

A Protection Scheme Based on Modified Curve of Overcurrent Relay for Distribution Systems with High Penetration Level of Electric Vehicles

Majid Tavoosi¹, Bahador Fani², Majid Delshad³, Iman Sadeghkhan⁴

^{1,2,3}Department of Electrical Engineering, Isfahan(Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

⁴Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad 85141-43131, Iran

Abstract:

To reduce transportation's dependence on fossil fuels, electric vehicles (EVs) have gained widespread acceptance, which has led to an increase in the number of charging stations. With the increasing penetration level of EV charging stations in the distribution system, the fault current characteristic has become more complicated, which leads to frequent undesired power outages, damage to network equipment, and reduced reliability. This paper presents a scheme to preserve protection coordination by considering EV charging stations with different penetration levels and various locations along the distribution feeder. By identifying the worst-case impact of integrated EVs into the distribution system on the protection miscoordination, the characteristic curve of conventional protection is modified. The proposed scheme does not change the structure of the existing protection system of the distribution network and can be implemented with old and non-programmable relays. In addition, it does not require communication links. The simulation results show that the coordination time interval in the proposed method and during the connection of electric vehicles between the main and backup relays is maintained at 300 milliseconds. Also, with the application of the proposed algorithm and in the condition of connecting electric vehicles to the distribution network upstream of the backup relay, the thermal limit of the network conductors (1000 milliseconds) is ensured.

Keywords: Distribution system, electric vehicle, overcurrent protection, protection coordination

Submit date: 2024/08/18

Accepted date: 2024/10/30

Corresponding author's name: Bahador Fani

Corresponding author's address: Department of Electrical Engineering, Isfahan(Khorasgan) Branch, Islamic Azad University, Isfahan, Iran

یک طرح حفاظتی مبتنی بر منحنی اصلاح شده‌ی رله اضافه جریان برای شبکه‌های توزیع با سطح نفوذ بالای خودروهای الکتریکی

نوع مطالعه: پژوهشی

مجید طاوسی^۱، دانشجو دکترا، بهادر فانی^{۲*}، دانشیار، مجید دلشاد^۱، دانشیار، ایمان صادق خانی^۳، دانشیار

۱- دانشکده فنی مهندسی، واحد اصفهان (خوراسگان)، دانشگاه آزاد اسلامی، اصفهان، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۳- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

چکیده: برای کاهش وابستگی حمل‌ونقل به سوخت‌های فسیلی، وسایل نقلیه الکتریکی رشد و کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند، به گونه‌ای که تعداد ایستگاه‌های شارژ مربوط به آنها افزایش داشته است. افزایش سطح نفوذ ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع، مشخصه جریان خطا را پیچیده‌تر کرده است که منجر به قطع انرژی نامطلوب بارها، آسیب به تجهیزات شبکه و کاهش قابلیت اطمینان می‌گردد. این مقاله روشی را برای حفظ هماهنگی حفاظتی با در نظر گرفتن ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی با سطوح نفوذ مختلف و مکان‌های گوناگون در امتداد فیدر توزیع معرفی می‌کند. با شناسایی بدترین حالت تأثیر خودروهای الکتریکی متصل شده به شبکه توزیع در ناهماهنگی حفاظتی، منحنی مشخصه حفاظت مرسوم شبکه توزیع اصلاح می‌شود. طرح پیشنهادی ساختار سیستم حفاظتی فعلی شبکه توزیع را تغییر نمی‌دهد و می‌تواند با رله‌های قدیمی و غیرقابل برنامه‌ریزی نیز اجرا شود. علاوه بر این، نیازی به ارتباط مخابراتی ندارد. کارایی روش پیشنهادی از طریق مطالعه یک سیستم توزیع شعاعی عملی نشان داده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد فاصله زمانی هماهنگی در روش پیشنهادی و در زمان اتصال خودروهای الکتریکی مابین رله‌های اصلی و پشتیبان، در مقدار ۳۰۰ میلی ثانیه حفظ می‌شود. همچنین با اعمال الگوریتم پیشنهادی و در شرایط اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع در بالادست رله پشتیبان، حد مجاز حرارتی هادی‌های شبکه (۱۰۰۰ میلی ثانیه) تضمین می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع، هماهنگی حفاظتی، خودروی الکتریکی، حفاظت اضافه جریان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۹

* نام نویسنده مسئول: دکتر بهادر فانی

نشانی نویسنده مسئول: اصفهان - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان) - دانشکده فنی مهندسی

۱- مقدمه

نماید. این اختلال ممکن است سطح اتصال کوتاه و جهت جریان را تغییر دهد و منجر به قطع سمپاتیک شبکه توزیع شود [۹ و ۱۰ و ۱۱]. لذا به جهت ارتقاء خودروهای الکتریکی و حفظ امنیت و ثبات شبکه توزیع، مهم است که تأثیرات اتصال خودروهای الکتریکی بر حفاظت شبکه توزیع و مسائل مربوط به پیکربندی مورد بررسی قرار گیرد [۱۲].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

تأثیرات ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع برق در موضوعات مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در [۱۳ - ۱۸]، این مسئله از جنبه افت توان حقیقی، کنترل ولتاژ، کیفیت توان و قابلیت اطمینان مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های توان برای ایستگاه شارژ در [۳، ۱۷ و ۱۸] مورد مطالعه قرار گرفت و اشاره شد که حالت شارژ آهسته دارای معایب جریان کم در شارژ و زمان طولانی برای شارژ است. با این وجود، شارژ سریع برای ارتقاء خودروهای الکتریکی از نظر مزایای آن شامل جریان شارژ بزرگتر و زمان کوتاه‌تر برای شارژ مفید است؛ اما حالت شارژ سریع باعث ایجاد نوسان کوتاه مدت بار و تأثیر گسترده بر شبکه توزیع می‌شود و به دلیل تزریق هارمونیک، کیفیت توان کاهش می‌یابد. با این وجود، مطالعات کمتری در مورد تأثیر ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی بر حفاظت شبکه توزیع که در برگیرنده‌ی همه‌ی استانداردهای شارژر باشد، وجود دارد.

۱-۳- پیشینه‌ی تحقیق

مکانیزم تأثیرات ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در حفاظت رله شبکه توزیع برق در [۱۰] ذکر شده است. این مقاله با در نظر گرفتن ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در

در سال‌های اخیر برای کاهش آلودگی هوا و وابستگی به نفت در بخش حمل و نقل، بکارگیری خودروهای الکتریکی افزایش یافته است به گونه‌ای که فروش آنها در سال ۲۰۲۳ بیانگر ۳۵ درصد افزایش سالانه نسبت به سال ۲۰۲۲ می‌باشد [۱ و ۲]. به طور سنتی، هدف اولیه از اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع، شارژ باتری آنهاست. با این حال، تکامل ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی از نقاط بار ساده تا رابط‌های انرژی دوطرفه با شبکه توزیع، فرصتی مهم برای افزایش انعطاف‌پذیری و تاب‌آوری شبکه توزیع است؛ در حالی که مزایای یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر را نیز به حداکثر می‌رساند. به بیان دیگر ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی قادرند به پشتیبانی از بهره‌برداری شبکه توزیع از طریق قابلیت شارژ/دشارژ باتری‌هایشان کمک کنند. این امر می‌تواند شامل ارائه خدمات جانبی مانند کاهش هارمونیک، تغذیه توان راکتیو، پیک سایی توان حقیقی و موارد دیگر از طریق طرح‌های خودرو به شبکه (V2G) باشد [۳ - ۵].

۱-۱- انگیزه تحقیق

با افزایش سطح نفوذ^۲ خودروهای الکتریکی در اتصال به شبکه توزیع، مشخصه‌های جریان خطا پیچیده‌تر شده است؛ بنابراین تنظیم حفاظت و هماهنگی بین مناطق حفاظتی مختلف دشوارتر شده و تناقض بین چهار الزام حفاظتی رله‌ها یعنی قابلیت اطمینان^۳، انتخاب‌گری^۴، سرعت^۵ و حساسیت^۶ بیشتر برجسته می‌شود [۶ - ۸]. تأثیر اتصال خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع در طول خطا کاملاً متفاوت از عملکرد عادی است که ممکن است عملکرد سیستم حفاظت^۷ را مختل

5 Speed
6 Sensitivity
7 Protection System Operation

1 Vehicle to Grid
2 Penetration Level
3 Reliability
4 Selectivity

انتهای فیدر شعاعی^۸ شبکه توزیع، با استفاده از ناحیه‌بندی رله اضافه جریان (OCR)^۹ و با بهبود تنظیمات این رله‌ها بصورت آفلاین، عملکرد طرح حفاظت را بهبود می‌بخشد. در [۱۹] مکانیزم بهره‌برداری ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در رابطه با مشخصه‌های بار شارژ و تأثیر آن روی رله اضافه جریان شبکه توزیع توصیف شده است و یک روش حفاظت اضافه جریان بر مبنای مؤلفه خطای توان راکتیو پیشنهاد شده است. تأثیر مکان‌های مختلف اتصال ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع و ضریب نفوذ آنها در مقیاس بزرگ، در هر دو مطالعه در نظر گرفته نشده است. نویسندگان [۲۰] یک روش تشخیص خطای طرف ریزشبه^{۱۰} را با بکارگیری یک ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی منفرد متصل به ریزشبه توسعه داده‌اند. این روش با اندازه‌گیری مستقیم ولتاژ و فرکانس، نیاز به سیگنال ارتباطی برای حفاظت ریزشبه را مرتفع می‌سازد. روش بکارگرفته شده بویژه برای شرایط جزیره‌ای عملکرد مناسب حفاظت را تضمین می‌کند و در شرایطی که حمله سایبری بستر ارتباطی را تهدید می‌کند، سودمند است. اما روش توسعه یافته نیازمند سخت افزار جدید حفاظتی و روزرسانی تنظیمات حفاظتی با ایجاد تغییرات در شبکه توزیع است. ضمن آنکه فاقد مدلسازی جامع ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی برای لحاظ کردن تأثیرات آن بر روی شبکه توزیع است. بعلاوه برخی مقالات، طرح حفاظتی را برای جلوگیری از آسیب ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی با قطع ایستگاه شارژ در طول رخداد خطا، پیشنهاد داده‌اند [۲۱ و ۲۲]. با توجه به محبوبیت شارژرهای جریان مستقیم سریع، این طرح‌های حفاظتی مبتنی بر محاسبات و تحلیل خطای باس‌های جریان مستقیم هستند. با توجه به امپدانس کوچکتر و سرعت خطای بالاتر جریان الکتریکی در سیستم‌های جریان مستقیم، نیاز به

سخت‌افزارهای حفاظتی جدید با تنظیمات حفاظتی متناسب، نسبت به سیستم‌های جریان متناوب وجود دارد؛ کما اینکه عمدتاً شبکه‌های توزیع عملی جریان متناوب هستند. همچنین آزادی عمل (عدم تأثیرپذیری) نسبت به مکان و سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در این مطالعات بررسی نشده است. برخی دیگر از مقالات، از محدودکننده‌ی جریان خطا (FCLs)^{۱۱} در مسیر اتصال منابع توان اکتیو^{۱۲} به شبکه توزیع به عنوان یک راهکار برای ایجاد شرایط هماهنگی حفاظتی استفاده نموده‌اند [۲۳ - ۲۷]. اما استفاده از FCLها در شبکه‌های توزیع به دلیل تلفات کلیدزنی در حالت کار دائم شبکه و همچنین هزینه‌های زیاد طراحی و نصب، محبوبیت به-کارگیری از این روش‌ها را کاهش می‌دهد. استفاده از شبکه مخابراتی گسترده به‌عنوان یک راهکار دیگر برای حفظ هماهنگی حفاظت شبکه توزیع فعال مطرح شده است [۲۸ - ۳۰]. در سیستم‌های چندعاملی (MASs)^{۱۳} با بهره‌گیری از شبکه ارتباطی بین تجهیزات شبکه، فرامین حفاظتی لازم به سیستم ارسال می‌گردد [۳۱ - ۳۳] و به‌صورت به‌هنگام حفاظت شبکه را کنترل می‌نماید. اما علاوه بر هزینه بالای اجرای شبکه ارتباطی، با وقوع مشکل در سیستم مخابراتی، این روش می‌تواند ناکارآمد گردد.

۴-۱- نوآوری تحقیق

نقاط ضعف روش‌های ارائه شده شامل متحمل نمودن هزینه‌های اضافی به شبکه توزیع، مناسب بودن روش‌ها برای یک سطح نفوذ مشخص از منابع خودروهای الکتریکی و همچنین محدود کردن مکان نصب آنها به نقاط خاصی که در آنجا بهترین عملکرد در سیستم حفاظتی میسر می‌شود، می‌باشد. در این مقاله با تکیه بر ساختار شعاعی شبکه توزیع و طراحی سنتی سیستم حفاظتی آن، رفتار سیستم در شرایط مختلف

11 Fault Current Limiters
12 Active Power Sources
13 Multi Agent Systems

8 Radial Feeder
9 Over Current Relay
10 Microgrid

مکان نصب و سطح نفوذ ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۱ طرح پیشنهادی را با برخی از طرح‌های موجود در مورد تأثیر خودرو الکتریکی بر حفاظت سیستم توزیع مقایسه می‌کند.

جدول (۱): مقایسه روش ارائه شده با برخی از طرح‌های حفاظتی موجود در کاهش تأثیر خودروهای الکتریکی بر کارایی حفاظت شبکه توزیع

شاخص ارزیابی	[۱۰]	[۱۹]	[۲۰]	[۲۱]	[۲۲]	روش ارائه شده
• آزادی عمل نسبت به تغییر مکان و سطح نفوذ خودرو الکتریکی	خیر	خیر	خیر	خیر	خیر	بله
• عدم نیاز به استفاده از سخت افزار جدید حفاظتی	بله	بله	خیر	بله	خیر	بله
• عدم بروز ساختارهای تنظیمات حفاظتی با ایجاد تغییرات شبکه	خیر	خیر	خیر	بله	بله	بله
• عدم نیاز به بست ارتباطی	بله	بله	بله	بله	خیر	بله
• عدم استفاده از رله‌های جدید برنامه پذیر	بله	بله	بله	خیر	خیر	بله
• در نظر گرفتن اثر اتصال خودرو الکتریکی به شبکه توزیع در مقیاس بزرگ	خیر	خیر	خیر	خیر	بله	بله

با در نظر گرفتن تأثیر حضور خودروهای الکتریکی متناسب با سطح نفوذ و محل قرارگیری آنها در شبکه، می‌توان شرایط و نقاطی از شبکه را مشخص نمود که در آنها منابع بیشترین تأثیر را بر روی سیستم حفاظتی دارند و می‌توانند موجب اختلال در عملکرد آن بشوند. از این رو سعی شده که با پوشش دادن راهکارهای قبلی، روشی پیشنهاد گردد که بدون وابستگی به نوع شارژر نصب شده در ایستگاه شارژ متصل به شبکه، بتواند در هر شرایطی از حضور خودروهای الکتریکی، هماهنگی سیستم حفاظتی را حفظ نماید و در شرایطی که سطح نفوذ خودروهای الکتریکی افزایش می‌یابد، هیچ اختلالی

در سیستم حفاظتی به وجود نیاید. نوآوری کلیدی مقاله‌ی حاضر در مقایسه با مقالات قبلی شامل موارد اصلی زیر است:

- عدم وابستگی به سطح نفوذ، مکان نصب و استراتژی شارژر خودروهای الکتریکی.
- بازیابی هماهنگی حفاظتی به صورت آفلاین (الگوریتم پیشنهادی برای مکان‌های مختلف نصب خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع اجرا شده و تنظیمات مربوط به اصلاح منحنی رله محاسبه می‌گردد).
- عدم نیاز به بستر مخابراتی.
- قابلیت اجرای الگوریتم پیشنهادی در رله‌های برنامه ناپذیر.
- عدم نیاز به سرمایه‌گذاری جدید از جمله تعویض، نصب دستگاه‌های جدید یا طراحی عملکردهای کنترلی آنلاین.

۵-۱- سازماندهی تحقیق

ادامه مقاله به شرح ذیل سازماندهی شده است. بخش ۲ تأثیر حضور خودروهای الکتریکی بر سیستم حفاظتی فیدر توزیع را بررسی می‌کند. بخش ۳ به طرح حفاظتی پیشنهادی اختصاص دارد. مطالعات شبیه سازی در بخش ۵ برای تأیید اثربخشی طرح پیشنهادی ارائه شده است. در نهایت، بخش ۶ نتایج حاصل از این مطالعه را ارائه می‌دهد.

۲- هماهنگی حفاظتی^{۱۴} شبکه توزیع در حضور خودروهای الکتریکی

بازار رو به رشد خودروهای الکتریکی منجر به نصب تعداد زیادی ایستگاه شارژ آنها می‌شود که به عنوان واسط برای اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع عمل می‌کنند. طرح حفاظتی غالباً پذیرفته شده برای فیدرهای شبکه توزیع، حفاظت جریان زیاد شامل OCR، فیوز و رله وصل مجدد^{۱۵}

است که به صورت یک حفاظت غیر واحد هماهنگ عمل می‌کند [۳۴]. با توجه به اینکه تنظیمات رله‌های حفاظتی فیدرهای توزیع متناسب با جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در شرایط خطا صورت می‌گیرد، تغییر در جریان خطای عبوری از این تجهیزات حفاظتی ناشی از حضور خودروهای الکتریکی می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد آنها شده و یا حتی در شرایطی می‌تواند عملکرد رله‌ها را بهبود بخشد. در فیدرهای توزیع، جریان از شبکه توزیع بالادست به سمت مصرف کنندگان واقع در فیدر پایین دست جریان می‌یابد. بسته به محل و سطح نفوذ ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی، جریان تزریقی شبکه توزیع بالادست تعیین می‌شود. هنگامی که یک خطا رخ می‌دهد، منابع جریان خطا هم شبکه توزیع بالادست و هم باتری‌های خودروهای الکتریکی هستند.

۲-۱- عملکرد شارژر خودروهای الکتریکی در شرایط

وقوع خطا

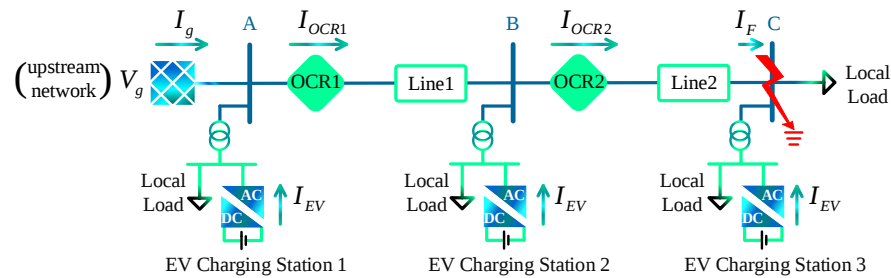
رفتار خودروهای الکتریکی متصل به شبکه توزیع در شرایط وقوع خطا وابسته به عملکرد کنترل کننده‌های شارژر در محدودسازی جریان خطای تزریقی توسط آنها به شبکه توزیع است. شارژر خودروهای الکتریکی که باتری آنها را از طریق یکسوساز سه فاز منبع ولتاژ (^{16}VSR) شارژ می‌کند، معمولاً از یک حلقه داخلی برای کنترل جریان و یک حلقه بیرونی برای کنترل توان بر اساس جبران پیش‌رو و کنترل‌کننده انتگرالی-تناسبی (^{17}PI) استفاده می‌کند. بنابراین، شارژر خودروهای الکتریکی را می‌توان با استفاده از یک منبع جریان مرتبط با فرمان کنترل مدل سازی کرد [۳۵ و ۳۶]. با توجه به خواص فیزیکی کلیدهای نیمه هادی، هنگامی که یک خطا در سیستم توزیع رخ می‌دهد، جریان مجاز از طریق مبدل شارژر خودروهای الکتریکی باید به حداکثر مقدار برای

محافظت از کلیدهای نیمه هادی در برابر گرم شدن بیش از حد در شرایط خطای اتصال کوتاه محدود شود. هنگامی که دامنه جریان خروجی کنترل‌کننده از حداکثر مقدار بیشتر شود، این جریان به حداکثر جریان مجاز که معمولاً دو برابر جریان نامی است، محدود می‌شود و شارژر خودروی الکتریکی حالت کنترل را به کنترل توان ثابت با اولویت خروجی توان حقیقی تغییر می‌دهد [۳۷]. لذا با توجه به اینکه خودروهای الکتریکی هنگام اتصال به شبکه در شرایط عادی، توان را از شبکه برای شارژ باتری داخلی دریافت می‌کنند، اگر ناگهان خطایی در شبکه رخ دهد، بواسطه‌ی آنکه توان باتری به شبکه‌ی معیوب تزریق می‌شود، جهت فازورهای ولتاژ محل اتصال ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی به شبکه توزیع و جریان خودروی الکتریکی (IEV) برای تأمین توان حقیقی با جهت معکوس شده، دارای اختلاف فاز ۱۸۰ درجه خواهد بود [۲۹ و ۳۸].

این مقاله به بررسی جریان‌های اتصال کوتاه خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع از طریق مبدل سمت شبکه می‌پردازد. این تحقیق شامل سیستم‌های شارژر سریع جریان مستقیم و شارژر آهسته جریان متناوب می‌شود و اشاره می‌کند که مبدل سمت شبکه، روش‌های کنترل آن و ویژگی‌های جریان اتصال کوتاه حاصل در این روش‌های شارژر ثابت می‌مانند. در نتیجه، طرح حفاظتی پیشنهاد شده در اینجا به طور کلی برای هر دو نوع زیرساخت شارژر قابل اجرا است.

مقدار جریان رله حفاظتی در شبکه توزیع به موقعیت ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در امتداد فیدر بستگی دارد. امپدانس بین شبکه توزیع بالادست و محل خطا، بزرگی جریان خطا را تعیین می‌کند. با اتصال خودروهای الکتریکی به فیدرهای شبکه توزیع، جریان عبوری از رله‌های پایین دستی شبکه توزیع ممکن است بسیار کمتر از جریان شبکه

توزیع بالادست باشد. در این شرایط، عملکرد سیستم حفاظتی مطابق شکل (۲) است. زمانیکه خودروی الکتریکی در شبکه



شکل (۱): دیاگرام تک خطی فیدر توزیع شعاعی در حضور ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی.

نمونه شکل (۱) قرار گیرد، بسته به مکان نصب آن بر روی فیدر، رفتار سیستم حفاظتی شبکه توزیع متفاوت خواهد بود که این رفتار در پنج حالت بررسی می‌گردد.

- در شرایط عدم اتصال ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع، رله‌های اصلی و پشتیبان عملکرد خود را با فاصله زمانی هماهنگی (CTI^{19}) مناسب برای جریان اتصال کوتاه I_g که از بالادست شبکه توزیع بالادست به طرف نقطه اتصالی در باس C در شکل (۱) جاری می‌شود، هماهنگ می‌کنند. براین اساس همانطور که از شکل (۲) ملاحظه می‌گردد، زمان عملکرد رله اصلی t_{OCR2} بوده و در صورت شکست این رله در عملکرد، رله پشتیبان با رعایت CTI مناسب در t_{OCR1} خطا را برطرف می‌کند. در شکل (۱) و در شرایط عدم اتصال ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی، جریان عبوری از رله‌ی اصلی و پشتیبان با در نظر گرفتن خطای سه فاز بر روی باس C از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$I_{OCR1} = I_{OCR2} = I_g = \frac{V_g}{Z_T} \quad (1)$$

در این رابطه V_g ولتاژ شبکه توزیع بالادست؛ ولتاژ مدار معادل تونن دیده شده از محل پست توزیع و Z_T امپدانس بین شبکه توزیع بالادست و محل وقوع خطا است.

- اکنون فرض می‌شود که فقط ایستگاه ۳ شارژ خودروی الکتریکی در شبکه توزیع نمونه شکل (۱) قرار دارد. در

تحت تأثیر اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع از طریق ایستگاه‌های شارژ قرار می‌گیرد و به دلیل حساسیت کمتر ممکن است از کار کردن خودداری کند. اتصال خودروهای الکتریکی در پایین دست رله اصلی باعث اختلال در عملکرد سیستم حفاظتی نمی‌شود. با این حال، هنگامی که خودروهای الکتریکی بین رله‌های پایین دست و بالادست به ترتیب به عنوان حفاظت اصلی و پشتیبان متصل می‌شوند، هماهنگی حفاظتی ممکن است از بین برود. از سوی دیگر، اگرچه اتصال خودروهای الکتریکی در بالادست حفاظت پشتیبان به یک اندازه جریان عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان را تغییر می‌دهد، ممکن است در برخی شرایط هماهنگی حفاظتی را مختل نماید. برای مطالعه دقیقتر بر روی مسأله حضور خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع، براساس مکان نصب و سطوح نفوذ مختلف این منابع، عملکرد سیستم حفاظتی شبکه در ادامه ارزیابی می‌گردد.

۲-۲- مکان نصب ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی

شکل (۱) یک شبکه توزیع شعاعی را نشان می‌دهد که در آن هر دو رله پشتیبان ($OCR1$) و رله اصلی ($OCR2$)، رله‌های اضافه جریان با مشخصه زمان حداقل معین لحظه‌ای ($IDMT^{18}$) هستند، که منحنی مشخصه زمان-جریان آنها

Z_2 امپدانس بین ایستگاه شارژ و محل وقوع خطا ست. تغییرات حاصل شده بر روی جریان عبوری از فیدرهای شبکه توزیع، تابعی از مکان نصب و جریان خودروهای الکتریکی متصل به شبکه توزیع می‌باشد. به عبارت دیگر با نزدیک شدن ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی به محل وقوع خطا و یا با بیشترین شدن ظرفیت این منابع، جریان حفاظت اصلی کاهش بیشتر و جریان حفاظت پشتیبان افزایش کمتری خواهد داشت. بنابراین زمان‌های عملکرد رله‌ها متناسب با ظرفیت ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی و همچنین مکان قرارگیری آنها تغییر می‌کند.

• در شرایطی که فقط ایستگاه ۱ شارژ خودروی الکتریکی بر روی فیدر شکل (۱) قرار گیرد، جریان عبوری از هر دو رله اصلی و پشتیبان کاهش می‌یابد. در نتیجه هر دو رله با تأخیر عمل می‌کنند و حاشیه هماهنگی بین آنها افزایش می‌یابد. در این شرایط، رابطه جریانی جدیدی بین رله‌ها برقرار بوده که مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_{OCR1} = I_{OCR2} = \frac{1}{Z_T} [V_g - I_{EV} Z_1] \quad (4)$$

رابطه (۴) نشان می‌دهد که حضور خودروهای الکتریکی در بالادست جفت رله‌های حفاظتی منجر به کاهش جریان رله‌های اصلی و پشتیبان می‌شود. در نتیجه، حفاظت پشتیبان با تأخیر زمانی بیشتر از فاصله هماهنگی اولیه عمل می‌کند.

• ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی ممکن است به طور همزمان بین و بالادست رله‌ها قرار گیرد. اگر ایستگاه ۱ شارژ خودروی الکتریکی در بالادست رله پشتیبان باشد و ایستگاه ۲ شارژ خودروی الکتریکی بین رله اصلی و پشتیبان قرار گرفته باشد، جریان عبوری از رله پشتیبان به صورت زیر محاسبه می‌شود:

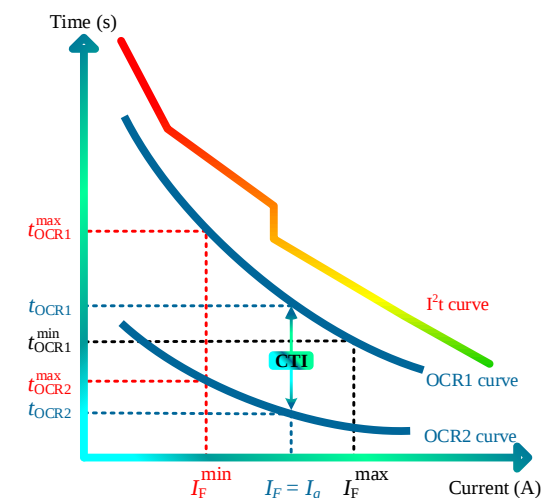
$$I_{OCR1} = I_g - \left(\frac{Z'_1}{Z_T} \right) I_{EV1} + \left(\frac{Z'_2}{Z_T} \right) I_{EV2} \quad (5)$$

شرایط وقوع خطا، به دلیل قرارگیری خودروهای الکتریکی در پایین دست رله‌های اصلی و پشتیبان و در محل خطا، جریان عبوری از رله‌های حفاظتی تغییر نکرده و هماهنگی حفظ می‌شود.

• زمانی که فقط ایستگاه ۲ شارژ خودروی الکتریکی در شبکه نصب شده باشد، با توجه به تأمین بخشی از جریان خطا توسط این منبع، جریان عبوری از OCR2 کاهش و جریان رله OCR1 که در بالادست این ایستگاه شارژ قرار دارد، افزایش می‌یابد. در این شرایط زمان عملکرد حفاظت اصلی افزایش و زمان فعال شدن حفاظت پشتیبان کاهش می‌یابد؛ این رله سریعتر عمل می‌کند. به عبارت دیگر حاشیه هماهنگی بین دو رله کوچکتر شده است. به ازای قرارگیری ایستگاه ۲ شارژ خودروی الکتریکی در شبکه، جریان‌های عبوری از رله‌های حفاظتی اصلی و پشتیبان مطابق زیر خواهند بود:

$$I_{OCR1} = \frac{1}{Z_T} (V_g + I_{EV} Z_2) \quad (2)$$

$$I_{OCR2} = \frac{1}{Z_T} (V_g - I_{EV} Z_1) \quad (3)$$



شکل (۲): منحنی‌های مشخصه رله‌های حفاظتی اصلی و پشتیبان

در این روابط I_{EV} جریان ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی متصل به شبکه توزیع در بین رله‌های حفاظتی، Z_1 امپدانس بین منبع شبکه توزیع بالادست شکل (۱) و ایستگاه شارژ و

به طور بالقوه، در ساعات مختلف روز، به دلیل تغییرات در زمان اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع، توزیع جغرافیایی و الگوهای شارژ، سطوح نفوذ مختلفی از اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه وجود دارد [۳ و ۳۹]. سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در حالت شارژ در یک فیدر به صورت زیر قابل تعریف است:

$$\%PL = \frac{\sum_{i=1}^m P_{EV_i}}{\sum_{j=1}^n P_{Other\ load_j}} \times 100 \quad (7)$$

که در آن P_{EV} و $P_{Other\ load}$ به ترتیب توان حقیقی ذخیره شده خودروهای الکتریکی متصل و توان حقیقی سایر بارهای شبکه هستند. m و n به ترتیب تعداد خودروهای الکتریکی متصل و بارهای شبکه هستند. طبق شکل (۲)، در مطالعه هماهنگی حفاظتی، حداقل و حداکثر جریان خطای رله‌های اصلی و پشتیبان که به ترتیب I_F^{min} و I_F^{max} است، به عنوان بحرانی‌ترین موارد در نظر گرفته شده است. براساس این جریان‌ها، زمان‌های عملکرد رله‌ها برای حفظ هماهنگی حفاظتی تعیین می‌شود. در واقع، در سیستم حفاظتی معمولی، OCR1 و OCR2 به درستی در محدوده امن هماهنگی $[I_F^{min}, I_F^{max}]$ با CTI مناسب بین منحنی‌های مشخصه خود عمل می‌کنند. اتصال خودروهای الکتریکی به شبکه توزیع در سطوح نفوذ بالا ممکن است جریان رله‌ها را از محدوده امن گرفته شده خارج نماید.

همانگونه که بیان شد در شرایط وقوع خطا در باس C در شکل (۱)، هنگامیکه خودروهای الکتریکی در بالادست رله‌های اصلی و پشتیبان به شبکه توزیع اتصال یافته‌اند، جریان عبوری از رله‌های اصلی و پشتیبان کاهش می‌یابد. افزایش سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در شبکه باعث کاهش بیشتر جریان جفت رله‌های حفاظتی می‌شود و در نتیجه زمان کار رله‌های اصلی و پشتیبان براساس منحنی‌های مشخصه حفاظتی آنها افزایش می‌یابد. اگر

که در این رابطه Z'_1 و Z'_2 به ترتیب امپدانس بین شبکه توزیع بالادست و ایستگاه ۱ شارژ خودروی الکتریکی و امپدانس بین ایستگاه ۲ شارژ خودروی الکتریکی و محل وقوع خطا هستند و I_{EV1} و I_{EV2} به ترتیب جریان ایستگاه‌های ۱ و ۲ شارژ خودروهای الکتریکی می‌باشند. بسته به محل ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی در امتداد فیدر، جریان رله پشتیبان بیشتر یا کمتر از مقدار اولیه آن (I_g) است. اگر ظرفیت ایستگاه‌های ۱ و ۲ شارژ خودروهای الکتریکی یکسان باشد، $I_{EV1} = I_{EV2} = I_{EV}$ ، رابطه (۵) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_{OCR1} = I_g - \left(\frac{Z'_1 - Z'_2}{Z_T} \right) I_{EV} \quad (6)$$

رابطه (۶) نشان می‌دهد که در سناریویی که خودروهای الکتریکی بین و بالادست رله‌ها قرار می‌گیرند، تأثیر ایستگاه‌های شارژ این خودروها بر OCR1 در مقایسه با زمانی که ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی بین یا بالادست رله‌ها قرار دارند، کمتر قابل توجه است. علاوه بر این، اگر فاصله قرارگیری ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی از دو سمت رله پشتیبان به یک اندازه باشد، $Z'_1 = Z'_2$ ، این ایستگاه‌های شارژ بر جریان OCR1 تأثیر نمی‌گذارند. بنابراین جریان عبوری از رله پشتیبان با جریان شبکه بالادست برابر است، $I_{OCR1} = I_g$ که شبیه به وضعیتی است که هیچ ایستگاه شارژ خودروی الکتریکی در شبکه وجود ندارد. در نتیجه این مقله منحصراً به مطالعه اثرات خودروهای الکتریکی متصل شده بین جفت حفاظت و آنهایی که در بالادست رله پشتیبان به شبکه توزیع متصل شده‌اند، می‌پردازد.

۳-۲- سطح نفوذ ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی

جریان کاهش یافته بین I_F و $I_F^{\min}$ باشد، اتصال ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی با ایجاد فاصله ایمن برای زمان کار رله پشتیبان، هماهنگی حفاظتی را بهبود می‌بخشد. با این حال، برای سطح نفوذ مشخصی از خودروهای الکتریکی، جریان عبوری از OCR1 و OCR2 کوچکتر از حد پایین $I_F^{\min}$ در شکل (۲) است. در این شرایط حداکثر زمان کار رله پشتیبان که به‌طور معمول در شبکه‌های توزیع برابر ۱۰۰۰ میلی ثانیه در نظر گرفته می‌شود، ممکن است بیشتر از حد حرارتی هادی‌های شبکه باشد. افزایش حرارت هادی‌ها در این شرایط به اندازه‌ای خواهد بود که موجب آسیب رسیدن به تجهیزات شبکه می‌شود. براساس استاندارد IEC 60909 یک حد تحمل حرارتی به منظور جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات برای هادی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود [۴۰] و [۴۱]. طبق این استاندارد، حداکثر مدت زمان رفع عیب نباید از حد حرارتی هادی تجاوز نماید. برای رعایت این دستورالعمل، منحنی‌های عملیاتی سیستم حفاظتی باید در زیر منحنی حد حرارتی (منحنی I^2t) که در شکل (۲) نشان داده شده است، قرار گیرند. هنگامی که جریان عبوری از رله پشتیبان OCR1 به زیر $I_F^{\min}$ می‌رسد، هماهنگی بین رله‌های حفاظتی نشان داده شده در شکل (۱) به خطر افتاده است. علاوه بر اینکه OCR2 آستانه حساسیت فعال شدن را از دست داده است؛ OCR1 نیز نمی‌تواند به عنوان حفاظت پشتیبان عمل کند و به احتمال زیاد در منطقه اضافه بار خود فعال می‌شود. با افزایش ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی متصل به شبکه توزیع در بالادست رله پشتیبان تا حد خاصی، جریان خطای عبوری از رله پشتیبان به زیر مقدار $I_F^{\min}$ کاهش می‌یابد. با مشخص کردن این ضریب نفوذ خاص بعنوان بدترین حالت حضور خودروهای الکتریکی و کاهش جریان عبوری از رله پشتیبان متناسب با این ضریب نفوذ به زیر مقدار $I_F^{\min}$ ، لازم است زمان عملکرد رله پشتیبان جهت بازیابی هماهنگی، عدم ورود به ناحیه

۱- اضافه بار و کاهش احتمال نقض حد حرارتی هادی‌های شبکه توزیع در $t_{OCR1}^{\max}$ که در زیر مقدار ۱۰۰۰ میلی ثانیه قرار دارد، تغییر یابد. برای این منظور به ازای جریان خطای کمتر از $I_F^{\min}$ زمان عملکرد رله پشتیبان در زیر منحنی تحمل حرارتی هادی‌های شبکه (I^2t) یعنی $t_{OCR1}^{\max}$ قرار می‌گیرد.

با حضور خودروهای الکتریکی بین رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه توزیع، در شرایط وقوع خطا، جریان رله اصلی کاهش می‌یابد در حالی که جریان رله پشتیبان افزایش می‌یابد. در سطوح نفوذ خاصی از اتصال خودروهای الکتریکی، اگر منحنی مشخصه رله پشتیبان طوری تنظیم شود که افزایش جریان بیش از $I_F^{\max}$ فاصله زمانی بین دو رله را کوتاه کند، هماهنگی حفاظتی از دست می‌رود. همچنین با توجه به اینکه به دلیل کاهش حساسیت، رله اصلی ممکن است پس از اتصال یک خودروی الکتریکی از کار کردن خودداری کند، با افزایش جریان از طریق رله پشتیبان، این رله به عنوان خاموش کننده سمپاتیک عمل می‌کند و سیستم حفاظتی نمی‌تواند الزامات انتخاب پذیری را برآورده کند. خاموش شدن کاذب می‌تواند منجر به قطع غیر ضروری فیدر توزیع سالم شود. بنابراین در سناریوی نصب ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی بین جفت رله‌های حفاظت و متعاقباً کاهش CTI بین دو رله با افزایش سطح نفوذ این خودروها بیشتر از حد مجاز ۲۵۰ میلی ثانیه، به منظور بازیابی هماهنگی لازم است نقطه کار رله پشتیبان به ازای جریان خطای $I_F^{\max}$ اصلاح شود. برای این منظور باید به ازای جریان خطای $I_F^{\max}$ ، زمان عملکرد رله پشتیبان با رعایت فاصله مجاز از منحنی حرارتی آنقدر افزایش یابد تا حاشیه زمانی بین دو منحنی حفاظت اصلی و پشتیبان برابر حد مجاز شود. بنابراین زمان عملکرد رله پشتیبان به ازای سطح نفوذ به شینه ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در بین جفت حفاظت، به اندازه حاشیه زمانی کمینه بیشتر از زمان

شکل (۳): مشخصه پیشنهادی رله‌های حفاظتی اصلی و پشتیبان

۳- بازیابی هماهنگی و اصلاح طرح حفاظتی

زمان عملکرد رله‌ها بر اساس استاندارد IEC60255 مطابق رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۴۲]:

$$t_{relay} = \frac{A \times TMS}{(I_{relay} / I_{pickup})^P - 1} \quad (9)$$

که در این رابطه t_{relay} زمان عملکرد رله، TMS ضریب تنظیم زمانی، I_{relay} جریان خطای عبوری از رله و I_{pickup} جریان تنظیم شده بر روی آن می‌باشد. این جریان‌ها مقادیر اندازه‌گیری شده در سمت ثانویه ترانسفورماتور جریان (CT) مربوط به رله می‌باشند. نسبت جریان عبوری به جریان تنظیمی بر روی رله را M در نظر می‌گیرند ($M = I_{relay} / I_{pickup}$). همچنین A و P ضرایب ثابتی هستند که شیب منحنی مشخصه حفاظتی را مشخص می‌کنند.

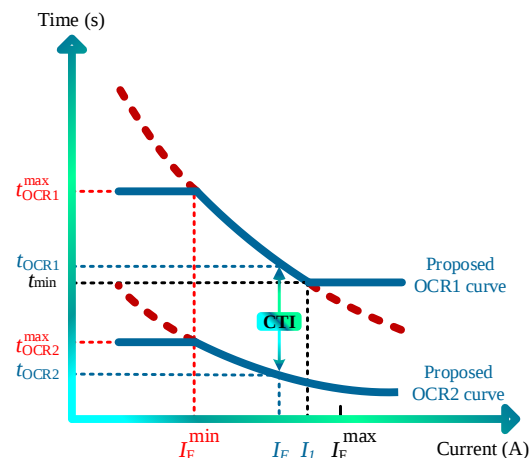
در شرایطی که خودروهای الکتریکی به سبب حضور در شبکه توزیع باعث برهم زدن هماهنگی حفاظتی شده‌اند، نیاز به یک راهکار مناسب برای بازیابی مجدد هماهنگی می‌باشد. باید در نظر داشت که اصلاح هماهنگی در یک سطح نفوذ خاص از حضور خودروهای الکتریکی، ممکن است برای سطوح نفوذ دیگر موجب سوء عملکرد سیستم حفاظتی گردد. در این بخش با ارائه یک راهکار مناسب به نحوی هماهنگی بازیابی می‌گردد که در هر شرایطی از حضور خودروهای الکتریکی، سیستم حفاظتی شبکه توزیع عملکرد مناسبی داشته باشد. در روش پیشنهادی یک محدوده عملکرد مجاز برای رله پشتیبان به صورت $[t_{min}, t_{OCR1}^{max}]$ در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس اگر بتوان مطابق شکل (۳) زمان عملکرد رله پشتیبان را در بازه هماهنگی مجاز باقی نگه داشت، می‌توان گفت همواره هماهنگی حفاظتی حفظ شده است. از طرفی حداکثر زمان عملکرد رله اصلی برای

عملکرد حفاظت اصلی (t_{OCR2}^{max}) در نظر گرفته می‌شود. مقدار t_{min} مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$t_{min} = t_{OCR2}^{max} + CTI_{min} \quad (8)$$

که در این رابطه CTI_{min} برابر حداقل حاشیه زمانی مجاز برای هماهنگی می‌باشد. شد که باید مقداری بین CTI و زمان ۲۵۰ میلی ثانیه داشته باشد. با در نظر گرفتن زمان عملکرد حفاظت پشتیبان به ازای بیشترین سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در بین جفت حفاظت شبکه برابر مقدار فوق، محدودیتی از دید سیستم حفاظتی در نصب ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی وجود نخواهد داشت.

در هر دو وضعیت نصب ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی در بالادست و بین رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه توزیع، چنانکه بررسی شد، جریان عبوری از رله اصلی کاهش می‌یابد. بدلیل اینکه کاهش جریان $OCR2$ بیشتر از I_F^{min} در پی افزایش سطح نفوذ خودروهای الکتریکی باعث کاهش حساسیت و عدم عملکرد صحیح این رله می‌شود، لازم است برای تضمین حداقل حساسیت رله اصلی در حضور این خودروها، حداقل زمان t_{OCR2}^{min} برای عملکرد این رله در سطوح نفوذی که جریان عبوری از رله اصلی به کمتر از I_F^{min} می‌رسد، در نظر گرفته شود.



مشخصه رله پشتیبان اصلاح می‌شود. در معادله مشخصه بدست آمده برای TMS رله $OCR1$ ، تمامی پارامترها به صورت ثابت و با محاسبات قبلی مشخص می‌شوند. تنها پارامتر متغیر در رابطه (۱۳) جریان عبوری از خود رله می‌باشد که به راحتی در محل نصب آن رله در دسترس است.

همچنین برای رله اصلی، زمان عملکرد مطلوب رله برای عملکرد مطابق شکل (۳) در رابطه (۱۴) آمده است:

$$t_{OCR2} = \begin{cases} t_{OCR2}^{\max} & I_{OCR2} < I_F^{\min} \\ \frac{A \times TMS}{\left(\frac{I_{relay}}{I_{pickup}}\right)^P - 1} & I_{OCR1} > I_F^{\min} \end{cases} \quad (14)$$

$I_F^{\min}$ جریان عبوری از رله اصلی به ازای زمان عملکرد $t_{OCR2}^{\max}$ می‌باشد که در رابطه (۱۱) محاسبه شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای ثابت رابطه (۱۱) برای رله اصلی و رله پشتیبان منحصر به فرد است. به جهت اعمال زمان عملکرد $t_{OCR2}^{\max}$ به معادله مشخصه رله اصلی برای جریان‌های عبوری کوچکتر از TMS ، $I_F^{\min}$ این رله بصورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$TMS_{OCR2}^{new} = \begin{cases} \frac{t_{OCR2}^{\max}}{A} \left[\left(\frac{I_{OCR2}}{I_{pickup}} \right)^P - 1 \right] & I_{OCR2} < I_F^{\min} \\ TMS_{OCR2}^{old} & I_{OCR2} > I_F^{\min} \end{cases} \quad (15)$$

منحنی مشخصه رله اصلی برای جریان‌های عبوری از این رله که کوچکتر از $I_F^{\min}$ باشد، اصلاح می‌شود و برای جریان‌های بزرگتر از $I_F^{\min}$ بدون تغییر و براساس تنظیمات اولیه باقی می‌ماند. در معادله (۱۵) تمامی پارامترها به صورت ثابت و با محاسبات قبلی مشخص می‌شوند و تنها پارامتر متغیر، جریان عبوری از خود رله می‌باشد که به راحتی در محل نصب آن رله در دسترس است.

همانطور که مشاهده شد در این مقاله ابتدا مکانهای مختلف نصب خودرو الکتریکی در شبکه توزیع و تاثیرات متفاوت آن بر هماهنگی طرح حفاظت بررسی شد. با توجه به تزریق جریان توسط شارژر خودرو الکتریکی متصل به شبکه توزیع

جریان‌های عبوری کمتر از $I_F^{\min}$ از این رله، به مقدار $t_{OCR2}^{\max}$ محدود می‌شود. برای این منظور بلید معادله مشخصه حفاظتی رله‌ها اصلاح گردد.

زمان عملکرد مطلوب رله پشتیبان برای عملکرد مطابق شکل (۳) به قرار زیر است:

$$t_{OCR1} = \begin{cases} t_{OCR1}^{\max} & I_{OCR1} < I_F^{\min} \\ \frac{A \times TMS}{\left(\frac{I_{relay}}{I_{pickup}}\right)^P - 1} & I_F^{\min} < I_{OCR1} < I_1 \\ t_{\min} & I_{OCR1} > I_1 \end{cases} \quad (10)$$

که در این رابطه جریان‌های I_1 و $I_F^{\min}$ به ترتیب جریان عبوری از رله پشتیبان به ازای زمان‌های عملکرد $t_{OCR1}^{\max}$ و $t_{\min}$ می‌باشد که در شکل (۳) مشخص شده است. بر این اساس مقادیر جریانهای I_1 و $I_F^{\min}$ از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$I_F^{\min} = I_{pickup} \left(1 + \frac{A \times TMS}{t_{OCR1}^{\max}} \right)^{1/P} \quad (11)$$

$$I_1 = I_{pickup} \left(1 + \frac{A \times TMS}{t_{\min}} \right)^{1/P} \quad (12)$$

با مشخص شدن شاخص‌های جریانی I_1 و $I_F^{\min}$ و براساس طرح پیشنهادی، می‌توان زمان عملکرد رله پشتیبان را مطابق رابطه (۱۰) کنترل نمود. برای این منظور ضریب تنظیم زمانی (TMS) این رله مطابق بازه جریانی ارائه شده در رابطه (۱۰) اصلاح می‌گردد. معادله مشخصه کنترلی این پارامتر به صورت زیر خواهد بود:

$$TMS_{OCR1}^{new} = \begin{cases} \frac{t_{OCR1}^{\max}}{A} \left[\left(\frac{I_{OCR1}}{I_{pickup}} \right)^P - 1 \right] & I_{OCR1} < I_F^{\min} \\ TMS_{OCR1}^{old} & I_F^{\min} < I_{OCR1} < I_1 \\ \frac{t_{\min}}{A} \left[\left(\frac{I_{OCR1}}{I_{pickup}} \right)^P - 1 \right] & I_{OCR1} > I_1 \end{cases} \quad (13)$$

براساس رابطه (۱۳) به ازای بازه جریانی $[I_F^{\min}, I_1]$ منحنی مشخصه رله پشتیبان بدون تغییر و براساس تنظیمات اولیه باقی می‌ماند. به ازای جریان‌های خارج از این بازه، منحنی

روندنمای ارائه شده در شکل (۴) با وقوع خطا در یکی از نقاط شبکه، به ازای سطح نفوذ منابع برابر با صفر شروع می‌گردد. با انجام محاسبات اتصال کوتاه، جریان شاخه‌ها و ولتاژ باس‌ها تعیین می‌شود. در مرحله بعد زمان عملکرد رله‌ها متناسب با جریان عبوری از آنها مشخص می‌شود. با افزایش تعداد



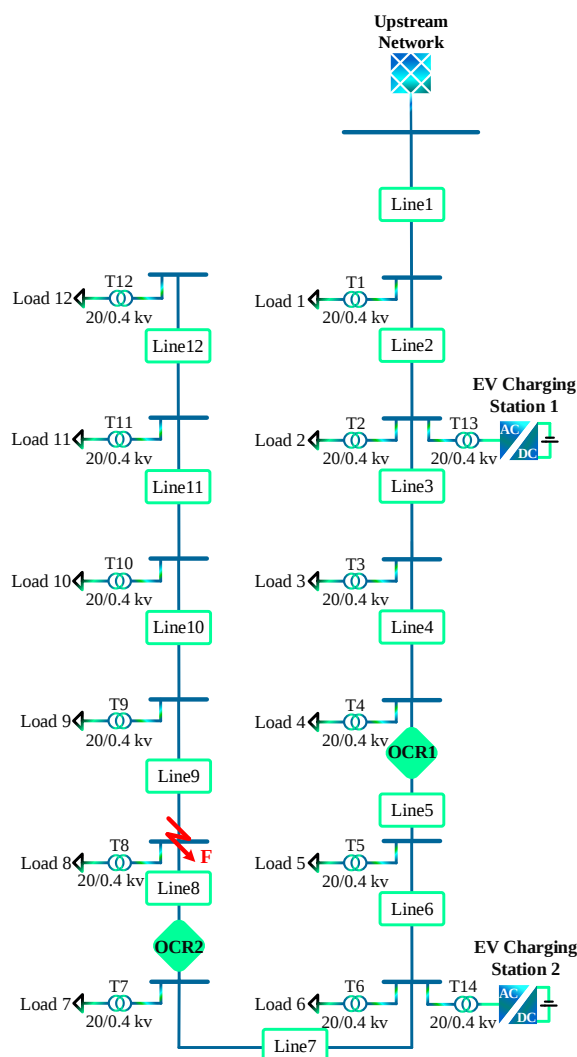
شکل (۴): روندنمای طرح پیشنهادی برای بازیابی هماهنگی و اصلاح طرح حفاظتی شبکه توزیع

۴- ارزیابی کارایی روش پیشنهادی

جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، قسمتی از یک شبکه توزیع نمونه در محیط نرم‌افزار ETAP شبیه‌سازی شده است. سیستم تست دارای آرایشی شعاعی می‌باشد. شبکه مذکور از نوع سه سیمه هوایی با سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت است. اکثر بارهای نصب شده بر روی این فیدر، مصرف‌کننده-های خانگی هستند که از طریق ترانسفورماتورهای ۲۰ به ۰/۴ کیلوولت به شبکه متصل شده‌اند. در شکل (۵) شمای تک خطی فیدر مورد مطالعه نشان داده شده است. مطابق شکل فرض می‌شود که دو ایستگاه ۱ و ۲ برای شارژ خودروهای الکتریکی می‌توانند به شبکه‌ی توزیع متصل شوند. مطابق با طراحی سیستم‌های حفاظتی متداول شبکه‌های توزیع، در شبکه شکل (۵) برای حفاظت فیدر از رله‌های اضافه جریان OCR1 و OCR2 به ترتیب به‌صورت پشتیبان و اصلی و از فیوز به‌منظور حفاظت شاخه‌های جانبی مصرف‌کننده‌ها استفاده شده است. اساس عملکرد هر تجهیز حفاظتی، تشخیص و برطرف نمودن خطاهای به وجود آمده در ناحیه حفاظتی خود در کمترین زمان ممکن است. همچنین هر تجهیز با تجهیز پایین دست خود هماهنگ عمل کرده و علاوه بر حفاظت اصلی در ناحیه حفاظتی خود، به عنوان حفاظت پشتیبان شاخه جانبی عمل می‌کند.

مبنای حاشیه زمانی هماهنگی بین دو تجهیز حفاظتی، زمان حداقلی ۳۵۰ میلی ثانیه به منظور عدم اختلال در عملکرد تجهیزات حفاظتی است. همچنین حداکثر زمان رفع خطا در شبکه ۱۰۰۰ میلی ثانیه و براساس منحنی حرارتی هادی‌های شبکه در نظر گرفته می‌شود. مشخصات رله‌های حفاظتی در بخش پیوست آمده است. ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی می‌توانند در نقاط و سطوح نفوذ مختلف در شبکه

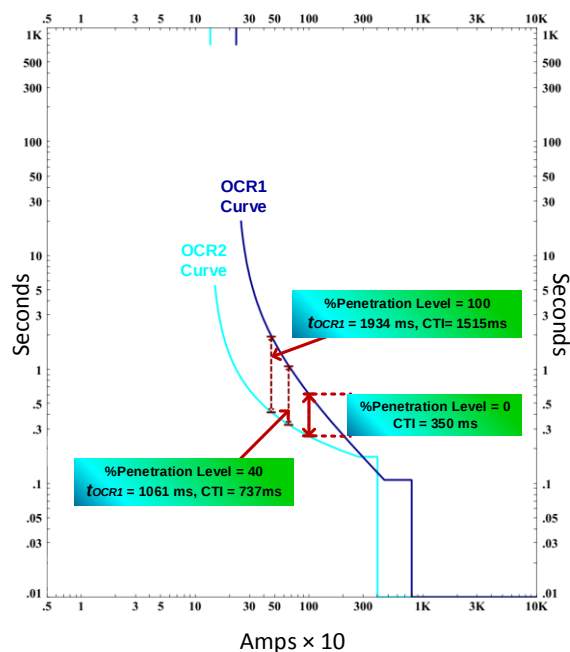
قرار بگیرند. به منظور بررسی تأثیر حضور خودروهای الکتریکی بر روی فیدر توزیع، شرایط شبکه در دو حالت مطالعه و شبیه‌سازی شده است. از آنجایی که بررسی عملکرد حفاظتی بین هر دو جفت رله مشابه دیگری می‌باشد، کافی است مراحل شبیه‌سازی برای رله‌های OCR1 و OCR2 به عنوان حفاظت‌های پشتیبان و اصلی انجام شود. موارد مطرح شده در مورد سایر رله‌های اضافه جریان نصب شده در سایر نقاط احتمالی نیز صدق می‌نماید.



شکل (۵): نمودار تک خطی سیستم تست با حضور ایستگاه شارژ خودروهای الکتریکی

در ابتدا شبکه بدون خودروی الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. در این شرایط جریان خطای یکسانی از جفت رله حفاظتی

رله‌ها به ازای این جریان خطا ۴۲۸ میلی ثانیه است. زمان عملکرد رله‌ها در این شرایط در جدول (۱) قابل مشاهده است. ملاحظه می‌شود که زمان عملکرد رله پشتیبان نسبت به شرایط عدم حضور خودروهای الکتریکی افزایش یافته است. بیشتر شدن سطح نفوذ خودروهای الکتریکی در بالادست جفت رله حفاظتی در شرایط استفاده از طرح حفاظت متداول شبکه توزیع، باعث افزایش زمان عملکرد رله‌ها است. در ضریب نفوذ ۴۰ درصد زمان عملکرد رله OCR1 برابر با ۱۰۶۱ میلی ثانیه بوده که از حداکثر زمان مجاز عملکرد رله پشتیبان در شبکه توزیع برای تضمین تحمل حرارتی هادی‌های شبکه فراتر رفته است. به عبارت دیگر این رله دیگر نمی‌تواند به عنوان پشتیبان رله OCR2 عمل نماید. این روند تا جایی ادامه خواهد داشت که در ضریب نفوذ ۱۰۰ درصد، زمان عملکرد OCR1 برابر ۱۹۳۴ میلی ثانیه می‌گردد. در شکل (۶) رفتار طرح حفاظت متداول شبکه توزیع مربوط به رله‌های اصلی و پشتیبان در حضور ایستگاه ۱ شارژ خودروهای الکتریکی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۶): تأثیر حضور خودروهای الکتریکی در بالادست رله پشتیبان.

عبور می‌کند. مطابق شکل (۵) با وقوع خطای سه‌فاز در نزدیکی رله OCR2، جریان عبوری از شبکه برابر ۹۶۴ آمپر است. به دلیل وقوع خطا در نزدیکترین نقطه به رله اصلی، این رله در کوتاه‌ترین زمان ممکن و براساس تنظیم حفاظتی خود در زمان ۲۵۰ میلی ثانیه عمل کرده و بخش معیوب را از شبکه جدا می‌کند. در صورت عدم عملکرد رله OCR2، پس از گذشت حاشیه زمانی (۳۵۰ میلی ثانیه) بین این رله و OCR1، رله OCR1 به عنوان پشتیبان خطا را تشخیص و نهایتاً در زمان ۶۰۰ میلی ثانیه برطرف می‌نماید.

زمانیکه ایستگاه ۱ شارژ خودروی الکتریکی در بالادست جفت رله حفاظتی شبکه شکل (۵) قرار گیرد، با وقوع خطا، جریان رله‌های اصلی و پشتیبان با وجود برابر بودن، نسبت به جریان عبوری در شرایط عدم حضور خودروهای الکتریکی با کاهش مواجه می‌شود.

جدول (۱): زمان عملکرد منحنی‌های متداول و پیشنهادی در حضور خودروهای الکتریکی در بالادست رله پشتیبان

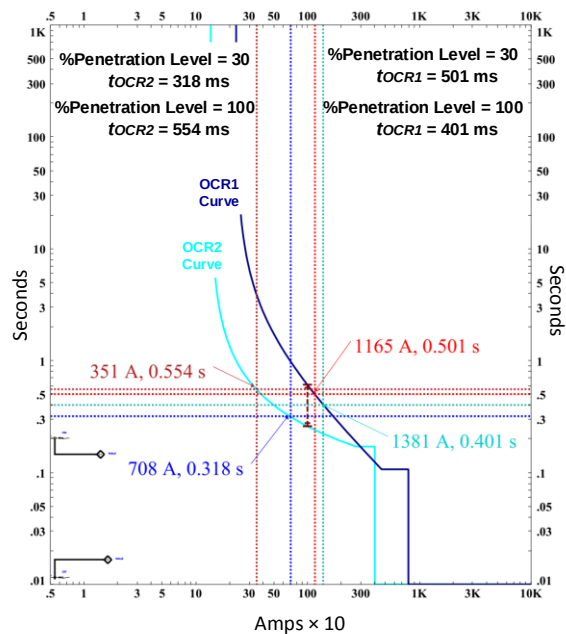
طرح پیشنهادی	طرح متداول	ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی				
$t_{OCR1}(ms)$	$\Delta t(ms)$	$t_{OCR2}(ms)$	$t_{OCR1}(ms)$	% PL		
۶۰۰	۳۵۰	۲۵۰	۶۰۰	۰		
۷۰۱	۴۲۸	۲۷۳	۷۰۱	۱۰		
۸۲۳	۵۴۰	۲۹۳	۸۲۳	۲۰		
۹۵۸	۶۴۸	۳۱۰	۹۵۸	۳۰		
۹۵۲	۷۳۷	۳۲۴	۱۰۶۱	۴۰		
۹۵۲	۸۴۳	۳۴۰	۱۱۸۳	۵۰		
۹۵۲	۹۴۹	۳۵۴	۱۳۰۳	۶۰		
۹۵۲	۱۰۶۶	۳۶۸	۱۴۳۴	۷۰		
۹۵۲	۱۲۲۱	۳۸۷	۱۶۰۸	۸۰		
۹۵۲	۱۳۶۳	۴۰۲	۱۷۶۵	۹۰		
۹۵۲	۱۵۱۵	۴۱۹	۱۹۳۴	۱۰۰		

بر این اساس اگر ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی در شبکه به میزان ۱۰ درصد کل بارهای شبکه در نظر گرفته شده باشد، جریان عبوری از رله‌ها برابر ۸۹۴ آمپر و حاشیه زمانی عملکرد

مشخصه حفاظتی رله‌های اصلی و پشتیبان براساس قرارگیری ایستگاه ۲ شارژ خودروهای الکتریکی در بین دو رله مشخص شده است.

۴-۱- بازیابی هماهنگی حفاظتی بر اساس طرح پیشنهادی

در جدول (۱) نتایج شبیه سازی عملکرد رله پشتیبان مطابق روش پیشنهادی به ازای قرارگیری ایستگاه ۱ شارژ خودروهای الکتریکی در بالادست رله پشتیبان OCR1 و در جدول (۲) به ازای قرارگیری ایستگاه ۲ شارژ خودروهای الکتریکی در بین جفت رله حفاظتی قابل مشاهده است. با مقایسه نتایج به دست آمده در مقابل طرح حفاظتی اولیه، عملکرد موفق روش پیشنهادی در هر سطح نفوذ از خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع ملاحظه می‌گردد.



شکل (۷): تأثیر حضور خودروهای الکتریکی در بین جفت رله حفاظتی

در جدول (۱) برای سطح نفوذ ۴۰ درصد، زمان عملکرد رله پشتیبان بر روی ۹۵۲ میلی ثانیه تنظیم شده است (پایین‌تر از حد حرارتی). با تنظیمات جدید اتخاذ شده برای رله OCR1، حاشیه زمانی مناسب از زمان عملکرد رله OCR2 به ازای ضریب نفوذ ۱۰۰ درصدی خودروهای الکتریکی همچنان

هنگامیکه در شکل (۵) ایستگاه ۲ شارژ خودروهای الکتریکی در بین جفت رله حفاظتی به شبکه متصل گردد، جریان عبوری از رله‌ی اصلی کاهش و جریان عبوری از رله پشتیبان افزایش می‌یابد. در شرایطی که ظرفیت این منابع توان حقیقی برابر با ۱۰ درصد بار شبکه می‌باشد، جریان خطای عبوری از رله‌های مذکور به ترتیب ۹۳۶ و ۱۰۶۱ آمپر خواهد بود. مطابق با این جریان، زمان عملکرد رله اصلی افزایش و زمان عملکرد رله پشتیبان کاهش یافته و به ترتیب برابر ۲۶۱ و ۵۶۱ میلی ثانیه می‌شود. با افزایش سطح نفوذ خودروهای الکتریکی نصب شده در بین جفت رله حفاظتی، حاشیه زمانی مابین زمان عملکرد رله‌ها نیز کاهش می‌یابد و در سطح نفوذ ۳۰ درصد با نقض حداقل CTI بین دو رله (۲۵۰ میلی ثانیه)، هماهنگی از دست رفته است؛ چنانکه در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): زمان عملکرد منحنی‌های متداول و پیشنهادی در حضور خودروهای الکتریکی در بین جفت رله حفاظتی

طرح پیشنهادی	طرح متداول	ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی						
% PL	t_{OCR1} (ms)	t_{OCR2} (ms)	Δt (ms)	t_{OCR1} (ms)	t_{OCR2} (ms)			
۰	۶۰۰	۲۵۰	۳۵۰	۶۰۰	۲۵۰			
۱۰	۵۶۱	۲۶۱	۳۰۰	۵۶۱	۲۶۱			
۲۰	۵۳۹	۲۷۲	۲۶۷	۵۳۹	۲۷۲			
۳۰	۵۰۱	۳۱۸	۱۸۳	۵۲۷	۲۷۷			
۴۰	۴۷۵	۳۴۶	۱۲۹	۵۳۷	۲۷۷			
۵۰	۴۴۸	۳۸۲	۶۶	۵۳۷	۲۷۷			
۶۰	۴۳۰	۴۱۵	۶۶	۵۳۷	۲۷۷			
۷۰	۴۱۷	۴۴۷	- ۳۰	۵۳۷	۲۷۷			
۸۰	۴۰۵	۴۸۱	- ۷۶	۵۳۷	۲۷۷			
۹۰	۴۰۲	۵۱۹	- ۱۱۷	۵۳۷	۲۷۷			
۱۰۰	۴۰۱	۵۵۴	- ۱۵۳	۵۳۷	۲۷۷			

طبق جدول (۲) کاهش حاشیه زمانی بین رله OCR1 و OCR2 تا جایی ادامه دارد که در سطح نفوذ ۷۰ درصد، رله پشتیبان زودتر از رله اصلی، خطای مربوط به ناحیه حفاظتی رله اصلی را برطرف می‌کند. در شکل (۷) رفتار منحنی

پیشنهادی به نوع الگوی شارژ خودروهای الکتریکی متصل شده در شبکه وابسته نبوده و نسبت به روش‌هایی که برای کنترل این خودروها در شرایط خطا پیاده‌سازی می‌شوند، ارجحیت دارد.

پیوست

اطلاعات رله‌های حفاظتی بصورت جدول زیر است.

جدول پ (۱): مشخصات فنی رله‌های شبکه تست

رله	نوع	نوع منحنی	TMS	Ipickup
OCR1	ALSTOM-P121	VI	0.15	1.24
OCR2	ALSTOM-P121	SI	0.075	1.8

مراجع

- [1] Adib, R; (2023). Renewables 2023 global status report: renewable energy demand policy network for The 21st century, National Technical University of Athens (NTUA), [Online] Available at: <https://www.ren21.net/gsr2023-demand-modules>.
- [2] International Energy Agency (IEA); (2023). Global EV Outlook 2023, [Online] Available at: <https://www.iea.org/energy-system/transport/electric-vehicles>.
- [3] Das, H; Rahman, M, Li, S, Tan, C, (2020). Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 120, pp. 1-17.
- [4] Wu, Q; (2013). Grid integration of electric vehicles in open electricity markets, John Wiley & Sons.
- [5] Unterluggauer, T; Rich, J, Andersen, P. B, Hashemi, S, (2022). Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks: A review, eTransportation, vol. 12, pp. 101-123.
- [6] Mahmud, Kh; Town, G. E, (2016). A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks, Applied Energy, vol. 172, pp. 337-359.
- [7] Tavoosi, M; Fani, B, Delshad, M, Sadeghkhani, I, (2024). Electric vehicle charging infrastructure and impact on distribution network, 1st International Conference of New Ideas on Electrical Engineering, Islamic Azad University, Isfahan, Iran.
- [8] Wu, S; (2017). An adaptive limited wide area differential protection for power grid with micro-sources, Protection Control Modern Power System, 2(1), pp. 1-21.

حفظ می‌گردد. در حالت قرارگیری حداکثری خودروهای الکتریکی مابین دو تجهیز حفاظتی در شبکه، عملکرد رله OCR1 به عنوان حفاظت پشتیبان در حداقل حاشیه زمانی ۲۵۰ میلی ثانیه، بدون نقض انتخاب‌گری تضمین می‌شود. همچنین زمان عملکرد حفاظت اصلی که در این شرایط دارای افزایش است، روی حداکثر مقدار ۲۷۷ میلی ثانیه تنظیم می‌شود تا آستانه حساسیت عملکرد برای این رله به خوبی، نزدیک به شرایط تنظیم اولیه، حفظ شود. زمان تنظیم اولیه رله اصلی در شرایط بدون حضور خودروهای الکتریکی برابر ۳۵۰ میلی ثانیه می‌باشد. بدین ترتیب در بدترین شرایط حضور خودروهای الکتریکی در بالادست یا بین جفت رله حفاظتی که همان سطح نفوذ ۱۰۰ درصدی است، هماهنگی حفظ شده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک بررسی کامل از حضور ایستگاه‌های شارژ خودروهای الکتریکی در شبکه توزیع و همچنین تأثیر آنها بر روی سیستم حفاظتی شبکه انجام شد. همانگونه که در بخش دوم مقاله آمده است، براساس مکان نصب و همچنین ضریب نفوذ خودروهای الکتریکی، میزان اثرپذیری سیستم حفاظتی متفاوت می‌باشد. برای این منظور روشی ارائه شد که با استفاده از آن بتوان هماهنگی حفاظتی از دست رفته در شرایط حضور این خودروها را بازیابی نمود. با بهره‌گیری از طرح پیشنهادی، به خوبی هماهنگی بین رله‌های اصلی و پشتیبان در شبکه برقرار گردید و با اصلاح منحنی مشخصه رله‌های اصلی و پشتیبان و استفاده از مشخصه‌های متداول رله‌های اضافه جریان، هماهنگی حفظ شد. به عبارت دیگر سیستم حفاظتی توانایی تشخیص به موقع و مطمئن خطا را مجدداً به دست آورد. مزیت روش ارائه شده در عملکرد قابل قبول آن به ازای هر سطح نفوذی از خودروهای الکتریکی و همچنین شرایط عدم حضور آنها در شبکه می‌باشد. طرح

- of an electric power system with distributed generations (DGs), *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 23(3), pp. 1-16.
- [24] Wheeler, K; Elsamahy, M, Faried, S, (2017). Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse-recloser protection systems, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 11(7), pp. 1605-1612.
- [25] Zarei, S. F; Khankalantary, S, (2021). Protection of active distribution networks with conventional and inverter-based distributed generator, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 129, pp. 1- 13.
- [26] Nourmohamadi, H; Gohil, G, Balsara, P. T, (2024). Intelligent Multi-Functional Fault Current Limiter, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 15(3), pp. 2434-2446.
- [27] Song, M; Li L, Wu, Q, Li, C, (2024). Impacts of Superconducting Fault Current Limiters on Undervoltage Protection for the Distribution Network, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34(8), pp. 1-5.
- [28] Nikolaidis, C; Papanikolaou, E, Safigianni, A.S, (2016). A communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, pp. 114-123.
- [29] Coffele, F; Booth, C, Dysko, A, (2015). An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), pp. 561-568.
- [30] Wong, J; Tan, C, AbdalRahim, N, Tan, R. H. G, (2024). Communication-Less Adaptive Overcurrent Protection for Highly Reconfigurable Systems Based on Nonparametric Load Flow Models, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 39(1), pp. 202-209.
- [31] Wang, Y; Wang, T, Liu, L, (2023). A fault segment location method for distribution networks based on spiking neural P systems and Bayesian estimation, *Protection and Control of Modern Power Systems*, 8(3), pp. 1-12.
- [32] Liu, Z; Su, C, Høidalen, H.K, Chen, Z, (2017). A multiagent systembased protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, pp. 536-545.
- [33] Wan, H; Li, K.K, Wong, K.P, (2010). An adaptive multiagent approach to protection relay coordination with distributed generators in industrial power distribution system, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 46(5), pp. 2118-2124.
- [34] Prévé, C; (2006). Protection of electrical networks, in 2006 by ISTE Ltd.
- [35] Kim, Y.J; Wang, J, (2018). Power hardware-in-the-loop simulation study on frequency regulation through direct load control of thermal and electrical energy storage resources, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), pp. 2786-2796.
- [36] . Haj-ahmed, M. A; Illindala, M. S, (2014). The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(4), pp. 2928-2937.
- [37] Lacerda, V. A; Monaro, R. M, Pena-Alzola, R, Campos-Gaona, D, Coury, D. V, Anaya-Lara, O, (2020). Control-based fault ~ current limiter for modular multilevel voltage-source converters, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, pp. 1-12.
- [38] Piesciorsky, E. C; (2017). Fuse relay adaptive overcurrent protection scheme for microgrid with distributed generators,
- [9] Rajaei, N; Ahmed, M.H, Salama, M.M.A, et al., (2014). Fault current management using inverter-based distributed generators in smart grids, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5 (5), pp. 2183-2193.
- [10] Gong, C; Ma, L, Zhang, B, Ding, Y, Li, X, Yang, Sh, Jiao, R, Liu, H, (2017). Research on influence and resolution of the relay protections with electric vehicle charging station integrating into distribution network, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 119, pp. 1-7.
- [11] Alzahrani, S; Sinjari, K, Mitra, J, (2024). Multi-Agent and State Observer-Based Technique for Microgrid Protection, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(2), pp. 2697-2705.
- [12] Karfopoulos, EL; Hatziaargyriou, ND, (2016). Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services, *IEEE Transactions on Power System*, 31(1), pp. 329-338.
- [13] Sunxing, S; Lichunping, H, Jiangnan, W, (2015). Stability analysis of power system consider the large-scale electric vehicle access, *Applied Electronics Technology*, 42(11), pp. 149-153.
- [14] Jinhan, He; Yuyu, Xie, (2015). Influence of electric vehicles charging modes on active network distribution, *Electronics Power Construction*, 36(1), pp. 97-103.
- [15] Shafiee, S; Fotuhi-Firuzabad, M, Rastegar, M, (2013). Investigating the Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Power Distribution Systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1-10.
- [16] Shaukat, N; et al, (2018). A survey on electric vehicle transportation within smart grid system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(1), pp. 1329-1349.
- [17] Srivastava, A; Manas, M, Dubey, R. K, (2024). Integration of power systems with electric vehicles: A comprehensive review of impact on power quality and relevant enhancements, *Electric Power Systems Research*, Vol. 234, pp. 1-29.
- [18] Wang, L; et al., (2021). Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview, *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 2, pp. 56-74.
- [19] Yuhua, G; Chunju, F, (2015). Research on relaying technologies of distribution network including mass electric vehicles, *Power System Protection Control*, 43(8), pp. 14-20.
- [20] Habib, H. F; Hariri, A. O, ElSayed, A, Mohammed, O. A, (2017). "Deployment of electric vehicles in an adaptive protection technique for riding through cyber attack threats in microgrids, 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, pp. 1-6.
- [21] Naveen, G; Yip, T. H. T, Xie, Y, (2014). Modeling and protection of electric vehicle charging station, 2014 6th IEEE Power India International Conference (PIICON), Delhi, India, pp. 1-6.
- [22] Sanchez-Sutil, F; Hernández, J. C, Tobajas, C, (2015). Overview of electrical protection requirements for integration of a smart DC node with bidirectional electric vehicle charging stations into existing AC and DC railway grids, *Electric Power Systems Research*, Vol. 122, pp. 104-118.
- [23] Jo, H.C; Joo, S.K, Lee, K, (2013). Optimal placement of superconducting fault current limiters (SFCLs) for protection

- Thermal Stress Curves in Distribution Networks Under Reconfiguration Scenarios, IEEE Access, vol. 12, pp. 98270-98284.
- [42] IEC standard for single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time", IEC standard 60255.
- IET Generation, Transmission & Distribution, 11(9), pp. 540–549.
- [39] Hung, D.Q; Mithulananthan, N, Lee, K.Y, (2014). Determining PV penetration for distribution systems with time-varying load models, IEEE Transactions on Power Systems, 29(6), pp. 3048-3057.
- [40] "IEC standard for short-circuit currents in three-phase a.c. systems", IEC Std 60909.
- [41] Rojnić, M; Prenc, R, Kirinčić, V, Beković, M, (2024). Assessment of an Overcurrent Protection Strategy Based on