۲۳.۶۰۳۳	۰.۰۰۰۲۷۸۴	۱۸	۲۳.۶۰۳۲	۱۲۷.۱
۶	۳۰۶	۱۲۱	۳۰	۲۳.۶۰۳۳	۰.۰۰۰۲۷۷۱	۱۸	۲۳.۶۰۲۹	۱۲۷۱.۰۲
۷	۳۸۰	۱۱۹	۳	۲۴	۰.۰۰۰۲۸۷	۱۸	۲۳.۹۹۹۹	۱۲۵
۸	۴۴۲	۱۲۸	۳۰	۲۲.۳۱۲۵	۰.۰۰۰۲۷۲۲	۱۸	۲۲.۳۱۲۱	۱۳۴۴.۵۵
۹	۵۲۰	۱۲۳	۳۰	۲۳.۲۱۹۵	۰.۰۰۰۲۸۲۲	۱۸	۲۳.۲۱۹۱	۱۲۹۲.۰۳
۱۰	۶۲۰	۱۳۰	۳۰	۲۱.۹۶۹۲	۰.۰۰۰۲۸۵۲	۱۸	۲۱.۹۶۸۸	۱۳۶۵.۵۷

پس از انجام شبیه‌سازی و اجرا پخش بار بر روی شبکه راه آهن برقی در نظر گرفته شده مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، مقادیر مربوط به ولتاژ، جریان، توان و هزینه مربوط به تولید توان برای هر یک از منابع مطابق جدول (۵-۱۱) بدست می‌آید.

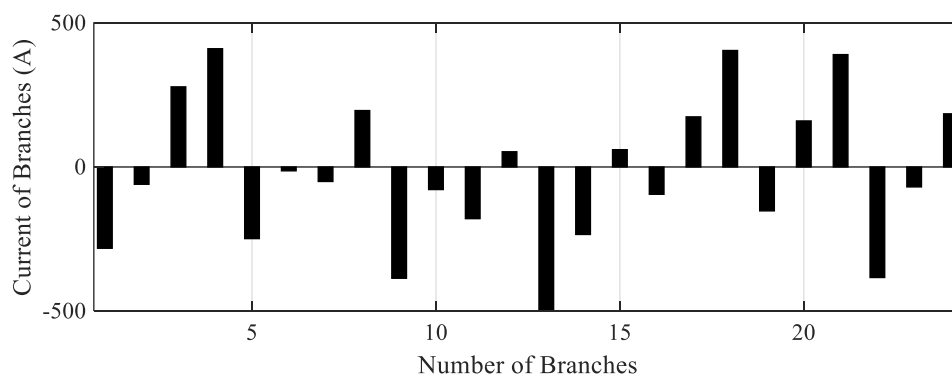
با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۵-۱۱) مشاهده می‌شود که با قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در نقاط مختلف شبکه راه آهن برقی مقدار توان تولیدی برخی از منابع کاهش یافته و باعث افزایش قابلیت اطمینان شبکه راه آهن برقی می‌شود. همچنین در نتیجه کاهش توان تولیدی منابع با هزینه تولید توان بالا و همچنین کاهش تلفات توان، هزینه کل شبکه نیز کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش تقسیم توان بهینه DC هنگام اضافه شدن تعدادی منبع همچنان عملکرد مناسب دارد.

جدول (۵-۱۱) مقادیر متغیرهای منابع حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC در حالت (۴) شبیه‌سازی

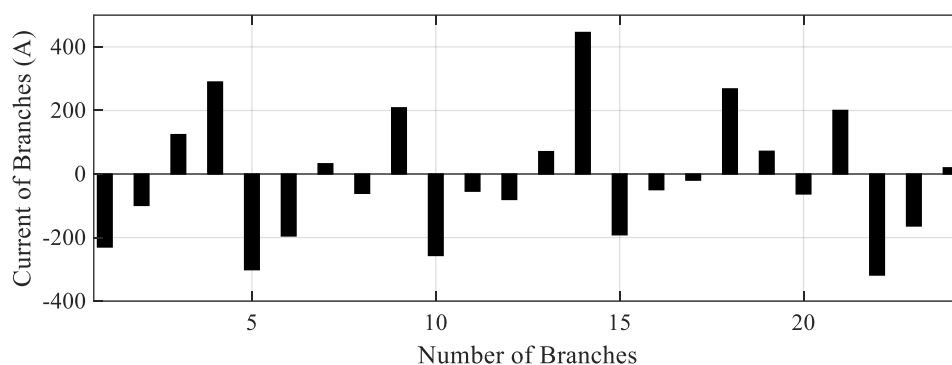
شماره منابع	روش تقسیم توان بهینه DC		
	جریان منابع (آمپر)	توان منابع (مگاوات)	ولتاژ منابع (کیلوولت)
۱	۵۱۱.۹۹	۱۱.۸۸۸۰۹	۲۳.۲۱۹
۲	۱۲۵۰.۰۱	۲۹.۹۱۵۹۷	۲۳.۹۳۲
۳	۱۳۰.۰۳	۲.۹۲۴۱۳	۲۲.۴۸۸
۴	۱۰۴۶.۹۸	۲۳.۹۲۱۲۲	۲۲.۸۴۷
۵	۱۲۷.۱	۲.۸۰۴۳	۲۲.۰۶۳
۶	۱۲۷۱.۰۲	۲۸.۲۰۴۴۴	۲۲.۱۹۰
۷	۱۲۵	۲.۶۱۷۹۲	۲۰.۹۴۳
۸	۷۵۳.۱۹	۱۶.۸۰۵۶۱	۲۲.۳۱۲
۹	۱۲۹۲.۰۳	۲۹.۸۰۹۱۳	۲۳.۰۷۱
۱۰	۲۰۴.۰۸	۴.۴۸۳۵۵	۲۱.۹۶۹
مجموع			۱۸۸۴۷.۸۴

شکل (۵-۱۸) که مربوط به جریان هر یک از شاخه‌های موجود در هر خط شبکه راه آهن برقی در حالت (۴) می‌باشد، نشان‌دهنده این موضوع است که جریان شاخه‌های اطراف منابع با قیمت بالا، نسبت به حالت (۳) با توجه به قرار گرفتن تعدادی منبع تولید پراکنده در شبکه راه آهن برقی کاهش یافته است.

در شکل (۵-۱۹) و شکل (۵-۲۰)، به ترتیب ولتاژ و توان مربوط به هر یک از گره‌ها (منابع و قطارها) در حالت (۴) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۵-۱۹) که پروفیل ولتاژ شبکه را در این حالت نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد با قرار گرفتن تعدادی منبع تولید پراکنده در شبکه راه آهن برقی و افزایش ظرفیت تولید توان، افت ولتاژ ناشی از تقاضای زیاد توان کاهش یافته است.

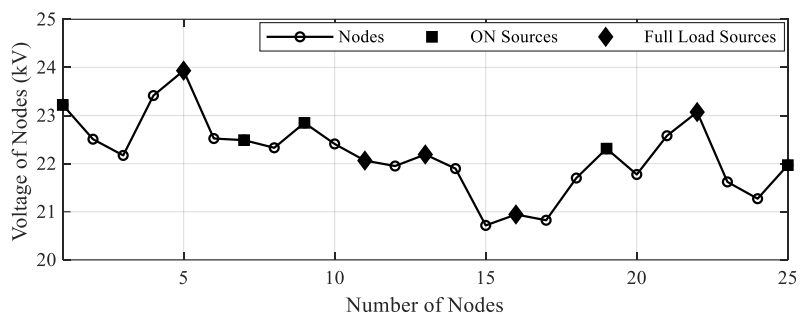


(الف)

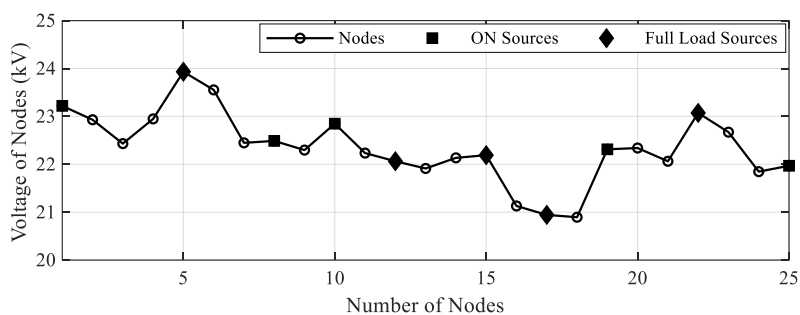


(ب)

شکل (۵-۱۸) جریان‌های شاخه‌ها در حالت (۴) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب آمپر



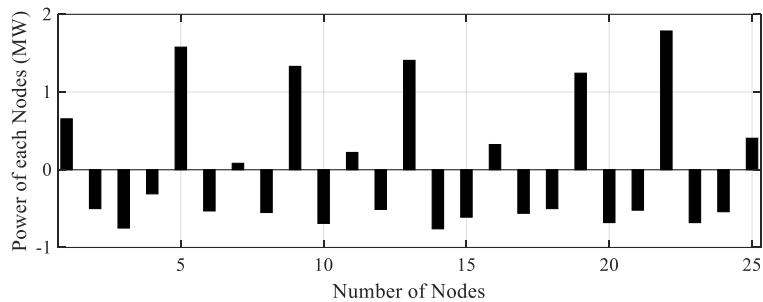
(الف)



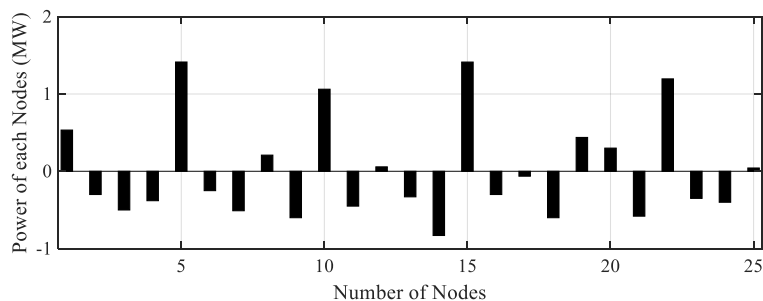
(ب)

شکل (۵-۱۹) ولتاژ هریک از منابع و قطارها در حالت (۴) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب

کیلوولت



(الف)



(ب)

شکل (۵-۲۰) توان هریک از منابع و قطارها در حالت (۴) شبیه‌سازی: (الف) در خط رفت، (ب) در خط برگشت برحسب

مگاوات

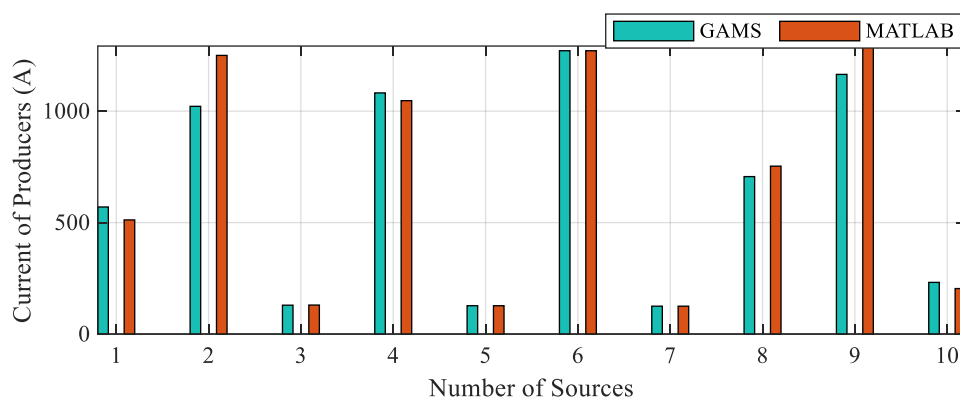
همانند حالت (۱) به منظور بررسی بهینه بودن عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC در این حالت، از نرم‌افزار بهینه‌سازی گمز استفاده شده است. در جدول (۵-۱۲) نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز برای منابع موجود در شبکه راه آهن برقی در حالت (۴) نشان داده شده است.

برهمن اساس، کل هزینه تولید توان منابع محاسبه شده توسط نرم‌افزار گمز برابر با ۱۸۷۰۳۰۳٫۷ دلار است. از طرفی، کل هزینه تولید توان منابع در روش تقسیم توان بهینه DC برابر با ۱۸۸۴۷۰۸۴٫۸۴ دلار می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تفاوت بین هزینه‌های محاسبه شده از طریق دو روش بسیار ناچیز و حدود ۰٫۷۶ درصد است. بنابراین نتایج به دست آمده در حالت اضافه کردن تعدادی منبع تولید پراکنده در شرایط پرباری شبکه، عملکرد بهینه روش تقسیم توان بهینه DC را نشان می‌دهد.

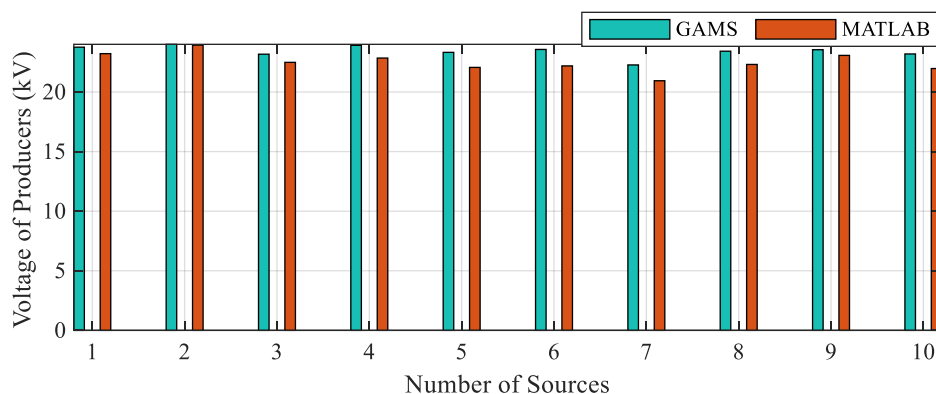
جدول (۵-۱۲) نتایج حاصله از نرم‌افزار گمز مربوط به منابع شبکه راه آهن برقی در حالت (۴) شبیه‌سازی

روش بهینه‌سازی (گمز)				شماره منابع
هزینه تولید توان (دلار)	ولتاژ منابع (کیلوولت)	توان منابع (مگاوات)	جریان منابع (آمپر)	
۱۶۶۵٫۸۸	۲۳٫۷۶	۱۳٫۵۴۳۸	۵۷۰۰٫۰۲	۱
۲۹۱۷٫۴۶	۲۴	۲۴٫۵۱۶۵	۱۰۲۱٫۵۲	۲
۳۸۱	۲۳٫۱۷۲	۳	۱۲۹٫۴۶	۳
۳۲۳۳٫۹۳	۲۳٫۹۱۷	۲۵٫۸۷۱۵	۱۰۸۱٫۷۲	۴
۳۵۸٫۷۴	۲۳٫۳۲۷	۲٫۹۶۴۸۶	۱۲۷٫۱	۵
۳۶۲۵٫۰۶	۲۳٫۵۷۱	۲۹٫۹۵۹۲	۱۲۷۱٫۰۳	۶
۳۳۱٫۲۷	۲۲٫۲۷۱	۲٫۷۸۳۸۶	۱۲۵	۷
۲۱۱۷٫۶۷	۲۳٫۴۲۲	۱۶٫۵۴۴۳	۷۰۶٫۳۴	۸
۳۳۷۳٫۹۶	۲۳٫۵۴۹	۲۷٫۴۳۰۶	۱۱۶۴٫۸۴	۹
۶۹۸٫۷	۲۳٫۱۹۱	۵٫۳۷۴۶۸	۲۳۱٫۷۵	۱۰
۱۸۷۰۳۰۳٫۷				مجموع

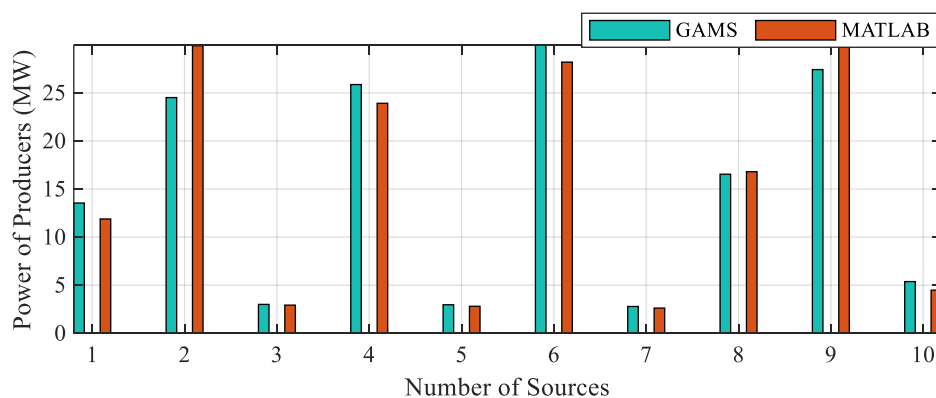
در شکل (۵-۲۱) جریان، ولتاژ و توان بدست آمده برای هر یک از منابع در دو روش بیان شده، با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



(الف)



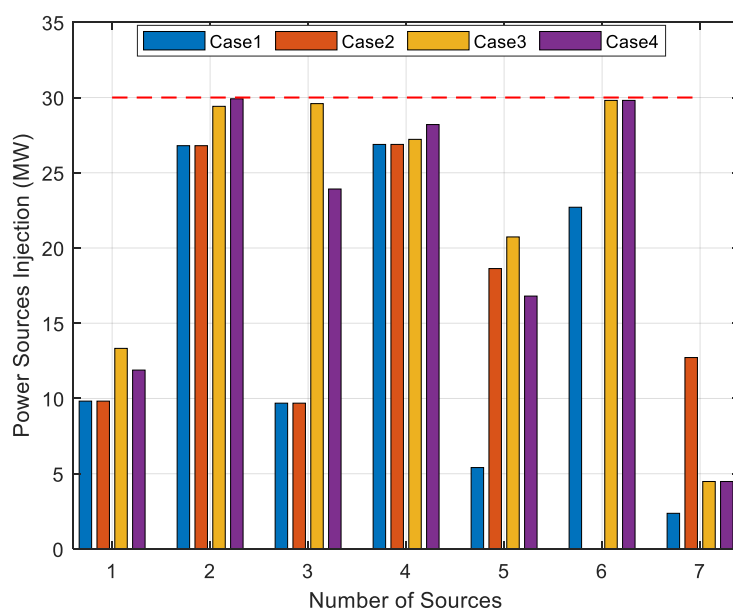
(ب)



(ج)

شکل (۵-۲۱) مقایسه نتایج حاصله از روش تقسیم توان بهینه DC و گمز در حالت (۴) شبیه‌سازی: (الف) جریان تزریقی منابع، (ب) ولتاژ منابع، (ج) توان تولیدی منابع

در انتها به منظور درک بهتر از عملکرد روش کنترل ولتاژ تقسیم توان بهینه DC در شکل (۵-۲۲) توان تولیدی هر یک از پست‌های کشش در تمام حالت‌های شبیه‌سازی شده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که در شکل (۵-۲۲) مشاهده می‌شود، روش تقسیم توان بهینه DC به صورت هوشمند و خودکار تامین توان مورد نیاز قطارها را به گونه‌ای میان منابع تقسیم می‌کند که عملکرد بهینه شبکه تحقق یابد. در واقع در این روش ابتدا منابع با قیمت ارزان‌تر تولید توان، اقدام به تولید کرده و سپس در صورت نیاز منابع با قیمت گران‌تر، اقدام به تولید توان می‌کنند. بر همین اساس در حالت اول شبیه‌سازی همانطور که در شکل (۵-۲۲) مشخص می‌باشد، توان تولیدی منابع ارزان قیمت بسیار بیشتر از توان تولیدی منابع گران قیمت بوده و همین مسئله منجر به عملکرد بهینه می‌گردد. در حالت دوم شبیه‌سازی همانطور که در شکل (۵-۲۲) مشخص می‌باشد، با توجه به رخ دادن خطا در منبع ۶ و عدم تولید توان، به علت زیاد شدن تلفات، تامین توان تولیدی منبع ششم به وسیله منابع ارزان قیمت صورت نگرفته و به ناچار این توان توسط دو منبع ۵ و ۷ با قیمت تولید توان نسبتاً بالا تامین شده است. این مسئله بیانگر هوشمند بودن روش تقسیم توان بهینه DC در لحاظ کردن تلفات توان در فرآیند تقسیم توان بهینه میان منابع می‌باشد. در حالت سوم شبیه‌سازی همانطور که در شکل (۵-۲۲) مشخص می‌باشد، به علت افزایش توان مصرفی تعدادی از منابع به حداکثر ظرفیت تولید خود رسیده که در حالت چهارم با به کارگیری منابع تولید پراکنده، توان تولیدی توسط این منابع کاهش یافته و در نتیجه آن هزینه تولید توان شبکه نیز کاهش یافته است. این مسئله عملکرد مناسب روش تقسیم توان بهینه DC در شرایط اضافه شدن منابع تولید پراکنده مختلف را نیز نشان می‌دهد.



شکل (۵-۲۲) توان تولیدی هر یک از پست‌های کشش در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی

۵-۴- جمع‌بندی

در این فصل به منظور بررسی عملکرد مناسب روش تقسیم توان بهینه DC، پیاده‌سازی روش پخش بار ارائه شده بر روی یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، صورت گرفته است. بر همین اساس شبیه‌سازی شبکه راه آهن برقی مربوطه در چهار حالت کارکرد در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفته و همچنین به منظور صحت نتایج حاصله از روش کنترل ولتاژ پیشنهادی و بررسی بهینه بودن عملکرد شبکه راه آهن برقی از یک نرم‌افزار مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی یعنی نرم‌افزار گمز استفاده شده است. پس از مدل کردن شبکه راه آهن برقی با استفاده از روابط مداری، فرآیند شبیه‌سازی در نرم افزار گمز انجام گرفت.

در حالت (۱) شبیه‌سازی، عملکرد شبکه راه آهن برقی با تعداد ۱۰ عدد قطار در هر خط مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت (۲) شبیه‌سازی، عملکرد شبکه راه آهن برقی با تعداد ۱۰ عدد قطار در هر خط در حالتی که در یک منبع با قیمت نسبتاً پایین (منبع ۶) خطایی رخ داده و از مدار خارج شده است، مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت (۳) شبیه‌سازی، عملکرد روش کنترل ولتاژ پیشنهادی در ساعات پرتراфик و شرایط پرباری شبکه راه آهن برقی با تعداد ۱۵ عدد قطار در هر خط مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت (۴) شبیه‌سازی، عملکرد شبکه راه آهن برقی در شرایطی که تعدادی منبع تولید پراکنده در نقاط پر بار شبکه قرار گرفته اند، مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج حاصله از روش کنترل ولتاژ پیشنهادی نشان می‌دهد که منابع با هزینه تولید توان کمتر سهم بیشتری را در تامین توان مصرفی قطارها ایجاد کرده‌اند. این مسئله منجر به عملکرد بهینه روش پیشنهادی شده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز و اختلاف اندکی که بین هزینه کل محاسبه شده توسط نرم‌افزار متلب و گمز وجود دارد، بهینه بودن عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC تایید می‌شود. در هریک از حالت‌های شبیه‌سازی، منحنی‌های مربوط به جریان شاخه‌ها و ولتاژ و توان گره‌های منابع و قطارها آورده شده است که نشان از عملکرد مناسب روش کنترل ولتاژ پیشنهادی دارد.

بنابراین می‌توان گفت که روش تقسیم توان بهینه DC، عملکرد مناسب فرآیند کنترل ولتاژ به همراه بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری را برای شبکه راه آهن برقی DC فراهم می‌کند.

فصل ۶:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱- نتیجه‌گیری

به طور کلی، شبکه‌های راه آهن برقی به دو دسته AC و DC قابل دسته‌بندی می‌باشند. در حالی که توان راکتیو و کنترل آن یکی از مهم‌ترین موضوعات شبکه‌های AC است، این توان در شبکه‌های DC وجود ندارد. به عبارت دیگر، مشکلات توان راکتیو با حذف طبیعی آن در شبکه‌های DC با توجه به DC بودن ولتاژ، کاملاً برطرف می‌شود. یکی از مسائل بسیار مهم در شبکه‌های راه آهن برقی DC، مسئله کنترل ولتاژ آن‌ها می‌باشد. با توجه به وجود ارتباط تنگاتنگی بین ولتاژ و توان اکتیو در شبکه‌های تغذیه DC راه آهن برقی، همواره کنترل ولتاژ و توان اکتیو در این شبکه‌ها باید به صورت هم‌زمان و یکپارچه صورت پذیرد.

تعداد روش‌های موجود به منظور کنترل ولتاژ در شبکه‌های راه آهن برقی DC بسیار محدود می‌باشند. با این حال، روش‌های موجود معایب مختلفی مانند حساسیت به میزان تغییرات بار و انعطاف‌پذیری کم، زمان‌بر و سنگین بودن محاسبات، به کارگیری سیستم‌های کنترلی نسبتاً پیچیده، نیاز به سیستم‌های ارتباطی جهت تبادل اطلاعات و قابلیت اطمینان پایین را دارند که باعث عملکرد نامناسب آن‌ها می‌شود. بر همین اساس یک روش جدید برای کنترل ولتاژ شبکه‌های راه آهن برقی DC همراه با بهینه‌سازی هزینه بهره‌برداری ارائه شده است. این روش، روش تقسیم توان بهینه DC می‌باشد. از ویژگی‌های برجسته این روش می‌توان به عدم نیاز به اطلاعات شبکه راه آهن برقی، قابلیت اطمینان بالا، پیاده‌سازی ارزان، مقاوم بودن و مدولار بودن و ... اشاره کرد. در این روش کنترل ولتاژ به هر یک از منابع موجود در شبکه راه آهن برقی مدنظر یک منحنی ولتاژ-جریان اختصاص داده می‌شود که طبق این منحنی و میزان ولتاژ، فرآیند تقسیم توان صورت می‌گیرد.

اساس روش کنترل ولتاژ پیشنهادی بر پایه قیمت تولید توان منابع است؛ در واقع از قیمت تولید توان منابع استفاده کرده تا زمان روی کار آمدن و تولید توان منابع مختلف را تعیین کند. روند کنترل ولتاژ روش پیشنهادی بدین صورت است که ابتدا یک منبع که دارای کمترین هزینه تولید توان می‌باشد به عنوان منبع مرجع و ولتاژ آستانه فعال شدن آن منبع برابر با ولتاژ نامی شبکه در نظر گرفته می‌شود. سپس براساس رابطه بدست آمده برحسب قیمت تولید منابع، ولتاژ آستانه فعال شدن منابع دیگر تعیین می‌گردد و بدین ترتیب یک فرآیند کنترل ولتاژ مناسب که فقط نیاز به دانستن قیمت تولید منابع دارد انجام می‌گردد. همچنین به منظور بررسی صحت و درست بودن فرآیند کنترل ولتاژ پیشنهادی یک روش پخش بار بررسی شده که به حداقل اطلاعات شبکه نیاز دارد، بسیار سریع و دارای بازدهی بالاست و نیاز به تعیین منبع شناور ندارد و تنها نیاز به دو ماتریس ساده BIBC و BCBV که طبق ساختار شبکه محاسبه می‌شوند، دارد.

به منظور بررسی عملکرد مناسب روش تقسیم توان بهینه DC، پیاده‌سازی روش پخش بار بر روی یک شبکه راه آهن برقی DC ولتاژ متوسط مجهز به روش تقسیم توان بهینه DC، صورت گرفته است. بر همین اساس شبیه‌سازی شبکه راه آهن برقی مربوطه در چهار حالت کارکرد در محیط نرم‌افزار متلب انجام گرفته و همچنین به منظور صحت نتایج حاصله از روش کنترل ولتاژ پیشنهادی و بررسی بهینه بودن عملکرد شبکه راه آهن برقی از یک نرم‌افزار مدل‌سازی مسائل بهینه‌سازی یعنی نرم‌افزار گمز استفاده شده است. پس از مدل کردن شبکه راه آهن برقی با استفاده از روابط مداری، فرآیند شبیه‌سازی در نرم افزار گمز انجام گرفت. نتایج حاصله از روش کنترل ولتاژ پیشنهادی نشان می‌دهد که منابع با هزینه تولید توان کمتر سهم بیشتری را در تامین توان مصرفی قطارها ایجاد کرده‌اند. این مسئله منجر به عملکرد بهینه روش پیشنهادی شده است. همچنین با توجه به نتایج حاصل از نرم‌افزار گمز و اختلاف اندکی که بین هزینه کل محاسبه شده توسط نرم‌افزار متلب و گمز وجود دارد، بهینه بودن عملکرد روش تقسیم توان بهینه DC تایید می‌شود. علاوه بر این، نتایج حاصل از حالت دوم و چهارم شبیه‌سازی نشان‌دهنده این موضوع است که با استفاده از روش تقسیم توان بهینه DC به راحتی می‌توان منابع مختلف را اضافه، حذف یا جایگزین کرد بدون اینکه عملکرد بهینه شبکه دچار اختلال شود. همچنین براساس نتایج حاصل از حالت سوم شبیه‌سازی تغییرات هیچ‌یک از توان بارها نمی‌تواند عملکرد روش کنترل ولتاژ پیشنهادی را مختل کند. بنابراین روش تقسیم توان بهینه DC یک روش عملی، کم هزینه، مدولار، مقیاس پذیر، خودمختار و با قابلیت اطمینان بالا می‌باشد که عملکرد بهینه شبکه راه آهن برقی DC را فراهم می‌کند.

۶-۲- پیشنهادها

همان‌طور که گفته شد، با توجه به جدید بودن مبحث تقسیم بهینه توان در راه آهن برقی DC، تاکنون تحقیقات اندکی در این زمینه صورت گرفته است. پیرو نتایج بدست آمده در این پایان‌نامه موارد زیر پیشنهاد می‌گردد.

- پیاده‌سازی روش کنترل ولتاژ تقسیم توان بهینه DC در شبکه‌های راه آهن برقی DC: پس از بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این پایان‌نامه، در مرحله بعد می‌توان نسبت به پیاده‌سازی روش کنترل ولتاژ ارائه‌شده اقدام نمود.

- برنامه‌ریزی و توسعه بهینه شبکه‌های راه آهن برقی DC با استفاده از اندازه ولتاژ: مزاد و کمبود توان تولیدی پست‌های کشش در شبکه راه آهن برقی DC، همان‌طور که در این پایان‌نامه نشان داده شد، به ترتیب منجر به افزایش و کاهش ولتاژ شبکه راه آهن برقی DC می‌شود. با توجه به این موضوع، جهت برنامه‌ریزی و توسعه بهینه شبکه راه آهن برقی DC می‌توان با استفاده از اندازه ولتاژ اقداماتی را انجام داد.
- استفاده از اندازه ولتاژ در فرآیندهای مرتبط با بازار شبکه راه آهن برقی DC: با توجه به مطالب بیان شده در این پایان‌نامه و روابط بدست آمده بین ولتاژها و قیمت‌های توان در گره‌های شبکه راه آهن برقی DC، جهت تسهیل فرآیندهای مرتبط با بازار شبکه راه آهن برقی DC، شاید بتوان از اندازه ولتاژ استفاده نمود.
- استفاده از اندازه ولتاژ جهت تشخیص انواع خطاهای^۱ شبکه راه آهن برقی DC: هر خطایی در شبکه راه آهن برقی DC منجر به تغییراتی در دو کمیت اصلی شبکه راه آهن برقی DC، یعنی ولتاژ و توان اکتیو، خواهد شد. از طرف دیگر، با توجه به وجود یک رابطه تنگاتنگ بین ولتاژ و توان اکتیو شبکه راه آهن برقی DC، شاید بتوان امکان تشخیص حداقل برخی از خطاهای شبکه راه آهن برقی DC را با استفاده از اندازه ولتاژ برخی از گره‌های آن فراهم کرد.
- بررسی مسائل و مشکلات ایجاد شده در فرآیند پخش بار، در نتیجه اعمال روش پیشنهادی به شبکه راه آهن برقی AC در تحقیقات آینده: در شبکه‌های AC با توجه به وجود راکتانس هادی‌ها و توان راکتیو، در صورت اعمال روش پخش بار پیشنهادی بر روی شبکه‌های راه آهن برقی AC، مشکلاتی مانند ایجاد عبارت‌های موهومی در محاسبات، پیچیده و دشوارتر شدن محاسبات، اعوجاج هارمونیک‌ها و نیاز به دانستن مدل هارمونیک‌ی شبکه راه آهن برقی به وجود خواهد آمد که می‌توان در تحقیقات آینده به بررسی آن‌ها و ارائه راهکارهایی جهت برطرف کردن آن‌ها پرداخت.

^۱ Fault Detection

منابع و مراجع

منابع و مراجع

- [1] B. Bhargava, "Railway electrification systems and configurations," in *1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36364), Vol.1*, 1999.
- [2] M. Yuan, J. Z. Thellufsen, H. Luad and et al, "The electrification of transportation in energy transition.," *Energy (121564)*, vol. 236, 2021.
- [3] D. Pan, L. Zhao, Q. Luo and et al, "Study on the performance improvement of urban rail transit system.," *Energy (1016)*, vol. 10, 2018.
- [4] J. Ning, Y. Zhou, F. Long and X. Tao, "A synergistic energy-efficient planning approach for urban rail transit operations.," *Energy*, vol. 151, pp. 854-863, 2018.
- [5] H. J. Kaleyba, M. Brenna and et al, "Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification," *Energies*, vol. 13, no. 24, 2020.
- [6] P. Simiyu and I. E. Davidson, "MVDC Railway Traction Power Systems; State-of-the Art, Opportunities, and Challenges," *Energies*, vol. 14, no. 14, 2021.
- [7] S. Aatif, H. Hu, et al, "Analysis of rail potential and stray current in MVDC railway electrification system," *Railway Engineering Science (2021)*, pp. 1-14, 2021.
- [8] E. Mansori and R. Asad, "A review of voltage control methods for direct current power supply networks of electric railways.," in *7th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE2021)*, Tehran, Iran, May 2021.
- [9] A. Gómez-Expósito, J. M. Mauricio and J. M. Maza-Ortega, "VSC-Based MVDC Railway Electrification System," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 1, pp. 422-431, 2013.
- [10] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron and C. Courtois, "New Medium-Voltage DC Railway Electrification System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, pp. 591-604, 2018.
- [11] X. Yang, H. Hu, et al, "An improved droop control strategy for VSC-based MVDC traction power supply system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 5, pp. 5173-5186, 2018.

- [12] A. Verdicchio, P. Ladoux, et al, "Future DC railway electrification system-go for 9 kV," in *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, 2018.
- [13] P. Cheng, W. Liu, J. MA and et al, "Solar-powered rail transportation in China: Potential, scenario, and case.," *Energy (123221)*, vol. 245, 2022.
- [14] R. Asad and A. Kazemi, "Quantitative analysis of power loss changes in load, generation, storage and distribution sections of different microgrids due to the DC transition," *International Review of Electrical Engineering-IREE*, vol. 7, no. 5, pp. 5754-5768, 2012.
- [15] R. Asad and A. Kazemi, "A quantitative analysis of effects of transition from AC to DC system, on storage and distribution systems," in *4th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf.*, Shanghai, China, Mar.2012.
- [16] R. Asad and A. Kazemi, "A quantitative analysis of effects of transition from AC to DC system, on loads and generation," in *IEEE Smart Electrical Grids Technology Conf.*, Tehran, Iran, Dec.2012.
- [17] Y. Zhang, S. Wang, T. Liu and et al, "A traveling-wave-based protection scheme for the bipolar voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission lines in renewable energy integration.," *Energy (119312)*, vol. 216, 2021.
- [18] J. Chen, "High-speed rail and energy consumption in China: The intermediary roles of industry and technology.," *Energy (120816)*, vol. 230, 2021.
- [19] Y. Chang, S. Lei, J. Teng and et al, "The energy use and environmental emissions of high-speed rail transportation in China: A bottom-up modeling.," *Energy*, vol. 10, 2019.
- [20] M. Kalhor and R. Asad, "Research of voltage and power fluctuations in DC and MVDC power supply network of rail transportation system.," in *7th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE2021)*, Tehran, Iran, May 2021.
- [21] X. Zhu, H. Hu, et al, "Stability analysis of PV plant-tied MVDC railway electrification system," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 5, no. 1, pp. 311-323, 2019.
- [22] A. Hinz, M. Stieneker, R. W. De Doncker, "Impact and opportunities of medium-voltage DC grids in urban railway systems," in *18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, 2016.

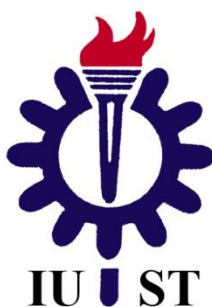
- [23] R. Asad and A. Kazemi, "A novel decentralized voltage control method for direct current microgrids with sensitive loads.," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, p. 10.1002/etep, 2013.
- [24] R. Asad and A. Kazemi, "A novel distributed optimal power sharing method for radial dc microgrids with different distributed energy sources.," *Energy*, pp. 1-9, 2014.
- [25] H. Kobayashi, S. Akita, T. Saito, K. Kondo, "A voltage basis power flow control for charging and discharging wayside energy storage devices in the DC-electrified railway system," in *19th International Conference on Electrical Machines and Systems*, Chiba, Japan, 2016.
- [26] M. Fracchia, M. Galaverna, P. Pozzobon, L. Puglisi, "Voltage regulation in electrical supply substations for DC traction systems," *Transactions on the Built Environment*, vol. 7, 1994.
- [27] A. Ebrahimian, A. Dastfan, S. Ahmadi, "Metro train line voltage control: using average modeling bidirectional DC-DC converter," in *9th annual power electronics, drives systems and technologies conference*, 2019.
- [28] S. Aatif, H. Hu, et al, "Adaptive droop control for better current-sharing in VSC-based MVDC railway electrification system," *State grid electric power research institute*, Jan.2019.
- [29] M. S. Shadlu, "Harmonic and imbalance compensation in electric railway systems using modular multilevel converters under varying load conditions," in *Feb. 2018*, Tehran, Iran, 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC).
- [30] H. Alnuman, D. T. Gladwin, M. P. Foster and T. Fantham, "Adaptive Control Method to Manage SOC for Energy Storage in DC Electric Railways," in *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Lisbon, Portugal, Oct.2019.
- [31] S.Hiramatsu, H. Kobayashi, F. P. Wijaya, K. Kondo, M. Kageyama, "A control method for on board battery power to compensate the fluctuation of line voltage in case of long distance power feeding in DC electric railway," in *IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systmes (PEDS)*, Honolulu, HI, USA, 2017.

- [32] S. Aatif, X. Yang, et al, "Integration of PV and Battery Storage for Catenary Voltage Regulation and Stray Current Mitigation in MVDC Railways," *Journal of modern power systems and clean energy*, vol. 9, no. 3, May 2021.
- [33] F. Hao, G. Zhang, et al, "Optimal Voltage Regulation and Power Sharing in Traction Power Systems with Reversible Converters," *IEEE Transactions on power systems*, 2019.
- [34] R. Asad and A. Kazemi, "A novel practical fair nodal price for DC microgrids and distribution systems.," *Computer Science & Engineering and Electrical Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 2232-2242, 2014.
- [35] R. Asad and M. H. Khanzadeh, "Extracting Novel Relations between Economic and Electrical Variables in DC Electric Power Systems.," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018.
- [36] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A Three-Phase Power Flow Method for Real-Time Distribution System Analysis.," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, 1995.
- [37] R. D. Zimmerman and H. D. Chiang, "Fast Decoupled Power Flow for Unbalanced Radial Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 4, pp. 2045-2052, 1995.
- [38] R. Asad and A. Kazemi, "A novel slack bus-free load flow method for dc microgrids and distribution systems with dc-bus signaling control methods.," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, pp. 3538-3552, 2015.
- [39] J. H. Teng, "A Direct Approach for Distribution System Load Flow Method for DC Microgrids and Distribution Systems with DC-Bus Signaling Control Methods," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 882-887, 2003.
- [40] S. Paudyal, C. A. Canizares, K. Bhattacharya, "Optimal Operation of Distribution Feeders in Smart Grids," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 671-679, 1995.
- [41] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, GAMS Release 2.25, a users guide, Washington: GAMS Development Corporation, 1998.

Abstract:

Due to the significant advantages of the electric railway network compared to the traditional railway network, such as high efficiency, higher speed and acceleration, less noise and air pollution, etc., attention to the electric railway networks is increasing day by day. In general, these types of networks can be classified into two categories: AC and DC with different voltage levels. AC electric railway networks have important problems compared to DC electric railway networks, such as voltage drop due to conductor reactance and skin effect, etc. In addition, reactive power and its control are important issues in AC electric railway networks, while this power is naturally eliminated in DC electric railway networks. Accordingly, research and development on DC electric railway networks has intensified in recent years. One of the most important issues with DC electric railway networks is their voltage control. In AC electric railway networks, voltage control depends on the reactive power and the voltage control process is performed based on it. However, in DC electric railway networks, the reactive power is zero and it is not possible to control the voltage by controlling the reactive power. On the other hand, due to the zero frequency in these networks, there will be no need to control the frequency. Accordingly, due to the close relationship between voltage and active power in DC electric railway networks, voltage control is done by controlling the active power output. In fact, in these networks, active power-voltage control is established. Choosing the right voltage control method can improve voltage quality, reduce costs and increase reliability. In this thesis, a new and significant method for voltage control of DC electric railway network is presented, called the DC Optimal Power Sharing (DCOPS) method. Optimal power sharing between traction substations, high reliability, robustness and modularity and scalability are prominent features of the expressed method. Also, a method for calculating the power price of different network nodes and a simple, fast, robust and with high computational efficiency load flow method to be implemented on DC electric railway networks that are equipped with the DCOPS method are presented. Examination of the simulation results on a medium voltage DC electric railway network in different modes and scenarios shows the successful performance of the DCOPS method.

Keywords: DC voltage control, Droop control, Optimal power sharing, Distributed generation (DG), Traction power systems (TPS), Low-voltage and medium-voltage DC electric railway systems, High-speed rail (HSR)



Iran University of Science and Technology
Railway Engineering Department

Voltage Control of Electric Railway DC Power Supply Network with the Aim of Optimizing Operating Costs

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science in Railway Engineering**

By:
Ehsan Mansori

Supervisor:
Dr. Roozbeh Asad

March 2022