



Computational Intelligence in Electrical Engineering  
Vol. 14, No. 2, 2023  
Research Paper

## Optimization of Multi-Objective Function for User-defined Characteristics Recloser and Size of Fault Current Limiters in Radial Networks with Distributed Generation

Saman Ghobadpour<sup>1</sup>, Majid Gandomkar<sup>1\*</sup>, Javad Nikoukar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Saveh branch, Saveh, Iran

### Abstract:

In addition to the many advantages of Distributed Generation (DG) for the distribution networks, they change the direction and increase the level of fault current. These changes may cause the loss of protection coordination of reclosers and fuses in distribution networks. Usually, the operation time of reclosers is determined by two main settings, TDS and IP, but two other parameters (A and B), which are defined by the standards of traditional reclosers, are also influential on the operation time of reclosers. These two parameters can be modified in digital reclosers. In this article, these two characteristics are optimized with TDS and IP to restore protection coordination. For this purpose, first, the location and the size of the DGs are specified, after that to alleviate the effects of the DGs, the location and the impedance of FCLs are optimized by a multi-objective optimization function to reduce the loss, improve voltage profile, and reduce the effects of changes in the feeders' fault current while DGs are connected to the distribution network. Then, to restore the protection coordination, and to reduce the operating time of the protection equipment, fuse, and recloser, the parameters A, B, TDS, and IP are optimized using a multi-function optimization. To validate the proposed approach, the IEEE 33-bus network in the presence of synchronous DGs and resistive SFCL has been simulated in DIgSILENT software.

**Keywords:** Voltage profile, Protection coordination, Loss reduction, Digital reclosers.



This is an open access article under the CC BY-NC-ND/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



<https://doi.org/10.22108/ISEE.2022.126344.1436>

مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی تابع چندهدفه برای مشخصه‌های ریکلوزر دیجیتال و سائز محدودساز جریان

خطا در شبکه توزیع دارای تولیدات پراکنده

سامان قبادپور<sup>۱</sup>، مجید گندمکار<sup>۱\*</sup>، جواد نیکوکار<sup>۱</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی ساوه - ساوه - ایران

sqmqn@stu.iau-saveh.ac.ir, gandomkar@iau-saveh.ac.ir

**چکیده:** تولیدات پراکنده در کنار مزایای فراوانشان برای شبکه‌های توزیع، باعث تغییر جهت و افزایش سطح جریان خطا در شبکه توزیع می‌شوند. این تغییرات باعث از بین رفتن هماهنگی حفاظتی ریکلوزرها و فیوزها در شبکه‌های توزیع می‌شود. معمولاً زمان عملکرد ریکلوزرها با دو تنظیم اصلی TDS و IP تعیین می‌شوند؛ اما دو مشخصه دیگر A و B که در ریکلوزرهای سنتی به صورت استاندارد تعریف می‌شوند، زمان عملکرد ریکلوزرها را تغییر می‌دهد که در ریکلوزرهای دیجیتال تغییرپذیرند. در این مقاله، این دو مشخصه به همراه TDS و IP برای ایجاد هماهنگی حفاظتی، بهینه‌سازی می‌شوند. برای این منظور، ابتدا مکان و سائز DGها و سپس برای کاهش تأثیرات DGها، محل و امپدانس FCLها با هدف کاهش تلفات، بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تغییرات جریان‌های خطای فیدرها در زمان اتصال DGها با تابع هدف چندعامله بهینه‌سازی می‌شود. سپس با هدف بازیابی هماهنگی حفاظتی و کاهش زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی فیوز و ریکلوزر، با استفاده از یک تابع چندعامله، مشخصه‌های A، B، TDS، IP بهینه‌سازی می‌شود. طرح پیشنهادی برای اعتبارسنجی بر شبکه ۳۳ باسه IEEE در حضور DGهای سنکرون و SFCL مقاومتی در نرم‌افزار دیگسایلنت شبیه‌سازی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پروفیل ولتاژ، هماهنگی حفاظتی، کاهش تلفات، ریکلوزر دیجیتال

۱- مقدمه

است، تولیدات پراکنده DG نامیده می‌شوند [۲]. اگرچه DGها مزایای فراوانی برای شبکه توزیع دارند، افزایش حضور آنها باعث بروز مشکلاتی نیز می‌شود که باید راه‌حل مناسب آنها ارائه شوند [۳]. هماهنگی حفاظتی اضافه‌جریان، یکی از الزامات شبکه‌های توزیع است که با اتصال DGها به شبکه دچار اختلال می‌شود [۴]. محققان برای غلبه بر این مشکل روش‌های متعددی را توسعه داده‌اند تا اثرات منفی DGها بر هماهنگی حفاظتی را کاهش دهند [۵]. در مقالات [۶-۸] تنظیمات جدیدی برای رله‌های جهت‌دار و تنظیم دوگانی ایجاد شده است تا هماهنگی حفاظتی ازدست‌رفته را در شبکه‌های توزیع بازیابی کند. با توجه به اینکه این روش نیازمند اندازه‌گیری ولتاژ و جریان با تجهیزات حفاظتی است، این طرح برای فیوزها، کات اوت‌ها و ریکلوزرهای

بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع سنتی با هدف بهبود کیفیت انرژی و استفاده از تکنولوژی‌های جدید همواره در حال تغییر است. یکی از راه‌های بهبود کیفیت انرژی الکتریکی، تأمین انرژی نزدیک مصرف‌کنندگان است؛ این کار، تلفات شبکه و گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهد [۱]. این منابع که محدوده توان آنها بین kW تا MW متغیر

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۸

نام نویسنده مسئول: مجید گندمکار

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ساوه - دانشگاه آزاد اسلامی ساوه

- دانشکده برق

سنکرون جریان زیادی را در زمان خطا به شبکه تزریق می‌کند، با استفاده از یک تابع هدف نوین به بهینه‌سازی محل و ساین محدودساز جریان خطا با هدف مینیمم‌سازی اختلاف جریان عبوری تجهیزات حفاظتی در زمان اتصال DGها و زمان نبود آنها هنگام خطا در شبکه می‌پردازد. در مرحله سوم، با استفاده از بهینه‌سازی مشخصه‌های یک ریکلوز دیجیتال میکروپروسسوری، هماهنگی حفاظتی به‌ازای جریان خطای حداقل تا جریان خطای حداکثر در حداقل زمان ممکن ایجاد می‌شود. برای اعتبارسنجی، طرح پیشنهادی روی شبکه ۳۴ باسه IEEE در نرم‌افزار دیگسایلنت، شبیه‌سازی و برای بهینه‌سازی از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

## ۲- هماهنگی حفاظتی فیوز و ریکلوزر

فیوزها و ریکلوزرها به‌طور گسترده برای حفاظت اضافه‌جریان در شبکه‌های توزیع استفاده می‌شوند. ریکلوزرها معمولاً ابتدای شاخه‌های اصلی نصب می‌شوند و تعداد معینی عملیات قطع و وصل سریع و با تأخیر را در زمان خطا انجام می‌دهند. حالت قطع سریع برای پاکسازی خطای گذرا انجام می‌شود و حالت با تأخیر برای بررسی و رفع خطای گذرا عمل می‌کند که درنهایت، در صورت پاکسازی نشدن خطا، حالت با تأخیر آخر به‌عنوان پشتیبان فیوز یا جداسازی خطای دائم عمل می‌کند. همچنین، فیوزها با توجه نوع آنها، جریان خطای شاخه حفاظت‌کننده را در زمان معین قطع می‌کنند. معمولاً فیوزها و ریکلوزرها دارای منحنی مشخصه زمان - جریان معکوس هستند که مشخص می‌کند هر نوع تجهیز حفاظتی چه واکنشی به انواع جریان خطا داشته باشند. تابع عملکرد اصلی ریکلوزر از رابطه ۱ به دست می‌آید [۴].

$$t_{opr} = TDS \times \frac{A}{(I_{FR}/PCS)^P} + B \quad (1)$$

در اینجا  $t_{opr}$  زمان عملکرد،  $TDS$  ضریب تنظیم زمانی عملکرد در حالت سریع و با تأخیر،  $I_{FR}$  جریان عبوری خطای ریکلوزر و  $PCS$  ضریب تنظیم جریان تحریک از رابطه ۲ را معین می‌کند [۴].

معمولی اجرشدنی نیست؛ به همین دلیل، روی سیستم‌های توزیع شعاعی سستی نیز اجرشدنی نیست. در مقالات [۹-۱۱] یک روش هوشمند برای بهینه‌سازی تنظیمات ریکلوزر در حضور DGها و FCLها ارائه شده است. در این مقالات، اندازه بهینه DGها و FCLها محاسبه شده‌اند؛ به همین دلیل، با افزایش مقادیر DGها بازیابی هماهنگی حفاظتی دشوار خواهد بود. همچنین، در بیشتر مقالات، روش پیشنهادی برای یک نوع خطای معمولاً سه‌فاز اجرشدنی است؛ اما این هماهنگی حفاظتی می‌بایست برای یک محدوده جریان خطا از مقدار کم خطا تا مقدار بالای جریان خطا برقرار باشد، که در ریکلوزرهای معمولی به دلیل عدم توانایی در تغییر شیب منحنی زمان-جریان معکوس اجرشدنی نیست. در مقاله [۱۲] از یک ریکلوزر دیجیتال با مشخصه‌های غیر استاندارد برای بازیابی هماهنگی حفاظتی فیوز و ریکلوزر استفاده شده است. اگرچه نتایج خوبی ارائه شده است، با افزایش ساین DGها مجدداً هماهنگی حفاظتی دچار اختلال خواهد شد و بازیابی آن بدون استفاده از FCLها بسیار دشوار خواهد بود. در مرجع [۲۰] با استفاده از یک تابع هدف چندمرحله‌ای به کاهش تلفات و بهینه‌سازی پارامترهای شبکه پرداخته شده است. سپس با استفاده از FCL مناسب سعی می‌شود تأثیر DG بر هماهنگی حفاظتی رله‌ها کاهش یابد که هماهنگی حفاظتی برای فیوز و ریکلوزر مدنظر نبوده است. در مرجع [۲۱] به بررسی اتصال DGها به شبکه با حفاظت فیوز و ریکلوزر پرداخته شده است. در این مقاله، مکان‌های اتصال DG و از بین رفتن تعداد هماهنگی حفاظتی برای خطا در مکان‌های مختلف و سپس بهترین ساین و محل اتصال DG ارائه شده است؛ اما با توجه به تزریق جریان بیشتر با افزایش ظرفیت DG بازیابی هماهنگی حفاظتی بدون استفاده از تجهیز دیگری امکان‌پذیر نیست.

روش پیشنهادی این مقاله یک تابع هدف سه‌مرحله‌ای برای بهینه‌سازی پارامترهای شبکه و بازیابی هماهنگی حفاظتی فیوز و ریکلوزر است. در مرحله نخست، با استفاده از یک تابع هدف وزن‌دار به بهینه‌سازی ساین و محل DGهای سنکرون با هدف کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ می‌پردازد. در مرحله دوم، با توجه به اینکه DGهای

تنظیمات TDS و IP، مشخصه‌های A، B و P نیز مقادیر متغیر در نظر گرفته می‌شوند. این نوع ریکلوزرها انعطاف‌پذیری بیشتری را برای بهینه‌سازی و ایجاد محدوده حداقل تا حداکثر جریان خط فراهم می‌کنند.

برای کاهش مجموع زمان عملکرد فیوزها و ریکلوزرها با در نظر گرفتن حداقل و حداکثر جریان خط تابع هدف رابطه ۴ ارائه شده است. معمولاً برای هر ریکلوزر یک منحنی حالت تند و یک منحنی حالت کند در نظر گرفته می‌شود. با حداقل‌سازی OFT به وسیله ایجاد خطا در مکان‌های مختلف شبکه و تغییر مشخصات ریکلوزر دیجیتال در دو حالت تند و کند به وسیله یک الگوریتم هوشمند و بررسی هماهنگی حفاظتی مشخصه‌های یک ریکلوزر محاسبه می‌شود که باعث ایجاد هماهنگی حفاظتی در کمترین زمان ممکن می‌شوند.

$$OFT = \min \sum_{j=1}^k \left( \sum_{i=1}^n (t_{opRfm} + t_{opRsm}) + \sum_{b=1}^m t_{opF} \right) \quad (4)$$

در بهینه‌سازی تابع هدف ۴ می‌باید قیود زیر در نظر گرفته شوند.

فاصله زمانی حالت تند ریکلوزر و اولین فیوز باید مشخص باشد. بدین منظور، ریکلوزر باید سریع‌تر از فیوزها عمل کند.

$$t_{opF,jk} - t_{opR,fm} > MRCTI \quad (5)$$

فاصله زمانی بین فیوز اولیه و فیوزهای پشتیبان مهیا باشد.

$$t_{opF,(jk+1)} - t_{opF,jk} > MFCTI \quad (6)$$

فاصله زمانی بین آخرین فیوز و حالت با تأخیر ریکلوزر در محدوده زمانی مشخص باشد.

$$t_{opR,sm} - t_{opF,nk} > \frac{MRCTI}{2} \quad (7)$$

فاصله زمانی بین حالت تند و با تأخیر ریکلوزر در محدوده زمانی مشخص باشد.

$$t_{opR,sm} - t_{opR,fn} < MRCTI \quad (8)$$

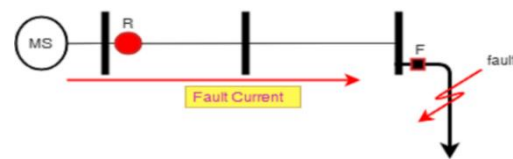
$$PCS = OLF \times I_{Lmax} \quad (2)$$

در اینجا  $I_{Lmax}$  جریان حداکثر بار و  $OLF$  ضریب اضافه بار است. زمان عملکرد فیوز از رابطه ۳ به دست می‌آید [۴].

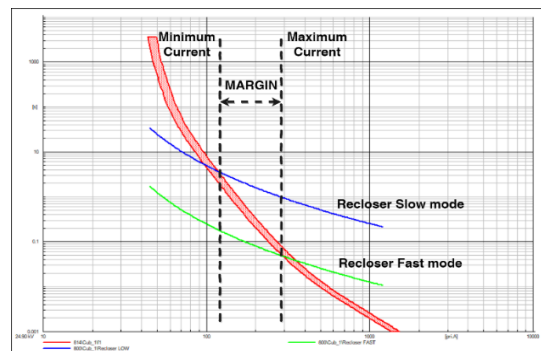
$$t_{opF} = \exp(a \times \log(I_{FF}) + b) \quad (3)$$

در اینجا  $t_{opF}$  زمان سوختن فیوز،  $I_{FF}$  جریان عبوری از فیوز در زمان خطا،  $a$  و  $b$  مشخصه‌های زمان - جریان وابسته به نوع فیوز هستند.

در شبکه ساده شکل ۱، اگر خطا در محل مشخص شده اتفاق بیفتد و هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر برقرار باشد، ترتیب عملکرد تجهیزات حفاظتی باید بدین صورت باشد: (۱) حالت سریع ریکلوزر، (۲) فیوز و (۳) حالت با تأخیر ریکلوزر. شکل ۲ محدوده زمانی هماهنگی بین فیوز و ریکلوزر را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شبکه ساده با حفاظت فیوز و ریکلوزر



شکل (۲): محدوده هماهنگی فیوز و ریکلوزر

در ریکلوزرها ثابت‌های A، B و P درجه شیب منحنی زمان - جریان معکوس را برای هر یک از حالت‌های تند و با تأخیر ریکلوزر مشخص می‌کنند. با استفاده از تکنولوژی‌های جدید یک ریکلوزر می‌تواند منحنی زمان معکوس غیر استاندارد ایجاد کند. بدین منظور، علاوه بر

نصب منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، منافع زیادی در شرایط نرمال شبکه از قبیل بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات اکتیو و راکتیو و فواید زیست محیطی از قبیل کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند. مشخصه تلفات توان در خطوط شبکه توزیع و مشخصه پروفیل ولتاژ با روابط ۱۴ تا ۱۶ محاسبه می‌شوند [۱۴].

$$PLI = \frac{\sum_{L=1}^{L=n} PL_{dg}}{PL_{nodg}} \quad (14)$$

$$QLI = \frac{\sum_{L=1}^{L=n} QL_{dg}}{QL_{nodg}} \quad (15)$$

$$VPI = \sum_{b=1}^{b=m} \frac{V_{ref} - V_{busb}}{V_{ref}} \quad (16)$$

در این روابط،  $PLI$  مشخصه تلفات اکتیو،  $PL_{dg}$  تلفات اکتیو در حالت وجود  $DG$ ،  $PL_{nodg}$  تلفات اکتیو در حالت نبود  $DG$ ،  $QLI$  مشخصه تلفات راکتیو،  $QL_{dg}$  مشخصه تلفات راکتیو در حالت وجود  $DG$ ،  $QL_{nodg}$  تلفات راکتیو در حالت نبود  $DG$  و  $L$  شماره خط بررسی می‌شوند. همچنین، ولتاژ هر باس مرجع و برابر یک پریونیت و  $V_{busb}$  ولتاژ هر باس که می‌تواند بیشتر یا کمتر از یک پریونیت باشد و  $B$  شماره باس مدنظر است.

در این مقاله، مکان و اندازه بهینه  $DG$ ها با هدف کاهش تلفات اکتیو، تلفات راکتیو خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ باس‌ها محاسبه می‌شوند. برای این منظور، تابع هدف وزن‌دار  $OFDG$  ارائه شده است. این تابع هدف شامل سه بخش برای هر سه مشخصه تلفات اکتیو، تلفات راکتیو و پروفیل ولتاژ باس‌ها است که به وسیله  $W1-W3$  وزن‌دار شده است. با اتصال  $DG$ ها با ظرفیت‌های مختلف در محل‌های مختلف شبکه، مقدار تلفات و ولتاژ باس‌ها با تابع  $OFDG$  محاسبه می‌شود. سپس مقادیری که این تابع را مینیمم می‌کنند، انتخاب می‌شوند.

$$OFDG = \min \left( \frac{w1 * \sum_{L=1}^{Ln} PLI + w2 * \left( \sum_{L=1}^{Ln} QLI + w3 * \sum_{B=1}^{BN} VPI \right)}{\sum_{L=1}^{Ln} PLI + w2 * \left( \sum_{L=1}^{Ln} QLI + w3 * \sum_{B=1}^{BN} VPI \right)} \right) \quad (17)$$

در اینجا  $L$  شماره خط و  $B$  شماره باس در شبکه است. وابسته به اهمیت هر قسمت برای بهره‌بردار،  $W1-W3$

تمامی مشخصه‌های  $A, B, P, TDS$  و  $IP$  در محدوده مشخص باشند.

$$TDS_{min} \leq TDS \leq TDS_{max} \quad (9)$$

$$PCS_{min} \leq PCS \leq PCS_{max} \quad (10)$$

$$A_{min} \leq A \leq A_{max} \quad (11)$$

$$B_{min} \leq B \leq B_{max} \quad (12)$$

$$P_{min} \leq P \leq P_{max} \quad (13)$$

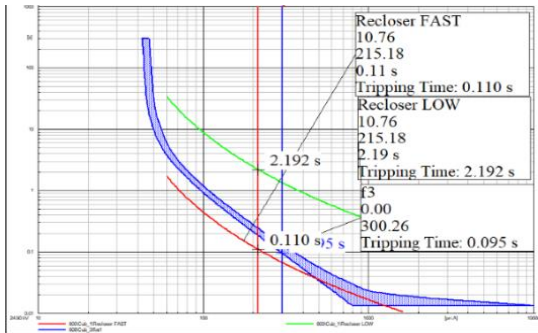
برای بهینه‌سازی تمامی توابع هدف، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. در الگوریتم ژنتیک ابتدا متغیرهایی با نام کروموزوم تعریف می‌شوند؛ این کروموزوم‌ها حاوی اطلاعات مقادیر متغیرهای مسئله تابع هدف است. این مقادیر در الگوریتم‌های هوشمند در هر تکرار بهینه‌سازی مقادیر جدیدی می‌گیرند و با مقادیر جدید، تابع هدف مجدداً بررسی می‌شود و تا رسیدن به شرایط پایان بهینه‌سازی این تکرار انجام می‌شود. سپس در انتها مقادیری که تابع هدف را بهینه می‌کنند، استخراج می‌شوند [۴]. در بهینه‌سازی تنظیمات ریکلوزرها، ابتدا نیاز است اطلاعات هر کروموزوم تعریف شوند. این کروموزوم‌ها می‌باید حاوی تمامی تنظیمات ریکلوزرها، شامل  $TDS_{SM}, TDS_{FM}, PCS, A, B$  و  $P$  برای هر ریکلوزر باشند. طول هر کروموزوم براساس نیاز به دقت بالاتر و تعداد ریکلوزرها تعیین می‌شود. شکل ۳ کروموزوم حاوی اطلاعات و تنظیمات ریکلوزر را نشان می‌دهد؛ البته نویسندگان مقاله به این نکته توجه دارند که روش‌های دیگر بهینه‌سازی نیز می‌توانند مقادیر مطلوبی ارائه دهند؛ اما با توجه به حجم مقاله، روش ژنتیک بررسی می‌شود که بیشتر در این زمینه استفاده می‌شود.

TDS <sub>fm</sub>					TDS <sub>sm</sub>					PCS					A					B					P				
BH0	BH1	BH2	BH3	BH4	BH5	BH6	BH7	BH8	BH9	BH10	BH11	BH12	BH13	BH14	BH15	BH16	BH17	BH18	BH19	BH20	BH21	BH22	BH23	BH24	BH25	BH26	BH27	BH28	BH29

شکل (۳): کروموزوم مشخصات ریکلوزرها

### ۳- تأثیرات $DG$ ها بر شبکه‌های توزیع

هنگامی که در این شبکه یک خطای گذرا اتفاق می‌افتد، فیوز قبل از عملکرد حال سریع ریکلوزر از بین می‌رود. این مشکل به دلیل افزایش جریان عبوری از فیوز اتفاق می‌افتد. شکل ۶ این ناهماهنگی حفاظتی را نشان می‌دهد.

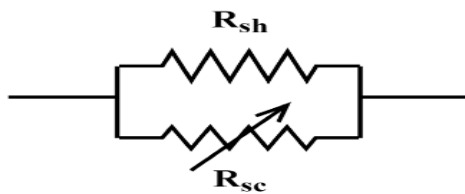


شکل (۶): هماهنگی حفاظتی از بین رفته فیوز و ریکلوزر

#### ۴- استفاده از FCLها برای کاهش تأثیر

#### DGها بر هماهنگی حفاظتی

محققان به تازگی به استفاده از محدودسازهای جریان خطا در شبکه‌های توزیع توجه بسیاری داشته‌اند. FCLها در شرایط نرمال شبکه تأثیری ندارند؛ اما هنگامی که یک خطا در شبکه رخ می‌دهد (افزایش جریان عبوری از آنها) FCLها به یک امپدانس بزرگ تبدیل می‌شوند و محدودسازی جریان خطا را انجام می‌دهند [۱۲]؛ بنابراین، می‌توانند برای محدودسازی جریان خطای منابع تولید پراکنده و بازیابی هماهنگی حفاظتی استفاده شوند؛ از این رو، برای استفاده بهتر مکان نصب FCLها و اندازه امپدانس آنها بسیار پراهمیت است. در این مقاله برای محدودسازی جریان خطا از یک محدودساز ابرسانای جریان خطای مقاومتی (R-SFCL) استفاده شده است.



شکل (۷): SFCL مقاومتی

مقدار متفاوتی می‌گیرد؛ اما در نهایت، مجموع W1-W3 باید برابر یک شود. تابع هدف OFDG می‌باید با در نظر داشتن قیود زیر بهینه شود.

$$\sum P_{dg} \leq 0.3 \times \sum P_d \quad (18)$$

$$V_{min} \leq V_{bus} \leq V_{max} \quad (19)$$

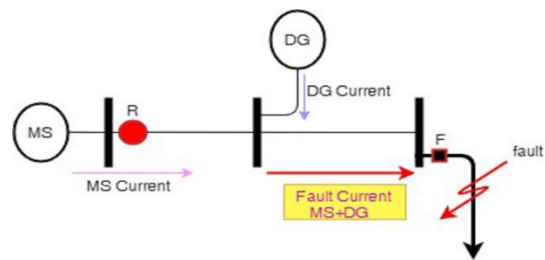
$$S_{min} \leq S_{dgi} \leq S_{max} \quad (20)$$

در این رابطه  $S_{dgi}$  توان ظاهری هر DG،  $P_d$  توان مصرفی شبکه و  $P_{dg}$  توان تولیدی DG است. برای مقداردهی قیود از مرجع [۲۰] استفاده شده است. با در نظر گرفتن الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی، هر کروموزوم شامل اطلاعات سایز و محل هر DG می‌شود. طول هر کروموزوم وابسته به دقت مورد نیاز و تعداد DGها متغیر است. کروموزوم شکل ۴ اطلاعات سایز و محل دو DG را نشان می‌دهد که نیاز است برای بهینه‌سازی با الگوریتم ژنتیک مقداردهی شوند.

DG1 Location		DG1 Size		DG2 Location		DG2 Size	
Bit0	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4	Bit5	Bit6	Bit7
Bit8	Bit9	Bit10	Bit11	Bit12	Bit13	Bit14	Bit15
Bit16	Bit17	Bit18	Bit19				

شکل (۴): کروموزوم مکان و سایز DGها

اگرچه اتصال DGها به شبکه توزیع منافع زیادی دارد، باعث از بین رفتن هماهنگی حفاظتی فیوز و ریکلوزر می‌شود. در شبکه ساده شکل ۵، با ورود منبع تولید پراکنده، ممکن است هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر به دلیل تغییرات سطح جریان خطا از بین برود.



شکل (۵): شبکه ساده توزیع با حضور DG

۶۰۰kVA و ۸۰۰kVA به شبکه توزیع شعاعی متصل می‌شوند. جزئیات این DGها در جدول ۱ آمده‌اند.

جدول (۱): مشخصات DGها

نام	بیشترین توان	نوع	قدرت اتصال کوتاه
DG1	600kVA	synchronous	1.4MVA
DG2	800kVA	synchronous	1.9MVA

برای انتخاب بهترین ظرفیت توان تولیدی و محل نصب DGها نیاز است این DGها با توان‌های تولیدی متفاوت در محل‌های مختلف نصب شوند. سپس با اندازه‌گیری تلفات خطوط و پروفیل ولتاژ باس‌ها با تابع هدف OFDG، مکان و سایز DGهایی که به‌ازای آن تابع هدف OFDG مینیمم می‌شود، محاسبه شود. برای این منظور، از زبان برنامه‌نویسی DPL استفاده شده است که با نرم‌افزار دیگسایلنت، قابلیت برنامه‌نویسی و اجرای کدهای بهینه‌سازی را می‌دهد. الگوریتم ژنتیک و محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه در DPL برنامه‌نویسی می‌شوند؛ البته نویسندگان مقاله توجه دارند که بهینه‌سازی اغلب در نرم‌افزار متلب و با کدهای بهینه‌سازی متلب انجام می‌گیرد؛ اما با توجه به اینکه شبیه‌سازی شبکه در نرم‌افزار دیگسایلنت انجام می‌گیرد، اتصال بین متلب و دیگسایلنت سرعت بهینه‌سازی را به‌شدت کاهش می‌دهد؛ به همین دلیل، تمامی کدهای بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با DPL در دیگسایلنت نوشته شده‌اند. در هر تکرار این بهینه‌سازی، مقادیر جدید با الگوریتم ژنتیک، تولید و استفاده می‌شوند. در این بهینه‌سازی برای تابع هدف OFDG،  $W2=0.3$ ،  $W1=0.3$ ،  $W3=0.4$  و مجموع ظرفیت DGها کمتر از ۱۳۱۰ کیلووات (۳۰٪ کل بار شبکه) در نظر گرفته شده است. برای مقادیر بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک از مرجع [۱۷] استفاده شده است.

با توجه به تعداد DGها و ظرفیت آنها ده بیت برای ظرفیت هر DG و ۵ بیت برای محل DG در نظر گرفته شده است که تولید هر کروموزوم ۳۰ بیت می‌شود. نتایج بهینه‌سازی با توجه به چند شاخص متفاوت، با ۵۰ کروموزوم اولیه و ۱۰۰۰۰ بار تکرار در جدول ۲ آمده‌اند. با اتصال این DGها شاخص اول به شبکه پروفیل

تابع هدف پیشنهادی OFFCL سایز و محل مناسب SFCL را با هدف کاهش مجموع جریان‌های عبوری از تجهیزات حفاظتی شبکه، قبل و بعد از نصب DGها محاسبه می‌کند. معمولاً در اینگونه توابع، هدف به مینیمم‌سازی سایز محدودساز جریان خطا می‌پردازند [۴]؛ اما در طرح پیشنهادی جدید، هدف کاهش مجموع اختلاف جریان‌های شبکه قبل و بعد از نصب DG خواهد بود. برای این منظور، با ایجاد خطا در نقاط مختلف شبکه اختلاف میزان جریان عبوری هر فیوز یا ریکلوزر در زمان نبود DGها و در زمان اتصال DGها و SFCLهای مختلف محاسبه می‌شود. سپس SFCLهایی که این تابع را مینیمم می‌کنند، انتخاب می‌شوند. در این بهینه‌سازی می‌باید قید ۲۲ در نظر گرفته شود.

$$Z_{min} \leq Z_{FCL} \leq Z_{max} \quad (22)$$

$$OFFCL = \min_{F=1}^k \left( \sum_{RECLOSER=1}^n I_{with DG} - I_{without DG} \right) + \sum_{FUSE=1}^m \left( I_{with DG} - I_{without DG} \right) \quad (21)$$

بهینه‌سازی تابع OFFCL نیز با الگوریتم ژنتیک انجام می‌گیرد. کروموزوم‌های این تابع هدف شامل اطلاعات مکان و سایز SFCLها است. طول این کروموزوم‌ها وابسته به دقت مورد نیاز SFCLها و تعداد آنها متغیر است. شکل ۸ کروموزوم اطلاعات سه SFCL را نشان می‌دهد.

SFCL1 Location	SFCL1 Size	SFCL2 Location	SFCL2 Size	SFCL3 Location	SFCL3 Size
B10	B11	B12	B13	B14	B15
B16	B17	B18	B19	B20	B21
B22	B23	B24	B25	B26	B27
B28	B29				

شکل (۸): کروموزوم مکان و سایز SFCLها

## ۵- شبیه‌سازی سیستم بررسی شده

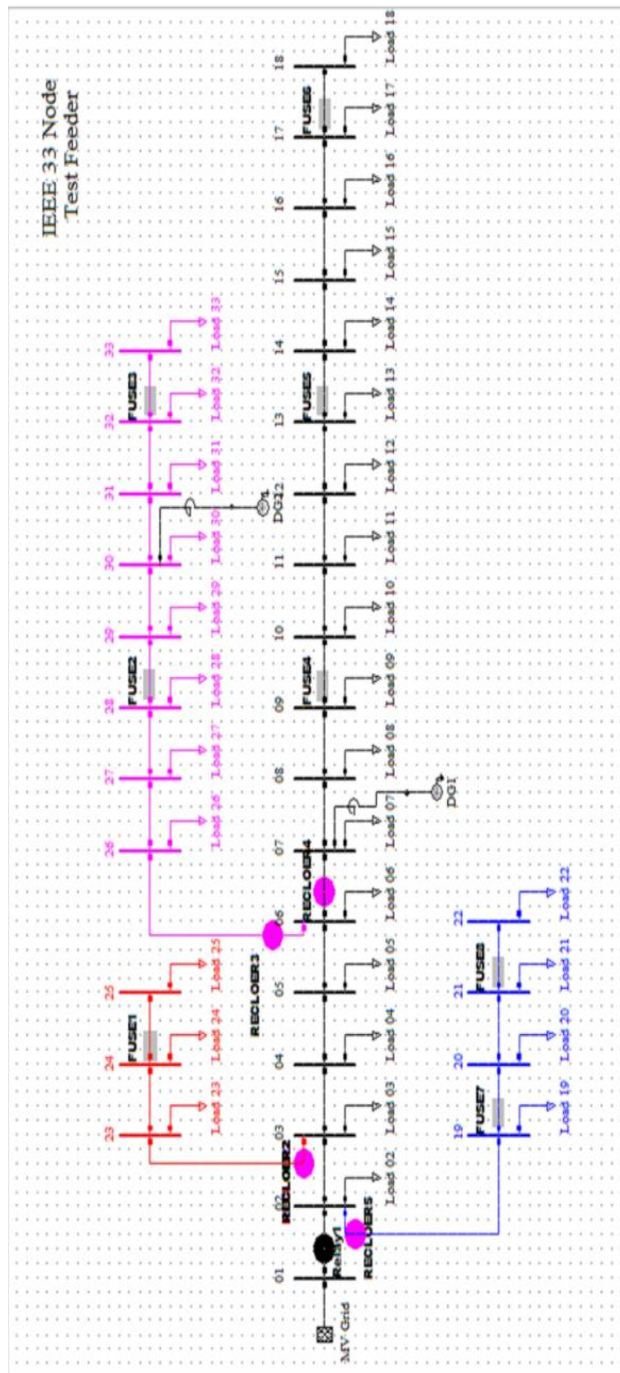
شبکه ۳۳ باسه IEEE نشان داده شده در شکل ۹ برای تست طرح پیشنهادی در نرم‌افزار دیگسایلنت شبیه‌سازی شده است. اطلاعات کامل این شبکه در مرجع [۱۶] موجود است.

در مرحله نخست، برای کاهش تلفات خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ دو ژنراتور سنکرون با حداکثر ظرفیت



برای انتخاب محدوده جریان خطا از یک خطای تک فاز به زمین با امپدانس ۲۰ اهم برای حداقل جریان خطا و یک خطای سه فاز به هم با امپدانس ۱ اهم برای حداکثر جریان خطا در باس‌های شبکه استفاده شده است که هماهنگی حفاظتی تمامی فیوزها و ریکلوزرها باید در این محدوده برقرار باشد.

باس‌ها و تلفات خطوط بهبود پیدا می‌کند. شکل ۱۰ ولتاژ باس‌ها و شکل ۱۱ تلفات خطوط قبل و بعد از اتصال DGها را به شبکه ۳۳ باسه IEEE نشان می‌دهد. در ادامه، هماهنگی حفاظتی بررسی می‌شود. حفاظت شبکه شامل یک رله ابتدای شبکه، چهار ریکلوزر ابتدای شاخه‌های اصلی و هشت فیوز در شاخه‌ها است [۱۸]. مشخصه‌های تجهیزات حفاظتی در جدول ۳ آمده‌اند.

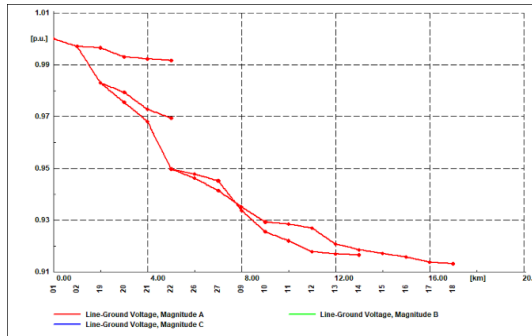


شکل (۹): شبکه استاندارد ۳۳ باسه IEEE

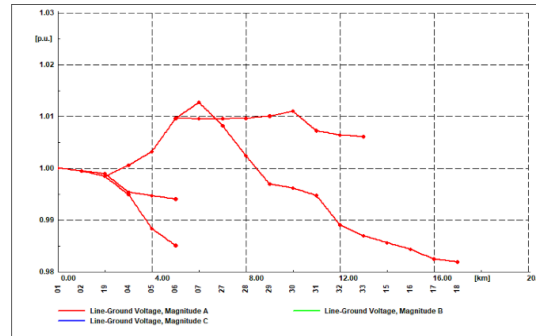


جدول (۲): سایز و محل نصب DGها

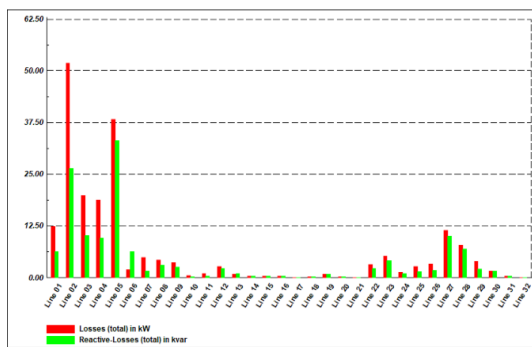
شخصها	توان راکتیو	توان اکتیو	محل نصب	نام
W3=0.4 , W2=0.3 , W1=0.3	289 kVAr	484 kW	07	DG1
	381 kVAr	633 kW	30	DG2
W3=0.3 , W2=0.3 , W1=0.4	316 kVAr	511 kW	11	DG1
	308 kVAr	509 kW	28	DG2
W3=0.5 , W2=0.3 , W1=0.2	267 kVAr	477 kW	17	DG1
	391 kVAr	650 kW	33	DG2



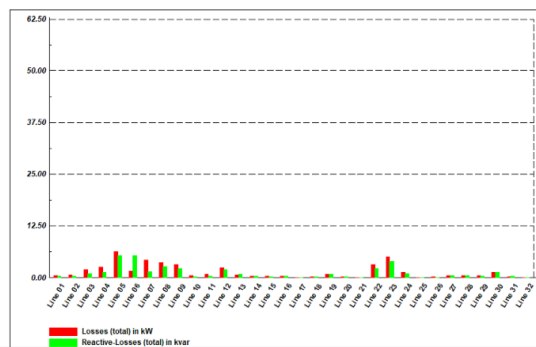
پروفیل ولتاژ باسها قبل از اتصال DGها



پروفیل ولتاژ باسها بعد از اتصال DGها



تلفات خطوط توزیع قبل از اتصال DGها



تلفات خطوط توزیع بعد از اتصال DGها

شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ باسها قبل و بعد از نصب DGها — تلفات خطوط توزیع قبل و بعد از نصب DGها

جدول (۳): مشخصات تجهیزات حفاظتی اضافه‌جریان

مشخصات	محل نصب	جریان نامی	تجهیز حفاظتی
TYPE LBU-II	Line 24	250	Fuse1
TYPE LBU-II	Line 28	260	Fuse2
TYPE LBU-II	Line 32	200	Fuse3
TYPE LBU-II	Line 09	330	Fuse4
TYPE LBU-II	Line 13	280	Fuse5
TYPE LBU-II	Line 17	180	Fuse6
TYPE LBU-II	Line 19	310	Fuse7
TYPE LBU-II	Line 21	300	Fuse8
TDS=5.3, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Line 1	150A	Relay1
TDSE=0.75, TDSS=1.74, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Line 22	100A	Recloser2
TDSE=0.85, TDSS=1.35, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Line 25	120A	Recloser3
TDSE=1.32, TDSS=2.01, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Line 6	120A	Recloser4
TDSE=1.51, TDSS=3.25, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Line 18	80A	Recloser5

جدول (۴): زمان عملکرد فیوزها و ریکلوزرها با حضور DG

بأس خطا					بدون DG
۳۳	۲۵	۲۲	۱۸	۱۱	
R3F=69	R2F=50	R5F=75	R4F=68	R4F=58	ترتیب عملکرد برای خطای سه فاز (ms)
F3=278	F1=259	F8=283	F6=268	F4=654	
F2=479	R2S=496	F7=458	F5=474	R4S=859	
R3S=690	RELAY=527	R5S=685	F4=680	RELAY=1240	
RELAY=1623	----	RELAY=887	R4S=882	----	
----	----	----	RELAY=3272	----	
بله	بله	بله	بله	بله	هماهنگی
R3F=78	R2F=49	R5F=74	R4F=81	R4F=58	وجود DG
F3=262	F1=245	F8=275	F6=266	F4=654	
F2=491	R2S=492	F7=476	F5=469	R4S=758	
783=R3S	RELAY=869	R5S=685	F4=672	RELAY=2037	
RELAY=3231	----	RELAY=897	R4S=1048	----	
----	----	----	RELAY=7703	----	
خیر	خیر	بله	خیر	خیر	هماهنگی

بیت برای محل نصب SFCLها در نظر گرفته شده که برای هر SFCL، مقدار ۱۲ بیت مورد نیاز است و هر کروموزوم شامل ۴۸ بیت است. نتایج بهینه‌سازی با استفاده از ۵۰ کروموزوم اولیه و ۱۰۰۰۰ بار تکرار در جدول ۵ آمده‌اند.

جدول (۵): سایز و محل نصب SFCLها

نام	محل نصب	اندازه SFCL
SFCL1	DG1	67.25Ω
SFCL2	DG2	39.5Ω
SFCL3	Line8	11.25Ω
SFCL4	Line19	7.75Ω

در مرحله سوم با استفاده از بهینه‌سازی تابع هدف OFT هماهنگی حفاظتی در حداقل زمان ممکن بازیابی می‌شود. الگوریتم ژنتیک مشخصات چهار ریکلوزر را به وسیله کروموزوم‌های حاوی اطلاعات آنها بهینه‌سازی می‌کند. هر کروموزوم شامل ۱۰ بیت برای TDSF، ۱۰ بیت برای TDSS، ۱۲ بیت برای A، ۱۲ بیت برای B، ۴ بیت برای OLF و ۴ بیت برای P برای هر ریکلوزر در نظر

جدول ۴ زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی را برای خطای سه فاز در زمان متصل شدن یا نشدن DGها نشان می‌دهد؛ البته در محاسبات شبیه‌سازی، خطای تک‌فاز نیز در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول ۴، اتصال DGها به شبکه با مشخصات به دست آمده از مرحله نخست، هماهنگی حفاظتی فیوز و ریکلوزر را در برخی مکان‌های خطا دچار اختلال می‌کند؛ برای مثال، در خطای باس ۱۱ در زمان اتصال DG زمان زمان عملکرد بین فیوز و حالت کند ریکلوزر کمتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه است و با توجه به قیود هماهنگی حفاظتی، ناهماهنگی تلقی می‌شود؛ به همین دلیل، به بازیابی هماهنگی حفاظتی در شبکه نیاز است. در مرحله دوم، تأثیر DGها بر افزایش جریان خطا با استفاده از SFCL مقاومتی کاهش می‌یابد. برای این منظور، از چهار SFCL مقاومتی استفاده می‌شود (البته تعداد آنها متغیر است) که می‌باید سایز و محل نصب آنها با تابع هدف OFFCL بهینه‌سازی شود. محدود امیدانس SFCLها بین ۱ تا ۱۲۷ اهم در نظر گرفته شده است. کروموزوم‌ها شامل ۷ بیت برای مقدار صحیح، ۲ بیت برای مقدار اعشاری و ۵

۱۵۲ بهینه‌سازی تابع چندهدفه برای مشخصه‌های ریکلوزر دیجیتال و ساین محدودساز جریان خطا در شبکه توزیع دارای تولیدات پراکنده

مجدد مشخصه‌های ریکلوزر بازیابی شده است. نمودار همگرایی بهینه‌سازی در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

جدول (۶): مشخصات بهینه‌شده تجهیزات حفاظتی

مشخصات	تجهیز حفاظتی
TDS=5.2, A=28.2, B=0.12, P=2, OLF=1.5	Relay1
TDSF=0.68, TDSS=1.84, A=23.1, B=0.11, P=1.9, OLF=1.6	Recloser2
TDSF=0.81, TDSS=1.33, A=22.5, B=0.10, P=1.8, OLF=1.6	Recloser3
TDSF=1.25, TDSS=2.17, A=25.2, B=0.12, P=1.8, OLF=1.7	Recloser4
TDSF=1.34, TDSS=3.24, A=21.4, B=0.10, P=2, OLF=1.6	Recloser5

گرفته شده است. قیود بهینه‌سازی برای مشخصه‌های  
 $MFCI, MRCTI > 200$ ,  $MRCO > 5000$ .

$A > 1$ ,  $OLF > 1.4$ ,  $TDSS, TDSF > 0.5$ ,  $B > 0.1$ ,  $P > 0.1$  همانند [18][19] در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده بهینه‌سازی با استفاده از ۵۰ کروموزوم و ۱۰۰۰۰ بار تکرار در جدول ۶ آمده‌اند.

همچنین، زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی با تنظیمات بهینه‌شده برای خطای سه‌فاز در حضور DGها و SFCLها در جدول ۷ آمده است، البته در بهینه‌سازی مشخصه‌های ریکلوزر دیجیتال، وجود هماهنگی برای خطای تک‌فاز نیز در نظر گرفته شده است.

با توجه به جدول ۷، هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر در حضور DGها با استفاده از SFCL و تنظیم

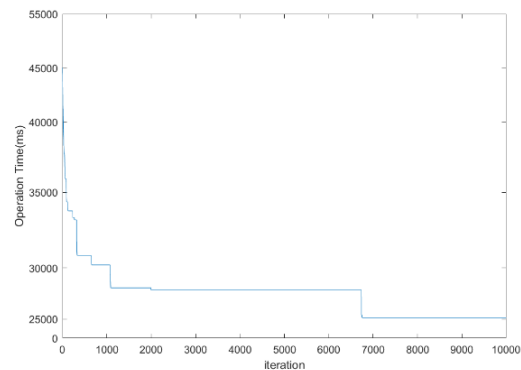
جدول (۷): زمان عملکرد فیوزها و ریکلوزرها در حضور DG

۳۳	۲۵	۲۲	۱۸	۱۱	بأس خطا
R3F=75	R2F=54	R5F=104	R4F=174	R4F=136	با حضور DG و SFCL
F3=275	F1=254	F8=386	F6=920	F4=897	
F2=479	R2S=498	F7=709	F5=1430	R4S=1330	
R3S=708	RELAY=844	R5S=1040	F4=2811	RELAY=3345	
RELAY=1911	----	RELAY=1476	R4S=3878	----	
----	----	----	RELAY=4830	----	ترتیب عملکرد برای خطای سه‌فاز (ms)
بله	بله	بله	بله	بله	هماهنگی
25053 ms			مجموع زمان عملکرد		

به دست آمده است که نشان می‌دهد هماهنگی حفاظتی بین فیوز و ریکلوزر با توجه به قیود مدنظر برقرار است.

## ۶- نتیجه‌گیری

تولیدات پراکنده در کنار مزایای فراوانی از قبیل بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات و گازهای گلخانه‌ای برای شبکه‌های توزیع باعث برهم خوردن هماهنگی حفاظتی می‌شوند. در این مقاله، یک طرح چندمرحله‌ای برای بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات شبکه و بازیابی هماهنگی حفاظتی از دست‌رفته فیوز و ریکلوزر ارائه شد. در این طرح در مرحله نخست، اندازه و محل بهینه DGها با هدف کاهش تلفات خطوط و بهبود پروفیل ولتاژ باس‌ها انجام



شکل (۱۱): نمودار همگرایی بهینه‌سازی

در نتایج به دست آمده مشخص است فاصله زمانی عملکرد تجهیزات حفاظتی به درستی بیشتر از ۲۰۰ میلی‌ثانیه

- Directional Overcurrent Relays for Protecting Automated Distribution Networks”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 15, No. 2, pp. 730-740, Feb. 2019.
- [9] F. G. K. Guarda, G. Cardoso, C. D. L. da Silva and A. P. de Morais, “Fault Current Limiter Placement to Reduce Recloser Fuse Miscoordination in Electric Distribution Systems with Distributed Generation using Multiobjective Particle Swarm Optimization”, in IEEE Latin America Transactions, Vol. 16, No. 7, pp. 1914-1920, July 2018.
- [10] M. N. Alam, B. Das and V. Pant, “Optimum recloser-fuse coordination for radial distribution systems in the presence of multiple distributed generations”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 12, No. 11, pp. 2585-2594, 2018.
- [11] K. Wheeler, M. Elsamahy and S. Faried, “Use of superconducting fault current limiters for mitigation of distributed generation influences in radial distribution network fuse-recloser protection systems”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 7, pp. 1605-1612, 2017.
- [12] P. H. Shah and B. R. Bhalja, “New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser-fuse miscoordination during distributed generation interconnections”, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 8, No. 4, pp. 682-688, April 2014.
- [13] A. Elmitwally, E. Gouda, S. Eladawy, “Restoring recloser-fuse coordination by optimal fault current limiters planning in DG-integrated distribution systems”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 77, 2016.
- [14] Sambaiah, KS, Jayabarathi, T. “Loss minimization techniques for optimal operation and planning of distribution systems: A review of different methodologies”, International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020.
- [15] L. Chen et al., “Study on Coordination of Resistive SFCLs and Hybrid-Type Circuit Breakers to Protect a HVDC System with LCC and VSC Stations”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 30, No. 4, pp. 1-6, June 2020.
- [16] A. Arafa, M. M. Aly and S. Kamel, “Impact of Distributed Generation on Recloser-Fuse Coordination of Radial Distribution Networks”, 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE), Aswan, Egypt, pp. 505-509, 2019.
- [17] Azizian, D., Bigdeli, M., Faiz, J., “Design optimization of cast-resin transformer using nature inspired algorithms”, Arab. J. Sci. Eng, pp. 3491–3500, 2016.
- [18] A. Arafa, M. M. Aly and S. Kamel, “Impact of Distributed Generation on Recloser-Fuse Coordination of Radial Distribution Networks”, 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE), pp. 505-509, Aswan, Egypt, 2019.
- [19] Carlos A. Castillo Salazar, Arturo Conde شد، سپس در مرحله دوم، برای کاهش تأثیر DGها بر جریان خطا و هماهنگی حفاظتی، اندازه و محل بهینه نصب SFCLها محاسبه شد. در مرحله آخر، با توجه به استفاده از ریکلوزر دیجیتال، به بهینه‌سازی مشخصات آنها و کاهش زمان عملکرد تجهیزات حفاظتی به وسیله الگوریتم ژنتیک پرداخته شد. اجرای طرح پیشنهادی روی شبکه ۳۴ باسه IEEE نشان داد روش پیشنهادی به‌خوبی تلفات خطوط و ولتاژ باس‌ها را با استفاده از DGها بهبود می‌بخشد. همچنین، هماهنگی حفاظتی از دست‌رفته فیوز و ریکلوزر، به علت حضور DGها با بهینه‌سازی مشخصه‌های ریکلوزر بازیابی شد.
- ### ۷- مراجع
- [1] S. Chatterjee, P. Kumar and S. Chatterjee, “A techno-commercial review on grid-connected photovoltaic system”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 81, part 2, 2018.
- [2] S. Chatterjee and S. Chatterjee, “Review on the techno-commercial aspects of wind energy conversion system”, IET Renewable Power Generation, Vol. 12, No. 14, pp. 1581-1608, 2018.
- [3] Manditereza, P. T., Bansal, R., “Renewable distributed generation: The hidden challenges – A review from the protection perspective”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No. 58, pp. 1457 – 1465, 2016.
- [4] Saman Ghobadpour, Majid Gandomkar, Javad Nikoukar, “Determining Optimal Size of Superconducting Fault Current Limiters to Achieve Protection Coordination of Fuse-Recloser in Radial Distribution Networks with Synchronous DGs”, Electric Power Systems Research, Vol. 185, 2020.
- [5] Kennedy, J., Ciufu, P., Agalgaonkar, A., “A review of protection systems for distribution networks embedded with renewable generation”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, No. 58, pp. 1308–1317, 2016.
- [6] M. E. Hamidi and R. M. Chabanloo, “Optimal Allocation of Distributed Generation With Optimal Sizing of Fault Current Limiter to Reduce the Impact on Distribution Networks Using NSGA-II”, IEEE Systems Journal, Vol. 13, No. 2, pp. 1714-1724, 2019.
- [7] K. Pereira, B. R. Pereira, J. Contreras and J. R. S. Mantovani, “A Multiobjective Optimization Technique to Develop Protection Systems of Distribution Networks With Distributed Generation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 33, No. 6, pp. 7064-7075, Nov. 2018.
- [8] A. Yazdaninejadi, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, S. Teimourzadeh and F. Aminifar, “Dual-Setting

Enríquez, Satu Elisa Schaeffer, “Directional overcurrent relay coordination considering non-standardized time curves”, Electric Power Systems Research, Vol. 122, 2015.