

Side Effect of Two-Level Fault Current on Satisfying Fault Ride Through Requirement of Distributed Generations by Protection Systems

Sina Aghazadeh¹, Amin Yazdaninejadi²

¹ M.Sc. Student, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran

sina.aghazadeh@sru.ac.ir

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, I.R. Iran

a.yazdaninejadi@sru.ac.ir

Abstract :

This paper explores the impact of two-level fault currents on efficiency of the existing protection systems in meeting fault ride-through (FRT) of inverter-based distributed generations (IBDGs) in active distribution networks. At the outset, to illustrate the possibility of occurrence of this challenge, a conceptual framework is presented based on the FRT curve of a IBDGs and the characteristic curve of a protection relay. Afterwards, mathematical analysis reveals that two-level fault currents may result in increased voltage drops within IBDG-connected bus. Consequently, the performance of voltage relays with IBDG FRT characteristics could compromise the reliable operation of these sources, potentially leading to unexpected disconnections from the network and jeopardizing power supply stability. To provide a thorough investigation, simulation studies utilizing PowerFactory 15.1 software on an active distribution network with IBDG sources will be conducted. Two scenarios with different FRT requirements are defined, focusing particularly on a relay near the source affected by two-level fault currents. The study aims to showcase how elevated voltage drops caused by two-level fault currents can impede the successful achievement of IBDG FRT, emphasizing the critical importance of addressing this challenge in power system protections.

Keywords: Two-level fault current, fault ride through, inverter-based distributed generation sources, active distribution networks, protection systems.

Article Type: Research

Received: 14. 05. 2024

Revised: 18. 07. 2024

Accepted: 01. 08. 2024

Corresponding author: Amin Yazdaninejadi

Corresponding author's address: Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Lavizan, Tehran, I.R. Iran

1. Motivation of the work

The increasing integration of renewable energy sources into power distribution networks has transformed traditional passive grids into active distribution networks. This shift has brought about significant challenges in maintaining the stability and reliability of power systems. One critical issue is the impact of two-level fault currents on the effectiveness existing protection systems. This paper explores the possible impact of two-level fault currents on efficiency of the existing protection systems in satisfying fault ride-through (FRT) of inverter-based distributed generations (IBDGs) in active distribution networks. The primary motivation for this work is to enhance the understanding of how two-level fault currents affect the performance of protection systems in meeting this critical requirement. To this end, this issue is comprehensively explored throughout a conceptual framework. After clarification regarding the possible reasons, this issue is precisely investigated based on analytical modeling. Then, to validate the possibility of the occurrence of this issue, extensive simulation-based studies are carried out by utilizing PowerFactory 15.1. In these studies, for different fault and FRT requirements, suitable scenarios are executed. Results highlights the essence of meeting this issue in protection schemes presented for active distribution networks including IBDGs. This study allows for a detailed investigation of the interaction between two-level fault currents and protection performance, highlighting the need for improved protection strategies in modern distribution networks.

2. Contributions

The conducted study provides a suitable analysis of a hidden challenge posed by two-level fault currents in active distribution networks including IBDGs. Unlike previous studies that primarily focused on single-level fault currents or conventional fault scenarios, this research delves into the complexities introduced by two-level faults. The study clearly outlines the limitations of existing protection systems in meeting IBDGs FRT requirements during such faults and emphasizes the need for updated protection strategies. Previous research has often focused on designing control equipment and fault current limiters on the distributed generation side, without considering the network topology changes that lead to two-level fault currents [1, 2]. Furthermore, recent studies have concentrated on relay coordination against these types of faults but have not accounted for meeting FRT requirement of IBDGs [3]. To explore this challenging issue, this research employs different simulation scenarios including different FRT requirement using PowerFactory 15.1 software, which allows for a more accurate representation of the described conditions. The objectives of this review are to highlight the critical importance of addressing two-level fault currents besides FRT requirements which can paves the way for future research in this area.

3. Procedures

The study involved a series of simulation experiments and analytical modeling conducted on an active distribution network based on using PowerFactory 15.1 software. The subject of this study is uncoordinated of the protection relays operation with IBDGs FTR requirements in the active distribution network during two-level fault current. The simulation scenarios are designed to replicate real-world conditions, including the occurrence of two-level fault currents and their impact on protection system of the network. The pointed subject is exposed to two different fault scenarios, each with distinct FRT requirements for IBDGs in Australia and the USA. The conditions included varying fault locations and magnitudes to test the weakness of the protection systems. The simulations are run over a sufficient period to capture the dynamic response of the protection system and the network, typically spanning several seconds to minutes depending on the scenario. Key measurements include voltage drops, relay operation times, and the stability of IBDG connections. The comparisons are between the performance of the protection systems under two-level fault conditions versus single-level fault conditions in satisfying FRT requirements. By analyzing these metrics, the study aimed to identify weaknesses in the current protection strategies and the essence of improvements.

4. Findings

The findings of the study revealed that two-level fault currents significantly impact the performance of protection relays in active distribution networks. The simulation results demonstrated that such fault currents could cause increased voltage drops at IBDG-connected busses, leading to unintended disconnections and compromising the stability of power supply. This analysis showed that the existing protection systems, particularly overcurrent relays besides IBDGs are not adequately equipped to handle the complexities introduced by two-level faults. The study also highlights the importance of considering network topology changes during faults, as these changes can exacerbate the impact of two-level fault currents. Moreover, the findings underscore the need for updated protection strategies to effectively manage this hidden challenge posed in modern active distribution networks. The results are significant as they provide a clear direction for future research and development in power system protection, emphasizing the need for more sophisticated and adaptable protection mechanisms.

5. Conclusion

The integration of IBDGs in active distribution networks has introduced new challenges for existing protection systems. One such challenge is the impact of two-level fault currents on the efficiency of protection systems in meeting the fault FRT requirements of IBDGs. At the outset, a conceptual framework presented in this paper illustrates the possibility of a mismatch between the FRT curve of an IBDG and the characteristic curve of a protection relay. Then, an analytical modeling is deployed which reveals that two-level fault currents can result in

increased voltage drops within the IBDG-connected bus. Consequently, the performance of voltage relays may be compromised, potentially leading to unexpected disconnections of IBDGs from the network and jeopardizing power supply stability.

Simulation studies conducted on an active distribution network with IBDG sources confirm that elevated voltage drops caused by two-level fault currents can impede the successful achievement of IBDG FRT. This emphasizes the critical importance of addressing this challenge in power system protections. By addressing the challenges posed by two-level fault currents and implementing appropriate mitigation measures, power system operators can ensure the reliable operation of IBDGs and maintain the stability of active distribution networks.

تأثیر سوء جریان‌های خطای دو سطحی در برآورده شدن گذر از خطای تولیدات پراکنده توسط سیستم‌های حفاظتی

سینا آقازاده^۱، امین یزدانی نژادی^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

sina.aghazadeh@sru.ac.ir

۲- استادیار - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - تهران - ایران

a.yazdaninejadi@sru.ac.ir

چکیده: این مقاله نشان می‌دهد وجود جریان‌های خطای دو سطحی چالش‌هایی را برای اثربخشی سیستم‌های حفاظتی فعلی در برآورده ساختن گذر از خطا (FRT) منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر (IBDG) در شبکه‌های توزیع فعال ایجاد می‌کنند. در ابتدا، امکان رخداد این چالش به صورت مفهومی توسط منحنی گذر از خطا منبع و منحنی عملکرد رله حفاظتی تبیین می‌شود. سپس، به صورت ریاضی مطالعه می‌شود که جریان‌های دو سطحی افت ولتاژ بیشتری را ممکن است در شین‌های متصل به IBDG ایجاد کنند. بنابراین عملکرد رله‌های ولتاژی دارای مشخصه گذر از خطا IBDG می‌تواند باعث جدا شدن غیرمنتظره این منابع از شبکه و تهدیدی برای برق‌رسانی پایدار شوند. برای بررسی کامل‌تر موضوع در این مقاله، این چالش از طریق مطالعات شبیه‌سازی روی یک شبکه توزیع فعال با حضور IBDG در نرم‌افزار PowerFactory 15.1 دنبال خواهد شد. در این مطالعه، دو سناریوی با FRT دو کشور متفاوت تعریف شده است. در هر دو سناریو، یکی از رله‌های نزدیک منبع که شامل جریان دو سطحی نیز شده است مورد بررسی دقیق قرار می‌گیرد. نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند افت ولتاژ بیشتر به علت جریان خطا دو سطحی می‌تواند موجب عدم برآورده شدن گذر از خطا IBDG‌ها گردد که بر دیده شدن این چالش در طرح‌های حفاظتی تأکید دارد.

کلمات کلیدی: جریان خطای دو سطحی، گذر از خطا، منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر، شبکه‌های توزیع فعال، سیستم‌های حفاظتی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۴/۲۸

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر امین یزدانی نژادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان شعبانلو - دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی و ذخایر محدود آنها، کشورها را متقاعد کرده است تا سیاست‌های نوینی برای استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر طراحی کنند و سرمایه‌گذاری در این زمینه را تسریع بخشند. از این رو، با گسترش شبکه‌های قدرت و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، شبکه‌های توزیع از حالت سنتی خود خارج و به صورت شبکه‌های توزیع فعال بهره‌برداری می‌شوند. بنابراین تأمین انرژی بدون وقفه و با قابلیت اطمینان بالا برای مصرف‌کننده‌ها، با جلوگیری از قطع بی‌مورد این منابع، به یک مسئله مهم در این شبکه‌ها تبدیل شده است. در این راستا، چالش‌هایی که سیستم‌های حفاظتی متداول ممکن است با آنها مواجه شوند بایستی مورد بررسی دقیق قرار گیرند.

در سال‌های اخیر مقالات زیادی برای معرفی چالش‌های حفاظتی مرتبط با شبکه‌های توزیع فعال و پرداختن به آن‌ها ارائه شده است که آنها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد. دسته اول، موارد مرتبط با طراحی تجهیزات کنترلی و محدود کننده جریان در سمت تولیدات پراکنده هستند. دسته دوم بر روی سیستم حفاظتی شبکه متمرکز می‌باشند. در مطالعات ابتدایی مربوط به دسته اول، مراجع [۱-۶] نشان داده‌اند که به دلیل امپدانس پایین بین شبکه و IBDG در هنگام خطا، IBDG افت ولتاژ زیادی را متحمل شده که با برآورده نشدن گذر از خطا، از شبکه جدا می‌شود. در مرجع [۲] استفاده از محدود کننده جریان خطا مبتنی بر ابررسانا با دمای بالا (HTSFCL) برای مزارع بادی با تکنولوژی SEIG به همراه یک جبران کننده سنکرون استاتیک (STATCOM) در هر توربین بادی پیشنهاد شده است. مرجع [۳] از محدود کننده مبتنی بر ابررسانا (SFCL) و ذخیره کننده انرژی فوق مغناطیسی (SMES) برای مزارع بادی با تکنولوژی DFIG استفاده کرده است. هنگامی که یک خطا رخ می‌دهد، از SFCL برای محدود کردن جریان خطا، بهبود افت ولتاژ شین متصل به منابع و همچنین از SMES برای جلوگیری از اثر باقیمانده نوسانات توان به کار گرفته می‌شود. تا با برآورده ساختن گذر از خطا مانع جدا شدن این منابع شود. در این راستا همچنین استفاده از SFCL اصلاح شده در مرجع [۴] پیشنهاد شده است. یک استراتژی کنترلی برای DFIG نیز در [۵] معرفی شده است که قادر به کنترل دقیق توان‌های اکتیو و راکتیو ایجاد شده توسط سیستم‌های تبدیل انرژی باد (WECS) است. در مرجع [۶] از خازن با یک استراتژی کنترلی جدیدتر برای تخلیه توان در زمان رخ دادن خطا بهره برده شده است. روش‌های دسته اول به خوبی توانسته‌اند افت ولتاژ ناشی از خطا را برای جلوگیری از جدا شدن منابع تولید پراکنده جبران کنند. اما استفاده از این روش‌ها می‌تواند هزینه زیادی را داشته باشد. همچنین جریان دو سطحی خطا ناشی از تغییر توپولوژی شبکه، در طی خطا در نظر گرفته نشده است.

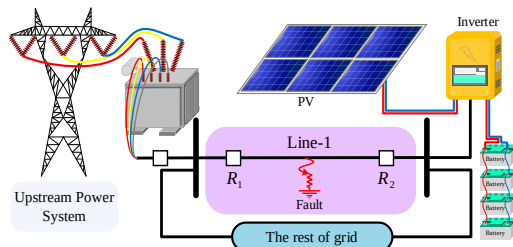
در دسته دوم، مطالعات صورت پذیرفته بر روی سیستم‌های حفاظتی شبکه هستند. در شبکه‌های توزیع فعال به دلیل پخش توان دو طرفه، رله‌های جریان زیاد جهتی (DOCRs) به عنوان یکی از مهمترین

تجهیزات حفاظتی بکار گرفته می‌شوند. این رله‌ها بایستی به نحوی هماهنگ گردند که خطا را در کمترین زمان ممکن رفع نمایند [۷، ۸]. در مطالعات اولیه صورت گرفته در مراجع [۹-۱۱] هماهنگی رله‌ها با استفاده از روش‌های مختلف از جمله روش‌های بهینه‌سازی ریاضی، اکتشافی، فراابتکاری انجام می‌شود. همچنین در مرجع [۱۲] پیشنهاد شده است که از روش‌های بهینه‌سازی ترکیبی به جای روش‌های متداول استفاده گردد. در این راستا، مرجع [۱۳] از ترکیب الگوریتم نقطه شکست و ژنتیک به صورت ترکیبی بهره جسته است. همچنین برای حل مساله هماهنگی، روش جستجوی گرانشی با برنامه‌ریزی غیرخطی سلسله‌ای در مرجع [۱۴] ترکیب و استفاده شده است. اگرچه این روش‌ها به خوبی توانسته‌اند زمان عملکرد رله‌ها را در کنار قیود هماهنگی حفاظتی کاهش دهند ولی در این مراجع به حل مشکلات حفاظتی ناشی از حضور این منابع پرداخته نشده است.

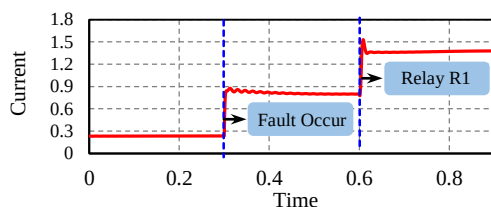
در برخی مراجع نشان داده شده است که حضور منابع تولید پراکنده در برآورد ساختن هماهنگی حفاظتی در شبکه‌های توزیع فعال تأثیرگذار هستند. لذا سعی بر حل این مشکل از طرق مختلف صورت گرفته است. در این راستا و با پیشرفت تکنولوژی در اتوماسیون و زیر ساخت‌های ارتباطی، طرح‌های حفاظتی جدیدی روی کار آمدند [۱۵]. در [۱۶] یک طرح گسترده مبتنی بر SCADA، در [۱۷] یک زیر ساخت حفاظتی ارتباطاتی برای یک شبکه فعال شعاعی و در [۱۸] الگوریتم مبتنی بر استفاده از PMUها جهت حفاظت آنلاین شبکه پیشنهاد شده است. در همین راستا، روش مورد مطالعه مرجع [۱۸]، در مرجع [۱۹] بر اساس رله‌های مبتنی بر ولتاژ ارتقا و بهبود داده شده است. این روش‌ها که برای شبکه‌های شعاعی ارائه شده‌اند غالباً پرهزینه و گاهی اوقات غیر قابل اعتماد هستند. همچنین در مرجع [۲۰] هماهنگی حفاظتی رله‌های اضافه جریان جهتی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن پایداری گذرای منابع تولید پراکنده سنکرون انجام شده است اما این طرح‌های حفاظتی مرور شده تا به اینجای کار الزامات گذر از خطا IBDGها در نظر گرفته نشده است.

در مطالعات جدید پیشنهاد شده است به جای جداسازی شدن سریع IBDG از شبکه در حین خطا از استاندارد FRT استفاده گردد [۲۱]. به عبارت دیگر طبق استاندارد در زمان خطا منابع تولید پراکنده تا افت ولتاژ معینی، به شبکه متصل می‌مانند. بنابراین در مرجع [۲۲]، یک طرح حفاظتی جدید مبتنی بر استفاده از رله‌های تنظیم دوگانه و بستر مخابراتی برای برآوردن FRT پارک‌های بادی پیشنهاد شده است که در آن طرح تنظیمات رله‌ها نیز به صورت بهینه تعیین می‌شوند. در [۲۳]، طرح مرجع قبلی به شکلی بهبود داده شده است که مسئله در نظریه FRT مربوط به IBDGها را بدون استفاده از بستر مخابراتی باشد. در این مطالعات، این مهم با قیود مناسب در مسئله اضافه شده است. اما نویسندگان [۲۴] نشان دادند که شاخص انرژی تأمین نشده (ENS) می‌تواند به عنوان یک تابع هدف مناسب در فرآیند هماهنگی حفاظتی لحاظ شده و استاندارد FRT را نیز پوشش دهد. این طرح در مرجع

R_1 عمل کرده و به علت به هم پیوسته بودن شبکه، جریان عبوری از رله جریان زیاد R_2 بیشتر از قبل می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است. جریان ترسیم شده در این شکل، جریان دو سطحی خطا نامیده می‌شود. این جریان می‌تواند سبب عملکرد سریع رله پشتیبان R_2 شده و هماهنگی حفاظتی را تهدید نماید [۲۶].



شکل (۱): شبکه به هم پیوسته فعال مورد تست



شکل (۲): جریان خطای دو سطحی عبوری از رله R_2

اما در این مقاله، هدف این است که یک چالش دیگری ناشی از وجود این جریان نشان داده شود. عملکرد سریع رله سمت دیگر خط می‌تواند افت ولتاژی بیشتری را در شین متصل به IBDG تحمیل کرده و باعث عدم برآورده شدن استاندارد FRT گردد. در نتیجه منبع به سرعت از شبکه جدا شده و برق‌رسانی پایدار را تهدید می‌کند. برای توضیح مفهوم این چالش، شکل ۳ را در نظر بگیرید. در این شکل خط‌چین آبی رنگ نمایانگر منحنی مشخصه رله R_2 و خط ممتد قرمز رنگ نمایانگر منحنی FRT تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر است. لازم به ذکر است که منحنی FRT در حالت عادی، به صورت ولتاژ-زمان نشان داده می‌شود که در اینجا به جهت مقایسه با منحنی مشخصه رله، معادل جریان-زمان آن رسم شده است. در رویه صحیح، برای هر جریان خطا، عملکرد رله حفاظتی جهت رفع خطا باید سریع‌تر از رله ولتاژی مربوط به منبع باشد. لذا در ناحیه‌ای که با رنگ سبز نشان داده شده است که برای جریان I_{F1} منحنی عملکرد رله زیر منحنی قرمز رنگ قرار دارد و مشکلی وجود نخواهد داشت. اما زمانی که رله حفاظتی سمت دیگر خط سریع‌تر عمل کند جریان خطا را دو سطحی شده و ممکن است جریان وارد ناحیه آبی رنگ شده و باعث شود منبع سریع‌تر از شبکه جدا شود. به عبارتی دیگر زمانی که جریان خطا به صورت تک سطحی ظاهر می‌شود، رله به موقع در زمان t_2 عمل کرده و شین متصل به IBDG افت ولتاژ بیشتری را حس نکرده و متصل می‌ماند ($t_2 < t_1$). ولی زمانی که جریان خطا دو سطحی می‌شود، جریان I_{F2} از رله عبور می‌کند. لذا رله در زمان t_3 دستور تریپ داده است و بدین ترتیب FRT برآورده نشده ($t_4 < t_3$) و در نتیجه IBDG از شبکه جدا خواهد شد. این مشکل در ناحیه هاشور

[۲۵] با ارائه یک شاخص ولتاژی و منحنی مشخص جدید به نحوی گسترش داده شده است که در شرایط حضور مقاومت خطا نیز، سیستم حفاظتی بتواند پاسخگو باشد. از طرف دیگر، عملکرد سریع رله دوردست برای خطای اتفاق افتاده در سیستم‌های قدرت به سبب ایجاد جریان خطای دو سطحی از جمله مواردی است که می‌تواند با ایجاد افت ولتاژ در شین باعث برآورده نشدن خطا IBDG ها در شبکه‌های فعال به هم پیوسته شود. در مقالات قبلی مسئله جریان دو سطحی فقط از دیدگاه هماهنگی رله‌ها بررسی شده [۲۶] و در کنار دیده شدن گذر از خطای منابع مورد بررسی و بحث قرار نگرفته است.

این مقاله به بررسی تاثیر جریان‌های خطای دو سطحی در برآورده نشدن استانداردهای مربوط به FRT منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع فعال به عنوان چالشی حل نشده پرداخته است. در این راستا، ابتدا به صورت مفهومی و سپس با روابط ریاضی نشان داده می‌شود که جریان‌های دو سطحی می‌توانند افت ولتاژ بیشتری را در شین‌های متصل به IBDG تحمیل کرده و شرایط سختی برای برآورد FRT ایجاد نمایند. بنابراین IBDG ها با توجه به عملکرد رله‌های ولتاژی زودتر از موعد و به صورت غیرمنتظره از شبکه جدا شده و بدین ترتیب برق‌رسانی پایدار در شبکه را تهدید خواهند نمود. سپس در ادامه، برای مطالعه بیشتر و دقیق‌تر این چالش، یک شبکه توزیع فعال با حضور IBDG در نرم‌افزار PowerFactory پیاده‌سازی شده و با در نظر گرفتن عملکرد رله‌های جریان زیاد دوردست IBDG، جریان خطای تک‌سطحی و دو سطحی ایجاد شده مورد مطالعه قرار می‌گیرند. در این مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی، این جریان‌ها و تأثیر آنها روی گذر از خطای منابع در دو سناریو با FRT دو کشور مختلف در نظر گرفته شده است. نتایج این دو سناریو به‌خوبی نشان می‌دهد افت ولتاژ شدید به علت جریان خطا دو سطحی، می‌تواند موجب عدم برآورده شدن گذر از خطا IBDG‌هایی گردد که تحت جریان تک سطحی به شبکه متصل می‌مانند.

در ادامه مقاله، بخش دوم به بیان مسئله و توضیح مفاهیم برای روشن شدن تأثیر جریان خطای دو سطحی بر FRT مربوط به IBDG ها می‌پردازد. در بخش سوم با استفاده از روابط ریاضی به این چالش که ناشی از بروز خطای دو سطحی در خط می‌باشد پرداخته خواهد شد. در بخش چهارم چالش مورد نظر از طریق مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی در سناریوهای مختلف به صورت مناسب مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش آخر جمع‌بندی مطالعه است.

۲- بیان مفهوم مسئله

در این بخش به بررسی مفهومی تأثیر جریان خطای دو سطحی بر عدم برآورده شدن گذر از خطا IBDG ها توسط رله‌های جریان زیاد، بر روی یک شبکه کوچک که در شکل ۱ نشان داده شده است، پرداخته می‌شود. شبکه به هم‌پیوسته و دارای یک IBDG است. یک خطا با مقاومت در خط Line-1 در نظر بگیرید. با اعمال این خطا جریان خط افزایش می‌یابد که در شکل ۲ آورده شده است. در همین راستا، رله جریان زیاد

شبکه در حالت اول $Z_{Bus}^{(1)}$ به صورت زیر بدست می‌آید [۲۷].

$$Z_{Bus}^{(1)} = \begin{pmatrix} Z_E & Z_E & Z_E \\ Z_E & a & b \\ Z_E & c & d \end{pmatrix} \quad (۱)$$

در ماتریس، پارامترهای a ، b ، c و d به صورت زیر می‌باشند.

$$a = \frac{Z_E Z_L + Z_E Z_{sys} + Z_L Z_{sys}}{Z_L + Z_{sys}} \quad (۲)$$

$$b = c = \frac{2Z_E Z_L + 2Z_E Z_{sys} + Z_L Z_{sys}}{2(Z_L + Z_{sys})} \quad (۳)$$

$$d = \frac{4Z_E Z_L + 4Z_E Z_{sys} + 2Z_L Z_{sys} + Z_L^2}{4(Z_L + Z_{sys})} \quad (۴)$$

همچنین Z_E امپدانس منبع، Z_L امپدانس خط Line-1 و Z_{sys} امپدانس باقی شبکه قدرت می‌باشد. برای بروزسانی ماتریس امپدانس شبکه بعد از عملکرد رله R_1 یک شاخه موازی با امپدانس $-Z_L/2$ بین شین ۱ و M در نظر می‌گیریم. سپس با استفاده از روش ارائه شده در مرجع [۲۷] به روز رسانی می‌گردد. معادله (۵)، ماتریس امپدانس بروز شده برای شبکه ۴-ب است که با $Z_{Bus}^{(2)}$ نمایش داده می‌شود.

$$Z_{Bus}^{(2)} = \begin{pmatrix} Z_E & Z_E & Z_E \\ Z_E & Z_E + Z_{sys} & Z_E + Z_{sys} \\ Z_E & Z_E + Z_{sys} & Z_E + Z_{sys} + Z_L/2 \end{pmatrix} \quad (۵)$$

بعد از اعمال خطا در شین M ، مقدار تغییرات ولتاژ باقی شین‌ها در شبکه‌های دو حالت ذکر شده از معادلات (۶) و (۷) بدست می‌آید.

$$\Delta V^{(1)} = Z_{Bus}^{(1)} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & -I_f^{(1)} \end{pmatrix}^T \quad (۶)$$

$$\Delta V^{(2)} = Z_{Bus}^{(2)} \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & -I_f^{(2)} \end{pmatrix}^T \quad (۷)$$

در این رابطه $I_f^{(1)}$ و $I_f^{(2)}$ به ترتیب جریان خطا در حالت‌های (۱) و (۲) می‌باشند. همچنین، $\Delta V^{(1)}$ و $\Delta V^{(2)}$ ماتریس‌های تغییرات ولتاژ شین‌ها در دو حالت مورد مطالعه می‌باشند. همانگونه که مشاهده می‌شود با ضرب منفی جریان خطای عبوری از شین M در ماتریس امپدانس، در دو حالت بیان شده میزان اختلاف ولتاژ ناشی از خطا به دست می‌آید [۲۷]. تغییرات ولتاژ شین M در حالت‌های (۱) و (۲) به صورت زیر خواهد بود.

$$\Delta V_M^{(1)} = -V_{f_0}^{(1)} + R_f I_f^{(1)} \quad (۸)$$

$$\Delta V_M^{(2)} = -V_{f_0}^{(2)} + R_f I_f^{(2)} \quad (۹)$$

در این روابط $V_{f_0}^{(1)}$ و $V_{f_0}^{(2)}$ به ترتیب ولتاژ شین M پیش از وقوع خطاست. R_f در این روابط مقاومت خطا می‌باشد. $\Delta V_M^{(1)}$ اختلاف ولتاژ شین M در حالت (۱) و $\Delta V_M^{(2)}$ همین اختلاف ولتاژ در حالت (۲) است.

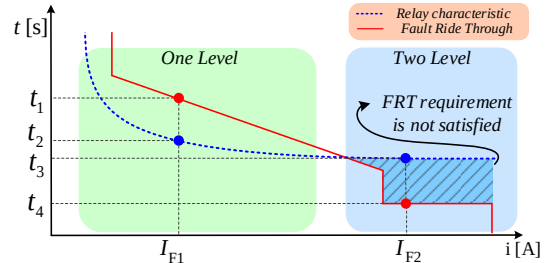
حال با قرار دادن معادله (۸) در (۶) و معادله (۹) در (۷)، مقدار جریان خطا با در نظر گرفتن مقاومت خطا مطابق معادلات (۱۰) و (۱۱) برای هر دو حالت به صورت زیر بدست می‌آید.

$$I_f^{(1)} = V_{f_0}^{(1)} / R_f + d \quad (۱۰)$$

$$I_f^{(2)} = V_{f_0}^{(2)} / R_f + Z_E + Z_{sys} + Z_L/2 \quad (۱۱)$$

حال با استفاده از معادلات (۶) و (۱۰) می‌توان تغییرات ولتاژ شین متصل

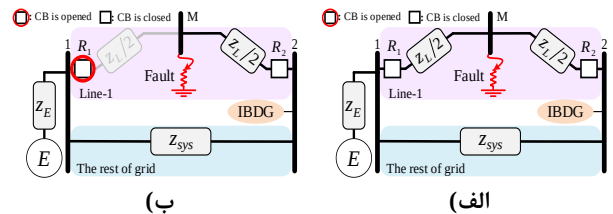
خورده شکل ۳ ممکن است اتفاق افتد. در این بخش، این چالش به صورت مفهومی مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه سعی می‌شود تا با روابط ریاضی اثبات گردد که طی جریان دو سطحی، شین متصل به منبع می‌تواند افت ولتاژ بیشتری را متحمل می‌شود. در ادامه، با استفاده از مطالعات مبتنی شبیه‌سازی در یک شبکه تست، نقص حفاظتی بیان شده به طور کامل با دو استاندارد مختلف نشان داده خواهد شد.



شکل (۳): نمودار نحوه عملکرد رله و FRT در حضور خطا

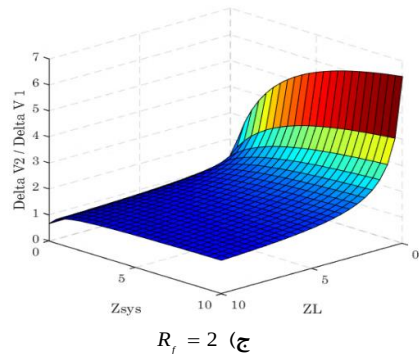
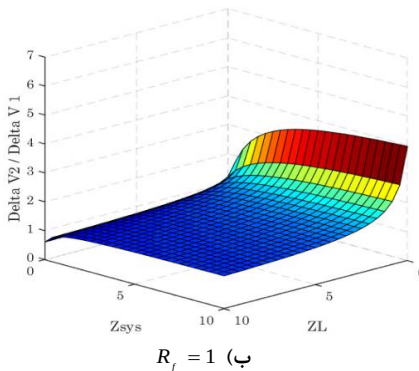
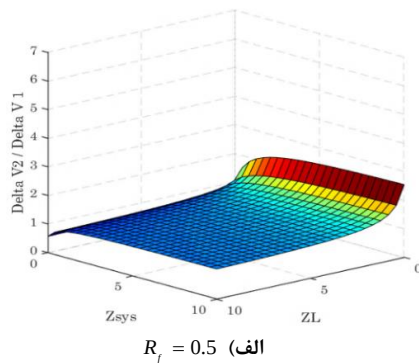
۳- آنالیز ریاضی چالش

در این بخش سعی می‌شود تا به صورت ریاضی نشان داده شود که ممکن است در صورت دو سطحی شدن جریان خطا، شین متصل به IBDG افت ولتاژ بیشتری را تجربه کند. این افت ولتاژ نیز باعث سخت‌تر شدن شرایط جهت برآورد ساختن استاندارد FRT می‌شود. برای نشان دادن این قضیه شبکه مورد بررسی در بخش قبل (شکل ۱) همراه با امپدانس خطوط در شکل ۴ آورده شده است. یک شین اضافی به منظور اعمال خطا در وسط خط Line-1 در نظر گرفته شده است. این شین M نامگذاری شده و در روابط پیش‌رو درایه سوم ماتریس امپدانس به این شین اختصاص داده خواهد شد. این شکل شامل دو حالت است. در حالت اول فرض می‌شود رله سمت شین ۱ R_1 دیرتر از رله سمت شین ۲ R_2 عمل خواهد کرد. بنابراین ولتاژ بدست آمده برای شین ۲ که متصل به IBDG است در حالت جریان خطای تک سطحی خواهد بود. این حالت در شکل ۴-الف مشهود است. در حالت دوم فرض می‌شود رله سمت شین ۲ R_2 دیرتر از رله سمت شین ۱ R_1 عمل خواهد کرد. بنابراین ولتاژ بدست آمده برای شین ۲ در حالت جریان خطای دو سطحی خواهد بود که در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



شکل (۴): دیاگرام شبکه شکل ۱: (الف) حالت (۱) زمانی که R_2 سریعتر از R_1 عمل کند و (ب) حالت (۲) زمانی که R_1 سریعتر از R_2 عمل کند

در این قسمت ابتدا ماتریس امپدانس شکل ۴-الف برای محاسبات خطای اتصال کوتاه بدست آورده می‌شود که برای شکل ۴-ب نیز به روزرسانی خواهد شد تا در طی خطا برای دو حالت یاد شده بتوان ولتاژ شین ۲ که متصل به IBDG است را مقایسه نمود. ماتریس امپدانس



شکل (۵): نمایش سه بعدی نسبت اختلاف ولتاژهای قبل و بعد جریان دو سطحی نسبت به Z_L و Z_{sys}

به IBDG در حالت (۱) $\Delta V_2^{(1)}$ و با استفاده از معادلات (۷) و (۱۱) می‌توان این تغییرات را در حالت (۲) $\Delta V_2^{(2)}$ بدست آورد. حال اگر رابطه $\Delta V_2^{(2)} / \Delta V_2^{(1)}$ بزرگتر از یک شود، مقدار افت ولتاژ در جریان دو سطحی بیشتر خواهد بود. رابطه ذکر شده با ثابت در نظر گرفتن مقدار $Z_E = 0.3j$ مطابق مرجع [۲۷] دارای ۴ مجهول است. در این قسمت برای رسم $\Delta V_2^{(2)} / \Delta V_2^{(1)}$ سه سناریو با R_f مختلف در نظر گرفته می‌شود. با این کار می‌توان به نمایش سه بعدی از Z_L و Z_{sys} و $\Delta V_2^{(2)} / \Delta V_2^{(1)}$ در این سه سناریو رسید که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است. در مقدار مقاومت خطای ۰/۵ اهم، نسبت اختلاف ولتاژ $\Delta V_2^{(2)} / \Delta V_2^{(1)}$ در بخش قابل توجهی از شکل ۵_الف بیشتر از ۱ است. همچنین این مقدار تا دامنه ۲/۵ نیز ادامه دارد می‌باشد. در سناریو بعدی مقدار مقاومت خطا ۱ اهم در نظر گرفته شده است. نمودار مربوط به نسبت اختلاف ولتاژ در شکل ۵_ب آورده شده است. در این نمودار نیز قسمت‌های زیادی نسبت اختلاف ولتاژ را بیشتر از ۱ نشان می‌دهند. برای بررسی بیشتر، همین کار با مقاومت خطای ۲ نیز تکرار می‌شود. شکل ۵_ج نیز مانند شکل‌های قبل تایید می‌کند که ممکن است با تغییر جریان در طی خطا و با تبدیل شدن جریان به جریان دو سطحی، شین متصل به IBDG افت ولتاژ بیشتری را تجربه کرده و این منبع سریع‌تر از شبکه جدا شود. همچنین، با مقایسه شکل ۵_ب و ۵_ج با شکل ۵_الف مشخص می‌شود که این نسبت اختلاف ولتاژ با افزایش مقاومت خطا فاحش‌تر می‌شود. به عبارتی دیگر با تغییر مقاومت خطا، اختلاف ولتاژ در زمان ایجاد جریان دو سطحی، افزایش یافته که متعاقباً منجر به افت ولتاژ بیشتری در شین دوم خواهد شد. در این بخش، به صورت ریاضی افت ولتاژ در شین متصل به IBDG ناشی از ایجاد جریان خطای دو سطحی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که این شکل جریان می‌تواند باعث جدا شدن منبع شود. در ادامه مقاله، این مشکل به صورت مطالعات شبیه‌سازی مورد بررسی بیشتر قرار خواهد گرفت.

۴- طرح مساله بر مبنای مطالعات شبیه‌سازی

در اینجا سعی شده به بررسی تأثیر سو جریان‌های خطای دو سطحی در برآورده شدن گذر از خطای تولیدات پراکنده توسط سیستم‌های حفاظتی از طریق مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی پرداخته شود. در این راستا شبکه IEEE 14-Bus که در شکل ۶ آورده شده است در نرم‌افزار PowerFactory 15.1 پیاده‌سازی شده است. اندازه شبکه در مطالعه صورت گرفته دارای اهمیت چندانی نخواهد بود. زیرا تنها خطاها در خطوط نزدیک به باس دارای IBDG می‌توانند باعث برآورد نشدن FRT به شکل اشاره شده در این مقاله شوند. اما انتخاب این شبکه از این جهت برای این مطالعه اهمیت دارد که رله‌های جریان زیاد در یک شبکه بهم‌پیوسته به صورت بهینه هماهنگ شوند تا چالش مورد مطالعه در این مقاله در کنار تنظیمات بهینه رله‌ها مورد بررسی دقیق قرار گیرد. اطلاعات مربوط به این شبکه در مرجع [۲۸] قابل دسترس است. این شبکه دارای ۱۴ شین می‌باشد که شین یازدهم در اینجا مورد مطالعه

می‌باشد. این شبکه دارای ۳۰ رله جریانی جهت‌دار می‌باشد. برای این شبکه یک IBDG از نوع نیروگاه خورشیدی مدل شده و به شین ۱۱ این شبکه اتصال یافته است. مشخصات و اطلاعات مربوط به این نیروگاه خورشیدی را می‌توان در مرجع [۲۹] یافت. رله‌های ولتاژی متصل به IBDG نیز طبق استاندارد FRT دو کشور ایالات متحده آمریکا و استرالیا تنظیم شده‌اند که اطلاعات لازم در مرجع [۳۰] آورده شده است.

$$t_i = (TDS_i \times A_i) / ((I_{Fi} / I_{Pi})^{B_i} - 1) \quad (16)$$

در این فرمول I_{Fi} جریان خطا در محل F خط که توسط رله i ام دیده می‌شود. مقادیر A_i و B_i ضرایب ثابت کاهشی استاندارد IEC رله i ام هستند که مقادیر $A_i = 0.14$ و $B_i = 0.02$ را دارند.

در این مقاله، به علت حضور جریان خطای دو سطحی، هماهنگی حفاظتی با استفاده از مدل دینامیکی برای عملکرد رله‌ها انجام شده است که مدل دینامیکی در روابط زیر بیان شده است [۲۶].

$$t_i = TDS_i \times M'_i + TDS_k \times M_k (1 - (M'_i / M_i)) \quad (17)$$

$$M_i = (A_i) / ((I_i^{first} / I_{Pi})^{B_i} - 1) \quad (18)$$

$$M'_i = (A_i) / ((I_i^{second} / I_{Pi})^{B_i} - 1) \quad (19)$$

$$M_k = (A_k) / ((I_k^{first} / I_{Pk})^{B_k} - 1) \quad (20)$$

در رابطه (۱۷) مقدار t_i ، با در نظر گرفتن جریان دو سطحی و مقادیر M_i ، M'_i و M_k در معادلات (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) آمده است. در روابط ذکر شده I_i^{first} مقدار جریان خطای تک سطحی و I_i^{second} مقدار جریان خطای دو سطحی عبوری از رله i ام می‌باشد. همچنین I_k^{first} مقدار جریان تک سطحی عبوری از رله k ام است که رله k ام، رله دور دست رله i ام می‌باشد. با توجه به فرمول‌بندی ارائه شده، هماهنگی حفاظتی برای رله‌های شبکه تست IEEE 14-Bus اجرا شده و تنظیمات رله‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. این هماهنگی حفاظتی با استفاده از حل کننده NEOS کتابخانه Pyomo زبان Python اجرا شده است.

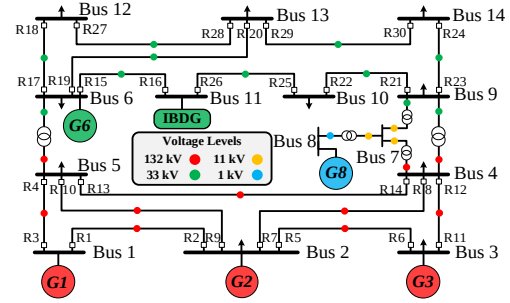
در این بخش، هدف آن است که با تنظیمات حفاظتی بدست آمده برای رله‌های شبکه تست IEEE 14-Bus چالش مورد بحث در قسمت‌های قبل را از طریق مطالعات شبیه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد. لذا در اینجا با مشخص شدن شبکه تست و تنظیمات مربوط به رله‌های آن، در دو سناریو، با دو FRT مختلف این موضوع بررسی خواهد شد.

جدول (۱): مشخصه تنظیم رله‌ها

شماره رله	TDS	Ip	شماره رله	TDS	Ip	شماره رله	TDS	Ip	شماره رله	TDS	Ip
R1	0.05	0.48	R9	0.12	0.26	R17	0.47	0.20	R25	0.59	0.10
R2	0.05	0.35	R10	0.05	0.20	R18	0.41	0.20	R26	0.67	0.10
R3	0.08	0.46	R11	0.15	0.15	R19	0.50	0.34	R27	0.59	0.04
R4	0.05	0.34	R12	0.10	0.15	R20	0.53	0.34	R28	0.89	0.04
R5	0.05	0.46	R13	0.08	0.40	R21	0.65	0.16	R29	0.34	0.14
R6	0.05	0.33	R14	0.07	0.40	R22	0.45	0.16	R30	0.46	0.14
R7	0.08	0.35	R15	0.74	0.14	R23	0.53	0.18			
R8	0.05	0.25	R16	0.50	0.19	R24	0.27	0.25			

۲-۴- بررسی سناریو ها

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، دو سناریو مختلف جهت بررسی تأثیر سو جریان‌های خطای دو سطحی در برآورده شدن گذر از خطای تولیدات پراکنده توسط سیستم‌های حفاظتی آورده شده است. در این دو سناریو، دو استاندارد FRT برای IBDG در نظر گرفته شده است. در سناریو اول استاندارد کشور آمریکا و در سناریو دوم، منحنی مربوط به کشور استرالیا



شکل (۶): شبکه 14 Bus IEEE

برای شروع این مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی، ابتدا لازم است رله‌های جریانی مانند رله‌های ولتاژی موجود در این شبکه تنظیم شوند. به منظور تنظیم رله‌های جریانی ذکر شده، مطابق روش پیشنهادی در مراجع [۹-۱۱]، هماهنگی حفاظتی رله‌ها به صورت مسئله بهینه‌سازی فرمول‌بندی شده و حل می‌شود. همچنین به علت دو سطحی بودن جریان خطا لازم است، عملکرد رله‌ها نیز به صورت دینامیکی مدل شوند [۲۶]. با توجه به توضیحات ارائه شده، در ادامه، ابتدا مدل هماهنگی حفاظتی ارائه و پیاده‌سازی می‌شود و تنظیمات بدست آمده از این هماهنگی حفاظتی برای رله‌های جریانی این شبکه در طی مطالعه شبیه‌سازی استفاده خواهد شد. سپس در دو سناریو، تأثیر سو جریان‌های خطای دو سطحی در برآورده شدن گذر از خطای تولیدات پراکنده توسط سیستم‌های حفاظتی با استاندارد مربوط به دو کشور آمریکا و استرالیا بررسی می‌شود.

۴-۱- تنظیم جریانی رله‌ها

مسئله هماهنگی حفاظتی به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود که شامل تابع هدف، قیود مربوط به متغیرها و قیود انتخابگری است. تابع هدف به صورت مجموع زمان عملکرد رله‌ها در رابطه (۱۲) تعریف می‌شود که در این مسئله باید کمینه گردد.

$$OF = \min \sum_{i \in I} t_i \quad (12)$$

در رابطه بالا OF تابع هدف، t_i زمان عملکرد رله i ام و I مجموعه رله‌های موجود می‌باشد. قیود مربوط به تنظیمات زمانی رله‌ها نیز به صورت زیر در رابطه (۱۳) آمده است. تنظیم زمانی هر رله باید بین 0.5 و 3 باشد [۳۱]. همچنین مطابق با مرجع [۳۱]، تنظیمات جریانی رله‌ها نیز باید حدود ارائه شده در رابطه (۱۴) را برآورد سازند. برای ایجاد انتخابگری بین جفت رله‌ها نیز فاصله زمانی 0.3 مطابق با رابطه (۱۵) باید برقرار باشد.

$$0.05 \leq TDS_i \leq 3.2 ; i \in I \quad (13)$$

$$1.1I_L \leq I_{pi} \leq 1.5I_L ; i \in I \quad (14)$$

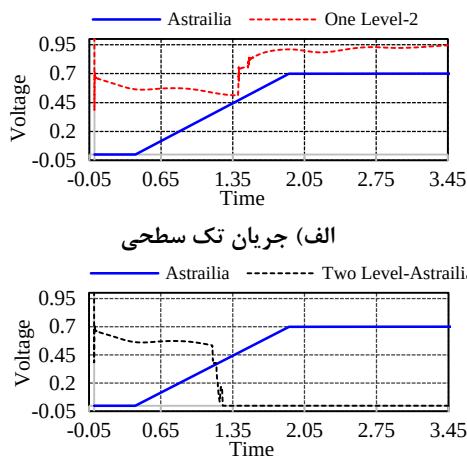
$$t_{backup} - t_{primary} \geq 0.3 \quad (15)$$

در معادلات بالا TDS_i تنظیم زمانی رله i ام و I_{pi} جریان عملکرد رله i ام است. مقادیر $t_{primary}$ و t_{backup} به ترتیب زمان عملکرد رله اصلی و رله پشتیبان می‌باشد.

به صورت متداول، برای به دست آوردن زمان عملکرد رله i ام از فرمول (۱۶) استفاده می‌شود:

۴-۲-۲- سناریو ۲

در سناریو دوم، استاندارد FRT کشور استرالیا به عنوان تنظیم رله ولتاژی متصل به IBDG در نظر گرفته شده است. در این سناریو نیز مانند قبل خطای سه فاز با مقاومت‌های ۲ اهم در خط متصل به شین ۱۰ و ۱۱ اعمال شده است. در اینجا نیز با عملکرد سریع رله R_{26} نسبت به R_{25} جریان خطای تک سطحی ایجاد می‌شود تا استاندارد FRT رله ولتاژی متصل به IBDG در این سناریو برآورده گردد.



شکل (۸): سناریو دوم با FRT کشور استرالیا

این امر در شکل ۹_الف نشان داده شده است. این در حالی است که در حالت دوم این خطا منجر به ایجاد جریان خطای دو سطحی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹_ب مشهود است، گذر از خطا این منبع متصل برآورده نشده است و قبل از جدا شدن خط معیوب از شبکه جدا می‌گردد. لازم به توضیح است که می‌توان به جای استفاده از نیروگاه خورشیدی از نیروگاه‌های بادی قفسه سنجابی و یا DFIG نیز استفاده نمود. هر دو نیروگاه بادی در شرایط جریان خطای دو سطحی نسبت به زمانی که جریان خطا تک سطحی را تجزیه می‌کنند، دچار افت ولتاژ بیشتری خواهند شد. بخصوص در ژنراتور قفس سنجابی به علت ساختار ساده این موضوع مشهودتر خواهد بود. اما ژنراتور DFIG با توجه به ساختار آن در مقابل افت ولتاژ مقاوم می‌باشد. به هر حال این نوع تولیدپراکنده نیز در خطا با مقاومت کم که خطای شدیدی محسوب می‌شود، افت ولتاژ منجر به برآورده نشدن FRT را تجربه خواهد کرد. لذا در نظریه یک نوع تولیدپراکنده برای مطالعه صورت گرفته کافی خواهد بود.

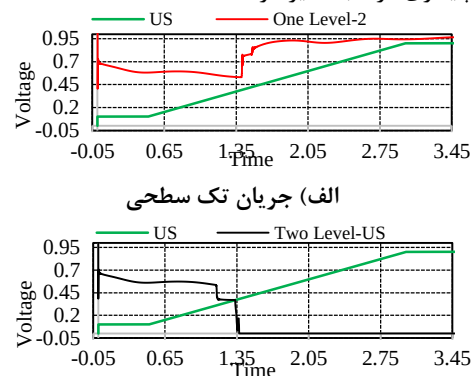
۵- نتیجه‌گیری

ترکیب منابع تولید پراکنده با شبکه‌های به هم پیوسته نیاز حفاظتی شبکه برای تأمین انرژی پایدار و قابل اطمینان را بیشتر مورد توجه قرار داده است. در مقاله نشان داده شد عملکرد سریع رله طرف دیگر خط می‌تواند باعث ایجاد مشکل حفاظتی در برآورد استاندارد FRT مربوط

استفاده شده است. در هر کدام از این سناریوها، با ایجاد خطا در خط مورد حفاظت، جریان دو سطحی دیده شده توسط رله جریانی و واکنش رله ولتاژی به افت ولتاژی ایجاد شده مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. باید به این نکته اشاره نمود که رخداد خطا با مقاومت خطای بالا به دلیل ایجاد افت ولتاژ کم در باس متصل به IBDG نمی‌تواند مانع برآورده شدن FRT شود. از طرفی چون چالش مورد مطالعه در افت ولتاژهای زیاد نمود پیدا می‌کند، در نظریه مقاومت خطا بالا در این مطالعه لازم نخواهد بود.

۴-۲-۱- سناریو ۱

در سناریو اول، استاندارد FRT کشور آمریکا به عنوان تنظیم رله ولتاژی در نظر گرفته می‌شود. خطای سه فاز با مقاومت ۲ اهم به خط متصل به شین ۱۰ و ۱۱ اعمال شده است. در این حالت رله جریانی R_{26} در زمان $1/4$ s عمل خواهد کرد. این در حالی است که رله جریانی R_{25} در سمت دیگر خط در زمان کمتری عمل می‌کند. در حالت اول برای اینکه جریان دو سطحی برای رله R_{26} رخ ندهد، R_{25} قفل می‌شود و بریکر مربوط به آن با تأخیر بعد از عملکرد رله R_{26} باز خواهد شد تا در ابتدای امر شرایط IBDG برای جریان تک سطحی مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۸-الف ولتاژ باس متصل به IBDG در طول خطا به همراه FRT مربوط به کشور آمریکا را برای این حالت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود منحنی ولتاژ با استاندارد FRT برخورد نکرده و IBDG به شبکه متصل می‌ماند. به صورت مشابه در حالت دوم از عملکرد رله R_{25} جلوگیری نمی‌شود و این رله در شرایط مشابه حالت قبل که خطای سه فاز با مقاومت ۲ اهم در این خط رخ می‌دهد، عملکرد سریع‌تری خواهد داشت. در نتیجه عملکرد سریع رله R_{25} منجر به ایجاد جریان خطای دو سطحی می‌شود. در این حالت، رله R_{25} در $1/15$ s عمل می‌کند. با دو سطحی شدن جریان خطا افت ولتاژ بیشتری را رله ولتاژی تجربه می‌کند که این امر در شکل ۸_ب نشان داده شده است. افت ولتاژ بیشتر نسبت به حالت قبل باعث می‌شود منحنی ولتاژ با منحنی FRT برخورد کرده و این منبع قبل از جدا شدن خط معیوب از شبکه جدا شود. این موضوع می‌تواند مانع برق‌رسانی پایدار و باعث ایجاد مشکلاتی از جمله ناپایداری در شبکه نیز گردد.



شکل (۷): سناریو اول با FRT کشور آمریکا

- [9] P. Alaei and T. Amraee, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in meshed active distribution network using imperialistic competition algorithm", *Journal of modern power systems and clean energy*, vol. 9, no. 2, pp. 416-422, 2020.
- [10] E. Dehghanpour, H. K. Karegar, R. Kheirollahi, and T. Soleymani, "Optimal coordination of directional overcurrent relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 1365-1375, 2016.
- [11] A. E. L. Rivas, L. A. G. Pareja, and T. Abrão, "Coordination of distance and directional overcurrent relays using an extended continuous domain ACO algorithm and an hybrid ACO algorithm", *Electric Power Systems Research*, vol. 170, pp. 259-272, 2019.
- [12] A. S. Noghahi, J. Sadeh, and H. R. Mashhadi, "Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 1857-1863, 2009.
- [13] A.-H. Ataee-Kachoei, H. Hashemi-Dezaki, and A. Ketabi, "Protection Coordination of Microgrids Using Dual Setting Directional Overcurrent Relays Based on Optimal Operating Characteristics and Curve Breakpoints", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 20, no. 2, pp. 111-130, 2023, doi: 10.52547/jiaeee.20.2.111.
- [14] A. Assouak and R. Benabid, "A new coordination scheme of directional overcurrent and distance protection relays considering time-voltage-current characteristics", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 150, p. 109091, 2023.
- [15] V. Terzija et al., "Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks", *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 80-93, 2010.
- [16] C. J. Edwards, E. M. Davidson, S. D. McArthur, I. Watt, and T. Cumming, "Flexible model-based alarm processing for protection performance assessment and incident identification", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2584-2591, 2013.
- [17] V. C. Nikolaidis, E. Papanikolaou, and A. S. Safigianni, "A communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation", *IEEE transactions on smart grid*, vol. 7, no. 1, pp. 114-123, 2015.
- [18] M. S. Elbana, N. Abbasy, A. Meghed, and N. Shaker, "μPMU-based smart adaptive protection scheme for microgrids", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 887-898, 2019.
- [19] P. T. Manditereza and R. C. Bansal, "Protection of microgrids using voltage-based power differential and sensitivity analysis", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 118, p. 105756, 2020.
- [20] S. Jamali, H. Rezaei, and N. Rafie, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays Considering Synchronous DGs Transient Stability in Distribution Networks", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 14, no. 1, pp. 19-27, 2017. [Online]. Available:
- [21] C. EnergiNet, "Grid connection of wind turbines to networks with voltages below 100 kV", *Regulation TF*, vol. 3, no. 6, 2004.
- [22] K. A. Saleh, M. S. El Moursi, and H. H. Zeineldin, "A new protection scheme considering fault ride through requirements for transmission level interconnected wind

به IBDG ها گردد که باید در طرح های حفاظتی مورد توجه قرار گیرد. در طول این مطالعه نتایج زیر مشاهده شد.

- به صورت مفهومی، ریاضی و مطالعات مبتنی بر شبیه سازی نشان داده شد جریان خطای دو سطحی می تواند باعث افت ولتاژ شدید در شین متصل به IBDG گردد؛
- این افت ولتاژ نیز می تواند باعث شود تا استاندارد FRT مربوط به IBDG ها برآورد نشده و این منابع از شبکه جدا شوند؛
- این موضوع با استاندارد دو کشور استرالیا و آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت که بر دیده شدن این چالش در طرح های حفاظتی تاکید دارد.

۶- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گزنت شماره ۳۹۸۰۹۷/۱۴۰۴ انجام گردیده است.

مراجع

- [1] A. Yazdanejadi, A. Hamidi, S. Golshannavaz, F. Aminifar, and S. Teimourzadeh, "Impact of inverter-based DERs integration on protection, control, operation, and planning of electrical distribution grids", *The Electricity Journal*, vol. 32, no. 6, pp. 43-56, 2019.
- [2] M. El-Moursi, "Fault ride through capability enhancement for self-excited induction generator-based wind parks by installing fault current limiters", *IET renewable power generation*, vol. 5, no. 4, pp. 269-280, 2011.
- [3] I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 5, pp. 1-4, 2014.
- [4] L. Chen, C. Deng, F. Zheng, S. Li, Y. Liu, and Y. Liao, "Fault ride-through capability enhancement of DFIG-based wind turbine with a flux-coupling-type SFCL employed at different locations", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, 2014.
- [5] A. E. Leon, J. M. Mauricio, and J. A. Solsona, "Fault ride-through enhancement of DFIG-based wind generation considering unbalanced and distorted conditions", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, no. 3, pp. 775-783, 2012.
- [6] M. S. El Moursi and H. Zeineldin, "A parallel capacitor control strategy for enhanced FRT capability of DFIG", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 303-312, 2014.
- [7] F. A. Albasri, A. R. Alroomi, and J. H. Talaq, "Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 4, pp. 1810-1820, 2015.
- [8] S. A. Jazayeri, G. Shahgholian, B. Fani, and M. Moazzami, "Hierarchical Protection Scheme Based on Multi-Agent Systems in Distributed Networks in the Presence of Distributed Generation Resources", (in eng), *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research* vol. 18, no. 2, pp. 93-106, 2021, doi: 10.52547/jiaeee.18.2.93.

- parks", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 11, no. 6, pp. 1324-1333, 2015.
- [23] D. Yoosefian and R. M. Chabanloo, "Protection of distribution network considering fault ride through requirements of wind parks", Electric Power Systems Research, vol. 178, p. 106019, 2020.
- [24] S. S. Fatemi and H. Samet, "Considering dgs voltage protection in optimal coordination of directional overcurrent relays to minimize the energy not supplied", IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 3, pp. 4037-4045, 2020.
- [25] H. Ebrahimi, A. Yazdaninejadi, S. Golshannavaz, and S. Teimourzadeh, "An ENS-oriented voltage protection scheme for inverter-based generators in active distribution networks", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 13, no. 4, pp. 2639-2649, 2022.
- [26] N. Mohammadzadeh, R. M. Chabanloo, and M. G. Maleki, "Optimal coordination of directional overcurrent relays considering two-level fault current due to the operation of remote side relay", Electric Power Systems Research, vol. 175, p. 105921, 2019.
- [27] W. Stevenson Jr and J. Grainger, Power system analysis. McGraw-Hill Education, 1994.
- [28] C. R. Power systems test case archive. IEEE 14 Bus System [Online] Available: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- [29] M. N. Hawas, I. J. Hasan, and M. J. Mnati, "Simulation and analysis of the distributed photovoltaic generation systems based on DIgSILENT power factory", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 28, no. 3, pp. 1227-1238, 2022.
- [30] M. Tarafdar Hagh and T. Khalili, "A review of fault ride through of PV and wind renewable energies in grid codes", International Journal of Energy Research, vol. 43, no. 4, pp. 1342-1356, 2019.
- [31] A. Baghery, H. Aghaei, M. Shamsi, M. Abedi, and H. Hashemi-Dezaki, "Optimal Combined and Adaptive Protection of Active Distribution Networks Considering Different System Topologies Incorporating Optimal Selection of Standard Relay Curves", (in eng), Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Research vol. 19, no. 4, pp. 223-239, 2022, doi: 10.52547/jiaeee.19.4.223.