

هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن پایداری گذرای منابع تولید پراکنده سنکرون

صادق جمالی^۱ حسین رضایی فرشه^۲ نوید رضا رفیع^۳

۱- قطب علمی اتوماسیون و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

sjamali@iust.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

hosein_rezaei@elec.iust.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه علم و صنعت ایران- تهران- ایران

navidrezarafi@alumni.iust.ac.ir

چکیده: اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع برق موجب چالش‌هایی در حفاظت این شبکه‌ها می‌شود. استفاده از رله‌های اضافه جریان جهتی می‌تواند به عنوان راهکاری به منظور غلبه بر پیچیدگی‌های حفاظتی شبکه‌های توزیع در حضور منابع تولید پراکنده مطرح گردد. دستیابی به هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی از اهمیت بالایی به منظور رعایت الزامات حفاظتی شبکه توزیع برخوردار می‌باشد. لذا در این مقاله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی برای یک شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده سنکرون، به عنوان مسئله بهینه‌سازی مطرح شده و توسط الگوریتم جستجوی هم‌نوایی تنظیمات بهینه حاصل می‌گردد. پس از دستیابی به تنظیمات بهینه، پایداری گذرای منابع تولید پراکنده سنکرون با مدل‌سازی سیستم تحریک آن، به ازای زمان پاک‌سازی خطاهای شبکه تعیین می‌شود. در مواردی که پایداری ژنراتور سنکرون از دست می‌رود، از تنظیم آنی عملکرد رله اضافه جریان بهره گرفته شده است. شبیه‌سازی بر روی یک شبکه توزیع ولتاژ متوسط با نرم‌افزار DigSILENT در این مقاله نشان می‌دهد که پایداری گذرای منابع تولید پراکنده سنکرون نقش مهمی در طراحی سیستم حفاظت اضافه جریان شبکه توزیع دارد.

کلمات کلیدی: الگوریتم جستجوی هم‌نوایی، پایداری گذرا، حفاظت شبکه توزیع، رله‌های اضافه جریان جهتی، منابع تولید پراکنده سنکرون، هماهنگی حفاظتی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر صادق جمالی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

حفاظت شبکه در مقابل خطاهای مختلف یک ضرورت اساسی در طراحی شبکه‌های توزیع برق می‌باشد. یک طرح حفاظتی مناسب باید بتواند در سریع‌ترین زمان ممکن با جداسازی کمترین قسمت ممکن از شبکه، خطا را از شبکه پاکسازی نماید. هماهنگی حفاظتی بین تجهیزات حفاظتی در شبکه توزیع به این منظور است که حفاظت اصلی در کوتاه‌ترین زمان خطا را از شبکه حذف نموده و در صورت عدم عملکرد آن، حفاظت پشتیبان وارد عمل شده و خطا را پاکسازی نماید. شبکه‌های توزیع اغلب به صورت شعاعی بهره‌برداری می‌شوند و دارای پخش بار یک سویه از سمت پست اصلی به سمت بارها می‌باشند. در این شبکه‌ها اغلب از فیوزها و رله‌های اضافه جریان جهت حفاظت اضافه جریان استفاده می‌شود. در حقیقت عبور یک سویه توان الکتریکی موجب سادگی در ایجاد هماهنگی بین تجهیزات حفاظتی می‌شود. اما با اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه‌های توزیع جهت تأمین محلی انرژی مشترکان، طرح حفاظتی موجود در سیستم‌های توزیع کارآیی خود را از دست می‌دهند. با متصل شدن منابع تولید پراکنده به شبکه توزیع پخش بار دچار تغییرات اساسی شده و دامنه جریان اتصال کوتاه افزایش یافته و جهت آن نیز از حالت یک سویه خارج می‌شود. تغییر ایجاد شده در جریان اتصال کوتاه شبکه به نوع، محل نصب و ظرفیت منابع تولید پراکنده بستگی دارد [۱].

حضور منابع تولید پراکنده می‌تواند موجب ایجاد عملکرد ناخواسته سیستم حفاظتی، عدم عملکرد تجهیزات حفاظتی (کورشدگی حفاظتی)، ایجاد شبکه‌ای جزیره‌ای کنترل نشده، بازبست غیر سنکرون و کاهش ایمنی شبکه توزیع گردد. شبکه توزیع در صورتی می‌تواند میزبان نصب منابع تولید پراکنده باشد که راهکارهای حفاظتی حضور آن‌ها در شبکه ایجاد گردد. پتانسیل میزبانی شبکه توزیع با نصب تجهیزات حفاظتی جدید قابل ارتقا است. رله‌های اضافه جریان از تجهیزات متداول حفاظتی مورد استفاده در شبکه‌های توزیع می‌باشند. استفاده از این رله‌ها در شبکه توزیع با حضور منابع تولید پراکنده می‌تواند به عنوان طرح حفاظتی در دسترس و کاربردی مطرح گردد. انجام هماهنگی بهینه بین رله‌های اضافه جریان امری ضروری به منظور رعایت الزامات حفاظتی شبکه‌های توزیع است.

استفاده از روش‌های بهینه سازی جهت دستیابی به تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی در بسیاری از مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. در [۲] از برنامه‌ریزی خطی جهت دستیابی به تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی استفاده شده است. در این روش جهت خطی کردن مسئله تنظیم بهینه رله‌ها، جریان عملکرد رله‌ها ثابت منظور شده و پارامتر تنظیم زمانی رله‌ها بهینه‌سازی می‌گردد. حال آنکه با تعریف پارامتر جریان عملکرد رله‌های اضافه جریان به عنوان متغیر تصمیم‌گیری می‌توان زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان را کاهش داد. روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مانند ازدحام

ذرات [۳] و الگوریتم ژنتیک [۴] جهت حل مسئله هماهنگی مورد استفاده قرار گرفته است. بنا بر نتایج گزارش شده در این مقالات و مقایسه روش‌های بهینه‌سازی مختلف انجام شده در آن‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که روش بهینه‌سازی به دلیل پیچیدگی مسئله هماهنگی رله‌های اضافه جریان جهتی، نقش مهمی در پاسخ بهینه و سرعت همگرایی دارد.

ساختار شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده سنکرون که دارای مشارکت بالایی در جریان خطا می‌باشند، به ساختار شبکه‌های قدرت به هم پیوسته نزدیک می‌شود. در این شبکه‌ها از رله‌های اضافه جریان جهتی به منظور حفاظت اتصال کوتاه استفاده می‌شود. در [۵] تنظیمات حفاظتی بهینه برای شبکه توزیع حلقوی بدون منابع تولید پراکنده انجام پذیرفته است. سپس از محدودساز جریان خطا به منظور محدودسازی جریان خطای تزریقی منابع تولید پراکنده و حفظ هماهنگی بین رله‌ها با تنظیمات قبلی، استفاده شده است. این روش برای نصب یک و یا دو منبع تولید پراکنده مورد استفاده قرار گرفته است. مشکل اساسی این روش آن است که برای شبکه‌ای با درصد نفوذ بالا از منابع تولید پراکنده کاربردی نمی‌باشد. در [۶] هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی برای ریزشبکه‌ها و با در نظر گرفتن هر دو وضعیت بهره‌برداری ریزشبکه شامل جزیره‌ای و متصل به شبکه انجام شده است. در هر دو مقاله اشاره‌ای به پایداری ژنراتورهای سنکرون شبکه در زمان پاکسازی خطا نشده است.

منابع تولید پراکنده مانند سایر عناصر سیستم قدرت باید دارای سیستم حفاظتی باشند. این سیستم حفاظتی علاوه بر حفاظت منبع در مقابل خطاهای شبکه باید شبکه را نیز از صدمات ناشی از حضور منبع تولید پراکنده در حین خطا حفظ نماید. سیستم حفاظتی منبع تولید پراکنده شامل دو بخش حفاظت نقطه اتصال و رله‌های واحد منبع تولید پراکنده می‌شود. حفاظت نقطه اتصال اغلب در نقطه اتصال مشترک بین منبع تولید پراکنده و شبکه نصب می‌شود که عملکردهای زیر را بر عهده دارد [۷]:

- جداسازی منبع تولید پراکنده یا نقطه اتصال مشترک هنگامی که منبع تولید پراکنده عملکرد موازی با شبکه را از دست می‌دهد؛
- حفاظت شبکه توزیع در مقابل صدمات ناشی از اتصال منبع تولید پراکنده که شامل مشارکت در جریان خطاهای شبکه و ایجاد اضافه ولتاژهای گذرای می‌باشند؛
- حفاظت منبع تولید پراکنده در مقابل صدمات احتمالی که توسط شبکه توزیع به منبع تولید پراکنده تحمیل می‌شود. حفاظت نقطه اتصال منبع تولید پراکنده می‌بایست تا حد ممکن با سیستم حفاظت شبکه توزیع هماهنگ باشد تا از خروج بی مورد منبع تولید پراکنده در خطاهای شبکه جلوگیری نماید. حفاظت‌های واحد، منابع تولید پراکنده را هنگام وقوع خطاهای داخلی ژنراتور یا وقوع شرایط غیرعادی بهره‌برداری مانند اضافه سرعت از شبکه خارج

عنوان عاملی مهم در پایداری گذرای منبع تولید پراکنده سنکرون در این بخش شرح داده می‌شود.

۱-۲- بیان ریاضی مسئله هماهنگی حفاظتی بهینه

زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان، تابعی معکوس از جریان خطای عبوری از آن‌ها می‌باشد. این تابع توسط دو پارامتر تنظیم می‌گردد. پارامتر اول تنظیم زمانی (TDS) و پارامتر دیگر جریان آغاز عملکرد (I_p) هستند. پارامتر جریان آغاز عملکرد رله حداقل جریانی است که در صورت عبور آن از رله، عملیات پاکسازی خطا توسط رله آغاز می‌گردد و متناسب با حداکثر جریان بار عبوری از رله تعیین می‌شود. تابع مشخصه معکوس زمانی عملکرد رله‌های اضافه جریان در رابطه (۱) ارائه شده است.

$$t = TDS \frac{A}{\left(\frac{I_{sc}}{I_p}\right)^B - 1} \quad (1)$$

در این رابطه I_{sc} جریان اتصال کوتاه عبوری از رله و پارامترهای A و B ثابت‌هایی هستند که وابسته به نوع مشخصه عملکردی رله اضافه جریان (معکوسی، خیلی معکوسی) تعیین می‌شوند. تابع هدف مسئله هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان جهتی، کمینه‌سازی مجموع زمان عملکرد رله‌های موجود در شبکه توزیع می‌باشد. تابع هدف هماهنگی حفاظتی مطابق رابطه (۲) می‌باشد.

$$\text{Minimize } T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (t_{ij}^p + \sum_{k=1}^K t_{ij}^{b_k}) \quad (2)$$

در این رابطه i شماره محل خطا و N تعداد کل محل خطاهایی که جهت برقراری هماهنگی حفاظتی مورد بررسی قرار می‌گیرد، j شماره رله اصلی و M تعداد کل رله‌های اصلی برای خطای i ام می‌باشند. در این رابطه p مشخص کننده رله اصلی و b نمایشگر رله پشتیبان می‌باشد. k شماره تعداد رله‌های پشتیبان و K تعداد رله‌های پشتیبان برای رله اصلی z ام می‌باشد و نهایتاً t مشخص کننده زمان عملکرد رله است که از رابطه (۱) حاصل می‌گردد.

اما شرط هماهنگی بین رله اصلی و پشتیبان در کمینه‌سازی تابع مذکور باید مدنظر قرار گیرد. این شرط به منظور اطمینان از این موضوع است که رله اصلی پیش از رله پشتیبان عملکرد داشته باشد. بدین منظور فاصله زمانی بین عملکرد رله اصلی و پشتیبان باید حداقلی داشته باشد که به عنوان پارامتر حداقل فاصله زمانی هماهنگی معرفی می‌شود. این مقدار وابسته به تجهیزات کلیدزنی و الکترومکانیکی یا عددی بودن رله، مقداری بین ۰/۲ تا ۰/۳ ثانیه خواهد داشت. این قید مسئله در رابطه (۳) بیان شده است.

$$t_{ij}^{b_k} - t_{ij}^p \geq CTI \quad \forall i, \{j, k\} \quad (3)$$

قید دیگر مسئله مذکور محدوده تغییرات پارامترهای TDS و I_p می‌باشند که باید در انتخاب جهت ایجاد هماهنگی رعایت شوند این دو قید در رابطه (۴) به صورت ریاضی بیان شده‌اند. با این توضیح که

می‌کنند. وقوع ناپایداری گذرا نیز از جمله مسائلی است که توسط رله‌های واحد منبع تولید پراکنده سنکرون به عنوان شرایط غیر عادی بهره‌برداری قابل تشخیص بوده و می‌تواند موجب خروج منبع تولید پراکنده شود. سیستم حفاظتی شبکه توزیع و حفاظت نقطه اتصال منبع تولید پراکنده باید از وقوع ناپایداری گذرا در منبع تولید پراکنده جلوگیری کنند. در غیر این صورت علاوه بر این که منبع تولید پراکنده دچار خروج بی مورد در خطاهای شبکه توزیع می‌شود، دچار تنش‌های مکانیکی می‌شود [۸].

پایداری گذرا به عنوان توانایی سیستم قدرت در حفظ سنکرون بودن در پی وقوع اختلالات گذرا تعریف می‌شود. در گذشته پایداری گذرای شبکه توزیع بدون حضور منابع تولید پراکنده موضوعیت نداشت. اما با اتصال منابع تولید پراکنده دوار به شبکه توزیع بررسی پایداری گذرای شبکه توزیع اهمیت می‌یابد. در حقیقت پایداری منابع تولید پراکنده متصل به شبکه توزیع، به عنوان پایداری گذرای شبکه توزیع تعبیر می‌شود. در [۹] نشان داده شده است که ناپایداری گذرا برای منابع تولید پراکنده بر اثر وقوع خطا در شبکه توزیع امکان‌پذیر است و سیستم حفاظتی شبکه توزیع می‌بایست با پاک‌سازی سریع خطا از بروز ناپایداری گذرا جلوگیری نماید. وقوع ناپایداری گذرا برای منبع تولید پراکنده هنگامی رخ می‌دهد که زمان رفع خطا از زمان رفع خطای بحرانی برای منبع تولید پراکنده بیشتر شود.

با توجه به اینرسی پایین منابع تولید پراکنده سنکرون و زمان بالای پاک‌سازی خطا در شبکه‌های توزیع، وقوع ناپایداری گذرا در ژنراتورهای سنکرون می‌بایست در طراحی سیستم حفاظت اضافه جریان شبکه توزیع مدنظر قرار گیرد.

در این مقاله هماهنگی رله‌های اضافه جریان جهتی با در نظر گرفتن ناپایداری گذرا منابع تولید پراکنده سنکرون انجام می‌شود. واحدهای تولید همزمان برق و گرما صنعتی و دیزل ژنراتورها اغلب توسط ژنراتورهای سنکرون به شبکه توزیع متصل می‌شوند. با توجه به این موضوع که در ایران، بخش بزرگی از منابع تولید پراکنده را ژنراتورهای سنکرون تشکیل می‌دهند، بررسی حفاظت اضافه جریان شبکه توزیع از دیدگاه پایداری گذرا اهمیت می‌یابد. در این مقاله پس از بیان مسئله هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان جهتی با در نظر گرفتن پایداری گذرا، هماهنگی حفاظتی برای یک شبکه توزیع شعاعی با حضور منابع تولید پراکنده سنکرون انجام می‌شود. همچنین استفاده از مشخصه عملکردی آنی رله‌های اضافه جریان به عنوان راهکاری جهت پیشگیری از وقوع ناپایداری گذرا پیشنهاد می‌شود.

۲- بیان مسئله و روش شبیه‌سازی

در این بخش نحوه اعمال پایداری گذرای منابع تولید پراکنده با ژنراتور سنکرون در مسئله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی بیان می‌گردد. همچنین نحوه مدل‌سازی سیستم تحریک ژنراتور سنکرون به

مقدار پارامتر I_p به منظور عدم عملکرد رله در بارگذاری بیش از حد خط توزیع باید از حداکثر جریان بار عبوری از رله بیشتر بوده و از سوی دیگر جهت ایجاد حساسیت نسبت به خطا و پاکسازی مناسب خط، I_p باید از حداقل جریان خطای عبوری از رله که در آن خطا نقش رله اصلی یا رله پشتیبان را دارد، کوچکتر باشد.

$$I_{pj-min} \leq I_{pj} \leq I_{pj-max}, \quad \forall j \quad (4)$$

$$TDS_{j-min} \leq TDS_j \leq TDS_{j-max}, \quad \forall j$$

در این مطالعه از روش جستجوی هم‌نمایی به عنوان یک روش نوین و کارآمد، جهت دستیابی به تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی استفاده می‌شود. با توجه به این موضوع که روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری طی روند بهینه‌سازی ساختاری را جهت مشارکت قیود ندارند، معمولاً قیود مسئله را در تابع هدف اعمال نفوذ می‌کنند. مسئله هماهنگی حفاظتی رله‌ها به دلیل وجود قیود زیاد بر اثر شرط هماهنگی حفاظتی بین زوج‌های حفاظتی به عنوان مسئله‌ای مقید و پیچیده مطرح می‌باشد. در این مقاله قیود هماهنگی حفاظتی توسط روش تابع جریمه با ضریب جریمه ثابت در تابع هدف لحاظ می‌شوند. لذا تابع هدف مسئله هماهنگی حفاظتی به صورت رابطه (۵) تعریف می‌گردد.

$$\text{Minimize } T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M ((t_{ij}^p + \sum_{k=1}^K t_{ij}^{b_k})) \quad (5)$$

$$+ \lambda(\max(0, -t_{ij}^{b_k} + t_{ij}^p + CTI)))$$

۲-۲- اعمال پایداری گذرا در مسئله هماهنگی بهینه

رله‌ها

پس از طراحی سیستم حفاظتی اضافه جریان شبکه توزیع بر مبنای بکارگیری از رله‌های اضافه جریان جهتی و تعیین شدن زمان عملکرد رله‌های شبکه در برابر خطاها، باید این موضوع را مدنظر قرارداد که زمان پاک‌سازی خطا حاصل از تنظیمات حفاظتی منجر به ناپایداری گذرای منابع تولید پراکنده دوار نگردد. این موضوع از دو بعد اهمیت دارد، ابتدا آنکه ناپایداری گذرا می‌تواند منجر به آسیب‌های مکانیکی به منبع تولید پراکنده گردد و از سوی دیگر با عملکرد حفاظت‌های واحد موجود در منبع تولید پراکنده مانند حفاظت اضافه سرعت یا رله خروج از قطب، منبع تولید پراکنده پیش از زمان معین شده توسط تنظیمات از مدار خارج می‌شود. بنابراین کارایی طرح حفاظتی در صورت وقوع ناپایداری گذرا به سبب زمان پاک‌سازی خطای طولانی از بین می‌رود. رفتار ژنراتورهای سنکرون در اختلالات شبکه توسط رابطه شناخته شده (۶) بدست می‌آید:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} (P_m - P_e) \quad (6)$$

در این رابطه δ زاویه روتور، H ثابت اینرسی ژنراتور بر حسب ثانیه، ω_s سرعت سنکرون روتور بر حسب رادیان بر ثانیه و P_m و P_e به ترتیب توان مکانیکی و توان الکتریکی ژنراتور سنکرون هستند. بر اساس روش معیار سطوح برابر جهت پایداری ژنراتور سنکرون زمان رفع خطای بحرانی (t_{cr}) ژنراتور سنکرون به ازای یک خطای مشخص طبق رابطه (۷) حاصل می‌شود [۱۰].

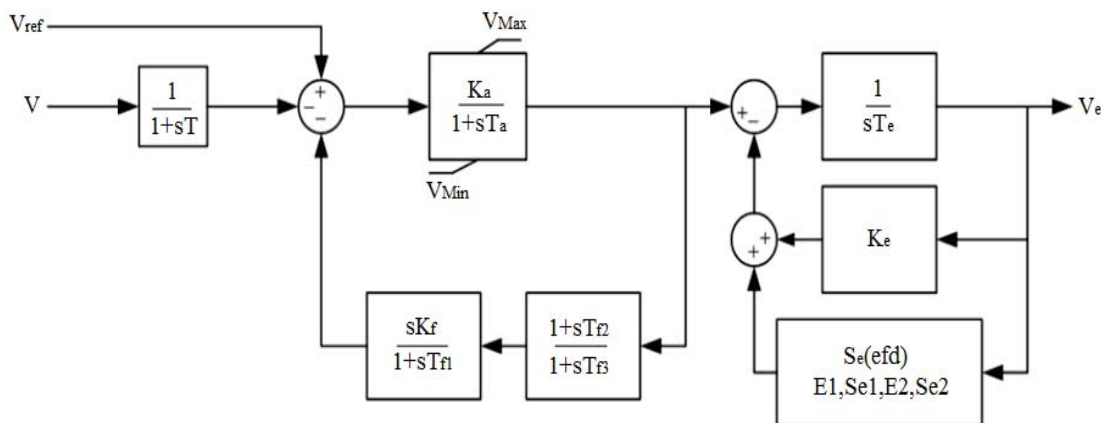
$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega_s P_m}} \quad (7)$$

در این رابطه δ_{cr} زاویه روتور بحرانی و δ_0 زاویه روتور اولیه هنگام وقوع خطا می‌باشد. این رابطه برای یک سیستم دو ماشینی بیان شده است. اما برای شبکه توزیع زمان رفع خطای بحرانی برای هر ژنراتور با انجام شبیه‌سازی قابل استحصال می‌باشد [۹]. در این مقاله به منظور بدست آوردن زمان رفع خطای بحرانی برای یک خطای مشخص ابتدا خطا با زمان طولانی (۲ ثانیه) ایجاد می‌شود. سپس در صورت ناپایداری طول زمان خطا نصف شده و شبیه‌سازی مجدد انجام می‌شود. در صورت وقوع ناپایداری روند فوق ادامه پیدا می‌کند اما در صورت پایداری ژنراتور، میانگین طول زمان خطای گام قبل و زمان فعلی به عنوان طول زمان خطای جدید شبیه‌سازی می‌شود. این روند تا جایی که زمان رفع خطای بحرانی با دقت مناسب (میلی ثانیه) حاصل گردد، ادامه می‌یابد.

پس از بدست آوردن زمان رفع خطای بحرانی برای تمامی منابع تولید پراکنده دوار موجود در شبکه توزیع، برای هر خطای مشخص زمان عملکرد رله اصلی باید کمتر از کمترین زمان رفع خطای بحرانی حاصل شده از روند ذکر شده برای منابع تولید پراکنده باشد. باید توجه داشت که زمان رفع خطا شامل مجموع زمان عملکرد رله و زمان عملکرد مدارشکن موجود در شبکه است. لذا حداکثر زمان عملکرد رله اصلی بر مبنای کاستن زمان عملکرد کلید قدرت از زمان رفع خطای بحرانی حاصل می‌شود. لذا علاوه بر قیودی که تاکنون پیرامون مسئله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان مطرح گردید، قید رابطه (۸) باید مدنظر قرار گیرد.

$$t_{ij}^p \leq \text{Min}\{CCT_i^n - t_{CB}\} \quad \forall i, j, n \quad (8)$$

که در این رابطه t_{ij}^p زمان عملکرد رله اصلی شماره j در خطای شماره i می‌باشد. CCT_i^n زمان رفع خطای بحرانی به ازای خطای شماره i و برای منبع تولید پراکنده شماره n می‌باشد. همچنین t_{CB} زمان عملکرد کلید قدرت در رفع خطای اتصال کوتاه است. مطابق این قید زمان عملکرد رله‌های اصلی در خطای اتصال کوتاه برای هر محل خطا باید از کمترین زمان رفع خطای بحرانی حاصل شده برای تمامی منابع تولید پراکنده سنکرون کمتر باشد.



شکل (۱): سیستم تحریک IEEE نوع AC5A [۱۱]

خطاهای شبکه استحصال نموده و بر اساس آن طراحی حفاظت اضافه جریان شبکه را پایه‌ریزی نمود.

۳-۲- مدل‌سازی سیستم تحریک منبع تولید

پراکنده سنکرون

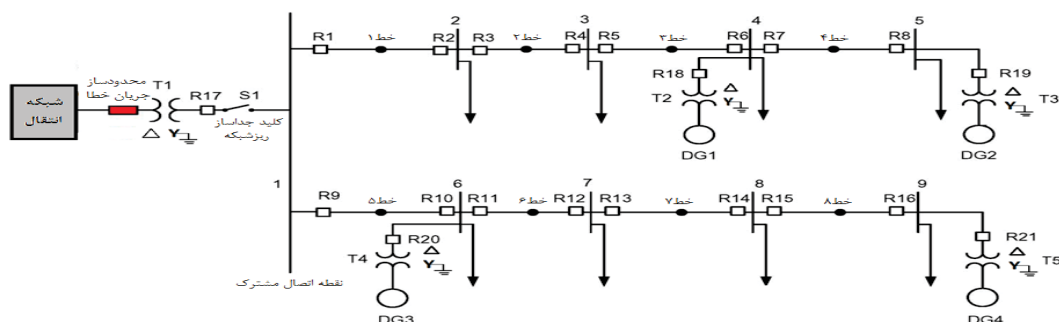
در [۸] نشان داده است که سیستم تحریک نقش بسزایی در زمان رفع خطای بحرانی منابع تولید پراکنده دارد. بنابراین بدون مدل‌سازی دقیق سیستم تحریک ژنراتور سنکرون نمی‌توان تخمین مناسبی از زمان رفع خطای بحرانی ژنراتور سنکرون داشت. سیستم تحریک منابع تولید پراکنده سنکرون در دو حالت کنترلی ضریب قدرت ثابت و ولتاژ ترمینال ثابت، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله برای سیستم تحریک ژنراتور سنکرون از مدل استاندارد IEEE نوع AC5A استفاده خواهد شد. این مدل برای سیستم‌های تحریک بدون جاروبک به کار می‌رود که اغلب برای ژنراتورهای مقیاس کوچک کاربرد دارد [۱۱]. در شکل (۱) این مدل استاندارد نمایش داده شده است. سیاست کنترلی این سیستم تحریک ولتاژ ترمینال ثابت است.

نکته مهمی که باید بیان گردد آن است که از دیدگاه حفاظتی و به منظور طراحی سیستم حفاظتی اضافه جریان شبکه توزیع، سیستم‌های کنترلی منابع تولید پراکنده سنکرون از جنبه پایداری گذرا اهمیت دارند. بنابراین هر گونه سیستم کنترلی متفاوت از آنچه در فوق بیان گردید، قابل پیاده‌سازی بوده و باید بر اساس آن پایداری گذرای منبع تولید پراکنده در برابر خطاهای اتصال کوتاه شبکه مورد مطالعه واقع گردد. قاعدتاً استراتژی‌های کنترل تحریک، مانند کنترل ضریب قدرت ثابت، باید با جزئیات کامل مدل‌سازی شده تا بتوان تخمین مناسبی از عملکرد ژنراتور در مقابله با

۳- شبيه‌سازی و نتایج

۳-۱- شبکه تحت مطالعه

به منظور اجرای طرح حفاظتی پیشنهاد شده شبکه توزیع شکل (۲) مدنظر قرار می‌گیرد. این شبکه توزیع واقعی از کشور کانادا با سطح ولتاژ ۱۲/۴۷ کیلوولت شامل دو فیدر مشابه با امپدانس $0.0 + j1529/1406 \Omega$ اهم بر کیلومتر می‌باشد که توسط شبکه‌ای با سطح ولتاژ ۱۱۵ کیلوولت تغذیه می‌شود [۶]. شبکه توسط یک ترانسفورماتور با قدرت ۲۰ مگاوات‌آمپر به شبکه اصلی متصل بوده و طول هر قسمت از فیدر ۵۰۰ متر است. چهار منبع تولید پراکنده سنکرون با ظرفیت ۵ مگاوات‌آمپر به این شبکه متصل هستند که توسط ترانسفورماتورهایی با همین ظرفیت و با نسبت تبدیل ۶/۳ کیلوولت به ۱۲/۴۷ کیلوولت بار شبکه را تأمین می‌کنند. بارهای شبکه همگی برابر ۲ مگاوات و ضریب قدرت ۰/۹ می‌باشند. اطلاعات ژنراتورهای سنکرون مطابق [۱۱] استفاده شده است. ۲۱ رله اضافه جریان متناسب با ساختار شبکه جهت حفاظت منابع تولید پراکنده و خطوط در این شبکه قرار داده شده است که در شکل (۲) مشخص شده‌اند. هر رله اضافه جریان باید قادر باشد تا خطای رخ داده در باس ابتدایی و باس انتهایی خط تحت حفاظت خود را در زمان مناسب پاکسازی نماید. در این مقاله جهت دستیابی به تنظیمات حفاظتی بهینه جریان خطای سه فاز روی نیمه خطوط مدنظر قرار می‌گیرد [۶].



شکل (۲): شبکه توزیع مورد مطالعه با حضور منابع تولید پراکنده سنکرون

۲-۳- تنظیمات بهینه رله‌ها

جهت حل مسئله هماهنگی بهینه رله‌های اضافه جریان در شبکه مذکور، پارامترهای A و B برای رله با مشخصه عملکردی استاندارد معکوسی به ترتیب برابر 0.02 و 0.14 هستند [۵]. حداقل فاصله زمانی هماهنگی برابر 200 میلی‌ثانیه منظور می‌گردد. محدوده تغییرات پارامتر تنظیم زمانی بین 0.05 تا 1 مدنظر قرار می‌گیرد. با پیاده‌سازی شبکه توزیع بیان شده در نرم‌افزار DigSILENT محاسبات اتصال کوتاه به ازای خطا در میانه خطوط انجام گردید. پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم جستجوی هم‌نویایی جهت دستیابی به تنظیمات بهینه در جدول (۱) ذکر شده است. با استفاده از این پارامترهای الگوریتم جستجوی هم‌نویایی، تنظیمات حفاظتی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی مطابق جدول (۲) حاصل گردید. تنظیم جریانی عملکرد بر حسب آمپر بیان شده است که در انجام تنظیمات رله متناسب با نسبت تبدیل ترانسفورماتور جریان در رله اعمال خواهد شد. تابع هدف حاصل شده که مجموع زمان عملکرد تمامی رله‌ها اعم از رله اصلی و پشتیبان در خطای اتصال کوتاه سه فاز در میانه تمامی خطوط شبکه می‌باشد، برابر $38/50$ ثانیه حاصل شده است.

جدول (۳) زمان عملکرد رله‌های اصلی و پشتیبان را به ازای خطا در میانه خطوط مختلف ارائه می‌دهد. همانطور که مشخص است الگوریتم در تمامی زوج‌های حفاظتی توانسته قید هماهنگی حفاظتی را رعایت نماید. مشابه جدول (۳) با انجام محاسبات اتصال کوتاه و استفاده از تنظیمات فوق برای خطا در ابتدا و انتهای خطوط نیز قابل ارائه است. پس از تعیین شدن زمان عملکرد رله‌های اضافه جریان شبکه، می‌بایست پایداری گذرای منابع تولید پراکنده را هماهنگی انجام شده مدنظر قرار داد.

۳-۳- بررسی پایداری گذرا در تنظیمات بهینه

به منظور بررسی پایداری گذرا منابع تولید، ابتدا باید سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون مدل‌سازی شود. مطابق آنچه در بخش دوم بیان گردید، برای تمامی منابع تولید پراکنده موجود در شبکه از مدل سیستم تحریک IEEE نوع AC5A استفاده می‌شود.

پارامترهای سیستم تحریک مورد استفاده در این مطالعه در [۱۱] ارائه شده است.

جدول (۱): پارامترهای الگوریتم جستجوی هم‌نویایی در حل مسئله

هماهنگی بهینه						
			تعداد	BW	BW	تعداد
			تکرار	برای	برای	تکرار
			جدید در هر	تنظیم	تنظیم	تکرار
			تکرار	زمانی	جریانی	تکرار
HMS	HMC	PAR	۵۰	۰/۰۵	۱۰۰	۲۰۰۰
۵۰	۰/۹	۰/۳	۵۰	۰/۰۵	۱۰۰	۲۰۰۰

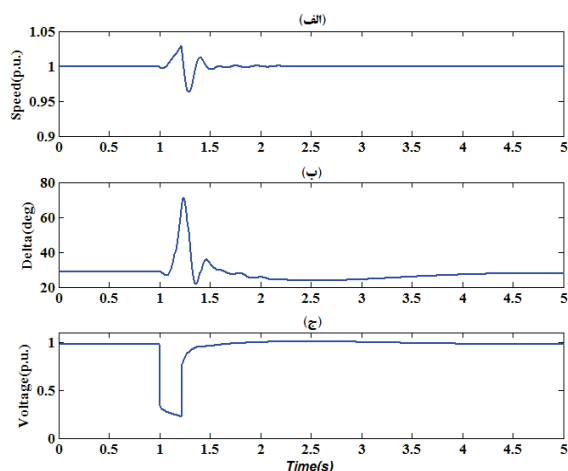
جدول (۲): تنظیمات بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی

رله	TDS	Ip(A)	رله	TDS	Ip(A)
R1	۰/۳۸۰۸	۶۱۹/۷۵	R12	۰/۱۲۸۶	۴۵۱/۱۹
R2	۰/۱۶۰۴	۵۷۵/۶۱	R13	۰/۱۲۳۶	۶۹۴/۳۰
R3	۰/۲۲۹۲	۴۳۱/۲۵	R14	۰/۲۶۳۷	۲۸۸/۲۵
R4	۰/۲۴۵۳	۴۳۱/۲۵	R15	۰/۰۵۰۰	۴۴۷/۱۸
R5	۰/۱۴۹۷	۳۳۰/۸۷	R16	۰/۴۷۷۱	۱۴۵/۱۱
R6	۰/۳۸۶۳	۲۸۸/۲۵	R17	۰/۱۲۵۹	۳۲۷۰/۰۱
R7	۰/۰۵۰۰	۳۹۹/۶۴	R18	۰/۲۷۱۰	۳۱۲/۵۰
R8	۰/۴۴۹۱	۱۴۵/۰۱	R19	۰/۳۱۴۱	۳۱۲/۵۰
R9	۰/۳۰۱۵	۶۵۵/۶۳	R20	۰/۱۹۶۱	۳۱۲/۵۰
R10	۰/۱۷۱۳	۵۷۲/۵۰	R21	۰/۳۳۷۹	۳۱۲/۵۰
R11	۰/۲۵۶۶	۵۲۱/۶۱	تابع هدف = $38/50$ ثانیه		

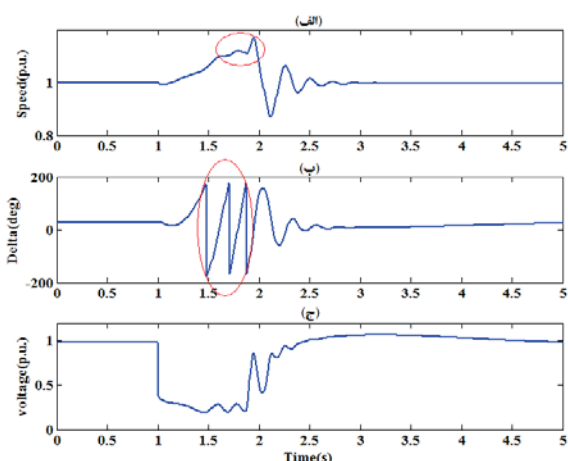
می‌بایست بیان کرد که منابع تولید پراکنده در تنظیم فرکانس سیستم قدرت مشارکتی ندارند، بنابراین در حالت کنترلی توان اکتیو ثابت بهره‌برداری می‌شوند. بنابراین مدل‌سازی سیستم گاورنر انجام نشده و توان مکانیکی ورودی منبع تولید پراکنده طی وقوع خطا ثابت مدنظر قرار می‌گیرد.

برای نمونه ابتدا خطای سه فاز در میانه خط ۴ مدنظر قرار می‌گیرد. در این خطا رله R7 مطابق تنظیمات انجام شده پس از گذشتن 114 میلی‌ثانیه از خطا فرمان عملکرد را برای کلید ارسال می‌کند. با در نظر گرفتن زمان عملکرد کلید برابر 100 میلی‌ثانیه

به سبب عبور از زاویه روتور بحرانی سرعت آن پس از خطا تا ۱۷ درصد سرعت سنکرون افزایش می‌یابد و ژنراتور سنکرون بودن خود را از دست می‌دهد. در این حالت رله اضافه سرعت یا رله خروج از قطب به عنوان حفاظت واحد منبع تولید پراکنده، ژنراتور را به سرعت از مدار خارج می‌کنند. اگر رله اضافه سرعت منبع تولید پراکنده برای عملکرد در ۱/۱ پریونیت سرعت تنظیم شده باشد، در این حالت ژنراتور به سبب عملکرد دیر هنگام سیستم حفاظتی طراحی شده، برای خطایی که ضرورتی برای خروج آن نیست از مدار خارج می‌شود و از سوی دیگر دچار استرس‌های حرارتی و مکانیکی می‌شود.



شکل (۳): تغییرات پارامترهای DG1 در ازای خطای سه فاز روی نیمه خط ۴ (الف) سرعت (ب) زاویه روتور (ج) ولتاژ شین



شکل (۴): تغییرات پارامترهای DG1 در ازای خطای نیمه خط ۵ (الف) سرعت (ب) زاویه روتور (ج) ولتاژ شین

خطا پس از ۲۱۴ میلی‌ثانیه از سمت شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده DG3، DG1 و DG4 پاکسازی خواهد شد.

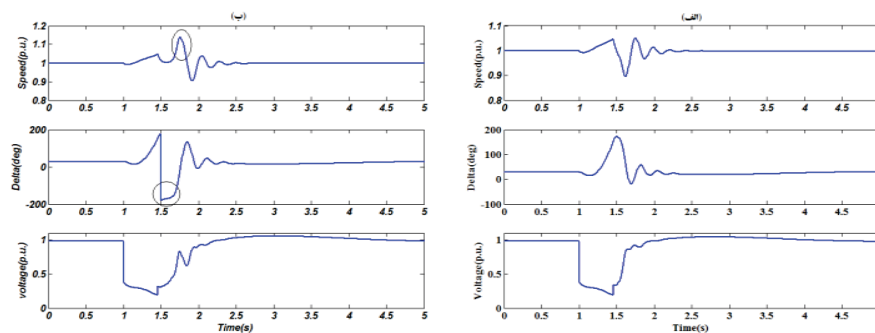
در این حالت نمودارهای شکل (۳) روند تغییرات سرعت، زاویه روتور و ولتاژ شین DG1 را نمایش می‌دهند که خروجی ماژول محاسبات گذرای الکترومکانیکی نرم‌افزار DigSIELNT می‌باشند. قابل ذکر است که خطا در لحظه $t=1$ ثانیه رخ داده است و ولتاژ مرجع سیستم تحریک روی ۰/۹۸ پریونیت تنظیم شده است. به منظور بررسی بحرانی‌ترین حالت از دیدگاه پایداری گذرا توان خروجی اکتیو ژنراتور، روی حداکثر مقدار و برابر ۴ مگاوات هنگام بروز خطا اعمال شده است. مطابق نتایج مشخص است که منبع تولید پراکنده DG1 پس از پاکسازی خطا توسط R7 پایدار مانده و به کار خود ادامه می‌دهد. چنین وضعیتی برای منابع تولید پراکنده DG2 و DG3 نیز به وقوع می‌پیوندد و پایداری این دو ژنراتور نیز پس از رفع خطا باقی می‌ماند.

حال خطای سه فاز را بر روی نیمه خط ۵ مدنظر قرار می‌گیرد. در این حالت رله R9 پس از ۷۷۰/۹ میلی‌ثانیه فرمان عملکرد را برای کلید ارسال می‌کند. لذا زمان رفع خطا برابر ۸۷۰/۹ میلی‌ثانیه پس از خطا می‌باشد، تا شبکه اصلی و منابع تولید پراکنده DG1 و DG2 بتوانند به کار عادی خود بازگشته و از این طریق خروج منابع تولید پراکنده در پی خطا به حداقل برسد. مشابه شرایط یاد شده برای خطا روی خط ۴ برای این خطا نیز اعمال شده است، شکل (۴) روند تغییرات سرعت و ولتاژ منبع تولید پراکنده DG1 را حین و پس از خطا نمایش می‌دهد.

جدول (۳): زمان عملکرد بهینه رله‌های اضافه جریان با مشخصه استاندارد معکوسی به ازای خطا در میانه خطوط

محل خطا	زمان عملکرد رله‌های اصلی (p) و پشتیبان (b) بر حسب ثانیه					
	b2	b1	p2	b2	b1	p1
خط ۱	-	R4	R2	R17	R10	R1
	-	۱/۱۲۲۵	۰/۹۱۱۰	۱/۰۱۹۶	۰/۹۹۰۴	۰/۷۰۰۲
خط ۲	-	R6	R4	-	R1	R3
	-	۱/۳۷۰۰	۱/۱۰۳۲	-	۰/۷۳۰۹	۰/۵۲۲۲
خط ۳	R18	R8	R6	-	R3	R5
	۱/۵۶۷۹	۱/۵۸۳۵	۱/۳۵۲۴	-	۰/۵۴۲۰	۰/۳۲۳۴
خط ۴	-	R19	R8	R18	R5	R7
	-	۱/۸۱۲۷	۱/۵۶۸۳	۱/۶۰۹۴	۰/۳۳۵۲	۰/۱۱۴۰
خط ۵	R20	R12	R10	R17	R2	R9
	۱/۱۳۶۱	۱/۱۳۴۳	۰/۹۳۴۰	۱/۰۱۹۶	۰/۹۷۸۵	۰/۷۷۰۹
خط ۶	-	R14	R12	R20	R9	R11
	-	۱/۴۴۴۸	۱/۰۹۹۲	۱/۱۶۰۴	۰/۸۰۷۶	۰/۶۰۴۲
خط ۷	-	R16	R14	-	R11	R13
	-	۱/۶۶۷۸	۱/۴۲۹۱	-	۰/۶۳۰۰	۰/۳۳۹۶
خط ۸	-	R21	R16	-	R13	R15
	-	۱/۹۳۲۷	۱/۶۵۷۱	-	۰/۳۵۵۳	۰/۱۲۰۷

با توجه به نمودار اگر چه منبع تولید پراکنده به خاطر سیستم کنترل تحریک بیان شده در گذر زمان به سرعت پایدار می‌رسد اما



شکل (۵): تغییرات پارامترهای DG1 در ازای خطای روی نیمه خط ۵ الف - رفع خطای ۴۵۰ ms ب - رفع خطای ۴۵۵ ms

خطای بحرانی برای رله‌های فرد در کنار هر زمان رفع بحرانی نام منبع تولید پراکنده‌ای که منجر به این زمان رفع خطای بحرانی شده است، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله خطا از منابع تولید پراکنده زمان رفع خطای بحرانی نیز افزایش می‌یابد. با توجه به زمان بحرانی رفع خطا و زمان عملکرد بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی مشخص می‌شود که رله‌های R1, R3, R9 و R11 زمان رفع خطای بحرانی را در خطاهای شبکه رعایت نمی‌کنند و باعث می‌شوند که منابع تولید پراکنده فیدرهای مجاور دچار افزایش سرعت خروج بی مورد شوند. در جدول (۴) رله‌هایی که زمان رفع خطای بحرانی را با در نظر گرفتن زمان عملکرد کلید قدرت (۱۰۰ میلی ثانیه) رعایت نمی‌کنند با علامت ستاره مشخص شده‌اند. با توجه به این موضوع که تنظیمات موجود پاسخ بهینه حفاظتی را شامل می‌شوند، استفاده از رله‌های اضافه جریان جهتی با مشخصه معکوسی استاندارد نمی‌تواند پایداری گذرا منابع تولید پراکنده سنکرون را تضمین نماید. به منظور رفع مشکل ذکر شده دو راهکار را می‌توان استفاده نمود. ابتدا آنکه از مشخصه خیلی معکوسی یا مشخصه فوق‌العاده معکوسی رله‌های اضافه جریان استفاده نمود و تنظیمات بهینه را مجدداً توسط الگوریتم جستجوی هم‌نوایی و با اعمال قید بیان شده در رابطه (۸) بدست آورد.

اما می‌توان با حفظ تنظیمات با مشخصه استاندارد معکوسی باید از تنظیم مشخصه آنی عملکرد رله اضافه جریان نیز استفاده نمود. به این منظور با انجام مطالعات اتصال کوتاه می‌توان این تنظیم را به گونه‌ای انتخاب نمود تا علاوه بر حفظ هماهنگی حفاظتی بتوان از وقوع ناپایداری گذرا پیشگیری نمود.

برای مثال جهت تنظیم جریان عملکرد آنی برای رله R1 جریان خطا سه فاز را روی انتهای خط ۱ را محاسبه کرده و جریانی بزرگتر از آن برای عملکرد آنی رله در نظر گرفته می‌شود. با این راهکار تنها برای خطاهای سه فاز روی خط ۱ رله به صورت آنی عمل کرده و هماهنگی آن با رله R3 تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد. در جدول (۵) تنظیمات جریان عملکرد آنی (I_{int}) را برای رله‌های اضافه جریان نمایش می‌دهد. زمان عملکرد برای مشخصه آنی رله ۵۰ میلی ثانیه در نظر گرفته می‌شود. با این تنظیمات می‌توان از ناپایداری ژنراتورهای سنکرون با خصوصیات

با توجه به توضیحات می‌توان گفت که طرح حفاظتی شامل رله‌های اضافه جریان جهتی با مشخصه معکوسی نمی‌تواند پایداری گذرای ژنراتورهای سنکرون را در خطاهای شبکه تأمین نماید و تنها به عنوان یک راه حل ریاضی در حل مسئله هماهنگی رله‌ها قابل قبول است. به منظور طراحی سیستم حفاظتی مناسب باید زمان بحرانی رفع خطا برای خطاهای شبکه حاصل شود و بر اساس آن‌ها هماهنگی حفاظتی رله‌ها انجام شود.

شکل (۵) تغییرات سرعت و زاویه روتور و ولتاژ شین منبع تولید پراکنده DG1 را برای زمان پاک‌سازی خطای ۴۵۰ میلی ثانیه و ۴۵۵ میلی ثانیه به ازای خطا روی نیمه خط ۵ نمایش می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده مشخص است که برای زمان رفع خطای ۴۵۰ میلی ثانیه ژنراتور از پایداری زاویه روتور برخوردار است. اما برای زمان رفع خطای ۴۵۵ میلی ثانیه زاویه روتور از زاویه روتور بحرانی عبور کرده و سرعت آن از ۱/۱ پریرینیت فراتر می‌رود. لذا با احتساب عملکرد رله اضافه سرعت در ۱/۱ برابر سرعت سنکرون و با گام‌های ۵ میلی ثانیه‌ای زمان رفع خطای بحرانی برای خطای سه فاز در میانه خط ۵ برابر ۴۵۰ میلی ثانیه می‌باشد. در شکل‌های (۴) و (۵) قسمت‌هایی که اطراف آن مشخص شده است نواحی هستند که سرعت و فاز از حدود مجاز پایداری (به ترتیب ۱/۱ پریرینیت و ۱۸۰ درجه) گذشته‌اند و در نتیجه ژنراتور دچار ناپایداری گردیده است. با همین روش می‌توان زمان رفع خطای بحرانی را برای تمامی خطاهای شبکه بدست آورد تا با اعمال آن‌ها در مسئله هماهنگی حفاظتی بتوان از وقوع ناپایداری گذرا برای ژنراتورهای شبکه پیشگیری نمود. جدول (۴) حداقل زمان رفع خطای بحرانی حاصل شده از شبیه‌سازی را برای خطاهای سه فاز شبکه ارائه می‌دهد. زمان رفع خطای بحرانی تنها برای رله‌های با شماره فرد حاصل شده است. زیرا برای رله‌ها با شماره زوج، عملکرد رله باعث ایجاد جزیره کنترل نشده در پایین دست رله خواهد شد.

لذا حفاظت ضدجزیره‌ای موجب خروج منبع تولید پراکنده خواهد شد و در هر صورت ژنراتور از مدار خارج خواهد شد. اما برای رله‌های فرد زمان پاک‌سازی خطا نباید موجب شود که ژنراتورهای موجود در فیدر مجاور و بالادست خطا دچار ناپایداری زاویه روتور و افزایش سرعت بیش از ۱۰ درصد شوند. برای ارائه اطلاعات بیشتر پیرامون زمان رفع

کنترلی بیان شده در خطاهای سه فاز شبکه جلوگیری نمود و عملکرد رله‌های اضافه جریان را جهت جلوگیری از وقوع ناپایداری گذرا منابع تولید پراکنده تطبیق داد.

جدول (۴): زمان رفع خطای بحرانی به ازای خطا در خطوط

محل خطا	زمان رفع خطای بحرانی (میلی ثانیه)		
	ابتدای خط	میانه خط	انتهای خط
خط ۱	R1* (DG3) ۲۷۰	R1* (DG3) ۴۱۵	R1* (DG3) ۵۸۰
خط ۲	R3* (DG3) ۵۹۰	R3 (DG3) ۶۷۵	R3 (DG3) ۹۸۵
خط ۳	R5 (DG3) ۹۹۰	R5 (DG3) ۱۲۴۵	R5 (DG3) ۱۵۷۵
خط ۴	R7 (DG1) ۲۵۰	R7 (DG1) ۳۲۰	R7 (DG1) ۴۲۰
خط ۵	R9* (DG1) ۳۳۰	R9* (DG1) ۴۵۰	R9* (DG1) ۶۴۰
خط ۶	R11* (DG3) ۲۵۰	R11* (DG3) ۳۷۰	R11* (DG4) ۵۲۵
خط ۷	R13 (DG3) ۵۳۰	R13 (DG3) ۷۴۵	R13 (DG3) ۹۹۰
خط ۸	R15 (DG3) ۱۰۰۵	R15 (DG3) ۱۴۱۵	R15 (DG3) ۱۵۵۵

جدول (۵): تنظیمات مشخصه عملکردی آنی به منظور پیشگیری از

ناپایداری گذرا

رله	R11	R9	R3	R1
تنظیم جریان عملکرد آنی (آمپر)	۸۷۰۰	۸۸۸۰	۸۵۰۰	۸۹۶۰

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پس از شرح مسئله هماهنگی حفاظتی بهینه رله‌های اضافه جریان جهتی در شبکه توزیع با منابع تولید پراکنده سنکرون، بیان گردید که پایداری ژنراتورهای سنکرون به عنوان یک قید در طراحی سیستم حفاظتی مدنظر قرار گیرد. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار DigSILENT نشان دادند که در تنظیمات بهینه حاصل شده از الگوریتم جستجوی هم‌نوایی، ناپایداری گذرا منابع تولید پراکنده سنکرون رخ می‌دهد. بنابراین در این مقاله پس از بدست آوردن زمان رفع خطای بحرانی برای خطا در ابتدا، میانه و انتهای تمامی خطوط شبکه، خطاهایی که زمان پاک‌سازی آن‌ها منجر به ناپایداری گذرای منابع تولید پراکنده موجود در شبکه توزیع شده شناسایی شدند. سپس با افزودن تنظیم عملکرد آنی به مشخصه عملکردی رله‌های اصلی مرتبط با خطاهای مذکور، از وقوع ناپایداری گذرای منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع به سبب عملکرد دیر هنگام سیستم حفاظت اضافه جریان پیشگیری گردید.

مراجع

- [1] S. A. M. Javadian, M. R. Haghifam, M. Firoozabadi and S. M. T. Bathaee, "Analysis of protection system's risk in distribution networks with DG," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 44, Issue 1, pp. 688-695, Sept. 2013.
- [2] P. P. Bedekar, S. R. Bhide, "Optimum coordination of overcurrent relays in distribution system using dual simplex method," in Proceeding of 2nd ICETET, pp. 555-559, 2009.
- [3] M. Mansour, S. Mekhamer and N. S. El-Kharbawe, "A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1400-1410, 2007.
- [4] P. Bedekar, S. R. Bhide and V. Kale, "Optimum coordination of directional overcurrent relays in distribution system using genetic algorithm," in Proceeding of ICPS, pp. 1-6, 2009.
- [5] W. El-Khattam and T. Sidhu, "Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation system utilizing fault current limiter," IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 23, no. 2, pp. 576-585, 2008.
- [6] W. Najy, H. H. Zeinedin, W. L. Woon, "Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1676, 2013.
- [7] واحدی حسان، نوروزیان رضا، جلیلود ابوالفضل، قره پتیان گئورگ، "ارائه روشی نوین برای بهره برداری و تشخیص حالت جزیره ای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر"، مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران. ۸ (۲)، ۳۳-۲۵، ۱۳۹۰.
- [8] R. Razzaghi, M. Davarpanah, M. Sanaye-Pasand, "A novel protective scheme to protect small-scale synchronous generator against transient instability," IEEE Transaction on Industrial Electronic, vol. 60, no. 4, pp. 1659-1668, 2013.
- [9] I. Xyngi, A. Alishchenko, M. Popov and L. Sluis, "Transient stability analysis of a distribution network with distributed generators," IEEE Transaction on Power System, vol. 24, no. 2, pp. 1102-1104, May 2009.
- [10] I. Xyngi, A. Ishchenko, M. Popov and L. Sluis, "Protection, transient stability and fault ride-through issues in distribution networks with dispersed generation," 43rd International universities Power Engineering conference (UPEC 2008), Padova, Italy, Sep. 2008.
- [11] P. Mahat, Z. Chen, and B. Bak-Jensen, "Control and operation of distributed generation in distribution systems," Electric Power System Research, vol. 81, no. 2, pp. 495-502, 2011.