

A Novel Method to Improve Transient Performance and Reduce Microgrid Disturbances Using Resistive Superconducting Fault Current Limiter and Auto Recloser

Arman Golzarfar¹, PhD Student, Ahmad Mirzaei¹, Associate Professor

¹ Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Abstract:

The increasing use of distributed generation sources in microgrids causes problems when a fault occurs, including an increase in the level of short-circuit current in the microgrid and consequently it causes disturbances in the system after fixing the fault. In this paper, using a novel method, the installation location and the optimal resistance value of the resistive superconducting fault current limiter in the microgrid are determined by considering the energy losses in the resistive superconducting fault current limiter, the requirements of low voltage ride through of the doubly fed induction generator and the interrupting capacity of circuit breakers. Also, a mathematical model of resistive superconducting fault current limiter is presented, which by simulating and placing it in the microgrid and applying various types of faults in different points of the microgrid, the effectiveness of the proposed resistive superconducting fault current limiter in reducing the short circuit current level of the microgrid, the impact of simultaneous use of resistive superconducting fault current limiter and auto recloser in significant decreasing of disturbances after Fixing the fault and improving the requirements of low voltage ride through of the doubly fed induction generator are approved. Finally, the analytical comparison of the proposed method with other studies conducted in this field is examined and proves its effectiveness.

Keywords: Microgrid, Distributed generation, Resistive superconducting fault current limiter, Auto recloser

Received: 05 November 2023

Revised: 01 January 2024

Accepted: 14 January 2024

Corresponding Author: Dr. Ahmad Mirzaei, mirzaei@yazd.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2024.2002968.1118>



یک روش جدید جهت بهبود عملکرد گذرا و کاهش اختلالات ریزش‌بکه با استفاده از محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی و اتوریکلوزر

آرمان گلزارفر^۱، دانشجوی دکتری، احمد میرزائی^۱، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده: استفاده روزافزون از منابع تولید پراکنده در ریزش‌بکه‌ها، باعث بروز مشکلاتی در زمان وقوع خطا از جمله افزایش سطح جریان اتصال کوتاه در ریزش‌بکه و در نتیجه آن، موجب اختلالات در سیستم پس از رفع خطا می‌شود. در این مقاله با استفاده از یک روش جدید، مکان نصب و مقدار مقاومت بهینه محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی در ریزش‌بکه با در نظر گرفتن تلفات انرژی محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی، الزامات گذر از ولتاژ پایین ژنراتور القایی دو سو تغذیه و ظرفیت قطع کلیدهای ریزش‌بکه مشخص می‌گردد. همچنین یک مدل ریاضی از محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی ارائه می‌شود که با شبیه‌سازی و قرار دادن آن در ریزش‌بکه و اعمال انواع خطاها در نقاط مختلف ریزش‌بکه، اثربخشی محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی پیشنهادی در کاهش سطح جریان اتصال کوتاه ریزش‌بکه، تاثیر استفاده همزمان محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی و اتوریکلوزر در کاهش قابل توجه اختلالات پس از رفع خطا و بهبود الزامات گذر از ولتاژ پایین ژنراتور القایی دو سو تغذیه مورد تایید قرار می‌گیرند. در پایان نیز مقایسه تحلیلی روش پیشنهادی با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و اثر بخشی آن را به اثبات می‌رساند.

واژه‌های کلیدی: ریزش‌بکه، منابع تولید پراکنده، محدودکننده جریان خطای ابررسانایی مقاومتی، اتوریکلوزر

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۴

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴

نویسنده‌ی مسئول: دکتر احمد میرزائی، mirzaei@yazd.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2024.2002968.1118>





۱- مقدمه

در سال‌های اخیر بدلیل افزایش نگرانی در خصوص تغییرات گسترده آب و هوای جهانی، تقاضا برای بکارگیری انرژی‌های پایدار پاک به طور قابل توجهی افزایش یافته است. در طول دو دهه گذشته محققان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر باد، خورشید و جزر و مد را در بسیاری از مقالات مورد تاکید قرار داده‌اند [۱، ۲]. یکی از مشکلات عمده در خصوص استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر، بکارگیری آنها در شبکه‌های قدرت بزرگ‌تر است. یکی از روش‌های پیشنهادی جهت رفع این مشکل، ادغام واحدهای تولید پراکنده^۱ (DG) شامل منابع انرژی تجدیدپذیر در ریزش‌بکه‌ها می‌باشد. در واقع نصب تعداد زیادی از واحدهای DG در ریزش‌بکه‌ها از دهه گذشته آغاز شده و انتظار می‌رود این روند در آینده نزدیک افزایش یابد [۳]. در سال‌های اخیر مفهوم ریزش‌بکه نیز به معنای یک شبکه توزیع ولتاژ متوسط یا ولتاژ پایین شامل واحدهای تولید پراکنده، ذخیره‌سازها و بارهای کنترل شونده مختلف با قابلیت بهره‌برداری در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای پیشنهاد گردیده است. چون ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای، شبکه‌ای با واحدهای تولید توان کوچک است، کوچکترین اغتشاشی ممکن است موجب ناپایداری آن شود [۴]. از طرفی با افزایش تقاضای بار و به طبع آن توسعه روز افزون و افزایش ظرفیت منابع DG، سطح جریان اتصال کوتاه در زمان وقوع خطا در سیستم‌های توزیع افزایش یافته و بیش از ظرفیت تجهیزات حفاظتی موجود، شده است [۵، ۶]. همچنین پایداری و رفع اختلالات ریزش‌بکه پس از رفع خطا نیز به عنوان یکی از دغدغه‌های مهم در ریزش‌بکه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۷، ۸]. به‌طور کلی طراحی حفاظتی یک ریزش‌بکه در مقایسه با کنترل و بهره‌برداری آن بسیار چالش برانگیزتر و حیاتی‌تر است [۹]. علیرغم مزایای فراوان ریزش‌بکه‌ها، عملکرد، کنترل و حفاظت ریزش‌بکه‌ها نسبت به شبکه‌های سنتی متفاوت است. یکی از چالش‌های اصلی در عملکرد ریزش‌بکه‌ها، طراحی مطلوب یک سیستم حفاظت هماهنگ و قوی است که بتواند به سرعت نسبت به ایزوله کردن خطا عمل نماید [۱۰، ۱۱]. تاکنون روش‌های مختلفی برای پوشش مشکلات ناشی از حضور منابع تولید پراکنده بر روی عملکرد سیستم حفاظتی و همچنین حفظ هماهنگی حفاظتی بیان شده است. تعدادی از این روش‌ها دارای معایبی مانند هزینه‌های قابل توجه در پیاده‌سازی و پیچیده شدن شرایط برقراری هماهنگی حفاظتی هستند. بنابراین لازم است روشی ارائه شود که علاوه بر بهبود سیستم حفاظتی در شبکه‌های توزیع، معایب روش‌های ارائه‌شده را نیز پوشش دهد [۱۲]. با تحقیق بر روی حفاظت ریزش‌بکه در شرایط عملکرد عادی و شرایط خطا نتیجه می‌گیریم که طرح‌های حفاظتی سنتی در یک ریزش‌بکه بنا به دلایل زیر با موفقیت عمل نمی‌کنند [۱۳]:

- شارش توان در یک ریزش‌بکه همیشه یک طرفه نیست زیرا در دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای عمل می‌کند. علاوه‌براین سطح جریان اتصال کوتاه در حالت جزیره‌ای در مقایسه با حالت متصل به شبکه کمتر است.
- جایگزینی و یا ارتقاء طرح‌های حفاظتی سنتی موجود به دلیل افزایش سطح جریان خطا، هزینه‌های زیادی را تحمیل می‌کند.
- از آنجایی که واحدهای DG از طریق یک مبدل با قابلیت تغذیه محدود جریان خطا به ریزش‌بکه متصل می‌شوند، طرح‌های حفاظتی سنتی مانند استفاده از فیوزها قابل اجرا نمی‌باشند.

محدودکننده جریان خطای ابرسانی^۲ (SFCL) یکی از مهم‌ترین نوآوری‌ها در زمینه محدودکننده‌های جریان خطا در سال‌های اخیر می‌باشد. SFCL دارای ویژگی‌های خوبی برای کنترل سطوح جریان خطا بدلیل امپدانس متغیر آن‌ها در شرایط عادی و خطا می‌باشد. ویژگی کاهش سطح جریان خطا در سیکل اول جریان خطا و همچنین توقف سیکل اول جریان خطا با توجه به نمودار مشخصه مقاومتی آن، بزرگ‌ترین مزیت SFCL است. در شرایط عادی، محدودکننده‌های جریان خطای ابرسانا (SFCLs) در حالت ابرسانی عمل می‌کند و امپدانس ناچیزی دارند. به خصوص از نوع مقاومتی آن به دلیل گذر خیلی سریع از حالت با مقاومت ناچیز یا حالت ابرسانا به حالت با مقاومت بالا به صورت خیلی سریع هر جریان خطایی را کاهش می‌دهند [۱۴، ۱۵]. بنابراین معرفی SFCLs بسیار سودمند می‌باشند به طوری که برنامه‌های حفاظتی سنتی و مدارشکن‌ها بدون هیچ گونه آسیبی عمل می‌کنند. مطالعات نشان می‌دهد که توسعه SFCLs یکی از جذاب‌ترین گزینه‌ها برای حل مشکلات جریان خطا است [۱۶، ۱۷]. همچنین استفاده همزمان از SFCL و ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابرسانا جهت کاهش دامنه جریان خطا و فراهم نمودن ولتاژ لینک DC، مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش به دلیل استفاده از ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابرسانا، هزینه‌ها به صورت قابل توجهی افزایش می‌یابد [۱۸].

- SFCL را می‌توان براساس امپدانس محدودکننده جریان خطا، به دو نوع القایی (L) و مقاومتی (R) طبقه‌بندی نمود. SFCL مقاومتی نسبت به SFCL القایی دارای مزیت‌های ویژه‌ای به شرح زیر است [۱۵، ۱۹].
- محدودکننده جریان خطای ابرسانی مقاومتی^۲ (RSFCL) ساده‌ترین و واضح‌ترین شکل SFCL است، زیرا ابرساناها از نظر



الکتریکی با رساناهای فاز به صورت سری هستند.

- در صورت بروز هرگونه خرابی بر روی RSFCL به هیچ وجه شرایط خطرناکی برای شبکه ایجاد نمی‌نماید.
- در مقایسه با SFCL القایی که در ساختار خود به آهن نیاز دارد و دارای اندازه بزرگ‌تر، وزن سنگین‌تر و تلفات آهن می‌باشد، RSFCL چنین معایبی را ندارد.

• پس از عبور جریان که بزرگ‌تر از جریان بحرانی ابررسانا است، RSFCL فرآیند فرونشانی را آغاز نموده که منجر به انتقال وضعیت ابررسانا به حالت مقاومتی می‌شود. بنابراین عملاً هیچ تلفات الکتریکی در طول عملیات عادی در RSFCL وجود ندارد. به طور کلی RSFCL به یک مرحله عملیات محدودکنندگی جریان محدود نمی‌شود، ولی معمولاً به یک دوره بازیابی پس از هر عملیات نیاز دارد، که در طول آن المنت تا زمانی که به حالت ابررسانایی خود برگردد سرد می‌شود.

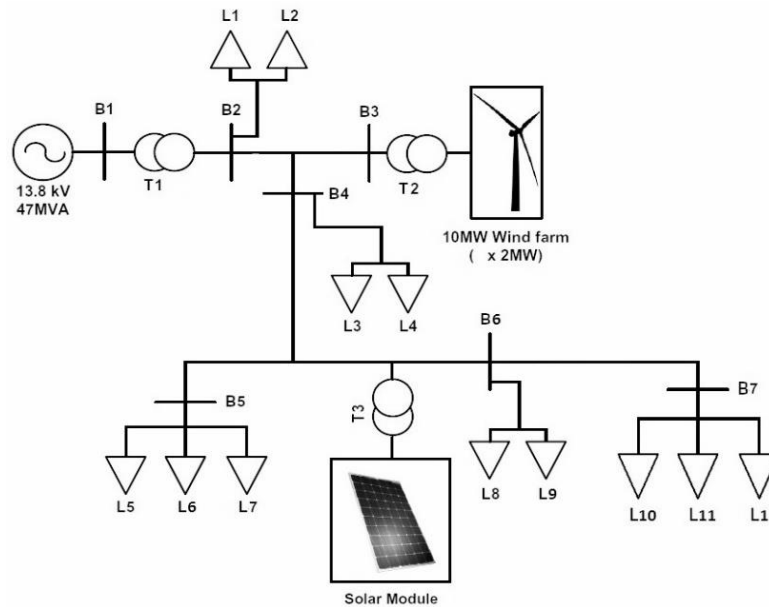
در برخی از مطالعات استفاده از SFCL مقاومتی جهت کاهش سطح جریان اتصال کوتاه مطرح شده است. در این روش، مدار معادل SFCL مورد بحث قرار گرفته و مشکل ایجاد تلفات توان و اضافه حرارت بوجود آمده ناشی از به‌کارگیری این نوع SFCL، بررسی گردیده است. برای رفع این مشکل به دست آوردن امپدانس بهینه SFCL مقاومتی بعنوان یک راه حل مورد تأکید قرار گرفته است [۲۰]. از طرفی ساختار، مشخصه عملکرد و مدل‌سازی یک واحد SFCL مقاومتی با روابط ریاضی مربوط به آن در نرم‌افزار MATLAB/Simulink ارائه شده و نتایج مورد بررسی قرار گرفته است [۲۱].

استفاده از RSFCL بدلیل نقش موثر آن در کاهش سطح جریان اتصال کوتاه بسیار جذاب می‌باشد. اما از آنجایی که استفاده از RSFCL با هزینه ساخت و تلفات بالایی همراه است، بدست آوردن مقاومت بهینه و تعیین مکان مناسب نصب آن امری ضروری می‌باشد. معمولاً مقدار مقاومت RSFCL بین ۲ الی ۵۰ اهم در نظر گرفته می‌شود [۲۲، ۲۳]. برای مدل نمودن RSFCL در مقالات از روش‌های متفاوتی استفاده شده است که یکی از آنها استفاده از مدل ریاضی براساس مطالعات تجربی در یک سیستم توزیع توان واقعی است [۲۴]. یکی از روش‌های دیگر مدل نمودن RSFCL، استفاده از مدل ریاضی آن با توجه به نوع مواد ابررسانای استفاده شده در ساختار RSFCL است که براساس مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان (E-J) ابررساناهای با دمای فوق‌العاده بالا (HTS) می‌باشد [۲۵، ۲۶].

در این مقاله، پس از شبیه‌سازی یک ریزشبکه کامل شامل واحدهای تولید، انتقال و توزیع و همچنین ارائه یک مدل شبیه‌سازی شده از RSFCL براساس مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان (E-J) ابررساناهای با دمای فوق‌العاده بالا (HTS)، جهت تعیین مکان نصب و مقاومت بهینه RSFCL، از الگوریتم ژنتیک با یک تابع هدف پیشنهادی با در نظر گرفتن تلفات انرژی RSFCL در زمان وقوع خطا، ولتاژ ترمینال ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) با حفظ الزامات گذر از ولتاژ پایین (LVRT) و ظرفیت قطع کلیدهای ریزشبکه استفاده شده است. پس از اعمال انواع خطاها در نقاط مختلف ریزشبکه، اثربخشی RSFCL و تابع هدف پیشنهادی در کاهش سطح جریان اتصال کوتاه ریزشبکه، بهبود الزامات LVRT و همچنین استفاده همزمان RSFCL و اتوریکلوزر در کاهش قابل توجه اختلالات پس از رفع خطا به درستی تایید می‌شوند. در انتها نیز مقایسه تحلیلی روش پیشنهادی با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و اثر بخشی آن را به اثبات می‌رساند.

۲- مدل ریزشبکه مورد مطالعه

یک ریزشبکه کامل شامل واحدهای تولید، انتقال و توزیع، برای تحلیل عملکرد و واکنش یک RSFCL در زمان وقوع خطاهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریزشبکه مدل شده که شامل یک ژنراتور به عنوان واحد تولید اولیه، یک مزرعه بادی و خورشیدی به عنوان منابع تولید پراکنده و همچنین شش بار صنعتی و شش بار خانگی می‌باشد، در شکل (۱) نشان داده می‌شود. واحد تولید اولیه شامل یک ژنراتور ۴۷ مگاوات آمپری، ۱۳/۸ کیلوولت، ۶۰ هرتز و یک ترانسفورماتور افزایشده است. پارامترهای ریزشبکه در جدول (۱) ارائه شده است. مزرعه بادی و مزرعه خورشیدی نیز توسط ترانسفورماتور، توان را به شبکه توزیع تزریق می‌کنند. مدل‌سازی مزرعه بادی براساس مدل Hydro-Quebec-Type-IV انجام شده است که در آن توان باد توسط یک ژنراتور سنکرون به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. تبدیل توان توسط یک مبدل AC-DC-AC انجام می‌شود که شامل یکسوساز دیودی، یک مبدل افزایشده DC-DC و یک مبدل سمت شبکه است. در مدل مزرعه بادی Type-IV یک کنترل گام برای محدود کردن توان خروجی مطابق مقادیر نامی استفاده شده است. علاوه بر این ویژگی رسیدن به حداکثر توان با وجود سرعت پائین باد بوسیله بهینه‌سازی سرعت توربین یک مزیت خاص در این مدل می‌باشد [۲۷].



شکل (۱): ریز شبکه مورد مطالعه

در ریز شبکه شبیه سازی شده یک مزرعه بادی ۱۰ مگاواتی در نظر گرفته شده است. این نیروگاه شامل پنج نیروگاه بادی ۲ مگاواتی است که از طریق یک فیدر با طول ۳ کیلومتر و سطح ولتاژ ۲۵ کیلوولت به ریز شبکه متصل شده اند.

جدول (۱): شرح واحدهای مختلف ریز شبکه

مشخصات	نوع تجهیزات
$S_B = 47 \text{ MVA}, V_B = 13.8 \text{ kV}$ $f = 60 \text{ Hz}, R_s = 2.8544 e^{-3} \Omega,$ $X_d = 1.305 \Omega, X_q = 0.474 \Omega$	ژنراتور
$T1 = 47 \text{ MVA}, 13.8/25 \text{ kV}, D_1/Y_g$ $T2 = 12.5 \text{ MVA}, 525 \text{ V}/25 \text{ kV}, D_1/Y_g$ $T3 = 200 \text{ kVA}, 260 \text{ V}/25 \text{ kV}, D_1/Y_g$ $f = 60 \text{ Hz}, R_1 = R_2 = 0.002 \Omega, L_1 = 0 \text{ H},$ $L_2 = 0.12 \text{ H}, R_m = 500 \Omega, L_m = 500 \text{ H}$	ترانسفورماتور
10 MW (5 × 2 MW)	مزرعه بادی
1.64 MW (20 × 82 kW), 1000 W/m ²	مزرعه خورشیدی
3 phase, $f = 60 \text{ Hz}, R_1 = 0.02546 \Omega/km,$ $R_0 = 0.3864 \Omega/km, L_1 = 0.9337 e^{-3} \text{ H/km}$ $L_0 = 4.1264 e^{-3} \text{ H/km}, C_1 = 12.74 e^{-9} \text{ F/km},$ $C_0 = 7.751 e^{-9} \text{ F/km}$	خطوط انتقال
10 MW, 5MW, 3MW, 3MW, 2MW 2MW	بار صنعتی
3 MW, 2MW, 2MW, 2MW, 1.5MW, 1.5MW	بار خانگی

مزرعه خورشیدی مورد تجزیه و تحلیل در این مطالعه متشکل از ۲۰ آرایه فتوولتائیک (PV) ۸۲ کیلووات است که توان ۱/۶۴ مگاوات را به ریز شبکه تزریق می کنند. هر آرایه شامل ۸ ماژول متصل به صورت سری و هر ماژول دارای ۵۰ رشته به صورت موازی است که منجر به توان خروجی حداکثر ۸۲ کیلووات می شود. آرایه خورشیدی از طریق دو مبدل افزایش دهنده DC-DC ولتاژ را به ۵۰۰ ولت افزایش

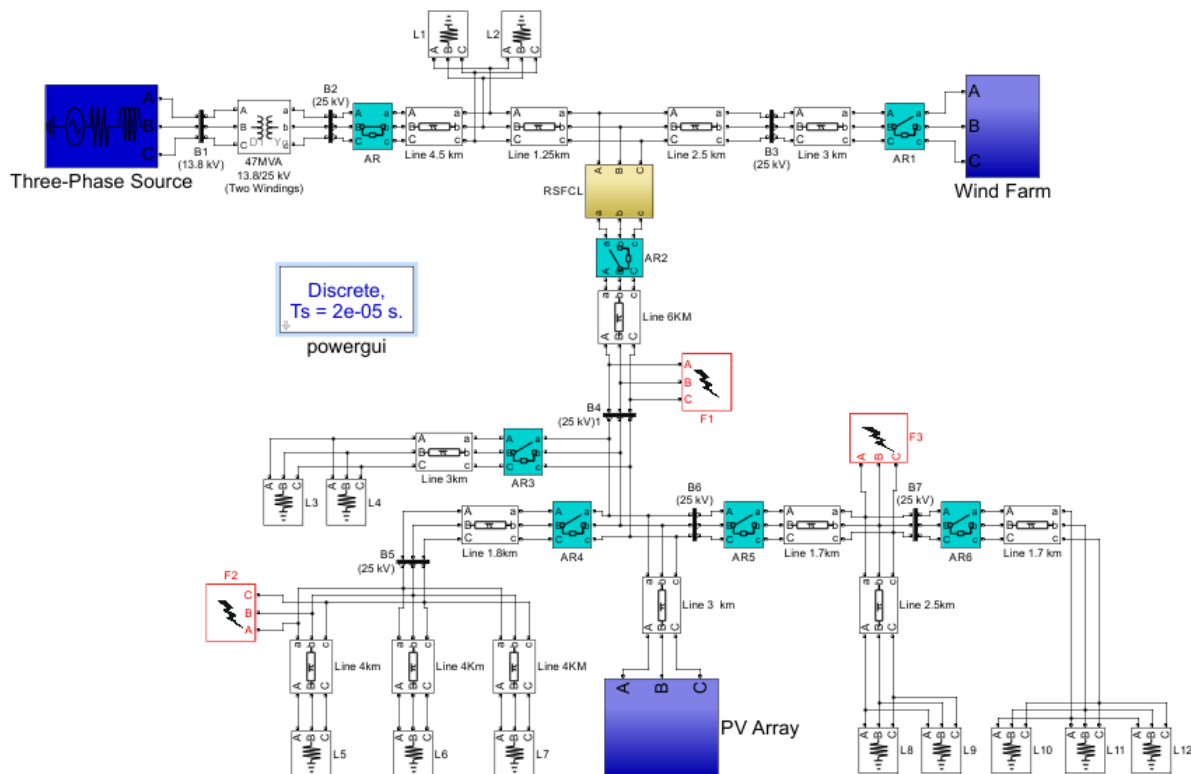
می‌دهد و یک مبدل منبع ولتاژ سه‌فاز^۸ (VSC) که ۵۰۰ ولت DC را به ۲۶۰ ولت AC تبدیل می‌کند. خروجی VSC به یک فیلتر غیرفعال با بانک خازنی ۲۰ کیلووالت متصل می‌شود تا هارمونیک‌ها را فیلتر کند. همچنین از یک ترانسفورماتور با ظرفیت ۲۰۰ کیلووالت‌آمپر و نسبت تبدیل ۲۶۰ ولت به ۲۵ کیلووالت برای اتصال مزرعه خورشیدی به ریزشبه استفاده می‌شود. همچنین از روش اختلال و مشاهده برای کنترل ردیابی نقطه ماکزیمم توان^۹ (MPPT) استفاده می‌شود [۲۸]. الگوریتم MPPT به شکل تابع MATLAB اجرا می‌شود که شامل یک حلقه جبری است [۲۹].

این مطالعه تجزیه و تحلیل یک ریزشبه مدل‌سازی شده با واحدهای DG در شرایط خطاهای مختلف را ارائه می‌دهد. در شکل (۲) علاوه بر شماتیک ریزشبه، سه مکان خطا به صورت F1، F2، F3 و محل نصب RSFCL نشان داده شده است.

۳- بهینه‌یابی مقدار مقاومت و محل نصب RSFCL با الگوریتم ژنتیک

برای انتخاب مقدار مقاومت و محل نصب RSFCL در یکی از نقاط با قابلیت نصب RSFCL در ریزشبه باید به این نکته توجه کرد که مکان بهینه و مقدار مقاومت زمانی بدست می‌آید که با کمترین مقدار مقاومت، در مناسب‌ترین مکان نصب در ریزشبه، بیشترین کاهش سطح جریان خطا محقق شود. چرا که مقدار و اندازه مقاومت در میزان هزینه ساخت و قیمت یک RSFCL بسیار موثر و مهم می‌باشد [۲۶].

در این مقاله، برای انتخاب مقدار مقاومت و محل نصب بهینه RSFCL، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. مراحل اصلی اجرای الگوریتم ژنتیک به صورت زیر است:



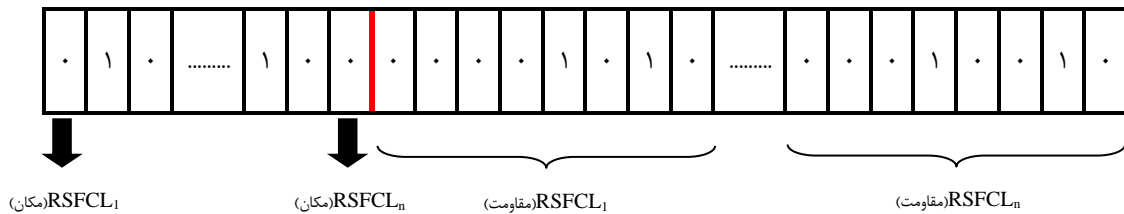
شکل (۲): نمایش ریزشبه مورد مطالعه در نرم افزار

۳-۱- معادل‌سازی مکان و مقاومت RSFCL

یکی از مهمترین نکات در الگوریتم ژنتیک نحوه تعریف کروموزوم جهت آرایش RSFCL و مقدار مقاومت آن می‌باشد تا در ضمن پوشش کامل متغیرهای مسئله زمان محاسباتی را نیز کاهش دهد. جهت تخصیص کروموزوم به مکان و مقاومت RSFCL، هر کروموزوم به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود، ژن‌های اول هر کروموزوم با توجه به تعداد مکان‌های با قابلیت نصب RSFCL اختصاص



یافته است. هر ژن با مقدار یک و صفر به ترتیب اتصال یا عدم اتصال RSFCL را در آن مکان نشان می‌دهد. قسمت دوم هر کروموزوم دسته های ۸ ژنی تشکیل شده که هر ۸ ژن آن به ترتیب معادل باینری مقاومت هر یک از RSFCL های نصب شده را نشان می‌دهد. شکل (۳) چگونگی تخصیص هر کروموزوم را جهت RSFCL ها و نماد n تعداد مکان‌های با قابلیت نصب RSFCL در ریزش شبکه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): نمایش نحوه تخصیص یک کروموزوم به مکان و مقاومت RSFCL

۲-۳- تابع برازش (Fitness)

برای بدست آوردن میزان برازندگی هر کروموزوم، ابتدا مکان و مقاومت هر کدام از RSFCL ها را با توجه به محتوای ژن‌های مربوط به آن بدست می‌آوریم. سپس مقادیر عددی بدست آمده از کروموزوم‌ها در تجهیزات سیستم جایگذاری می‌شود و اتصال کوتاه بر روی نقاط مختلف ریزش شبکه انجام می‌شود. عدد برازش هر کروموزوم با توجه به تابع هدف تعیین شده بدست می‌آید. در این مقاله، تابع هدف با در نظر گرفتن شرط‌های زیر تعریف شده است:

- با توجه به محدودیت‌های اقتصادی موجود در نصب RSFCL ها و قیمت بالای این تجهیزات، باید با کمترین تعداد RSFCL، مشکل سطح بالای جریان اتصال کوتاه را حل کنیم. بنابراین این شرط در تابع هدف به صورت زیر می‌باشد.

$$f_1 = (A * N_{RSFCL}) \quad (1)$$

- مقاومت RSFCL باید طوری انتخاب شود تا با کمترین مقدار مقاومت، بیشترین کاهش جریان خطا را داشته باشد. این نکته به عنوان دومین شرط در تابع هدف به صورت زیر لحاظ شده است.

$$f_2 = (B * \sum_1^n R_{RSFCL}) \quad (2)$$

- با توجه به اینکه هزینه خرید و نگهداری تعداد RSFCL کمتر با مقاومت بیشتر نسبت به تعداد RSFCL بیشتر با مقاومت کمتر، بسیار بیشتر می‌باشد. بنابراین می‌بایست مطابق رابطه (۳) شرطی را در تابع هدف در نظر گرفت که تا حد امکان برای حل مشکل جریان اتصال کوتاه، مقاومت کمترین تعداد RSFCL را قبل از اضافه کردن RSFCL های جدید، افزایش دهد. در این شرط هدف، می‌نیم کردن مقدار عددی رابطه (۳) می‌باشد بنابراین الگوریتم پیشنهادی با این شرط کمترین تعداد RSFCL را با مقدار مقاومت بیشتر را نسبت به تعداد بیشتر RSFCL با مقاومت‌های کمتر در اولویت قرار می‌دهد.

$$f_3 = (C * [N_{RSFCL} * \sum_1^n R_{RSFCL}]) \quad (3)$$

- چهارمین شرط، کمترین میزان تلفات انرژی در RSFCL در حین خطا تعریف شده است که مطابق رابطه (۴) عبارت است از:

$$E_{RSFCL} = \int_{t_1}^{t_2} i^2(t) R_n \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) dt \quad (4)$$

- در این رابطه $i(t)$ جریان عبوری از RSFCL، $\Delta(t) = t_1 - t_2$ مدت زمان وقوع خطا، E_{RSFCL} انرژی تلف شده در RSFCL و τ ثابت زمانی می‌باشد. در تابع هدف پیشنهادی این شرط به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$f_4 = (D * \sum_1^n E_{RSFCL}^n) \quad (5)$$



• وقوع اتصال کوتاه در قسمتی از ریزشبهه ممکن است موجب بروز افت ولتاژ در ترمینال DFIG گردد. در نتیجه توان اکتیو DFIG کاهش می‌یابد و شاهد وقوع اضافه جریان در استاتور و روتور آن خواهیم بود. از طرفی بدلیل ظرفیت کم مبدل‌های الکترونیک قدرت DFIG، ممکن است این مبدل‌ها قادر به تحمل این اضافه جریان‌ها نباشند. بنابراین مبدل‌ها به منظور جلوگیری از آسیب دیدن قفل شده و DFIG از ریزشبهه خارج می‌شود [۳۰].

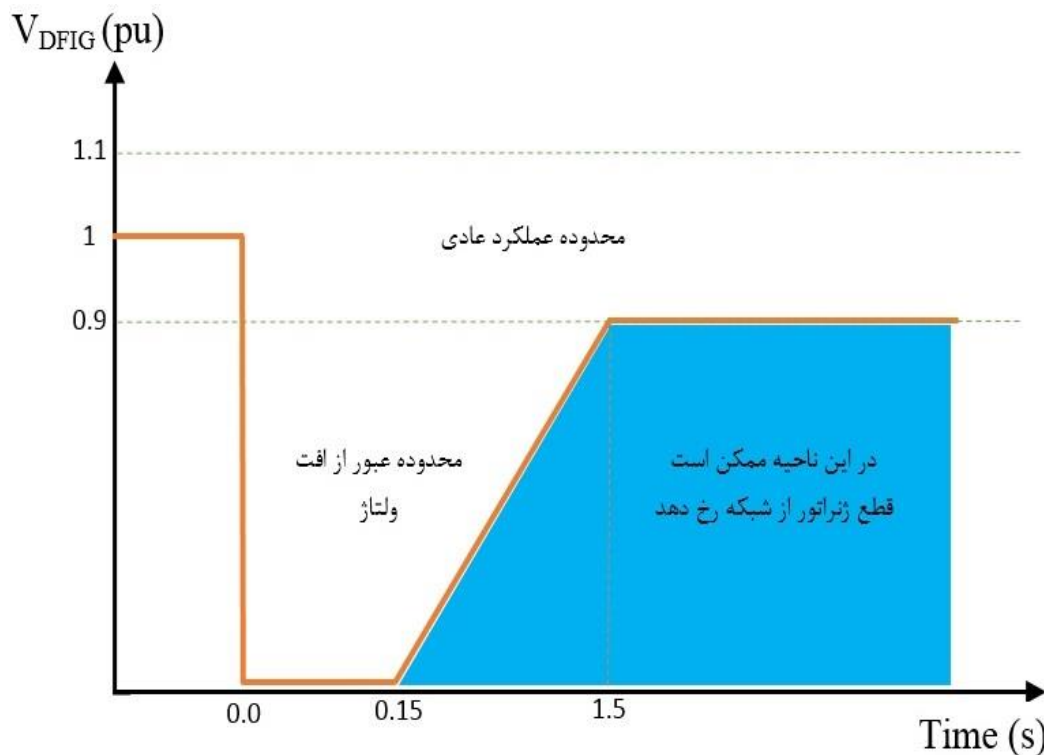
بنابراین در یک ریزشبهه با نفوذ بالای مزارع بادی، خارج شدن DFIG جهت جلوگیری از آسیب دیدن مبدل‌های الکترونیک قدرت آن در شرایط افت ولتاژ، باعث قطع بی‌مورد ظرفیت بالایی از توان تولید ریزشبهه می‌شود. به منظور پیشگیری از وقوع چنین حوادثی، الزامات LVRT در استانداردهای شبکه تعریف شده است [۳۱]. در شکل (۴) الزامات مربوط به کشور آلمان نشان داده شده است. طبق این الزامات، ژنراتور باید برای مدت زمان مشخصی به شبکه متصل باقی بماند که این مدت وابسته به شدت افت ولتاژ ترمینال DFIG می‌باشد. به عبارت دیگر DFIG ممکن است در ناحیه آبی رنگ از شبکه قطع شود و خارج از آن اجازه قطع شدن از شبکه را نخواهد داشت [۳۲]. همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، در شرایط وقوع افت ولتاژ ۱۰۰ درصدی، ژنراتور مذکور به مدت ۱۵۰ میلی ثانیه به شبکه متصل باقی می‌ماند و پس از این زمان امکان قطع شدن آن از شبکه وجود دارد. در این مقاله الزامات LVRT کشور آلمان به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است.

طبق این مشخصه واضح است که اگر دامنه ولتاژ DFIG در حین خطا بهبود داده شود، مدت زمان اتصال DFIG به شبکه نیز افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر موجب بهبودی الزامات LVRT می‌گردد. این امر از طریق استفاده از RSFCL امکان پذیر است. بنابراین با توجه به شکل (۴)، در تابع هدف جهت حفظ و بهبودی الزامات LVRT، شرط جدیدی مربوط به ولتاژ ترمینال DFIG مطابق رابطه (۶) در نظر گرفته می‌شود.

$$0.9 \leq V_{DFIG} (pu) \leq 1.1 \quad (6)$$

برای جلوگیری از افزایش یا کاهش ولتاژ ترمینال DFIG به بیش از ۱/۱ پریونیت و یا کمتر از ۰/۹ پریونیت، تعریف یک فاکتور جریمه ضروری است. فاکتور جریمه در تابع هدف با عنوان (PF1) مطرح شده و به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\text{If } (V_{DFIG} (pu) \geq 1.1) \text{ or } (V_{DFIG} (pu) \leq 0.9) \text{ Then } (PF1 = 1500) \text{ Else } (PF1 = 0) \quad (7)$$



شکل (۴): الزامات LVRT کشور آلمان [۳۲]



• مقدار مقاومت تعیین شده برای RSFCL مطابق با رابطه (۸) باید در محدوده بین ماکزیمم و مینیمم مقاومت مجاز برای RSFCL در نظر گرفته شود. در این مقاله با در نظر گرفتن لزوم رعایت الزامات LVRT و در نتیجه تضمین عملکرد بدون قطعی مزارع بادی در حین خطا حداقل و حداکثر مقاومت RSFCL قابل محاسبه است.

$$R_{RSFCL}^{\min} \leq R_{RSFCL} \leq R_{RSFCL}^{\max} \quad (۸)$$

که R_{RSFCL}^{\min} و R_{RSFCL}^{\max} به ترتیب ماکزیمم و مینیمم مقاومت مجاز برای RSFCL هستند. برای جلوگیری از افزایش بیش از حد مقاومت RSFCL، تعریف یک فاکتور جریمه ضروری است. فاکتور جریمه برای هر RSFCL در تابع هدف با عنوان (PF2) مطرح شده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{If } (R_{RSFCL} > R_{RSFCL}^{\max}) \text{ or } (R_{RSFCL} < R_{RSFCL}^{\min}) \text{ Then } (PF2 = 1000) \text{ Else } (PF2 = 0) \quad (۹)$$

• نسبت ماکزیمم جریان اتصال کوتاه به قدرت قطع کلیدهای موجود در ریزش شبکه، باید کمتر از ۱ باشد. این بدان معنی است که سطح جریان اتصال کوتاه باید در محدوده قدرت قطع کلیدها باشد تا کلیدهای قدرت توانایی قطع جریان اتصال کوتاه را در لحظه وقوع خطا داشته باشند.

$$\frac{I_{KSS}^n}{I_{ic}^R} \leq 1 \quad (۱۰)$$

که I_{ic}^R و I_{KSS}^n به ترتیب ماکزیمم جریان اتصال کوتاه و قدرت قطع کلید بر حسب کیلو آمپر است. این شرط در تابع هدف به صورت زیر می‌باشد.

$$f_5 = (E * \sum_1^n \frac{I_{KSS}^n}{I_{ic}^R}) \quad (۱۱)$$

• ماکزیمم جریان اتصال کوتاه بعد از نصب RSFCL برای هر یک از نقاط ریزش شبکه با قابلیت نصب RSFCL، باید حداقل ۱۰٪ نسبت به قبل از نصب RSFCL کاهش داشته باشد. بنابراین یک فاکتور جریمه در تابع هدف با عنوان (PF3) برای تحقق این شرط در نظر گرفته شده است.

$$\text{If } (I_{KSS}(\text{withoutRSFCL}) - I_{KSS}(\text{withRSFCL}) \geq 0.1(I_{KSS}(\text{withoutRSFCL}))) \text{ Then } (PF3 = 800) \text{ Else } (PF3 = 0) \quad (۱۲)$$

با توجه به ۸ بند مطرح شده در بالا، عدد برازش برای هر کروموزوم براساس یک تابع هدف مطابق با رابطه (۱۳) با ۵ شرط و ۳ فاکتور جریمه بدست می‌آید.

$$F = (A * N_{RSFCL}) + (B * \sum_1^n R_{RSFCL}) + (C * [N_{RSFCL} * \sum_1^n R_{RSFCL}]) + \quad (۱۳)$$

$$(D * \sum_1^n E_{RSFCL}^n) + (E * \sum_1^n \frac{I_{KSS}^n}{I_{ic}^R}) + (\sum_1^n PF1) + (\sum_1^n PF2) + (\sum_1^n PF3)$$

ضرایب ۵ شرط موجود در تابع هدف شامل A، B، C، D و E بعنوان ضرایب وزنی هر یک از شرطها و با توجه به میزان اهمیت هر یک لحاظ شده است. مینیمم نمودن تابع هدف و رسیدن به کروموزومی با حداقل برازش مطابق رابطه (۱۳) هدف این الگوریتم و شرط پایان آن نیز عدم کاهش بیش از ۲ درصد تغییرات عدد برازش برای حداقل ۲۰ تکرار متوالی می‌باشد. همچنین پارامترهای الگوریتم ژنتیک با مقادیر عددی زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

- جمعیت اولیه (Population size): $N = 50$
- نرخ جهش (Mutation rate): $P_m = 0.2$
- نرخ ترکیب (Crossover rate): $P_c = 0.8$
- ماکزیمم تعداد تکرار (Maximum iteration number): ۲۰۰



پس از اجرای کلیه مراحل الگوریتم ژنتیک شامل برنامه اصلی و کلیه زیر برنامه‌های دیکد، ترکیب، جهش، تعیین برآزش در نرم افزار MATLAB و بررسی شرایط ذکر شده در آن، مقدار بهینه برای مقاومت RSFCL، ۱۲ اهم و بهترین مکان نصب RSFCL که با کمترین مقدار مقاومت، بیشترین کاهش سطح جریان اتصال کوتاه را محقق کند در محل تقاطع تمام واحدهای تولید ریزشبکه (تقاطع B2، B3 و B4) بدست می‌آید.

۴- مدل سازی محدودکننده جریان خطای ابرسانی مقاومتی (RSFCL)

در این مقاله یک مدل شبیه سازی برای RSFCL ارائه شده است. این مدل براساس مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان (E-J) ابرساناهای با دمای فوق العاده بالا (HTS) می‌باشد. مواد HTS به دلیل هزینه پایین خنک سازی مورد توجه قرار گرفته و در زمینه تجاری سازی RSFCL نیز کمک کرده است [۳۳]. یک مدل واقعی RSFCL بر اساس موارد زیر طراحی شده است [۲۷، ۳۴].

• مدل سازی مستقل RSFCL برای هر فاز:

در مطالعه سیستم‌های سه فاز قدرت، RSFCL برای هر فاز مدل می‌شود تا آنها را به صورت مستقل در طول خطاهای نامتعادل سیستم که در سیستم‌های توزیع رایج هستند اجرا کند. از این رو، کل سیستم را می‌توان برای انواع خطاها در مکان‌های مختلف با مدل سازی عملکرد مستقل هر فاز ارزیابی کرد.

• مدل سازی یک RSFCL قابل اطمینان:

این مدل با توجه به سناریوهای مختلف خطا قابل اطمینان بوده و اثرات مدت زمان‌های مختلف وقوع خطا، تعداد دفعات مختلف وقوع خطا و مقادیر مختلف جریان خطا را مدل می‌کند.

• ابعاد RSFCL:

ابعاد سیم‌های ابرسانا با توجه به مقاومت بهینه ۱۲ اهم در جدول (۲) ارائه شده است [۳۴].

RSFCL بر روی ماده ابرسانی Bi2212 طراحی و پیاده سازی گردیده است. ابرسانای Bi2212 دارای سه حالت خزش شار (ابرسانا)، حالت شارش شار و حالت نرمال (مقاومتی) می‌باشد. رابطه بین میدان الکتریکی (E) و چگالی جریان (J) برای این سه حالت در شکل (۵) نشان داده شده است. در حالت خزش شار، ابرسانای دمای بالا به عنوان یک مقاومت اهمی بسیار پایین در نظر گرفته می‌شود و معادلات مربوط به آن به صورت زیر می‌باشد.

$$E^{(1)}(J, T) = E_c \times \left(\frac{J}{J_c(T)} \right)^{\alpha(T)} \quad (14)$$

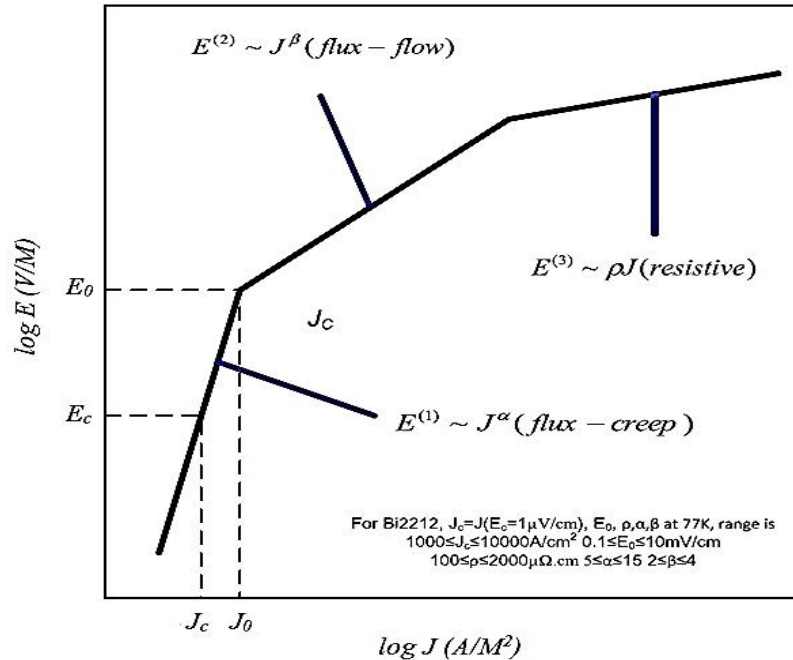
جدول (۲): پارامترهای مدل RSFCL

مقدار	نماد	شرح پارامتر
250	I_{SC}	طول ابرسانا (m)
90	W_{SC}	عرض ابرسانا (m m)
0.12	t_{SC}	ضخامت ابرسانا (m m)
77	T_A	دمای محیط برای ابرسانا (K)
95	T_C	دمای بحرانی ابرسانا (K)
7	$\alpha(77K)$	توان ناحیه خزش شار (ابرسانایی) در ۷۷ کلوین (بدون واحد)
4	β	توان ناحیه شارش شار در ۷۷ کلوین (بدون واحد)
$1/5 \times e^7$	$J_c(77K)$	چگالی جریان بحرانی در ۷۷ کلوین (A/m^2)
0.1	E_0	میدان الکتریکی در گذار از حالت ابرسانایی به حالت شارش شار (V/m)
$7 \times e^{-6}$	ρ	مقاومت حالت رسانایی عادی (Ωm)
$1/5 \times e^3$	K	ضریب انتقال حرارت به سرمایش مخزن ($W/(Km^2)$)
$1/5 \times e^6$	C_v	گرمای ویژه حجمی ابرسانا ($J/(Km^3)$)



در معادله (۱۴) چگالی جریان بحرانی (J_c) در میدان الکتریکی بحرانی $(E_c) = 1 \mu V/cm$ تعریف می‌شود. همچنین $\alpha(T)$ به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\alpha(T) = \max(\beta, \alpha^*(T)) \quad (15)$$



شکل (۵): مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان و حالت RSFCL [۲۴]

و $\alpha^*(T)$ نیز به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\alpha^*(T) = \frac{\log(E_0, E_c)}{\log \left[\left(\frac{J_c(77K)^{(1-1/\beta)}}{J_c(T)} \right) \times \left(\frac{E_0}{E_c} \right)^{\frac{1}{\alpha(77K)}} \right]} \quad (16)$$

در حالت شارش شار، میدان الکتریکی (E) با چگالی جریان (J) افزایش می‌یابد و با رابطه زیر نشان داده می‌شود.

$$E(J, T) \alpha(J/J_c)^n \quad (17)$$

$$E^2(J, T) = E_0 \times \left(\frac{E_c}{E_0} \right)^{\beta/\alpha(77K)} \times \frac{J_c(77K)}{J_c} \times \left(\frac{J}{J_c(77K)} \right)^\beta \quad (18)$$

و در حالت عادی، در چگالی‌های بالاتر، ابررسانا حالت خود را به هادی اهمی تغییر می‌دهد که به آن حالت مقاومتی نیز گفته می‌شود. در این حالت، میدان الکتریکی متناسب با جریان بوده و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E^3(J, T) = \rho(T_c) \times \frac{T}{T_c} \times J \quad (19)$$

که در آن ρ مقاومت ویژه در حالت عادی و J_c چگالی جریان بحرانی ابررسانای دمای بالا است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

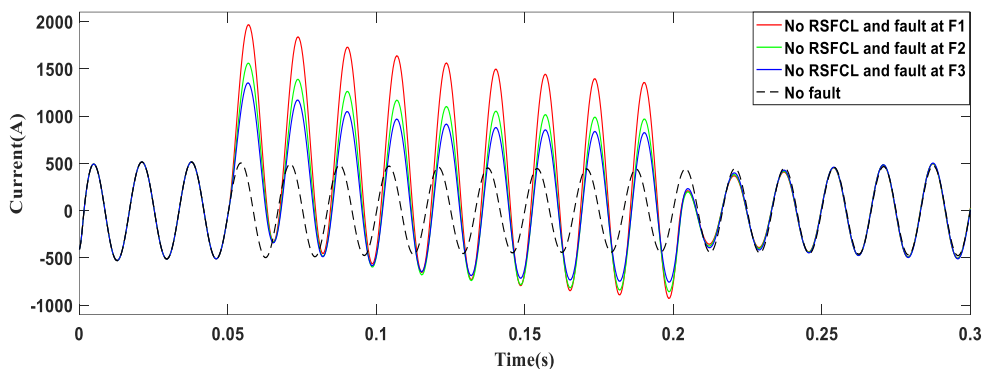
در این بخش عملکرد RSFCL مدل‌سازی شده براساس مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان (E-J) ابررساناهای با دمای فوق‌العاده بالا (HTS) و تابع هدف پیشنهادی در کاهش سطح اتصال کوتاه ریزش‌بکه، بهبود الزامات LVRT و کاهش افت ولتاژ ترمینال DFIG و همچنین تاثیر بکارگیری اتوریکلوزر به‌مراه RSFCL در کاهش اختلالات ریزش‌بکه پس از وقوع انواع خطاها در نقاط مختلف ریزش‌بکه



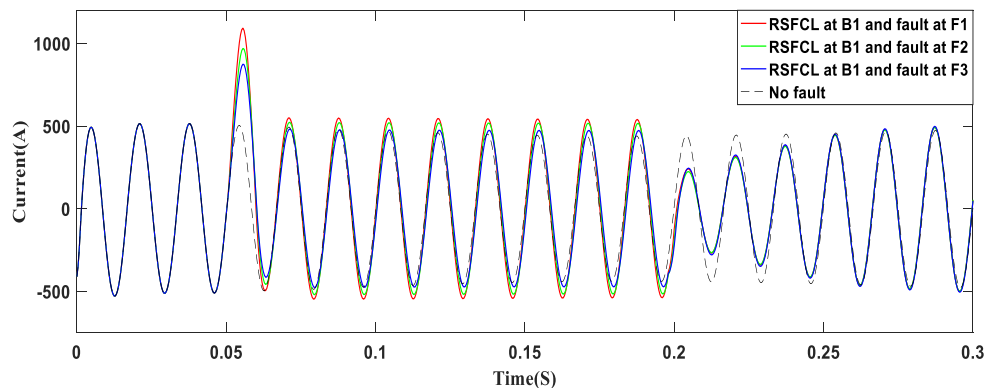
مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور یک ریزشبه کامل شامل واحدهای تولید، انتقال و توزیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. ریزشبه مورد مطالعه شامل یک ژنراتور به عنوان واحد تولید اولیه، یک مزرعه بادی و خورشیدی به عنوان منابع تولید پراکنده و همچنین شش بار صنعتی و شش بار خانگی می‌باشد که با استفاده از نرم‌افزار MATLAB/Simulink مدل‌سازی شده است.

۵-۱- تجزیه و تحلیل سطوح انواع خطاها

برای بررسی سطح جریان خطا در ریزشبه مدل‌سازی شده، سه مکان خطا به صورت F1، F2 و F3 که دارای بالاترین سطح جریان اتصال کوتاه بودند و همچنین محل نصب RSFCL در محل تقاطع تمام واحدهای تولید ریزشبه (تقاطع B2، B3 و B4) در شکل (۲) نشان داده شده است. در مکان‌های F1، F2 و F3، چهار نوع خطا شامل خطاهای تک‌فاز به زمین، دوفاز، سه‌فاز و سه‌فاز به زمین در نظر می‌گیریم. اولین مورد خطا در مطالعه ما، خطای تک‌فاز به زمین است که در زمان ۵۰ میلی‌ثانیه برای مدت ۱۵۰ میلی‌ثانیه رخ می‌دهد و شکل موج جریان متناظر آن در شکل (۶) نشان داده می‌شود.



شکل (الف) وقوع خطای تک‌فاز به زمین بدون حضور RSFCL



شکل (ب) وقوع خطای تک‌فاز به زمین با حضور RSFCL

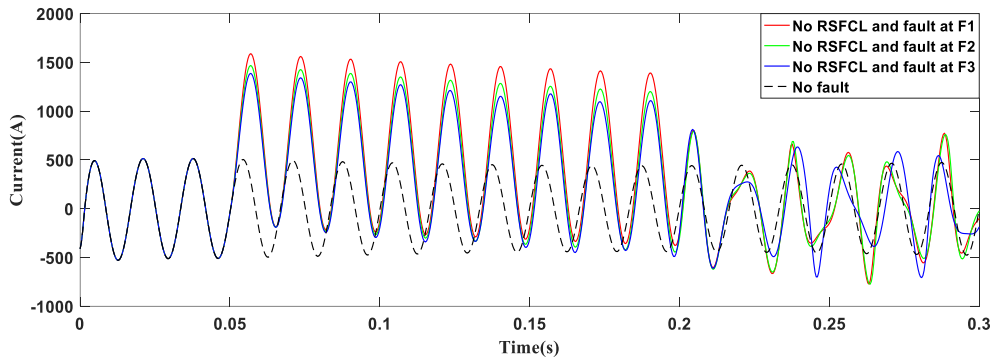
شکل (۶): پاسخ جریانی در طول یک خطای تک‌فاز به زمین

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که اولین و بیشترین پیک لحظه‌ای از جریان خطای تک‌فاز به زمین در محل F1، به ۱۹۷۰ آمپر می‌رسد که پس از حضور و عملکرد محدودکننده جریان خطای ابرسانایی مقاومتی جریان خطا در طی مدت ۵ میلی‌ثانیه و قبل از رسیدن به پیک اول، در ۱۰۹۲ آمپر محدود می‌شود. این امر نشان دهنده آن است که محدودکننده جریان خطای ابرسانایی مقاومتی پیشنهادی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش سطح پیک لحظه‌ای و اولیه جریان خطا به میزان ۴۵ درصد داشته و سطح جریان را پس از پیک اولیه و در طول مدت زمان وقوع خطا در محدوده جریان نامی حفظ می‌نماید.

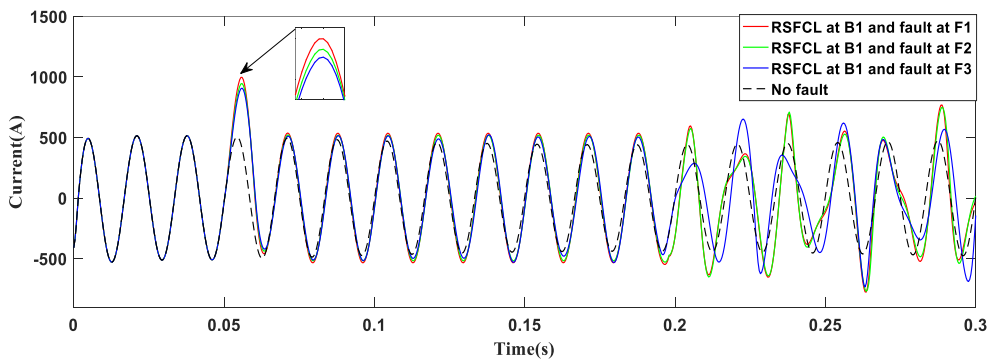
برای بررسی توانایی RSFCL مدل‌سازی شده، ریزشبه تحت خطاهای سه‌فاز و سه‌فاز به زمین قرار می‌گیرد که شکل موج جریان متناظر خطاهای سه‌فاز در شکل (۷) و خطاهای سه‌فاز به زمین در شکل (۸) نشان داده می‌شود.



در شکل های (۷) و (۸)، با اینکه زمان وقوع خطا از ۵۰ تا ۲۰۰ میلی ثانیه است اما اختلالات پس از رفع خطا در خطاهای سه فاز و سه فاز به زمین کاملا مشهود می باشد. این اختلالات ناشی از نفوذ منابع تولید پراکنده در ریزش شبکه است و تنها در خطاهای سه فاز و سه فاز به زمین شایع تر هستند. همانطور که در شکل های (۶)، (۷) و (۸) مشاهده می شود پس از وقوع انواع خطاها در ریزش شبکه مدل سازی شده، بیشترین سطح جریان اتصال کوتاه در خطای تک فاز به زمین در محل F1 رخ می دهد که RSFCL با موفقیت سطح جریان اتصال کوتاه را محدود می کند. مقادیر اندازه گیری شده سطح جریان های اتصال کوتاه در طول خطاهای مختلف با و بدون حضور RSFCL در جدول (۳) نشان داده می شود و نتایج را برای تمامی موارد مطالعه شده مقایسه کرده و مروری کوتاه از عملکرد موفق RSFCL در محدود کردن جریان خطا تا حد زیادی ارائه می دهد.

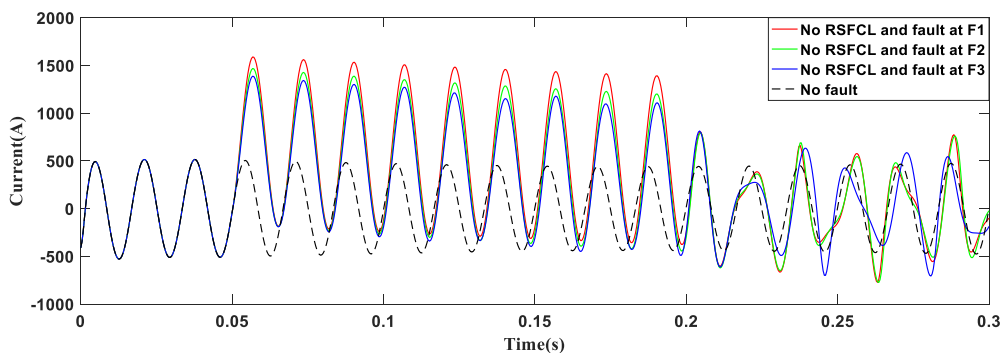


الف) وقوع خطای سه فاز بدون حضور RSFCL



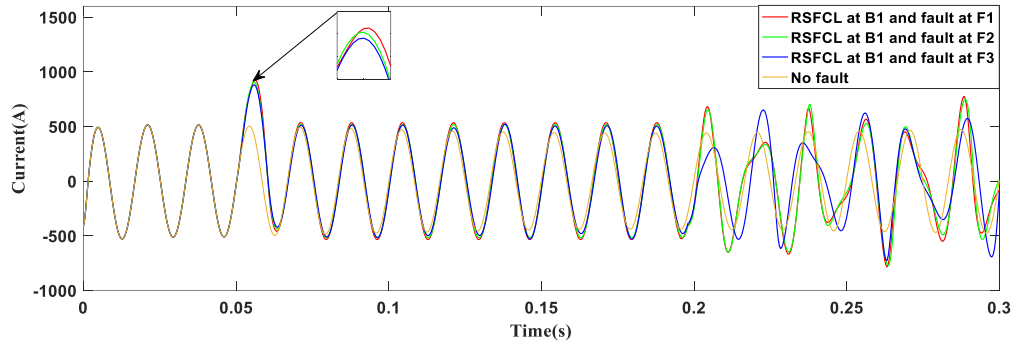
ب) وقوع خطای سه فاز با حضور RSFCL

شکل (۷): پاسخ جریانی در طول خطاهای سه فاز



الف) وقوع خطای سه فاز به زمین بدون حضور RSFCL





شکل (۸): پاسخ جریانی در طول خطاهای سه فاز به زمین با حضور RSFCL

هنگامی که در شبکه خطا رخ می دهد دمای ابرسانای استفاده شده در ساختار RSFCL، بدلیل انرژی اتلافی از آستانه دمای بحرانی (T_C) بیشتر شده و به حالت مقاومتی تغییر حالت می دهد. برای برگشت دوباره به حالت ابرسانایی یک سیستم برودتی می بایست ابرسانا را تا دمایی پایین تر از دمای بحرانی خنک کند. این دوره بازیابی می تواند تا چند دقیقه به طول انجامد [۳۴]. این مشکل بدلیل غیر قابل استفاده شدن RSFCL در زمان بازیابی بسیار مهم است. البته راه حل هایی در خصوص استفاده از ابرساناهای نوع ۲ مطرح شده است که در آن در صورتی که جریان خطا از جریان بحرانی فراتر رود، دمای ابرسانا زیر دمای بحرانی باقی می ماند. بنابراین یک RSFCL می تواند جریان را در طول جریان های خطای بالا محدود کند اما بلافاصله پس از رفع خطا به حالت ابرسانایی بازگردد و در نتیجه به هیچ دوره بازیابی نیاز نخواهد داشت [۳۴، ۳۵].

جدول (۳): بررسی عملکرد RSFCL

نوع خطا	محل وقوع خطا	جریان خطا (A) بدون RSFCL	جریان خطا (A) با RSFCL
خطای تکفاز به زمین L-G	F1	۱۹۷۰	۱۰۹۲
	F2	۱۵۶۰	۹۶۹
	F3	۱۳۵۰	۸۷۴
خطای دوفاز L-L	F1	۱۵۴۰	۱۰۳۰
	F2	۱۴۵۰	۹۹۰
	F3	۱۳۸۰	۹۶۰
خطای سه فاز L-L-L	F1	۱۵۸۵	۹۹۵
	F2	۱۴۶۵	۹۴۵
	F3	۱۳۸۵	۹۰۸
خطای سه فاز به زمین L-L-L-G	F1	۱۵۱۰	۹۲۵
	F2	۱۴۵۳	۹۰۵
	F3	۱۳۵۰	۸۸۱



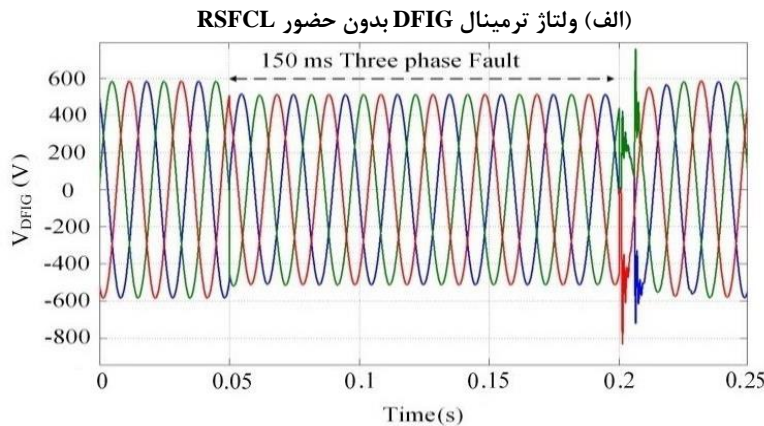
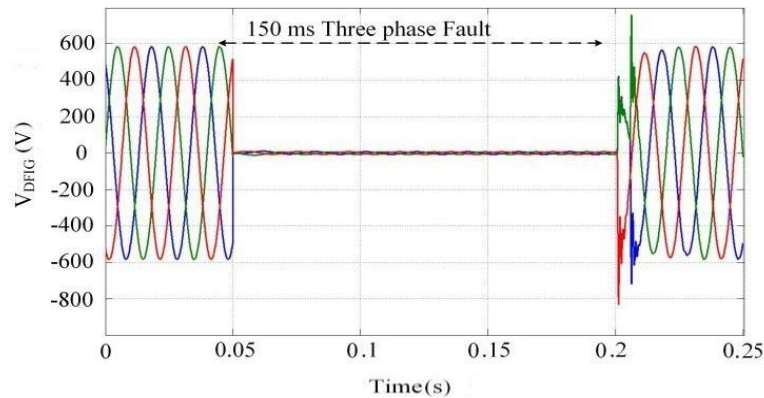
۲-۵- عملکرد تابع هدف پیشنهادی در بهبود الزامات LVRT

در ریزش شبکه مدل سازی شده از پنج نیروگاه بادی ۲ مگاواتی متصل به DFIG با ولتاژ نامی ۵۷۵ ولت استفاده شده است. مقادیر مربوط به DFIG در جدول (۴) آورده شده است.

جدول (۴): اطلاعات DFIG

مقادیر DFIG	
توان نامی	10 MW
ولتاژ نامی	575V
فرکانس	60 Hz
اندوکتانس متقابل	2.8 mH
مقاومت استاتور	2.3 Ω
اندوکتانس پراکندگی استاتور	0.165 mH
مقاومت روتور	1.52 mΩ
اندوکتانس پراکندگی روتور	157 mH

به منظور بررسی تاثیر تابع هدف پیشنهادی جهت بهبود الزامات LVRT، ولتاژ سمت DFIG در شکل (۹) نشان داده شده است. در شرایط خطای سه فاز، افت ولتاژ شدیدی مشاهده می‌گردد. لذا DFIG قادر به تحمل افت ولتاژ نبوده و از شبکه خارج می‌شود و نتیجه آن بروز مشکل در پایداری ریزش شبکه‌های با نفوذ بالای مزارع بادی خواهد بود. بر اساس شکل (۹)، روش و تابع هدف پیشنهادی با به کارگیری RSFCL ولتاژ سمت DFIG را بهبود بخشیده است. طبق الزامات LVRT، کاملاً مشخص است که در این شرایط DFIG به شبکه متصل خواهد ماند چرا که ولتاژ ترمینال آن در حد قابل قبول باقی مانده است. به عبارت دیگر، از آنجایی که RSFCL با محدود کردن جریان خطا موجب بهبود ولتاژ ترمینال DFIG به مقدار ۵۲۰ ولت در حین خطا شده است، طبق الزامات LVRT و برای افت ولتاژ کمتر از ۱ پروبیت، DFIG قادر به متصل باقی ماندن به شبکه شده است و از قطع غیر ضروری آن در این شرایط جلوگیری به عمل آمده است.



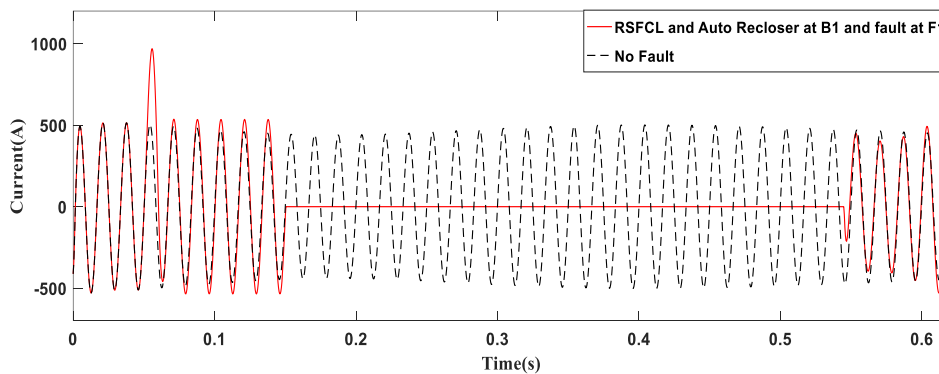
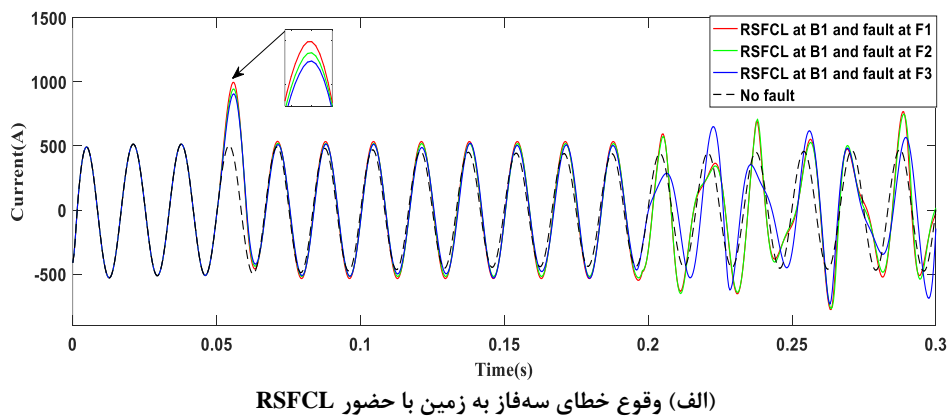
شکل (۹): مقایسه ولتاژ ترمینال DFIG با و بدون حضور RSFCL



۳-۵- عملکرد اتوریکلوزر در رفع اختلالات پس از وقوع خطا

شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهند که ریزشبه که پس از وقوع خطاهای سه‌فاز و سه‌فاز به زمین دچار اختلالاتی می‌شود که ناپایداری ریزشبه را به همراه دارد. لذا عملکرد همزمان RSFCL و اتوریکلوزر به عنوان یک حفاظت مکمل جهت کاهش این اختلالات مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور یک اتوریکلوزر در محل خروجی باس‌ها نصب می‌شود که با در نظر گرفتن وقوع یک خطای گذرای سه‌فاز به زمین، پس از تشخیص خطا توسط رله جریان زیاد^{۱۰} (OCR) و فرمان قطع مدار، اتوریکلوزر پس از ۱۰۰ میلی‌ثانیه مدار را باز نموده و سپس بعد از وقفه‌ای به مدت ۳۰۰ میلی‌ثانیه با فرض گذرا بودن خطا و رفع آن و همچنین غیرفعال شدن RSFCL، فرمان وصل مجدد را صادر می‌کند. لذا پس از فرمان وصل مجدد بعد از گذشت ۱۰۰ میلی‌ثانیه مدار در زمان ۵۵۰ میلی‌ثانیه وصل می‌گردد. شکل (۱۰) عملکرد همزمان RSFCL و اتوریکلوزر را نشان می‌دهد.

از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که عملکرد همزمان RSFCL و اتوریکلوزر به عنوان یک حفاظت مکمل علاوه بر محدود نمودن سطح جریان خطا در اولین پیک جریان توسط RSFCL، اختلالات ناشی از نفوذ منابع تولید پراکنده پس از وقوع و رفع خطای سه‌فاز به زمین را نیز به طور کامل از بین می‌برد.



شکل (۱۰): بررسی عملکرد همزمان RSFCL و اتوریکلوزر

۳-۵- بررسی ویژگی‌های روش پیشنهادی و مقایسه با مطالعات مشابه

چند ویژگی اصلی روش پیشنهادی با سایر مطالعات صورت گرفته در این زمینه در جدول (۵) مقایسه گردیده است. با توجه به مقایسه صورت گرفته میان روش پیشنهادی و روش‌های مطالعاتی مرسوم در جدول (۵) مشخص می‌گردد که روش پیشنهادی نسبت به سایر مطالعات صورت گرفته علاوه بر هزینه کمتر مواردی همچون کاهش تلفات انرژی در RSFCL در زمان وقوع خطا، قدرت قطع کلیدها، رعایت الزامات LVRT و کاهش اختلالات ریزشبه را نیز در نظر گرفته است. مطابق جدول (۵) هیچ یک از مطالعات مشابه، راه حلی جهت کاهش اختلالات ناشی از نفوذ منابع تولید پراکنده پس از وقوع و رفع خطای سه‌فاز به زمین در ریزشبه‌ها که در شکل (۱۰) نشان داده شده ارائه نکرده‌اند. در صورت عدم رفع اختلالات بوجود آمده پس از وقوع و رفع خطای سه‌فاز به زمین در ریزشبه



عملکرد تجهیزات الکترونیکی حساس مختل و یا تحت شعاع قرار می‌گیرد. در این مقاله عملکرد همزمان RSFCL و اتوریکلوزر به عنوان یک حفاظت مکمل جهت کاهش موثر این اختلالات پیشنهاد شده و اثر بخشی این روش را به اثبات می‌رساند.

جدول (۵): مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های مطالعاتی مرسوم

روش پیشنهادی	روش‌های مورد استفاده در مطالعات مشابه				شرح ویژگی مطالعات
	[۳۶]	[۲۰]	[۱۹]	[۱۸]	
بله	خیر	خیر	خیر	خیر	بررسی تلفات انرژی RSFCL
بله	خیر	خیر	خیر	خیر	کاهش اختلالات
بله	خیر	خیر	خیر	خیر	قدرت قطع کلید
کم	زیاد	کم	زیاد	زیاد	میزان هزینه
بله	خیر	بله	خیر	خیر	محاسبه مقاومت RSFCL جهت بهبود الزامات LVRT

۶- نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد محدود کننده جریان خطای ابرسانی مقاومتی (RSFCL) برای کاهش سطح جریان اتصال کوتاه ریزش شبکه متشکل از منابع انرژی تجدید پذیر شامل یک مزرعه بادی و یک مزرعه خورشیدی، بهبود الزامات LVRT و همچنین استفاده همزمان RSFCL و اتوریکلوزر در کاهش قابل توجه اختلالات پس از رفع خطا ارائه گردید. یکی از مهمترین نکات در استفاده از RSFCL در ریزش شبکه، تعیین مکان نصب و مقاومت بهینه آن می‌باشد که با استفاده از الگوریتم ژنتیک و یک تابع هدف پیشنهادی با در نظر گرفتن تلفات انرژی در RSFCL در زمان وقوع خطا، ولتاژ DFIG با حفظ الزامات LVRT و قدرت قطع کلیدهای ریزش شبکه محقق گردید. با شبیه سازی ریزش شبکه و مدل شبیه سازی شده RSFCL براساس مشخصه میدان الکتریکی - چگالی جریان (E-J) ابرسانهای با دمای فوق العاده بالا (HTS) و پس از اعمال انواع خطاها در نقاط مختلف ریزش شبکه، اثر بخشی RSFCL پیشنهادی در کاهش سطح جریان اتصال کوتاه ریزش شبکه، بهبود الزامات LVRT و همچنین استفاده همزمان RSFCL و اتوریکلوزر در کاهش قابل توجه اختلالات پس از رفع خطا به درستی تایید گردید. همچنین مقایسه تحلیلی روش پیشنهادی با سایر مطالعات انجام شده در این زمینه مورد بررسی قرار گرفته و اثر بخشی روش پیشنهادی را به اثبات رساند.

مراجع

- [1] L. Chen, H. Chen, J. Yang, Y. Tang, and L. H. Koh, "Optimal Allocation of Flux-Coupling-Type SFCLs for a Micro-grid with Wind-PV Hybrid Generation and Battery Energy Storage," in *2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, Singapore, 25-27 October 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ACEPT.2016.7811507.
- [2] L. Chen et al., "Study of resistive superconducting fault current limiters for stability improvement of VSG-controlled multiple microgrid clusters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 4, pp. 1-7, June 2022, doi: 10.1109/TASC.2022.3150620.
- [3] L. Chen et al., "Investigation of flux-coupling-type SFCLs for enhancing interconnectivity of multiple microgrid clusters under fault conditions," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 8, pp. 1-7, November 2021, doi: 10.1109/TASC.2021.3094455.
- [4] P. K. Astaneh and H. S. S. Dehkordi, "Integrated optimal active and reactive power planning in smart microgrids with possibility of one-hour islanding," *Journal of Technovations of Electrical Engineering in Green Energy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 36-50, 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1979749.1063.
- [5] C. Li et al., "Impacts of a flux-coupling SFCL on the overcurrent protection for distribution system with infeed," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 149, July 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109036.
- [6] K. Peddakapu, M. R. Mohamed, M. H. Sulaiman, P. Srinivasarao, and S. R. Reddy, "Design and simulation of resistive type SFCL in multi-area power system for enhancing the transient stability," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, vol. 573, June 2020, doi: 10.1016/j.physc.2020.1353643.



- [7] I. Sadeghkhan, "Analysis of hybrid reference frame limiting strategy performance in the presence of secondary control of inverter based islanded microgrids," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 33, pp. 3-14, 2018.
- [8] F. Zandi, B. Fani, S. Tahanzadeh, E. Rokrok, E. Adib, and M. Dashtipour, "Improvement of conventional droop methods performance during the fault occurrence in an islanded micro-grid using the concept of virtual impedance," *Journal of Technovations of Electrical Engineering in Green Energy Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 13-25, 2022, doi: 10.30486/teees.2022.691006.
- [9] J. S. Reddy and S. Chatterjee, "Superconducting Fault Current Limiter for Smart Grid Application," in *2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, February 2017, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCT.2017.8118025.
- [10] H. Fayazi, M. Moazzami, B. Fani, and G. Shahgholian, "Coordination of protection equipment in synchronous generator-based microgrids with regard to maintaining first swing stability," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 14, no. 53, pp. 1-14, 2023.
- [11] H. Karimi, B. Fani, and G. Shahgholian, "Coordinated protection scheme based on virtual impedance control for loop-based microgrids," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 12, no. 46, pp. 15-32, 2021.
- [12] S. Soltaniyan and B. Fani, "Distributed generations management to restore protective coordination using multi-agent systems," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 59, pp. 125-142, 2024.
- [13] R. H. Lasseter et al., "CERTS microgrid laboratory test bed," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 325-332, 2011, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2051819.
- [14] M. Dehghani-Ashkezari, S. M. Modaresi, S. A. Saied, T. Daemi, and H. Akbari, "Impact of type and impedance value of fault current limiters on the transient stability of the power system taking in to fault clearing time," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 15, no. 60, pp. 135-148, 2025.
- [15] I. K. Okakwu, P. Orukpe, and E. Ogujor, "Application of superconducting fault current limiter (SFCL) in power systems: A review," *European Journal of Engineering and Technology Research*, vol. 3, no. 7, pp. 28-32, 2018, doi: 10.24018/ejers.2018.3.7.799.
- [16] L. Kong, H. Nian, Q. Huang, Z. Zhang, J. Xu, and K. Dai, "Optimization of Current Breaker and Fault Current Limiter in DC Micro-Grid Based on Faulty Transient Analysis," in *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Jeju, Korea (South), October 2018, pp. 2017-2022, doi: 10.23919/ICEMS.2018.8549294.
- [17] S. H. Lim and S. T. Lim, "Current limiting and recovery characteristics of a trigger-type SFCL using double quench," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 3, pp. 1-5, 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2799199.
- [18] L. Chen et al., "Combined use of a resistive SFCL and DC-link regulation of a SMES for FRT enhancement of a DFIG wind turbine under different faults," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-8, 2019, doi: 10.1109/TASC.2018.2881988.
- [19] E. M. Leung, "Superconducting fault current limiters," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 20, no. 8, pp. 15-18, 2000, doi: 10.1109/39.857449.
- [20] M. Sarwar, B. Hussain, A. Hussain, and M. Abubakar, "Improvement of Fault Ride Through Capability of DFIG-based Wind Turbine Systems Using Superconducting Fault Current Limiter," in *2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)*, 2019, pp. 4019-4024, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881155.
- [21] Z. X. Zheng, C. J. Huang, R. H. Yang, X. Y. Xiao, and C. S. Li, "A low voltage ride through scheme for DFIG-based wind farm with SFCL and RSC control," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 2, pp. 1-5, 2019, doi: 10.1109/TASC.2019.2891687.
- [22] M. Mousa, S. Abdelwahed, and J. Kluss, "Impact of Resistive Superconductive Fault Current Limiter's Location and its Resistance Value on the Stability of Micro Grid System," in *2019 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, Texas, February 2019, USA, pp. 1-6, doi: 10.1109/TPEC.2019.8662153.
- [23] F. Zheng, C. Deng, L. Chen, S. Li, Y. Liu, and Y. Liao, "Transient performance improvement of microgrid by a resistive superconducting fault current limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, 2015, doi: 10.1109/TASC.2015.2391120.



- [24] S. Yadav, R. K. Mandal, and G. K. Choudhary, "Determination of Appropriate Location of Superconducting Fault Current Limiter in the Smart Grid," in *2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*, Guntur, India, 2014 ,pp. 1-9, doi: 10.1109/ISEG.2014.7005580 .
- [25] S. M. Blair, C. D. Booth, and G. M. Burt, "Current–time characteristics of resistive superconducting fault current limiters," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 22, no. 2, 2012 ,doi: 10.1109/TASC.2012.2187291.
- [26] W. Paul, "Superconducting Fault Current Limiter-Applications, Technical and Economical Benefits, Simulations and Test Results," *CIGRE 2000*, 2000.
- [27] R. Gagnon, G. Turmel, C. Larose, J. Brochu, G. Sybille, and M. Fecteau, "Large-Scale Real-Time Simulation of Wind Power Plants into Hydro-Québec Power System," in *9th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Power Plants*, 2010, Quebec,Canada, pp. 18-19 .
- [28] T. Efram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, 2007, doi: 10.1109/TEC.2006.874230.
- [29] N. Femia ,G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963-973, 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850975.
- [30] X. Zhou, Y. Tang, and J. Shi, "Enhancing LVRT capability of DFIG-based wind turbine systems with SMES series in the rotor side," *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/4635452.
- [31] M. Abbasi, M. Nafar, and M. Simab, "Management and control of microgrid connected to a three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using the fuzzy intelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources," *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 13, no. 49, pp. 55-66, 2022.
- [32] H. Margossian, G. Deconinck, and J. Sachau, "Distribution network protection considering grid code requirements for distributed generation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 12, pp. 1377-1381, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0987.
- [33] Y. Lin, L. LiangZhen, and K. P. Juengst, "Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 12, no. 1, pp. 900-903, 2002, doi: 10.1109/TASC.2002.1018545.
- [34] J. Langston, M. Steurer, S. Woodruff, T. Baldwin, and J. Tang, "A generic real-time computer Simulation model for Superconducting fault current limiters and its application in system protection studies," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 2090-2093, 2005, doi: 10.1109/TASC.2005.849459.
- [35] M. Noe and M. Steurer, "High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status," *Superconductor science and technology*, vol. 20, no. 3, 2007, doi: 10.1088/0953-2048/20/3/R01.
- [36] X. Y. Xiao, R. H. Yang, X. Y. Chen, and Z. X. Zheng, "Integrated DFIG protection with a modified SMES-FCL under symmetrical and asymmetrical faults," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-6, 2018, doi: 10.1109/TASC.2018.2802782.

¹ Distributed generation

² Superconducting fault current limiter

³ Resistive superconducting fault current limiter

⁴ High-temperature superconductors

⁵ Doubly fed induction generator

⁶ Low voltage ride through

⁷ Photovoltaic

⁸ Voltage source converter

⁹ Maximum power point tracking

¹⁰ Over current relay

