



ارائه روشی نوین بمنظور هماهنگی حفاظتی ریزشبرکه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ساختاری و عملکردی

سیدامیر حسینی^۱، رضا اسلامی^۲، حسین عسکریان ابیانه^۳

^۱ گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی گلپایگان، گلپایگان، ایران

hosseini.amir@gut.ac.ir

^۲ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

eslami@sut.ac.ir

^۳ دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

askarian@aut.ac.ir

چکیده

علاوه بر ماهیت دینامیک ریزشبرکه‌ها، عدم قطعیت در عملکرد صحیح رله‌های حفاظتی دیگر چالشی است که حفاظت موثر این شبکه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. براین اساس در این مقاله به ارائه یک روش جدید برای ایجاد هماهنگی حفاظتی در ریزشبرکه‌ها با توجه به عدم قطعیت‌های ساختاری شبکه و عملکردی رله‌های حفاظتی پرداخته می‌شود. روش جدید ارائه شده براساس تنظیمات آفلاین ذخیره شده در حافظه رله‌های حفاظتی می‌باشد. از آنجا که وجود عدم قطعیت‌های ساختاری شبکه موجب افزایش چشمگیر قیود هماهنگی حفاظتی می‌شود، لذا مقاله حاضر استفاده از ریاضیات خطی-بازه‌ای را برای کاهش قیود هماهنگی حفاظتی پیشنهاد می‌دهد. با استفاده از این روش، ایجاد یک تنظیم هماهنگی حفاظتی مقاوم برای کلیه توپولوژی‌های عملکردی ریزشبرکه، ممکن می‌شود. از سوی دیگر با پیشنهاد یک تابع هدف جدید هماهنگی حفاظتی، تاثیرگذاری عدم قطعیت رله‌های حفاظتی بر قابلیت اطمینان طرح‌های حفاظتی کاهش می‌یابد. روش پیشنهاد شده در این مقاله بر روی یک شبکه نمونه در نرم‌افزار DigSILENT تست می‌شود. علاوه بر شبیه سازی تئوری، روش پیشنهادی با استفاده از تستر طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو، تست عملی می‌گردد. نتایج نشان از موفقیت طرح پیشنهادی در پاسخگویی به عدم قطعیت‌های مدنظر دارد.

کلمات کلیدی

هماهنگی حفاظتی، ریزشبرکه، عدم قطعیت، ریاضیات خطی-بازه‌ای، تستر حفاظتی

آنکه ریزشبرکه می‌تواند بخوبی مشکلات تولید برق و محدودیت سوخت‌های فسیلی را حل نماید، اما بدلیل مشکلات فنی متعدد، طرح‌های آن هنوز در ابعاد آزمایشگاهی باقی مانده‌اند. مهمترین این مشکلات فنی، چالش‌های حفاظتی در ریزشبرکه است [۲].

۱- مقدمه

ریزشبرکه، شبکه توزیع اکتیوی است که از منابع تولید پراکنده (DG^1)، بارهای مختلف و ذخیره‌سازهای انرژی تشکیل شده است [۱]. علیرغم



داده نمی‌شوند بلکه زمانی این خطا ماهیت خود را نشان می‌دهد که خطایی در جایی از شبکه رخ داده باشد و لازم است سیستم حفاظت برای مقابله با آن خطا، واکنشی نشان دهد [۱۴]. بنابراین موجب کاهش قابلیت اطمینان سیستم حفاظت می‌گردد.

تعیین نرخ رخداد خطاهای پنهان بطور مستقیم انجام نمی‌شود بلکه مستلزم آنالیز جزئیات اجزای مختلف سیستم حفاظت و تعیین نرخ خطا برای هر یک از آنها است [۱۳]. براین اساس بمنظور مدلسازی عیوب پنهان در سیستم حفاظت، مطالعات مدل‌های مارکوف مختلفی را پیشنهاد نموده‌اند [۱۵، ۱۶]. با این وجود تاکنون مطالعه مشخصی در خصوص کاهش تاثیرات خطاهای پنهان بر عملکرد هماهنگی حفاظتی شبکه‌ها بویژه ریزشبکه‌ها انجام نشده است.

براین اساس در مقاله حاضر یک روش جدید هماهنگی حفاظتی بمنظور پاسخگویی به عدم قطعیت‌های ساختاری ریزشبکه و عملکردی رله‌های حفاظتی پیشنهاد می‌شود. بمنظور پاسخگویی به عدم قطعیت‌های ساختاری شبکه، استفاده از ریاضیات خطی-بازهای پیشنهاد می‌گردد. این روش موجب کاهش قیود هماهنگی حفاظتی به تعداد جفت رله‌های حفاظتی شده و در نتیجه ایجاد یک تنظیم هماهنگی حفاظتی مقاوم بگونه‌ای که برای کلیه توپولوژی‌های عملکردی ریزشبکه معتبر باشد را ممکن می‌سازد. بمنظور پاسخگویی به عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی یک تابع هدف جدید برای ایجاد هماهنگی حفاظتی در ریزشبکه‌ها پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از تابع هدف جدید پیشنهاد شده، زمان عملکرد جفت رله‌های اصلی و پشتیبانی که رله اصلی آنها دارای احتمال عملکرد صحیح پایینی است کمتر از حد معمول قرار داده می‌شود تا در صورت عدم عملکرد صحیح و بموقع رله اصلی، رله پشتیبان در زمان کمتری وظیفه حفاظت را انجام دهد. با استفاده از تابع هدف پیشنهادی، تاثیر عدم قطعیت رله‌های حفاظتی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های حفاظت ریزشبکه‌ها کاهش خواهد یافت. روش پیشنهاد شده در این مقاله بر روی یک شبکه نمونه در نرم‌افزار DigSILENT تست می‌شود. علاوه بر شبیه‌سازی تئوری، روش پیشنهادی با استفاده از تست طراحی و ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو، تست عملی می‌گردد. بدین منظور، تنظیمات حفاظتی حاصل از شبیه‌سازی تئوری به رله‌های حفاظتی اعمال گردیده و جریان‌های خطا توسط تستر حفاظتی ایجاد شده و عملکرد رله‌ها مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج تئوری مقایسه می‌گردد. نتایج تست‌های تئوری و عملی، نشان از موفقیت طرح پیشنهادی در پاسخگویی به عدم قطعیت‌های مدنظر دارد.

ساختار این مقاله بدین صورت است. در بخش دوم ضرورت وارد نمودن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی در پروسه هماهنگی حفاظتی

ایجاد هماهنگی حفاظتی مناسب بطوریکه قادر به تحت پوشش قرار دادن عدم قطعیت در توپولوژی عملکردی ریزشبکه باشد، یکی از مهمترین چالش‌های حفاظتی این شبکه‌ها است [۲]. عدم قطعیت در توپولوژی ریزشبکه بدلیل عملکرد این شبکه در دو مد نرمال و جزیره‌ای و نیز قطع و وصل منابع تولید پراکنده (CODD²) ایجاد می‌شود [۳]. با وقوع تغییر در توپولوژی شبکه ممکن است تنظیمات موجود مناسب نباشند و بنابراین لازم است هماهنگی حفاظتی مجدداً محاسبه گردد. زیرا در غیر اینصورت تنها چاره، جدا کردن منابع تولید پراکنده بعد از رخ دادن هر خطا در شبکه است تا در اینصورت شبکه به حالت قبل از نصب منابع تولید پراکنده بازگردد [۴].

در مطالعات [۵-۷] نصب و اندازه‌دهی منابع تولید پراکنده بگونه‌ای انجام می‌شود که حفاظت سنتی شبکه‌های توزیع همچنان معتبر باشد. استفاده از این روش، علاوه بر آنکه مانع عملکرد ریزشبکه در مد جزیره‌ای می‌شود، میزان نفوذ منابع تولید پراکنده و استفاده از مزایای آن را نیز کاهش می‌دهد [۲].

به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در توپولوژی ریزشبکه، مطالعات [۴، ۸] محاسبه مجدد هماهنگی حفاظتی را پس از رخ دادن هر تغییر در شبکه، پیشنهاد می‌کنند. مشخص است که به دلیل تعدد عدم قطعیت‌های ساختاری ریز شبکه و نیز زمان بر بودن محاسبات هماهنگی حفاظتی، این روش کارایی لازم را در شبکه‌های واقعی ندارد.

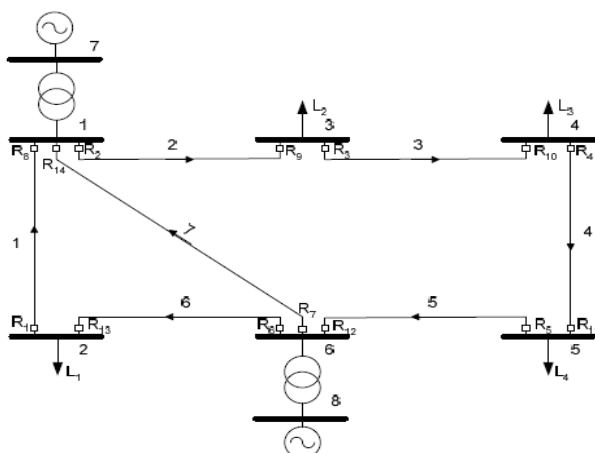
در مطالعه [۹] هماهنگی حفاظتی وارد پروسه جایابی و اندازه‌دهی بهینه منابع تولید پراکنده شده است. با استفاده از روش پیشنهاد شده در این مطالعه، منابع تولید پراکنده در مکان‌ها و با اندازه‌هایی نصب می‌گردد که امکان ایجاد هماهنگی حفاظتی با توجه به عدم قطعیت‌های ساختاری شبکه مهیا باشد.

مطالعات [۱۰-۱۲] استفاده از حفاظت تطبیقی را راهکاری مناسب برای پاسخگویی به تغییرات دینامیک ریز شبکه‌ها در پروسه هماهنگی حفاظتی می‌دانند. روش‌های پیشنهادی در این مطالعات نیازمند زیرساخت‌های گسترده مخابراتی است که هزینه پیاده‌سازی آنها را بسیار زیاد می‌کند.

علاوه بر عدم قطعیت‌های ساختاری ریز شبکه‌ها، عدم قطعیت عملکردی سیستم‌های حفاظت و بویژه رله‌های حفاظتی، چالش دیگری است که قابلیت اطمینان طرح‌های هماهنگی حفاظتی را بشدت کاهش می‌دهد. با توجه به گزارش سیگره^۳، در ۲۰ سال گذشته اکثر اغتشاشات بزرگ در شبکه‌های قدرت که منجر به خاموشی‌های گسترده شده‌اند، ناشی از عدم عملکرد مناسب سیستم حفاظت یا همان عیوب پنهان بوده است [۱۳].

براین اساس مطالعه [۱۳] آثار وقوع عیوب پنهان را به دو دسته تقسیم‌بندی نموده است که به ترتیب با "نقص در عملکرد"^۴ و "تریپ ناخواسته"^۵ نام‌گذاری شده‌اند. خطاهای پنهان در شرایط عادی تشخیص

مسئله لزوم وارد نمودن احتمال خرابی سیستم‌های حفاظت را در هماهنگی حفاظتی مشخص می‌سازد.



شکل (۱) شبکه نمونه برای بررسی اثر عدم قطعیت عملکردی بر هماهنگی حفاظتی

جدول (۱): تاثیر پذیری زمان عملکرد رله پشتیبان در شکل (۱) از روش

هماهنگی حفاظتی

شماره	نوع هماهنگی حفاظتی	زمان عملکرد رله ۲ (ثانیه)
۱	براساس مطالعه [۱۹]	۰,۵۴
۲	براساس مطالعه [۱۸]	۵,۸۳

۳- روش پیشنهادی

۳-۱- وارد نمودن عدم قطعیت عملکردی رله‌های

حفاظتی در پروسه هماهنگی حفاظتی

همانطور که در قسمت قبل نیز مشاهده شد، اگر قسمتی از شبکه بدلیل فرسودگی یا عدم کیفیت نامناسب تجهیزات حفاظتی آن در معرض عیوب پنهان بزرگتری باشد، طبیعی است که هماهنگی رله‌ها باید با دقت بیشتری انجام شود. اگر یک رله دارای نرخ تریپ ناخواسته بالاتری نسبت به سایر رله‌ها باشد، آنگاه باید زمان عملکرد رله‌های پشتیبان آن حتی‌الامکان کوچک باشند. در واقع وقوع خطا در محل‌هایی که باعث عبور جریان زیاد از این رله می‌شود باید مدنظر قرار گیرد و در این حالت‌ها هماهنگی با دقت بیشتری انجام شود. بدین منظور مقاله حاضر برای وارد نمودن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی در پروسه هماهنگی حفاظتی از تابع هدف ارائه شده در مطالعه [۱۳] استفاده می‌نماید. این تابع هدف در رابطه (۱) نشان داده شده است.

تبیین می‌گردد. در بخش سوم، روش جدید هماهنگی حفاظتی برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های مدنظر ارائه می‌شود. در بخش چهارم نیز نتایج تست نرم‌افزاری و عملی روش پیشنهادی ارائه و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۲- لزوم مدنظر قراردادن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی

بطور کلی در مطالعات قابلیت اطمینان برای خرابی سیستم‌های حفاظت یک نرخ خرابی ثابت در نظر گرفته می‌شود. حال آنکه برخی از سیستم‌های حفاظت دارای نرخ خرابی بالاتری نسبت به سیستم‌های دیگر هستند. این اختلاف در نرخ عیوب پنهان ممکن است به فرسودگی یا عدم مرغوبیت رله‌ها، کلیدها و یا سایر تجهیزات حفاظتی مربوط شود. مطالعه [۱۳] نشان داده است که رله‌ها یا بعبارت دقیق‌تر سیستم‌های حفاظتی که احتمال رخداد نقص در عملکرد یا تریپ ناخواسته در آن‌ها بیشتر است، باید جداگانه مورد بررسی قرار بگیرند و در تابع هدف هماهنگی، احتمال وجود عیب در آن‌ها دیده شود. در همین راستا مطالعه [۱۷] به بررسی روش‌های مختلف هماهنگی حفاظتی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های حفاظت پرداخته است. براساس نتایج این مطالعه، روش‌هایی که براساس احتمال خرابی سیستم‌های حفاظت، به اجرای هماهنگی می‌پردازند دارای قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به طرح‌هایی هستند که احتمال خرابی سیستم‌های حفاظت را مدنظر قرار نمی‌دهند. برای بررسی این موضوع شبکه نمونه شکل (۱) آورده شده است [۱۳].

در این شبکه فرض می‌شود خطای سه فازی در وسط خط سوم رخ دهد، در این صورت رله‌های ۳ و ۱۰ مسئول پاسخگویی به این خطا هستند. اگر فرض شود رله اصلی شماره ۳ بدلیل وجود عیوب پنهان نتواند عملکرد مناسب در مقابل خطای بوقوع پیوسته داشته باشد، لذا رله پشتیبان شماره ۲ باید عمل نماید. براساس نوع هماهنگی حفاظتی انجام شده بین رله‌های اصلی و پشتیبان شبکه، جدول (۱) ارائه شده است.

همانطور که از جدول (۱) مشخص است، نوع هماهنگی حفاظتی و مدنظر قراردادن عدم قطعیت عملکردی سیستم حفاظت کاملاً بر زمان عملکرد رله‌های پشتیبان تاثیرگذار است. براین اساس مشاهده می‌شود در مطالعه [۱۸] که عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی مدنظر قرار نگرفته است، زمان عملکرد رله پشتیبان بسیار بالا رفته است بطوریکه افزایش زمان عملکرد رله شماره ۲ می‌تواند موجب وقوع تریپ ناخواسته در رله‌های دیگری که خطا را حس می‌کنند، شود. این مسئله موجب افزایش خروج بارها از شبکه و در نتیجه کاهش قابلیت اطمینان شبکه می‌شود. این

در این رابطه، r تعداد کل رله‌های شبکه، t_m^{CS} زمان عملکرد رله m ام در توپولوژی CS ام شبکه و TDS_m^{CS} تنظیم زمانی رله m ام در توپولوژی CS ام باشد.

همانطور که گفته شد، تعدد حالات CS ممکن است رسیدن به هماهنگی بهینه را با استفاده از روش‌های سنتی با مشکل مواجه نماید. برای حل این مشکل مقاله حاضر، مشابه مطالعه [۲۰]، تبدیل محدودیت‌های هماهنگی بصورت بازه‌ای را پیشنهاد می‌دهد. براین اساس t_m رابطه (۱)، به دو بخش ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. بخش ثابت آن شامل $f_m(I_{fm}, I_{gm})$ و بخش متغیر آن شامل $g_m(TDS_m)$ می‌شود. اگر $f_m(I_{fm}, I_{gm})$ با C_m و محدودیت‌های مرتبط با آن به روابط (۳) و (۴) تبدیل می‌شوند [۲۰].

$$OF = \text{Min} \sum_{CS=1}^{CS_{Sg}} \sum_{m=1}^r C_m^{CS} \cdot X_m^{CS} \quad (3)$$

$$\text{Subject to: } C_b^{CS} \cdot X_b^{CS} - C_m^{CS} \cdot X_m^{CS} \geq CTI \quad \forall (m, b) \in \Omega \quad (4)$$

$$X_m^{\min(CS)} \leq X_m^{CS} \leq X_m^{\max(CS)}$$

مشابه مطالعه [۱۹]، مقدار بهینه تابع هدف رابطه (۳) با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود. بعلاوه با توجه به آنکه بررسی محدودیت‌های رابطه (۴) برای تمام توپولوژی‌های موجود ریز شبکه سخت و وقت‌گیر است، لذا تنها کافی است مقدار مینیمم و ماکزیمم هر محدودیت بررسی شود. بدین منظور محدودیت ارائه شده در رابطه (۴) بصورت محدودیت دو مرحله‌ای ارائه شده در رابطه (۵) تبدیل می‌شود.

$$\text{Stage (1): } C_b^{\max(CS)} \cdot X_b^{\max(CS)} - C_m^{\max(CS)} \cdot X_m^{\max(CS)} \geq CTI \quad (5)$$

$$\text{Stage (2): } C_b^{\min(CS)} \cdot X_b^{\min(CS)} - C_m^{\min(CS)} \cdot X_m^{\min(CS)} \geq CTI$$

بمنظور بدست آوردن ماکزیمم و مینیمم زمان عملکرد هر یک از رله‌های اصلی و پشتیبان به ازای تمام توپولوژی‌های مختلف موجود ریز شبکه، رابطه (۶) ارائه شده است. در این رابطه، $\Delta t_n^{(CS)}$ اختلاف زمان عملکردی جفت رله n ام در توپولوژی CS ام ریز شبکه می‌باشد.

$$\Delta t^{(CS)} = \begin{bmatrix} \Delta t_1^{(1)} & \Delta t_2^{(1)} & \dots & \Delta t_n^{(1)} \\ \Delta t_1^{(2)} & \Delta t_2^{(2)} & \dots & \Delta t_n^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Delta t_1^{(CS)} & \Delta t_2^{(CS)} & \dots & \Delta t_n^{(CS)} \end{bmatrix} \quad (6)$$

رابطه (۷) بمنظور محاسبه ماکزیمم و مینیمم زمان عملکرد هر یک از جفت رله‌ها به ازای تمام توپولوژی‌های موجود در ریز شبکه ارائه شده است. در این رابطه ماکزیمم و مینیمم مقدار اختلاف زمان عملکرد هر یک از جفت رله‌ها در تمام توپولوژی‌های موجود ریز شبکه، بصورت یک ماتریس $1 \times n$ با نام $\Delta t_i^{(CS)}$ که درایه‌های آن بازه‌ای هستند، نوشته می‌شود.

$$\Delta t_i^{(CS)} = [[\Delta t_i^{\min(CS)}, \Delta t_i^{\max(CS)}] \dots [\Delta t_n^{\min(CS)}, \Delta t_n^{\max(CS)}]] \quad (7)$$

در این رابطه $\Delta t_n^{\min(CS)}$ ، $\Delta t_n^{\max(CS)}$ بترتیب ماکزیمم و مینیمم اختلاف زمان عملکرد جفت رله n ام به ازای تمام توپولوژی‌های ریز شبکه است.

$$OF = A + B \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} \alpha_1 \cdot (t_m)^2 & \text{if } m \neq b \\ \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot (t_m)^2 & \text{if } m = b \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} \text{Re ject this generation} & \text{if } \Delta t_{bm} < CTI \\ \alpha_2 \cdot (\Delta t_{bm})^2 & \text{if } m \neq b \\ \alpha_2 \cdot \beta_2 \cdot (\Delta t_m)^2 & \text{if } m = b \end{cases}$$

در رابطه فوق OF تابع هدف هماهنگی، t_m زمان عملکرد رله m ام برای خطای واقع شده جلوی رله، Δt_{bm} اختلاف زمان عملکرد بین هر دو جفت رله اصلی و پشتیبان، CTI فاصله زمان هماهنگی (در حدود ۰٫۳ یا ۰٫۴ ثانیه)، α_1 ضریب وزنی برای تعیین ارزش زمان عملکرد رله‌ها (t_m) و α_2 ضریب وزنی برای تعیین ارزش اختلاف زمانی عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان (Δt_{bm}) می‌باشند.

در رابطه (۱) فرض می‌شود که رله شماره b ، رله پشتیبان رله با نرخ خرابی بالا باشد. از این رابطه ملاحظه می‌شود که در حالتی که نوبت به تنظیم رله شماره b می‌رسد، زمان عملکرد این رله با ضریب β_1 کاهش می‌یابد. همچنین اگر محاسبات مرتبط با اختلاف زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان باشد (پارامتر B در تابع هدف)، کاهش زمان عملکرد بین رله‌های اصلی و پشتیبان در تابع هدف بر عهده ضریب β_2 است.

۲-۳- مدنظر قرار دادن عدم قطعیت ساختاری شبکه با استفاده از ریاضیات خطی-بازه‌ای

اگر شبکه دارای یک توپولوژی ثابت باشد، تابع هدف هماهنگی حفاظتی ارائه شده در رابطه (۱) را می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های بهینه سازی مانند الگوریتم ژنتیک بهینه نمود و تنظیمات حفاظتی بهینه را بدست آورد.

اما همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، ریز شبکه‌ها دارای ساختار ثابت نیستند. بنابراین در محاسبات هماهنگی حفاظتی باید تنظیمی را بدست آورد که برای کلیه توپولوژی‌های عملکردی شبکه معتبر باشد. با این وجود در نظر گرفتن توپولوژی‌های مختلف شبکه در پرو سه هماهنگی حفاظتی، موجب افزایش تعداد محدودیت‌های هماهنگی حفاظتی می‌گردد که عملاً الگوریتم‌های بهینه‌سازی مانند ژنتیک را در ایجاد جواب بهینه، ناتوان می‌سازد. محدودیت‌های هماهنگی حفاظتی با در نظر گرفتن توپولوژی‌های مختلف شبکه بصورت رابطه (۲) بیان می‌شوند.

$$\text{Subject to: } t_m^{CS} - t_b^{CS} \geq CTI \quad \forall (m, b) \in \Omega \quad (2)$$

$$TDS_m^{\min(CS)} \leq TDS_m^{CS} \leq TDS_m^{\max(CS)}$$

کمترین زمان ممکن عمل می‌کند تا از گسترش خطا به سایر بخش‌های شبکه جلوگیری بعمل آید.

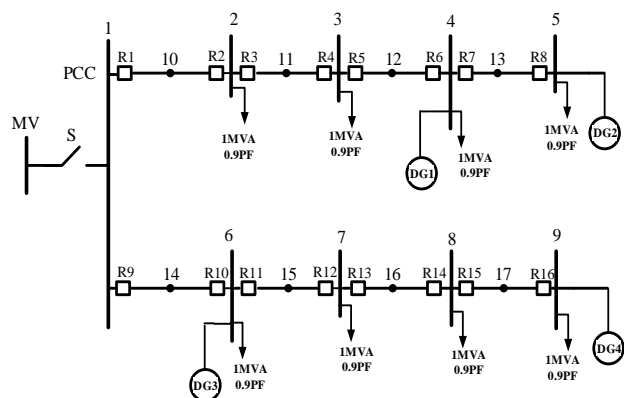
۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

روش پیشنهادی در مقاله حاضر به دو صورت شبیه‌سازی و تست عملی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. بمنظور شبیه‌سازی این روش، از نرم‌افزار DIGSILENT استفاده شده است. ارزیابی عملی روش پیشنهادی نیز با استفاده از دستگاه تستر ساخته شده در آزمایشگاه تخصصی-تحقیقاتی حفاظت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و شرکت دانش‌بنیان وبکو انجام شده است.

۴-۱- ارزیابی نرم‌افزاری روش پیشنهادی

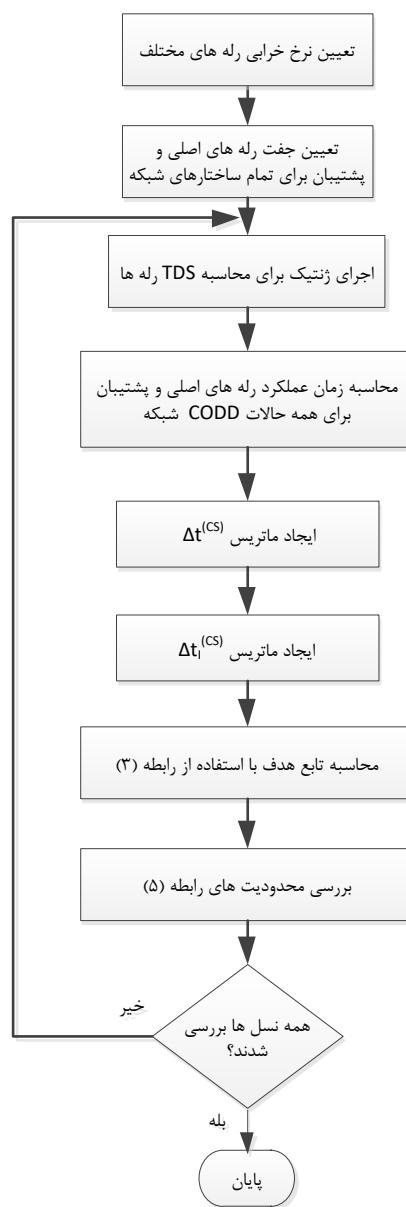
بمنظور ارزیابی نرم‌افزاری روش پیشنهادی، این روش بر روی ریز شبکه ۹ با سه ارائه شده در شکل (۳) پیاده‌سازی می‌شود. این شبکه قبلاً برای پیاده‌سازی روش ارائه شده در مطالعه [۴] نیز مورد استفاده قرار گرفته است.

ریز شبکه نمونه از طریق باس شماره یک به شبکه بالادست متصل است. ۱۶ رله اضافه جریان جهت‌دار در این شبکه نصب شده است. همچنین چهار منبع تولید پراکنده با توان (MVA) ۱۰ در باس‌های ۴، ۵، ۶ و ۹ متصل است.



شکل (۳) ریز شبکه ۹ شینه نمونه

با توجه به آنکه هر یک از منابع تولید پراکنده به تنهایی توانایی تامین بارهای شبکه را دارند، لذا حالات مختلف قطع و وصل منابع تولید پراکنده در این شبکه در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که مشخص است، تعداد حالات CODD مدنظر در ریز شبکه نمونه برابر ۱۶ حالت است.



شکل (۲) فلوچارت روش پیشنهادی

بطور کلی روش ارائه شده در این مقاله بمنظور ایجاد هماهنگی حفاظتی در ریز شبکه‌ها با در نظر گرفتن عدم قطعیت ساختاری شبکه و عملکردی رله‌های حفاظتی، مطابق فلوچارت ارائه شده در شکل (۲) است. همانطور که مشخص است تابع هدف رابطه (۱) که بمنظور در نظر گرفتن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی ارائه گردیده بود، با استفاده از ریاضیات خطی-بازه‌ای حل می‌گردد تا تنظیمات مقاومی که برای کلیه ساختارهای ممکن شبکه، معتبر باشند ایجاد گردد. بنابراین با تغییر ساختار بهره‌برداری شبکه، نیاز به محاسبه مجدد هماهنگی حفاظتی نیست. ضمن آنکه برای رله‌هایی که احتمال عملکرد صحیح آن‌ها بالا است، رله‌های پشتیبان با



سیزدهمین کنفرانس حفاظت و اتوماسیون در سیستم‌های قدرت

دانشگاه صنعتی شریف

۱۸ و ۱۹ دی ماه ۱۳۹۷



جدول (۴): هماهنگی مقاوم حفاظتی زمانیکه رله‌های ۴ و ۱۳ دارای نرخ خرابی بالاتری باشند

تنظیم جریانی	TSM	شماره رله	تنظیم جریانی	TSM	شماره رله
R 1	0.38	378	R 10	0.28	364
R 2	0.18	378	R 11	0.3	117
R 3	0.27	420	R 12	0.41	117
R 4	0.3	420	R 13	0.19	182
R 5	0.16	481	R 14	0.56	182
R 6	0.35	481	R 15	0.05	234
R 7	0.05	234	R 16	0.75	234
R 8	0.66	234	R 17	0.57	715
R 9	0.43	364			

جدول (۲): حالات مختلف CODD در ریزشیکه نمونه شکل (۳)

حالت	وضعیت DGها	حالت	وضعیت DGها
۱	NO DG	۹	DG2+DG3
۲	DG1	۱۰	DG2+DG4
۳	DG2	۱۱	DG3+DG4
۴	DG3	۱۲	DG1+DG2+DG3
۵	DG4	۱۳	DG1+DG2+DG4
۶	DG1+DG2	۱۴	DG1+DG3+DG4
۷	DG1+DG3	۱۵	DG2+DG3+DG4
۸	DG1+DG4	۱۶	DG1+DG2+DG3+DG4

لازم به ذکر است در محاسبات هماهنگی حفاظتی تنظیم جریانی رله‌ها از پیش تعیین شده و برابر ۱,۴ جریان بار عبوری از آن‌ها در نظر گرفته شده است. به همین دلیل تنظیم جریانی برای هر دو حالت هماهنگی حفاظتی در جدول‌های (۳) و (۴) یکسان است.

جدول (۵): جریان‌های بحرانی عبوری از جفت رله‌های شبکه

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	مینیمم جریان خطای رله اصلی	ماکزیمم جریان خطای رله پشتیبان	شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	مینیمم جریان خطای رله اصلی	ماکزیمم جریان خطای رله پشتیبان
1	17	54.8	54.0	7	5	9.55	9.55
1	10	54.8	1.77	5	3	13.1	13.2
10	12	6.41	3.05	3	1	21.3	21.3
12	14	3.21	3.21	6	8	3.32	3.22
4	6	3.21	3.21	15	13	9.71	9.71
2	4	3.10	3.10	13	11	13.4	13.4
14	16	3.33	3.33	11	9	22	21.3
9	2	54.8	0.84	9	17	54.7	54.8

بمنظور ارزیابی موفقیت تابع هدف ارائه شده در رابطه (۱) برای تحت پوشش قرار دادن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی، هر دو هماهنگی حفاظتی به ازای جریان‌های بحرانی عبوری از رله‌های حفاظتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است برای محاسبه جریان‌های بحرانی عبوری از جفت رله نام، انواع جریان‌های عبوری از این جفت رله به ازای توپولوژی‌های مختلف بررسی می‌شوند و مینیمم جریان عبوری از رله اصلی و ماکزیمم جریان عبوری از رله پشتیبان که منجر به بدترین عملکرد این جفت رله باشد (اختلاف زمان عملکردی آن‌ها به هم نزدیکتر باشد) بعنوان جریان‌های بحرانی جفت رله نام شناخته می‌شوند. جدول (۵)

ابتدا فرض می‌شود که نرخ خرابی کلیه رله‌ها یکسان است و فقط در پروسه هماهنگی حفاظتی، عدم قطعیت ساختاری ریز شبکه مطابق ساختارهای ارائه شده در جدول (۲) مدنظر است. براین اساس هماهنگی حفاظتی مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۳) محاسبه می‌شود. همانطور که از این جدول مشخص است، روش ارائه شده در مقاله حاضر موفق شده است برای کلیه ساختارهای مختلف شبکه یک تنظیم مقاوم ارائه دهد بطوریکه با تغییر توپولوژی بهره‌برداری شبکه، نیاز به محاسبه مجدد هماهنگی حفاظتی که بسیار سخت و وقت‌گیر است، نمی‌باشد.

جدول (۳): هماهنگی مقاوم حفاظتی با نرخ خرابی یکسان رله‌ها

تنظیم جریانی	TSM	شماره رله	تنظیم جریانی	TSM	شماره رله
R 1	0.54	378	R 10	0.37	364
R 2	0.24	378	R 11	0.6	117
R 3	0.42	420	R 12	0.56	117
R 4	0.34	420	R 13	0.29	182
R 5	0.21	481	R 14	0.65	182
R 6	0.43	481	R 15	0.05	234
R 7	0.05	234	R 16	0.75	234
R 8	0.75	234	R 17	0.86	715
R 9	0.7	364			

بمنظور وارد نمودن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی فرض می‌شود که رله‌های حفاظتی ۴ و ۱۳ دارای نرخ خرابی بالاتری نسبت به سایر رله‌های حفاظتی باشند. بنابراین مطابق تابع هدف ارائه شده در رابطه (۱) انتظار آن است که زمان عملکرد رله‌های پشتیبان این دو رله (به ترتیب رله‌های ۶ و ۱۱) نسبت به حالتی که نرخ خرابی‌ها یکسان در نظر گرفته شده است (جدول ۳)، کاهش یابد. براین اساس نتایج هماهنگی حفاظتی مقاوم زمانیکه نرخ خرابی رله‌های ۴ و ۱۳ بالاتر در نظر گرفته شده است، برای کلیه توپولوژی‌های شبکه در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول (۶)، مشخص است که انتظار ذکر شده بخوبی برآورده شده است. براین اساس اختلاف زمان عملکرد جفت رله ۱۱-۱۳ زمانیکه نرخ خرابی رله‌ها یکسان است (حالت اول شبیه‌سازی) برابر ۰,۷۰ ثانیه بوده است که این مقدار در حالت دوم (زمانیکه نرخ خرابی رله‌های ۴ و ۱۳ بالاتر است) به ۰,۲۵ ثانیه کاهش یافته است. همچنین زمان عملکرد جفت رله ۶-۴ در حالت اول شبیه‌سازی ۰,۴۰ بوده است که این مقدار در حالت دوم به ۰,۲۵ ثانیه کاهش یافته است. بنابراین مشخص است که روش پیشنهادی بخوبی موفق به وارد نمودن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی و ساختاری ریزشبکه در پروسه هماهنگی حفاظتی شده است.

۲-۴- ارزیابی عملی روش پیشنهادی

شکل (۴) تستر و بستر مورد نیاز برای ارزیابی عملی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. مطابق آنچه در شکل (۴) نشان داده شده است، رله مورد استفاده در این تست‌ها از کمپانی Micom بوده و نسبت تبدیل CTها در تست‌ها ۳۰/۵ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است برای ایجاد هماهنگی حفاظتی از منحنی standard inverse در استاندارد IEC استفاده شده است.



(الف)



(ب)

شکل (۴) الف: تستر مورد استفاده برای تست‌های عملی. ب: نحوه انجام تست‌های عملی

جریان‌های بحرانی عبوری از جفت رله‌های مختلف شبکه را نشان می‌دهد. همچنین جدول (۶) و جدول (۷) به ترتیب ارزیابی دو هماهنگی حفاظتی ارائه شده یکی با نرخ ثابت خرابی رله‌های حفاظتی و دیگری با نرخ خرابی بالاتر برای رله‌های ۴ و ۱۳ را به ازای جریان‌های بحرانی تعیین شده، نشان می‌دهند.

جدول (۶): ارزیابی هماهنگی حفاظتی با نرخ یکسان خرابی رله‌ها به ازای

جریان‌های بحرانی

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	زمان عملکرد رله اصلی	اختلاف زمان	شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	زمان عملکرد رله اصلی	اختلاف زمان
1	17	1.51	0.43	7	5	0.11	0.36
1	10	1.22	0.38	5	3	0.47	0.47
10	12	0.87	0.39	3	1	0.95	0.27
12	14	1.26	0.27	6	8	1.52	0.40
4	6	1.14	0.40	15	13	0.11	0.54
2	4	0.78	0.38	13	11	0.65	0.70
14	16	1.52	0.40	11	9	1.36	0.25
9	2	1.58	0.50	9	17	1.58	0.36

جدول (۷): ارزیابی هماهنگی حفاظتی به ازای جریان‌های بحرانی زمانیکه

رله‌های ۴ و ۱۳ دارای نرخ خرابی بالاتری باشند

شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	زمان عملکرد رله اصلی	اختلاف زمان	شماره رله اصلی	شماره رله پشتیبان	زمان عملکرد رله اصلی	اختلاف زمان
1	17	0.86	0.43	7	5	0.11	0.25
1	10	0.86	0.35	5	3	0.36	0.25
10	12	0.66	0.26	3	1	0.61	0.25
12	14	0.92	0.40	6	8	2.56	4.45
4	6	1.01	0.25	15	13	0.11	0.31
2	4	0.58	0.44	13	11	0.43	0.25
14	16	1.30	0.61	11	9	0.68	0.29
9	2	0.97	0.59	9	17	0.91	0.37

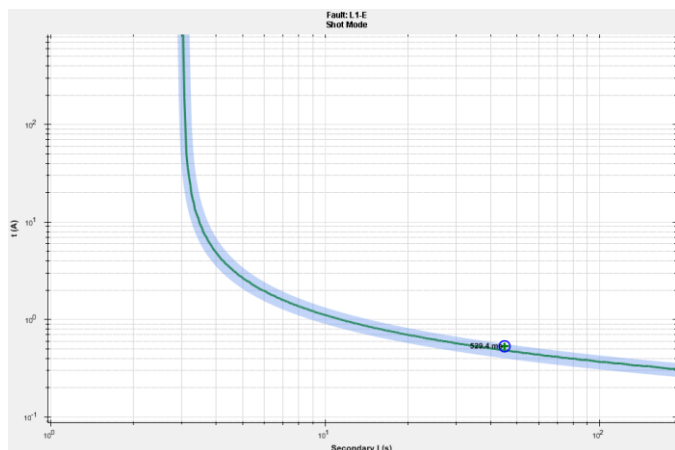
پرواضح است که در حالت دوم شبیه‌سازی بدلیل بالاتر در نظر گرفتن نرخ خرابی‌های رله‌های ۱۳ و ۴، انتظار آن است که رله‌هایی که پشتیبان این دو رله هستند، سریعتر عمل نموده و اختلاف زمانی خود را با رله‌های ۱۳ و ۴ کم کنند. بدین ترتیب در صورتی که رله‌های اصلی ۱۳ و ۴ در پاک کردن خطا موفق نبودند (که احتمال آن هم زیاد است)، رله‌های پشتیبان بلافاصله وارد عمل شده و خطا را با کمترین خسارت از شبکه پاک کنند. با مقایسه زمان‌های بحرانی ایجاد شده در جدول (۷) با مقادیر مشابه در

۵- نتیجه

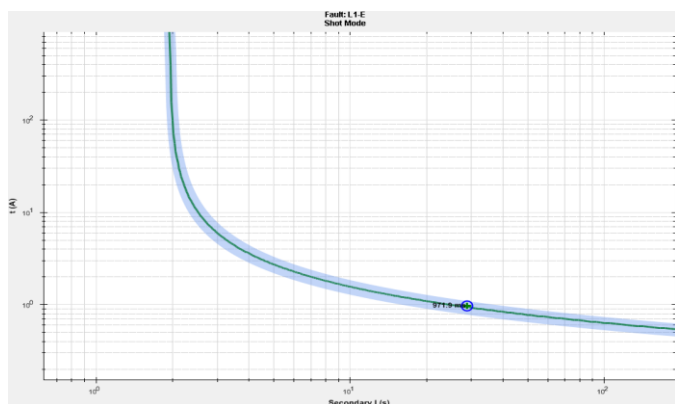
یکی از تفاوت‌های اصلی ریزشبه‌ها با شبکه‌های توزیع معمولی عدم وجود ساختار ثابت در ریزشبه‌ها است. براین اساس هر تنظیم هماهنگی که برای ریزشبه‌ها ارائه می‌شود باید قادر به حفاظت ریزشبه در کلیه توپولوژی‌های عملکردی آن باشد. از سوی دیگر نرخ خرابی رله‌های حفاظتی همواره یکسان نیست و در نظر گرفتن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی می‌تواند موجب افزایش قابلیت اطمینان طرح‌های هماهنگی حفاظتی شود. براین اساس در این مقاله یک روش جدید برای در نظر گرفتن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی و عدم قطعیت ساختاری ریزشبه‌ها ارائه گردید. بمنظور در نظر گرفتن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی یک تابع هدف جدید و بمنظور در نظر گرفتن عدم قطعیت ساختاری شبکه، استفاده از ریاضیات خطی-بازه‌ای پیشنهاد گردید. استفاده از ریاضیات خطی-بازه‌ای موجب کاهش قیود هماهنگی حفاظتی به تعداد جفت رله‌های شبکه می‌شود. روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار بر روی یک شبکه نمونه و با استفاده از تستر حفاظتی، بصورت عملی تست گردید. نتایج نشان از موفقیت این روش در تحت پوشش قراردادن عدم قطعیت‌های مدنظر دارد. براین اساس یک تنظیم هماهنگی حفاظتی مقاوم ایجاد گردید که قادر به ایجاد هماهنگی حفاظتی برای کلیه توپولوژی‌های عملکردی شبکه است. ضمن آنکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت عملکردی رله‌های حفاظتی، اختلاف زمان عملکرد جفت رله‌هایی که رله اصلی آن‌ها دارای نرخ خرابی بالاتری است، کاهش یافت تا اگر رله اصلی در پاک کردن خطا موفق نبود، رله پشتیبان با زمان کمتری عمل نموده و از این طریق مانع گسترش خطا به سایر بخش‌های شبکه شده و قابلیت اطمینان سیستم حفاظت افزایش یابد.

در این بخش هماهنگی حفاظتی جفت رله ۱۱-۱۳ زمانیکه رله اصلی ۱۳ دارای نرخ خرابی بالاتری است، بررسی می‌شود. براین اساس مطابق شکل (۵) به رله اصلی ۱۳ جریان ۴۵(A) در ثانویه اعمال شده و این رله در زمان ۵۲۹(ms) عملکرد داشته است. از سوی دیگر مطابق شکل (۶) به رله پشتیبان ۱۱ جریان ۲۸,۹۲(A) در ثانویه اعمال شده و این رله در زمان ۹۷۲(ms) عمل داشته است. بنابراین اختلاف زمان عملکرد دو رله ۴۴۲(ms) بوده و دو رله در هماهنگی کامل هستند.

مقایسه نتایج حاصل شده از شکل‌های (۵) و (۶) و نتایج شبیه‌سازی (نتایج جدول (۷)) حاکی از وجود تفاوت در اختلاف عملکرد رله‌های ۱۱-۱۳ در دو حالت تست عملی و نتایج شبیه‌سازی است. این مسئله بدلیل تاخیرهای زمانی موجود در انجام تست عملی ناشی از دریافت فرامین توسط تستر، تاخیر در ایجاد جریان‌های خطا و دریافت سیگنال‌های تریپ از رله است.



شکل ۵) نحوه عملکرد رله اصلی ۱۳ زمانیکه نرخ خرابی رله‌های ۴ و ۱۳ بالاتر در نظر گرفته شده است



شکل ۶) نحوه عملکرد رله پشتیبان ۱۱ زمانیکه نرخ خرابی رله‌های ۴ و ۱۳ بالاتر در نظر گرفته شده است

مراجع

- [۱] R. H. Lasseter, "MicroGrids", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, pp. 305-308, vol.1, 2002.
- [۲] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, F. Razavi, and A. Nasiri, "An overview of microgrid protection methods and the factors involved", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 64, pp. 174-186, 2016.
- [۳] T. S. Ustun, C. Ozansoy, and A. Zayegh, "Modeling of a centralized microgrid protection system and distributed energy resources according to IEC 61850-7-420", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, pp. 1560-1567, 2012.
- [۴] W. K. A. Najy, H. H. Zeineldin, and W. L. Woon, "Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 1668-1677, 2013.

- [۱۷] K. Mazlumi and H. A. Abyaneh, "Relay coordination and protection failure effects on reliability indices in an interconnected sub-transmission system", *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1011-1017, 2009.
- [۱۸] H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, H. K. Karegar, S. H. H. Sadeghi, and R. A. Khan, "A new optimal approach for coordination of overcurrent relays in interconnected power systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, pp. 430-435, 2003.
- [۱۹] F. Razavi, H. A. Abyaneh, M. Al-Dabbagh, R. Mohammadi, and H. Torkaman, "A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination", *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 713-720, 2008.
- [۲۰] A. S. Noghabi, H. R. Mashhadi, and J. Sadeh, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering different network topologies using interval linear programming", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 1348-1354, 2010.
- [۵] W. Lingfeng and C. Singh, "Reliability-constrained optimum placement of reclosers and distributed generators in distribution networks using an Ant colony system algorithm", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 38, pp. 757-764, 2008.
- [۶] S. Chaitusaney and A. Yokoyama, "An appropriate distributed generation sizing considering recloser-fuse coordination", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-6, 2005.
- [۷] H. H. Zeineldin, Y. A. R. I. Mohamed, V. Khadkikar, and V. R. Pandi, "A protection coordination index for evaluating distributed generation impacts on protection for meshed distribution systems", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, pp. 1523-1532, 2013.
- [۸] W. El-Khattam and T. S. Sidhu, "Resolving the impact of distributed renewable generation on directional overcurrent relay coordination: a case study", *IET Renewable Power Generation*, vol. 3, pp. 415-425, 2009.
- [۹] S. A. Hosseini, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and F. Razavi, "Merging the retrieval of the protection coordination of distribution networks equipped with DGs in the process of their siting and sizing", *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 8, pp. 035502, 2016.
- [۱۰] S. A. Hosseini, H. A. Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, R. Eslami, and F. Razavi, "A decision-tree scheme for responding to uncertainties in microgrid protection coordination", *Electric Power Components and Systems*, vol. 46, pp. 69-82, 2018/01/02 2018.
- [۱۱] S. A. Hosseini, H. Askarian Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and R. Eslami, "Improving adaptive protection to reduce sensitivity to uncertainties which affect protection coordination of microgrids", *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 42, pp. 63-74, 2018.
- [۱۲] P. Mahat, C. Zhe, B. Bak-Jensen, and C. L. Bak, "A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, pp. 428-437, 2011.

زیر نویس‌ها

- ¹ Distributed Generation
² Connecting or Disconnecting of DGs
³ Cigre (International Council on Large Electric Systems)
⁴ Failure to trip
⁵ False operation

[۱۳] ک. مظلومی، "ارائه روشی نوین جهت ارزیابی تاثیر هماهنگی رله‌های حفاظتی بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان در شبکه‌های توزیع کابلی"، رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ۱۳۸۷.

- [۱۴] J. Kai and C. Singh, "New models and concepts for power system reliability evaluation including protection system failures", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 1845-1855, 2011.
- [۱۵] Y. Xingbin and C. Singh, "A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1811-1820, 2004.
- [۱۶] X. Y. a. C. Singh, "Power system reliability analysis considering protection failures", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 2, pp. 963-968, 2002.