

## Coordinated Protection Scheme Based on Virtual Impedance Control for Loop-Based Microgrids

Hamed Karimi<sup>1,2</sup>, *Ph.D. Student*, Bahador Fani<sup>1,2</sup>, *Associated Professor*, Ghazanfar Shahgholian<sup>1,2</sup>, *Associated Professor*

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

<sup>2</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran  
hamed.karimi35@gmail.com, bahadorfani@gmail.com, shahgholian@iaun.ac.ir

### Abstract:

The presence of the inverter distributed generations in the power systems can bring about incoordination in the protection system performance while enjoying various advantages. In this paper, a suitable solution, independent of relay settings, is presented in order to solve the protection problems of inverter island microgrids with circular arrangement. The presence of distributed inverter generation sources causes a change in the direction and amplitude of the fault current at the microgrid level. This problem is more visible in microgrids with circular arrangement. Therefore, conventional protection schemes that consider a single path and a high fault current level compared to load current may be problematic. An important factor for the proper design of a protective system for microgrids is the contribution of the injecting fault current of the inverter sources. In this paper, a protection strategy based on the inverter control of sources is presented and ordinary overcurrent relays with the same characteristic curve are used. When a short circuit fault occurs in the microgrid, an adaptive current limiting strategy is applied using the virtual impedance loop. In this case, the share of fault current of each source is controlled according to the position of the fault, and sources closer to the fault produce a larger fault current. Therefore, the current passing through the protective equipment is closer to the fault than other equipment in the micro grid. And without the need for making connection between protective equipment, the protective coordination is guaranteed.

**Keywords:** loop microgrid, distributed generation, protective coordination, overcurrent relay, virtual impedance

**Received:** 13 October 2020

**Revised:** 12 December 2020

**Accepted:** 29 December 2020

**Corresponding Author:** Dr. Bahdor Fani

**Citation:** H. Karimi, B. Fani, 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, September 2021 (in Persian).

 DOR: [20.1001.1.23223871.1400.12.2.2.0](https://doi.org/10.23223871.1400.12.2.2.0)

مقاله پژوهشی

## روش حفاظت هماهنگ بر مبنای کنترل امیدانس مجازی برای ریزشبه‌های حلقوی

حامد کریمی<sup>۱،۲</sup>، دانشجوی دکتری، بهادر فانی<sup>۱،۲</sup>، دانشیار، غضنفر شاهقلیان<sup>۱،۲</sup>، دانشیار  
دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۱- دانشکده مهندسی برق - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبه‌های هوشمند - واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران  
hamed.karimi35@gmail.com, bahadorfani@gmail.com, shahgholian@iaun.ac.ir

**چکیده:** حضور منابع تولید پراکنده اینورتری در سیستم‌های قدرت در مقابل مزایای متعدد آن، می‌تواند باعث ایجاد عدم هماهنگی در عملکرد سیستم حفاظتی گردد. در این مقاله یک راه کار مناسب، مستقل از تنظیمات رله‌ها، به‌منظور حل مشکلات حفاظتی ریزشبه‌های جزیره‌ای اینورتری با آرایش حلقوی ارائه گردیده است. حضور منابع تولید پراکنده اینورتری، تغییر جهت و دامنه‌ی جریان خطا در سطح ریزشبه را موجب می‌شود. این مساله در ریزشبه‌ها با آرایش حلقوی بیشتر به چشم می‌خورد. بنابراین طرح‌های حفاظتی متداول که یک مسیر واحد و یک سطح جریان خطای بالا را در مقایسه با جریان بار در نظر می‌گیرند، ممکن است دچار مشکل شوند. یک عامل مهم برای طراحی مناسب یک سیستم حفاظتی برای ریزشبه‌ها، سهم جریان خطای تزریقی منابع اینورتری است. استراتژی حفاظت بر مبنای کنترل اینورتر منابع ارائه می‌گردد و از رله‌های اضافه جریان معمولی با منحنی مشخصه‌ی یکسان استفاده شده است. هنگامی که یک خطای اتصال کوتاه در ریزشبه رخ دهد، یک استراتژی محدود کننده جریان وقتی با استفاده از حلقه امیدانس مجازی اعمال می‌گردد. در این حالت سهم جریان خطای هر منبع با توجه به موقعیت خطا کنترل می‌شود و منابع نزدیک‌تر به خطا جریان خطای بزرگ‌تری تولید می‌کنند. بنابراین جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی نزدیک‌تر به خطا بیشتر از سایر تجهیزات موجود در ریزشبه می‌شود و بدون نیاز به برقراری ارتباط بین تجهیزات حفاظتی هماهنگی حفاظتی تضمین می‌شود.

**کلمات کلیدی:** ریزشبه حلقوی، منابع تولید پراکنده، هماهنگی حفاظتی، رله اضافه جریان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۲۲

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۹/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۰/۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر بهادر فانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد - دانشکده مهندسی برق

## ۱- مقدمه

به دلیل افزایش نگرانی‌ها در ارتباط با امنیت انرژی و تغییرات زیست محیطی به کارگیری واحدهای تولید پراکنده<sup>۱</sup> (DG) مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۲۰،۱]. علاوه بر این ناکافی بودن منابع انرژی، افزایش سطح آگاهی عمومی در کاهش گازهای گلخانه‌ای<sup>۲</sup> و همچنین تلاش برای ایجاد رقابت آزاد در بازار برق<sup>۳</sup> موجب افزایش استفاده از منابع پراکنده مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۴</sup> شده است [۴،۳]. از آنجا که اغلب واحدهای تولید پراکنده دارای مشخصه‌های توان خروجی DC و یا AC کنترل نشده هستند، لذا یک مبدل الکترونیک قدرت که عمدتاً اینورتر منبع ولتاژ<sup>۵</sup> (VSI) است به عنوان یک رابط موثر برای اتصال این واحدها به شبکه برق اتخاذ می‌شود [۶،۵]. وظیفه‌ی اصلی مبدل واسط، کنترل توان حقیقی و راکتیو تزریقی توسط منابع است [۸،۷].

با ورود منابع اینورتری به سیستم‌های توزیع<sup>۶</sup>، به منظور کنترل هماهنگ آن‌ها و افزایش قابلیت اطمینان در سیستم، مفهوم ریزشبکه<sup>۷</sup> به عنوان مجموعه‌ای از واحدهای تولید پراکنده و بارها به منظور تولید و دریافت توان در مقیاس کوچک مطرح شد [۱۰،۹]. ریزشبکه‌ها می‌تواند در حالت اتصال به شبکه مورد بهره‌برداری قرار گیرد یا به علت وقوع خطا در شبکه‌ی بالادست و یا به صورت از پیش برنامه‌ریزی شده در حالت جزیره‌ای<sup>۸</sup> عمل نمایند [۱۲،۱۱]. قابلیت جزیره‌ای شدن ریزشبکه سبب می‌شود تا مین انرژی بارهای حساس موجود در ریزشبکه، در شرایط قطعی شبکه‌ی اصلی امکان پذیر شود، که این مساله باعث افزایش سطح قابلیت اطمینان برای مصرف‌کنندگان داخل ریزشبکه می‌شود [۱۴،۱۳].

از طرف دیگر طراحی و انتخاب نوع آرایش ریزشبکه جهت محقق شدن مزایای آن همچون قابلیت اطمینان بالا اهمیت فراوانی دارد. با توجه به توسعه‌ی انواع مختلف منابع پراکنده و الگوهای جدید کنترل و حفاظت، می‌توان در طراحی آرایش ریزشبکه‌ها علاوه بر ساختار شعاعی<sup>۹</sup> متداول ریزشبکه‌ها که در آن بارها تنها از یک سمت تغذیه می‌شوند از ساختار حلقوی<sup>۱۰</sup> نیز استفاده کرد [۱۶،۱۵]. انعطاف‌پذیری و قابلیت اطمینان بیشتر در تغذیه بارها و افزایش بهره‌وری اقتصادی از جمله عوامل موثر در انتخاب آرایش ریزشبکه‌ها است. بنابراین آرایش شعاعی ممکن است بهترین گزینه برای تحقق این ویژگی‌ها نباشد. در حالی که ریزشبکه‌ها با ساختار حلقوی به دلیل وجود مسیرهای متعدد برای تحویل انرژی به مصرف‌کننده‌ها می‌تواند فرصت بیشتری را به منظور برآورده ساختن ویژگی‌های مذکور فراهم کند [۱۸،۱۷].

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. در عملکرد جزیره‌ای ریزشبکه به دلیل عدم حضور شبکه‌ی اصلی، سطح جریان خطا کوچک است. علاوه بر این منابع تولید پراکنده اینورتری نمی‌توانند همچون منابع پراکنده مبتنی بر ماشین سنکرون، جریان قابل ملاحظه‌ای را در هنگام خطا تزریق کنند. همچنین به دلیل حضور منابع تولید پراکنده، جهت جریان خطا در ریزشبکه‌ها دوطرفه است. این مساله در ریزشبکه‌ها با آرایش حلقوی بیشتر به چشم می‌خورد. بنابراین طرح‌های حفاظتی متداول که یک مسیر واحد و یک سطح جریان خطای بالا را در مقایسه با جریان بار در نظر می‌گیرند، کمتر می‌تواند در چنین سیستم‌های کارآمد باشد. تاکنون طرح‌های مختلفی در زمینه‌ی طراحی سیستم حفاظتی ریزشبکه‌ها مطرح شده است. این طرح‌ها را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد.

## ۱-۱- طرح‌های حفاظتی ولتاژ

در این دسته از طرح‌های حفاظتی، تشخیص خطا با توجه به افت دامنه ولتاژ و یا اعوجاج هارمونیک ولتاژ در زمان وقوع خطا صورت می‌پذیرد [۲۰،۱۹]. در مقاله [۲۱] یک روش حفاظت مبتنی بر اندازه‌گیری ولتاژهای فاز منابع تولید پراکنده ارائه شده است. در این روش ولتاژهای فازی منابع به مرجع سنکرون dq0 انتقال داده شده، سپس شکل موج‌های حاصل با یک سیگنال مرجع مقایسه می‌شود. در صورت وجود افت ولتاژ در مقایسه با این سیگنال، رله فرمان قطع را صادر می‌کند. مزیت اصلی روش‌های مبتنی بر ولتاژ، عدم نیاز به مقدار و جهت جریان است. اما ولتاژ ریزشبکه در مقابل سایر غیر خطا نیز ممکن است تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین این نوع حفاظت در برابر رخدادهایی مانند کلیدزنی بار ممکن است دچار اشتباه شود.

## ۲-۱- طرح‌های حفاظتی مؤلفه‌های متقارن

این طرح حفاظتی در واقع روشی برای اصلاح رله‌های جریان زیاد متداول برای حفاظت ریزش‌بکه‌ها است [۲۳،۲۲]. در مرجع [۲۴] از روش‌های مبتنی بر مؤلفه‌های متقارن ولتاژ و جریان بهره می‌برد. این روش بر اثر عدم تعادل ریزش‌بکه در حین خطا-های نامتقارن کار می‌کند. معمولاً از مؤلفه‌ی توالی صفر جریان برای تشخیص اتصال کوتاه به زمین و از مولفه توالی منفی جریان برای تشخیص خطای دوفاز استفاده می‌کند. مشکل این روش عدم کارآیی در زمان وقوع اتصال کوتاه‌های سه‌فاز متقارن و کاهش کارآیی در ریزش‌بکه‌های با ولتاژ کم به علت عدم تعادل ذاتی آنهاست.

## ۳-۱- طرح‌های حفاظتی دیفرانسیل

حفاظت دیفرانسیل بر اساس مقایسه‌ی جریان‌های ورودی و خروجی از منطقه حفاظت شده، تعریف می‌شود. در صورتی که تفاوت بین جریان‌ها از یک مقدار از پیش تعیین شده بیشتر گردد، این حفاظت عمل می‌نماید [۲۶،۲۵] از این نوع حفاظت می‌توان به منظور آشکارسازی خطا در ریزش‌بکه‌ها استفاده نمود [۲۸،۲۷]. مزیت این نوع حفاظت عدم حساسیت به جهت پخش توان و کاهش دامنه‌ی جریان در حالت جزیره‌ای ریزش‌بکه‌ها است. در این روش‌ها به علت نیاز به دستگاه‌های حفاظتی در ابتدا و انتهای خط، هزینه سیستم افزایش می‌یابد. به علاوه حضور بارهای نامتعادل و دوره‌های گذرای ناشی از قطع و وصل منابع تولید پراکنده می‌تواند مشکلاتی را جهت بکارگیری این نوع از حفاظت در ریزش‌بکه‌ها بوجود آورد.

## ۴-۱- طرح‌های حفاظتی دیستانس

بکارگیری حفاظت دیستانس یکی از طرح‌های حفاظتی مرسوم برای خطوط انتقال است. با توجه به اینکه رله‌های دیستانس، امیدانس یعنی نسبت ولتاژ و جریان را اندازه‌گیری می‌کنند و از هر دو کمیت ولتاژ و جریان برای تصمیم در خصوص وقوع و مکان خطا استفاده می‌کنند [۳۰،۲۹]. اخیراً توسط برخی از محققین بکارگیری رله‌های دیستانس در سیستم‌های توزیع مطرح شده است [۳۲،۳۱]. مشکل اصلی این نوع حفاظت اثر مقاومت خطا بر روی امیدانس محاسبه شده توسط رله است. بخصوص در سیستم‌های توزیع که خطوط کوتاه بوده و احتمال وقوع خطاهایی با امیدانس بالا بیشتر است.

## ۵-۱- طرح‌های حفاظتی وفقی

در روش‌های حفاظت تطبیقی مشکلات حفاظتی در هر دو بخش متصل به شبکه و جزیره‌ای حل می‌گردد. در این روش‌ها یک تنظیم مجدد در تنظیمات رله‌های ریزش‌بکه در زمان تغییر وضعیت ریزش‌بکه رخ می‌دهد [۳۴،۳۳]. تفاوت روش‌های حفاظت وفقی<sup>۱۱</sup>، در الگوریتم‌هایی است که برای تعیین تنظیمات مجدد حفاظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مقاله [۳۵] یک طرح حفاظت تطبیقی جهت تشخیص و جداسازی خطا در ریزش‌بکه‌ها پیشنهاد شده است. در این طرح با استفاده از رله‌های دیجیتال و یک زیر ساخت ارتباطی با مشاهده هر تغییر در ریزش‌بکه، تنظیمات رله‌های آن اصلاح و به روز می‌گردد. در مقاله [۳۶] یک طرح حفاظت تطبیقی جهت نظارت و به روزرسانی ساختار ریزش‌بکه ارائه شده است. در این طرح به‌ازای هر تغییر، منحنی مشخصه‌ی رله‌ها با استفاده از یک ساختار ارتباطی گسترده و یک واحد کنترل مرکزی به روز می‌گردد. در مقاله [۳۷] یک طرح حفاظت تطبیقی که مستقل از پارامترهای سیستم است برای شبکه با نفوذ بالای DGها ارائه شده است. در این طرح با استفاده از یک سیستم کامپیوتری متمرکز اطلاعات شبکه پردازش شده و با استفاده از آنها تصمیم در مورد عملکرد تجهیزات حفاظتی گرفته می‌شود. در مقاله [۳۸] یک روش حفاظت وفقی مبتنی بر امیدانس پیشنهاد شده است. در این روش امیدانس سیستم از طریق اندازه‌گیری ولتاژ و مولفه‌ی خطای جریان به کمک روش فوریه محاسبه می‌شود و با مقایسه امیدانس تنظیمات رله‌ها به روز می‌شود. در مقاله [۳۹] یک طرح حفاظتی تطبیقی مبتنی بر قانون به همراه یادگیری ماشین برای ریزش‌بکه‌ها ارائه شده است. در این طرح از یک مدل ترکیبی شامل شبکه‌ی عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبانی<sup>۱۲</sup> (SVM) برای تشخیص خطا و به روزرسانی تنظیمات رله‌ها استفاده شده است. اگر چه روش‌های وفقی حفاظت قابل قبولی را

برای ریزش‌بکه‌ها فراهم می‌کنند اما نیازمند یک سیستم پردازش با سرعت بالا هستند، همچنین ممکن است با وقوع تغییرات گسترده در سیستم ریزش‌بکه الگوریتم حفاظتی نیلز به روزرسانی داشته باشد.

#### ۶-۱- طرح‌های حفاظتی مبتنی بر تجهیزات هوشمند

بکارگیری روش‌های هوشمند یکی دیگر از راه‌حل‌هایی است که به‌منظور رفع مشکلات حفاظتی ریزش‌بکه پیشنهاد شده است [۴۱،۴۰]. یکی از طرح‌های حفاظتی ارائه شده در حوزه سیستم‌های حفاظتی هوشمند، بکارگیری مفهوم سیستم‌های چند عاملی<sup>۱۳</sup> است. در این روش‌ها عامل‌های مبتنی بر تجهیزات هوشمند، اطلاعات شبکه را جمع‌آوری کرده و به واسطه یک ساختار ارتباطی چند لایه، شروع به انتقال اطلاعات در بین تجهیزات مختلف ریزش‌بکه می‌کنند. در نهایت این تجهیزات به واسطه‌ی حضور یک پردازشگر مرکزی و اطلاعات جمع‌آوری شده، قادر خواهند بود تا طرح حفاظتی شبکه را تغییر دهند. در مقاله [۴۲] یک ساختار کنترلی مبتنی بر سیستم‌های چند عاملی برای خود ترمیمی<sup>۱۴</sup> در سیستم‌های توزیع هوشمند ارائه شده است. در این طرح به‌منظور موقعیت یابی خطا و ایزوله کردن آن از یک ساختار چند عاملی دو سطحی شامل ناحیه‌ها در سطح اول و عامل فیدر در سطح دوم استفاده شده است. در مقاله [۴۳] یک ساختار حفاظت دو سطحی بر روی بستر سیستم‌های چند عاملی را پیشنهاد شده است. در سطح اول حفاظت به کمک استفاده از تجهیزات هوشمند، توابعی بر روی رله‌ها تعریف می‌شوند که به کمک آن هماهنگی حفاظتی برقرار می‌گردد. در سطح دوم، عامل‌های منابع تولید پراکنده با کمک دریافت اطلاعات از واحد عامل شبکه اصلی فیدر خطا را تشخیص می‌دهد. در مقاله [۴۴] با استفاده تغییر منحنی‌های حفاظتی روشی پیشنهاد شده است که به‌وسیله آن هماهنگی رله‌های اضافه جریان در زمان تغییرات جریان خطا حفظ می‌گردد. در مقاله [۴۵] یک طرح حفاظتی برای ریزش‌بکه‌ها پیشنهاد شده است که می‌تواند در شرایط عملکرد اورژانسی و در زمان وقوع اشکال در فرآیند بروزرسانی تنظیمات حفاظتی جایگزین گردد. در این طرح، وظایف حفاظتی به دو سطح کنترل سلسه مراتبی طبقه بندی می‌شود، سطح اول مسئولیت پاکسازی خطا را بر عهده دارد و سطح دوم اهداف فنی و اقتصادی را بر عهده دارد. در مرجع [۴۶] یک روش حفاظتی انتخابی برای ریزش‌بکه ارائه شده است. در این روش با توجه به موقعیت قرارگیری تجهیزات هوشمند و ویژگی‌های فیدر، موقعیت خطا تشخیص داده شده و سیستم حفاظتی بر اساس آن عمل می‌نماید. در مقاله [۴۷] یک طرح حفاظتی مبتنی بر ساختار چند عاملی برای مقابله با شرایط بهره‌برداری مختلف در سیستم توزیع به دلیل ادغام منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است. در این طرح بر اساس همکاری بین کنترل‌کننده منابع تولید پراکنده و رله‌ها یک الگوریتم حفاظتی و کنترلی به‌منظور محدودسازی جریان خطای منابع و اصلاح تنظیم رله‌ها ارائه شده است.

با وجود مشارکت‌های چشم‌گیر پژوهشگران برای ارائه روش‌های کاربردی در حوزه‌ی حفاظت ریزش‌بکه‌ها، هنوز مسائل زیادی در راستای یک حفاظت موثر و مناسب وجود دارد. چالش‌هایی که با در نظر گرفتن آن‌ها در تحقیقات آینده می‌تواند منجر به پیدایش یک روش جامع و کارا برای حفاظت ریزش‌بکه‌ها شود. اهم مسائل حل نشده عبارتند از: وابستگی روش‌های پیشنهادی به ساختار ریزش‌بکه، عدم در نظر گرفتن ریزش‌بکه‌های حلقوی، عدم در نظر گرفتن عملکرد سیستم کنترل اینورتر در شرایط خطا و هزینه‌های بالا برای پیاده‌سازی روش‌های پیشنهادی.

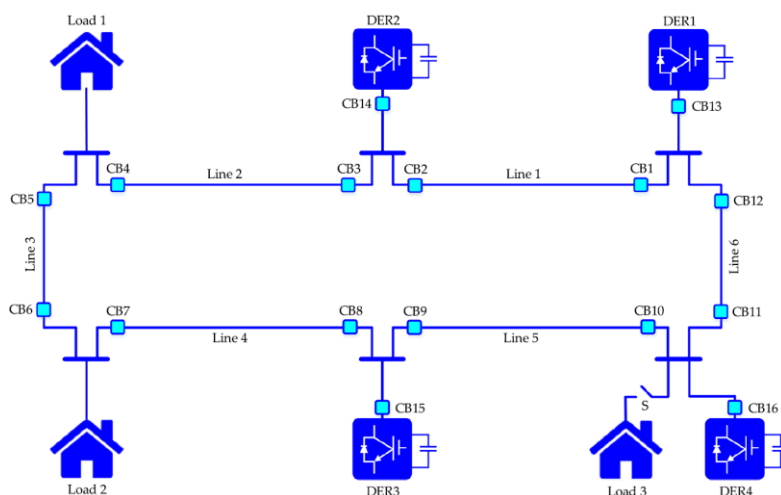
در این مقاله یک روش حفاظت هماهنگ شده به‌منظور حل مشکلات حفاظتی ریزش‌بکه‌های جزیره‌ای اینورتری بر مبنای کنترل اینورتر منابع پیشنهاد شده است. آرایش ریزش‌بکه حلقوی و تجهیزات حفاظتی مورد استفاده در ریزش‌بکه از نوع رله‌های اضافه جریان معمولی با منحنی مشخصه‌های یکسان در نظر گرفته شده است. بنابراین برای عملکرد صحیح رله‌ها و برقراری هماهنگی حفاظتی باید از رله‌های نزدیکتر به خطا جریان بیشتری عبور کند. برای نیل به این هدف، در این مقاله از حلقه‌ی امپدانس مجازی وفقی<sup>۱۵</sup> در ساختار کنترل‌کننده منابع استفاده می‌شود. در واقع مقدار امپدانس مجازی متناسب با موقعیت خطا محاسبه شده و باعث محدودسازی وفقی جریان خروجی منابع به‌گونه‌ای می‌شود که منابع نزدیک‌تر به خطا جریان بیشتری نسبت به منابع دورتر از محل وقوع خطا تزریق می‌کنند. بنابراین از رله‌های نزدیک‌تر به محل خطا جریان بیشتری عبور کرده و باعث عملکرد صحیح آنها می‌شود. روش پیشنهادی دارای مزایای زیر است:

- عدم نیاز به قرار گرفتن تجهیزات اضافی

- عدم نیاز به تغییرات منحنی‌های حفاظتی و تنظیمات رله‌ها
- عدم جایگزین کردن حفاظت‌ها و عدم نیاز به رله‌های جهتی
- عدم وابستگی به واحد پردازشگر مرکزی

## ۲- ساختار ریزشبکه

ساختار یک ریزشبکه با آرایش حلقوی شامل منابع تولید پراکنده و بارها در شکل (۱) نشان داده شده است. هر منبع تولید پراکنده از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت و فیدر مربوطه به ریزشبکه متصل شده است.



شکل (۱): ریزشبکه حلقوی مورد مطالعه  
Figure (1): Loop-based microgrid under study

### ۲-۱- ساختار کنترل ریزشبکه

برای اتصال منابع تولید پراکنده به ریزشبکه معمولاً از اینورترهای منبع ولتاژ VSI استفاده می‌شود. این مبدل‌ها به دلیل قابلیت انعطاف‌پذیری زیادی که در تامین انرژی کنترل شده و با کیفیت بالا برای بارها دارند، در بین صنایع و شرکت‌های برق محبوبیت زیادی کسب کرده‌اند [۴۸]. این نوع اینورتر می‌تواند دارای کنترل ولتاژ یا کنترل جریان باشد. مبدل در حالت کنترل ولتاژ، ولتاژی با دامنه و فرکانس مورد نظر تولید می‌کند که مناسب شرایط کار جزیره‌ای است. در حالت کنترل جریان، جریان خروجی مبدل از جریان مرجع آن پیروی می‌کند ولی دامنه ولتاژ و فرکانس خروجی تحت کنترل نبوده و توسط شبکه مشخص می‌شود. از آنجایی که در این مقاله حالت کار جزیره‌ای ریزشبکه مدنظر است، از اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با ولتاژ استفاده می‌شود.

شکل (۲) بلوک دیاگرام یک VSI که از طریق فیلتر LC به ریزشبکه متصل شده است را به همراه کنترل‌کننده‌های مربوطه نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، ساختار کنترلی اینورتر از دو بخش حلقه‌ی کنترل خارجی توان و حلقه‌ی کنترل داخلی شامل حلقه‌های کنترل ولتاژ و کنترل جریان تشکیل می‌شود. حلقه‌ی کنترل توان دامنه و فرکانس مولفه‌ی اساسی ولتاژ خروجی اینورتر را مطابق با مشخصه‌های افتی فرکانس/ولتاژ متداول به صورت زیر می‌سازد.

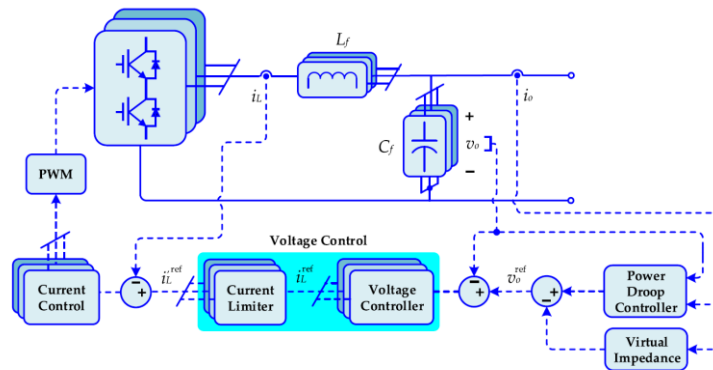
$$f = f_0 - m.P$$

(۱)

$$V = V_0 - n.Q$$

در این رابطه  $f_0$  و  $V_0$  فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی در حالت بی‌باری،  $m$  و  $n$  ثابت‌های افتی،  $P$  و  $Q$  توان‌های اکتیو و راکتیو متوسط هستند. همان‌طور که در شکل (۲) دیده می‌شود، این مشخصه‌ها مرجع ولتاژ و مرجع فرکانس را برای VSI تولید می‌کند. هم‌چنین به منظور بهبود دقت تقسیم توان در ریزشبکه در حالت عملکرد جزیره‌ای و ارتقای عملکرد دینامیکی سیستم، می‌توان از یک حلقه‌ی کنترلی با عنوان حلقه‌ی امپدانس مجازی نیز مطابق شکل (۲) استفاده کرد. کنترل‌کننده‌ی ولتاژ

وظیفه‌ی تنظیم ولتاژ خروجی اینورتر،  $V_o$  را بر عهده دارد. در این کنترل‌کننده برای کاهش خطای ولتاژ خروجی اندازه‌گیری شده با مقدار مرجع ولتاژ تولید شده توسط کنترل‌کننده توان از یک کنترل‌کننده PI ساده استفاده می‌شود.



شکل (۲). ساختار سیستم کنترل VSC

Figure (2): VSC control system structure

از آنجایی که در اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با ولتاژ، جریان خروجی منبع به‌طور مستقیم کنترل نمی‌شود، بنابراین لزوم به-کارگیری روش‌های محدودسازی جریان خروجی منبع در شرایط اضافه بار و اختلال ضروری به‌نظر می‌رسد. برای این منظور در ساختار کنترل اینورتر از یک بلوک محدودکننده‌ی جریان واقع در حلقه‌ی کنترل ولتاژ و یک حلقه‌ی کنترل جریان استفاده می‌شود. بلوک محدودکننده‌ی جریان تنها در شرایط وقوع خطا فعال شده و منجر به محدود شدن مرجع جریان سلف می‌گردد. مرجع جریان سلف به‌عنوان خروجی کنترل‌کننده‌ی ولتاژ برای تعیین ولتاژ اینورتر وارد کنترل‌کننده‌ی جریان می‌شود. مشابه با کنترل‌کننده‌ی ولتاژ در کنترل‌کننده‌ی جریان نیز با استفاده از یک کنترل‌کننده‌ی PI اختلاف جریان عبوری از سلف فیلتر با مرجع جریان محاسبه شده توسط کنترل‌کننده‌ی ولتاژ را به حداقل می‌رساند. در نهایت خروجی کنترل‌کننده‌ی جریان، ولتاژ اینورتر که همان سیگنال PWM است را می‌سازد.

## ۲-۲- محدودسازی جریان خروجی منابع اینورتری

همان‌طور که در بخش قبل بیان شد، با توجه به ظرفیت حرارتی کم یک اینورتر، جریان خروجی آن را باید در حین وقوع اضافه‌جریان محدود کرد تا به کلیدهای اینورتری آسیبی نرسد. بنابراین باید با استفاده از قابلیت‌های سیستم کنترل از اضافه‌جریان اینورتر جلوگیری شود. در این حالت از یک بلوک محدودکننده در خروجی کنترل‌کننده ولتاژ استفاده می‌شود تا از افزایش جریان مرجع از یک مقدار از پیش تعیین شده جلوگیری شود. به این ترتیب دو روش اصلی محدودسازی حد اشباع لحظه‌ای و حد قفل شده ارائه شده است [۴۹، ۵۰].

در محدودکننده نوع اول از افزایش سیگنال خروجی خود که مرجع جریان خروجی مبدل است به مقداری فراتر از آستانه از پیش تعیین شده جلوگیری می‌کند. با وجود این که این محدودکننده به‌سادگی قابل پیاده‌سازی است، اما اگر سیگنال ورودی به آن سینوسی باشد، کار محدودکننده اشباع لحظه‌ای قله‌های سیگنال را بریده و در نتیجه سیگنال خروجی دارای اعوجاج است. در محدودکننده نوع دوم در حین شرایط اضافه‌جریان، جریان مرجع اینورتر با جریانی از پیش تعیین شده جایگزین می‌شود. در نتیجه در خروجی مبدل نیز همانند ورودی شکل موج‌های سینوسی خواهیم داشت. اما هنگام استفاده از این محدودکننده امکان وقوع اضافه‌ولتاژ در فازهای سالم و در نتیجه اعوجاج شکل موج‌های خروجی مبدل وجود دارد. در کنار این دو محدودکننده اصلی که روش‌های نرم‌افزاری هستند، برخی روش‌ها از محدودکننده جریان خطا FCL برای محدود نمودن جریان استفاده می‌کنند. اما به‌کار بردن تجهیزات اضافی از یک طرف هزینه را افزایش داده و از طرف دیگر قابلیت اطمینان سیستم را کاهش می‌دهد. همچنین تعیین اندازه FCL خود چالش دیگری است. برای حل این مشکلات در این مقاله از حلقه امپدانس مجازی برای محدود کردن خطا استفاده می‌شود. در واقع با استفاده از امپدانس مجازی ولتاژ مرجع هنگام خطا کاهش می‌یابد و از اینکه کنترل‌کننده‌ی ولتاژ جریان مرجع بزرگی ایجاد کند جلوگیری می‌شود.

### ۳- حفاظت ریزشکبه‌های حلقوی

شبکه‌های توزیع سنتی با فرض ساختار شعاعی و مسیر جاری شدن توان یک‌طرفه طراحی شده‌اند. بنابراین می‌توان از حفاظت‌های ساده‌ای مثل حفاظت‌های جریان زیاد برای حفاظت این شبکه‌ها بهره برد. الگوی این نوع حفاظت بر اساس عبور جریان خطای زیاد از رله است. در این شرایط رله بر اساس منحنی مشخصه زمان-جریان فرمان تریپ را صادر می‌کند. مطابق با استاندارد IEC 60255، منحنی مشخصه رله‌های جریان زیاد به صورت زیر قابل بیان است.

$$t = \frac{A}{\left(\frac{I}{I_{base}}\right)^P - 1} + B \quad (2)$$

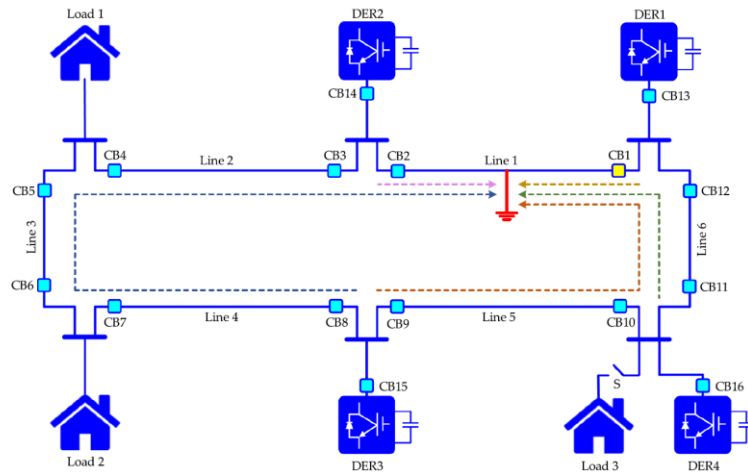
که در این رابطه  $t$  زمان عملکرد رله است.  $I$  و  $I_{base}$  به ترتیب جریان حالت خطای عبوری از رله و جریان تنظیم شده بر روی رله است.  $A$ ،  $B$  و  $P$  ثابت‌ها در جهت مشخص کردن نوع مشخصه رله است. تفاوت‌های زیادی بین شبکه‌های توزیع سنتی و ریزشکبه‌ها حلقوی وجود دارد. زمانی که خطایی در یک ریزشکبه حلقه بسته رخ می‌دهد، جریان خطا از هر دو طرف وارد نقطه خطا شده و باعث تغییر جریان در قسمت‌هایی از ریزشکبه می‌شود. بنابراین بسته به حساسیت تنظیمات رله‌ها ممکن است که سیستم حفاظتی رفتاری متفاوت از آنچه که در منحنی مشخصه آنها در نظر گرفته شده است از خود نشان دهند. از طرف دیگر مکانیزم جداسازی خطا در ریزشکبه‌های شعاعی و حلقوی متفاوت است. در یک سیستم شعاعی جداسازی خطا به معنای بازکردن نزدیک‌ترین کلید قدرت به خطا و پست فیدری است که به آن متصل است. اما در ریزشکبه‌ها با آرایش حلقوی نیاز به یک سیستم پیچیده برای جداسازی خطا است. در این شرایط به منظور جلوگیری از تغذیه خطا در خط، نیاز به یک طرح حفاظتی مناسب است تا تمام کلیدهای قدرت موجود در هر دو انتهای خط معیوب، عمل نمایند. این مساله می‌تواند بسیار دشوار باشد، زیرا جریان‌های خطا از جهت‌های مختلف جاری می‌شوند و بسته به نحوه اتصال دارای مقادیر و جهت‌های مختلفی هستند.

همان‌طور که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود برای خطای مشخص شده در خط یک، کلیدهای قدرت یک و دو برای جداسازی خطا باید باز شوند. اگر کلید یک به عنوان نزدیک‌ترین کلید به خطا عمل کند، همان‌طور که در شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود ساختار ریزشکبه تغییر کرده و جهت و دامنه‌ی جریان عبوری از سایر تجهیزات تغییر می‌کند و ممکن است با توجه به ظرفیت منابع موجود، محل نصب آنها و تنظیمات رله‌ها کلیدهای موجود در سایر بخش‌های ریزشکبه به اشتباه جدا شوند.

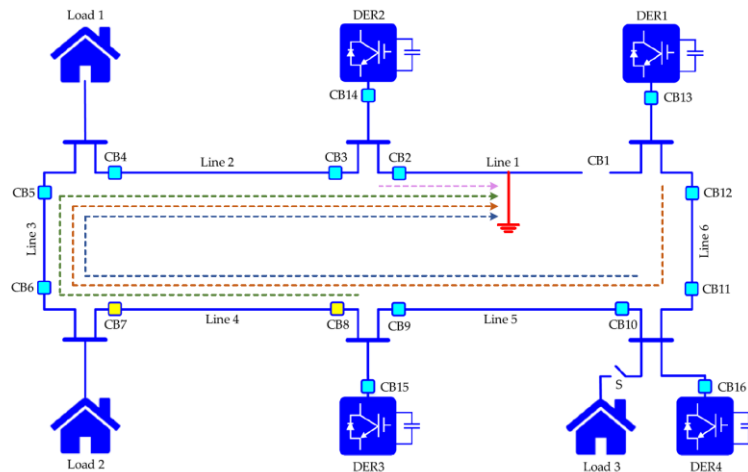
### ۴- استراتژی پیشنهادی

همان‌طور که در قسمت قبل بیان شد برای عملکرد صحیح سیستم حفاظتی و داشتن یک حفاظت هماهنگ شده باید از رله نزدیک‌تر به خطا جریان بزرگ‌تری عبور کند. برای نیل به این هدف منبع نزدیک‌تر به خطا باید جریان به نسبت بزرگ‌تری تزریق کند. از طرف دیگر جریان منابع اینورتری باید با هدف جلوگیری از آسیب رسیدن به سویچ‌های نیمه هادی، در حین خطا محدود گردد. بنابراین استراتژی کنترلی پیشنهادی در این مقاله به گونه‌ای است که با استفاده از حلقه‌ی امپدانس مجازی یک محدودسازی وفقی انجام گردد تا علاوه بر جلوگیری از آسیب رسیدن به منابع، شرایط عبور جریان بزرگ‌تر از رله‌های نزدیک به خطا نیز فراهم گردد. در استراتژی پیشنهادی با استفاده از امپدانس مجازی دامنه‌ی ولتاژ مرجع کاهش می‌یابد و از این که کنترل‌کننده ولتاژ جریان مرجع بزرگی ایجاد کند جلوگیری می‌شود. مزیت استفاده از امپدانس مجازی برای محدودسازی نسبت به روش‌های متداول محدودسازی، بسته ماندن حلقه‌ی کنترل ولتاژ در حین خطا و عدم تغییر در سیگنال جریان خروجی منبع است. کنترل‌کننده پیشنهادی برای تنظیم امپدانس مجازی متغیر در شکل (۴) نشان داده شده است. برای رسیدن به هدف مطرح شده در فوق، KV به صورت زیر بیان می‌شود:





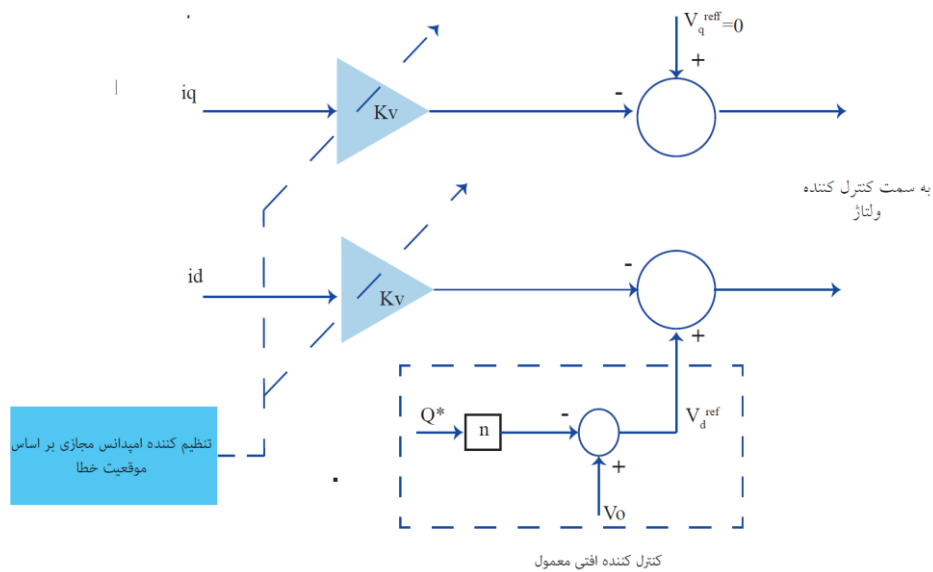
(الف) قبل از عملکرد CB1 (آرایش حلقوی)



(ب) بعد از عملکرد CB1 (آرایش شعاعی)

شکل (۳): جهت جریان خطا در ریز شبکه مورد مطالعه

Figure (3): Error flow direction in the studied microgrid, (a) Before CB1 operation (loop arrangement), (b) After CB1 operation (radial arrangement)



شکل (۴): ساختار کنترل حلقه امپدانس مجازی

Figure (4): Virtual impedance loop control structure

$$\begin{cases} K_v = \frac{\Delta v}{\Delta I} \\ \Delta v = v_{ref,i} - v_{fault,i} \\ \Delta I = I_{tr,i} - I_{n,i} \end{cases} \quad (3)$$

در این رابطه  $v_{ref,i}$  و  $v_{fault,i}$  به ترتیب مرجع ولتاژ خروجی منبع  $i$  ام و ولتاژ ترمینال منبع  $i$  ام در شرایط خطا هستند. جریان نامی منبع  $i$  ام و  $I_{tr,i}$  جریان مجاز منبع  $i$  ام است که در این مقاله  $3I_n$  در نظر گرفته می‌شود. هنگامی که یک خطا در ریزشبه رخ می‌دهد جریان خروجی VSC نسبت به شرایط قبل از خطا تغییر می‌کند. همان‌طور که از رابطه (۲) مشاهده می‌شود، در خلال کار عادی سیستم،  $K_v=0$  است. اما اگر خطایی در ریزشبه رخ دهد، استراتژی پیشنهادی فعال شده و  $K_v$  به گونه‌ای تنظیم می‌شود که جریان خروجی هر منبع حداکثر تا حد مجاز محدود شود. علاوه بر این، محدودسازی انجام شده به صورت وقتی و متناسب با موقعیت منبع نسبت به محل خطا باشد تا هماهنگی حفاظتی برقرار باشد. بنابراین در شرایط خطا با توجه به اینکه رله‌ها دارای تنظیمات یکسانی هستند، از رله نزدیک‌تر به خطا جریان بیشتری عبور می‌کند.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی صحت عملکرد روش پیشنهادی در این بخش ریزشبه‌ی جزیره‌ای نشان داده شده در شکل (۱) مورد شبیه‌سازی قرار می‌گیرد. اطلاعات ریزشبه‌ی در جدول (۱) آورده شده است. شرایط خطا برای موارد مختلف در خط ۱ و در زمان ۴ ثانیه با مقاومت خطا ۰/۳۵ اهم رخ می‌دهد. در این شبیه‌سازی شکل موج جریان خروجی منابع، جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی و منحنی مشخصه رله‌ها مورد بررسی قرار خواهند گرفت. دلیل ارزیابی شکل موج‌های جریان منابع نشان دادن عملکرد مناسب این شیوه برای محدودسازی وقتی است. هم‌چنین ارزیابی جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی و منحنی مشخصه رله‌ها بررسی هماهنگی حفاظتی بین رله‌های موجود در ریزشبه است.

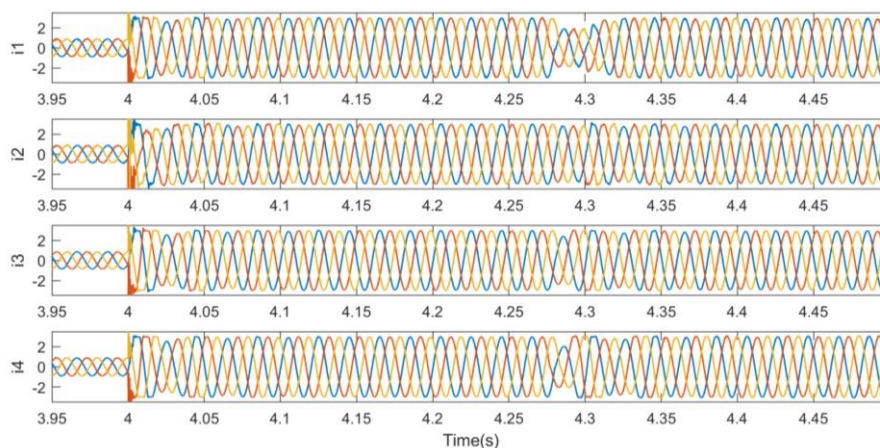
Table (1): Parameters of the system under study

جدول (۱): پارامترهای سیستم تحت مطالعه

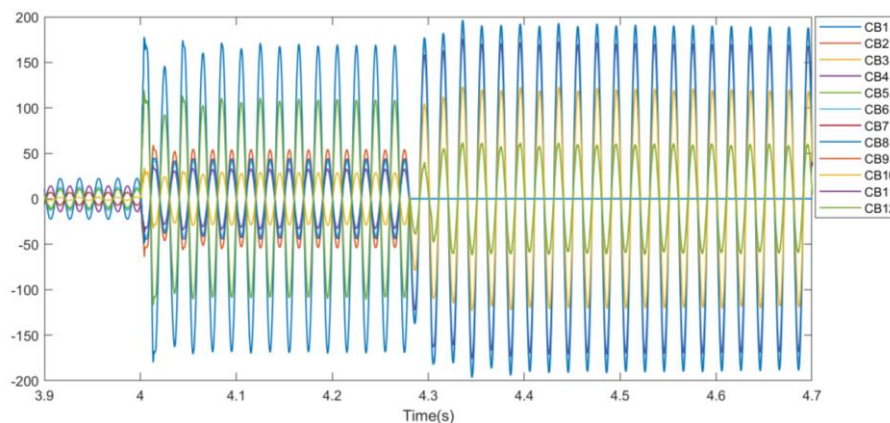
DER4	DER3	DER2	DER1	پارامتر
۱۵	۱۲	۳	۱۰	توان نامی (Kw)
۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	ولتاژ نامی (v)
۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	۸۰۰	ولتاژ لینک DC
۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	فرکانس (Hz)
۵	۵	۵	۵	فرکانس سویچینگ (KHz)
۳	۲/۴	۰/۶	۲	سلف فیلتر (mH)
۱۰	۱۲/۵	۵۰	۱۵	خازن فیلتر (μf)
۱/۳۳×۴-۱۰	۱/۶۶×۴-۱۰	۶/۶۷×۴-۱۰	۲×۴-۱۰	ضریب اکتیو توان اکتیو
۱۶/۲×۳-۱۰	۷/۲×۳-۱۰	۱۰/۸۳×۳-۱۰	۳/۲۵×۳-۱۰	ضریب اکتیو توان راکتیو

#### ۱-۵- شرایط عملکرد بدون اعمال روش پیشنهادی

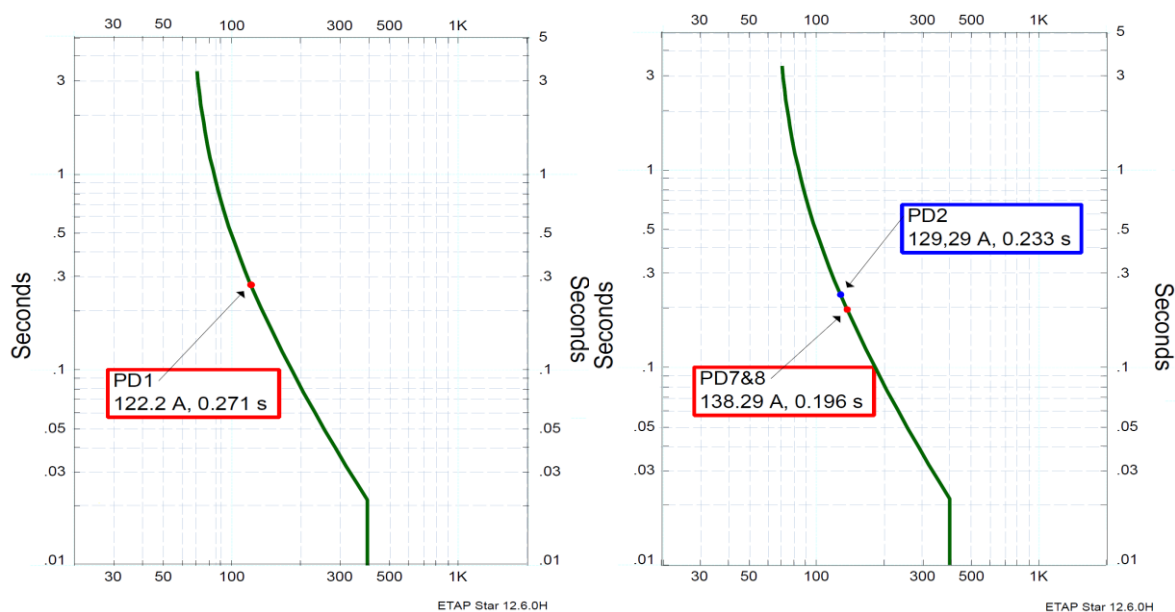
در این قسمت برای نشان دادن مشکل حفاظتی از روش محدودسازی معمول حد قفل شده استفاده می‌شود. شکل (۵) جریان خروجی منابع را بر حسب پریونیت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان خروجی منابع در ۳ برابر جریان نامی خود در شرایط خطا محدود شده‌اند. شکل (۶) جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی توزیع شده در ریزشبه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حین خطا مقدار جریان عبوری از رله ۱ برابر ۱۲۲/۲ آمپر است که بیشتر از جریان نامی آن است و طبق منحنی شکل (۷) در زمان ۰/۲۷۱ ثانیه بعد از وقوع خطا عمل می‌کند. بعد از عملکرد رله ۱، با توجه به ساختار ریزشبه انتظار می‌رود رله ۲ به عنوان رله‌ی نزدیک‌تر به خطا عمل کند.



شکل (۵): جریان خروجی منابع در حالت بدون اعمال روش پیشنهادی  
Figure (5): Output stream of resources in the state without applying the proposed method



شکل (۶): جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در حالت بدون اعمال روش پیشنهادی  
Figure (6): The current passing through the protection equipment in the state without applying the proposed method



(ب) منحنی رله‌های ۲ و ۷ و ۸ بعد از عملکرد رله ۱

(الف) منحنی رله ۱ در زمان وقوع خطا

شکل (۷): منحنی رله‌های حفاظتی در حالت خطای متقارن و بدون اعمال روش پیشنهادی

Figure (7): Curve of protection relays in symmetric error mode without applying the proposed method, (a) Relay curve 1 at the time of error, (b) Curves of relays 2, 7 and 8 after relay operation 1

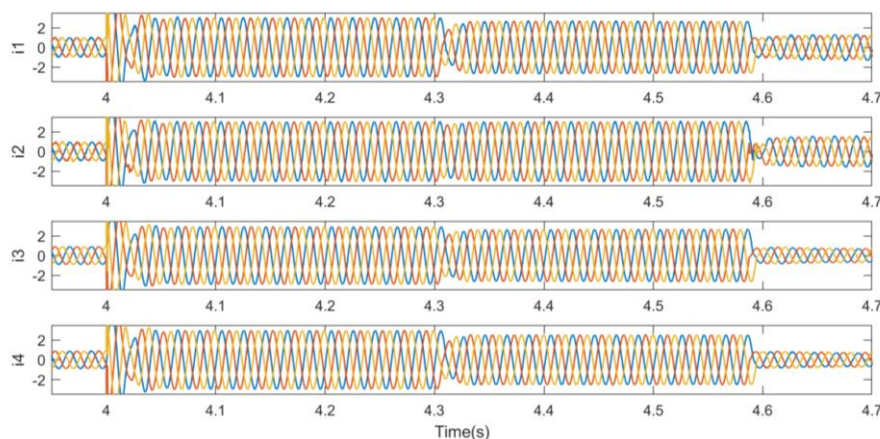
اما با توجه به شکل (۶) و مقایسه منحنی‌های (۷-الف) و (۷-ب) مشاهده می‌شود که از رله‌های ۷ و ۸ جریان بیشتری عبور می‌کند و باعث عملکرد اشتباه سیستم حفاظتی در زمان ۰/۱۹۶ ثانیه بعد از عملکرد رله‌ی ۱ می‌شود.

### ۵-۲- عملکرد سیستم حفاظتی با اعمال روش پیشنهادی

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی در شرایط اعمال روش پیشنهادی برای خطای متقارن مورد بررسی قرار گرفته است. جریان فازهای خروجی منابع در این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، محدودسازی جریان خطا هر منبع متناسب با فاصله منبع تا محل خطا انجام شده است. در این حالت جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در حین خطا مقدار جریان عبوری از رله ۱۱۹/۱ آمپر است که بزرگ‌تر از جریان نامی است و باعث قطع در زمان ۰/۲۹۱ ثانیه به درستی می‌شود. بعد از قطع شدن کلید ۱، بیشترین جریان از کلید ۲ عبور می‌کند که مطابق منحنی (۱۰) در زمان ۰/۲۷۱ ثانیه بعد از عملکرد رله ۱ به عنوان رله نزدیک‌تر به خطا درست عمل می‌کند. بنابراین با توجه به شکل‌های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) مشاهده می‌شود که هماهنگی حفاظتی از طریق اعمال روش پیشنهادی تحقق می‌یابد و کلید ۱ و ۲ به درستی به عنوان تجهیزات نزدیک به خطا عمل خواهند کرد.

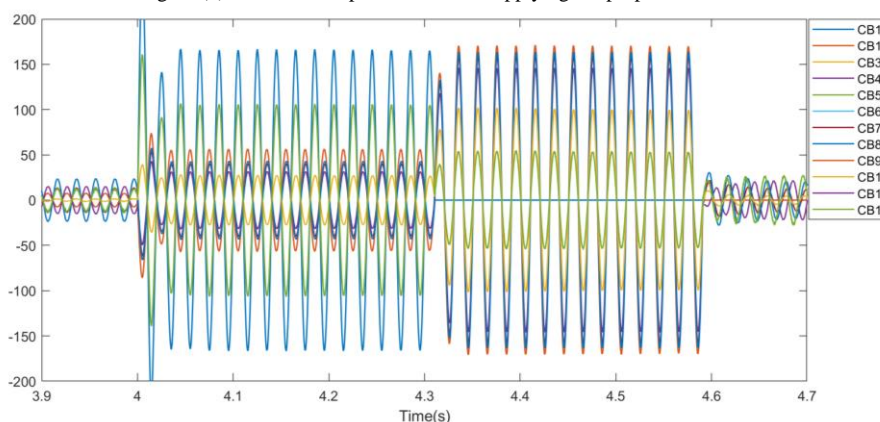
### ۵-۳- عملکرد روش پیشنهادی در برابر خطاهای تک‌فاز به زمین

در این قسمت نتایج شبیه‌سازی برای خطاهای تک‌فاز به زمین مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. شکل (۱۱) جریان خروجی هر یک از منابع را در حالت خطای نامتقارن تک‌فاز به زمین نشان می‌دهد.



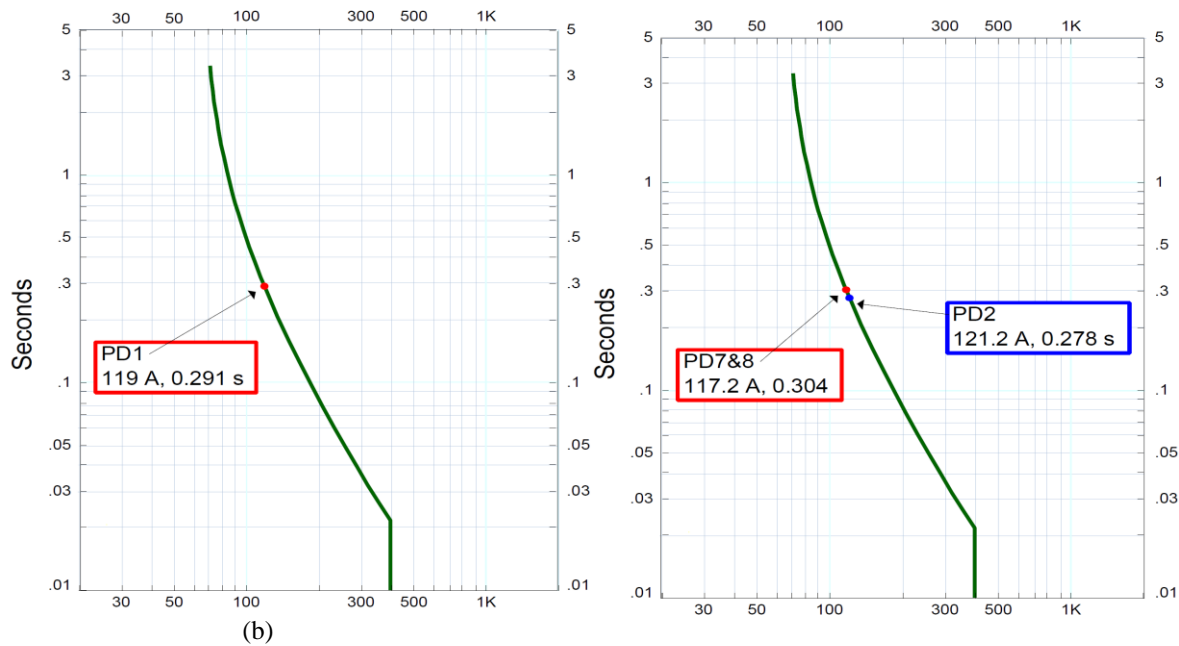
شکل (۸): جریان خروجی منابع در حالت اعمال روش پیشنهادی

Figure (8): Resource output stream when applying the proposed method



شکل (۹): جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در حالت اعمال روش پیشنهادی

Figure (9): Current passing through the protection equipment in the case of applying the proposed method

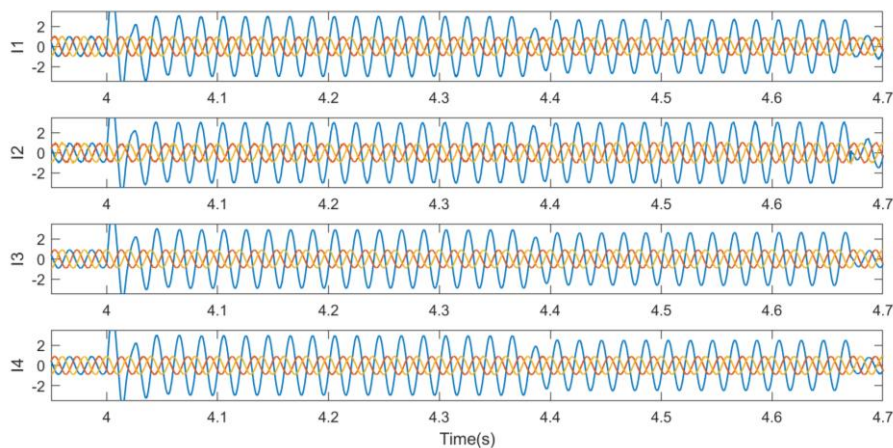


(ب) منحنی رله ۲ و ۷ و ۸ بعد از عملکرد رله ۱

(الف) منحنی رله ۱ در زمان وقوع خطا

شکل (۱۰): منحنی رله‌های حفاظتی در حالت خطای متقارن و اعمال روش پیشنهادی

Figure (10): Curve of protection relays in symmetric error mode and application of the proposed method, (a) Relay curve 1 at the time of error, (b) Curves of relays 2, 7 and 8 after relay operation 1

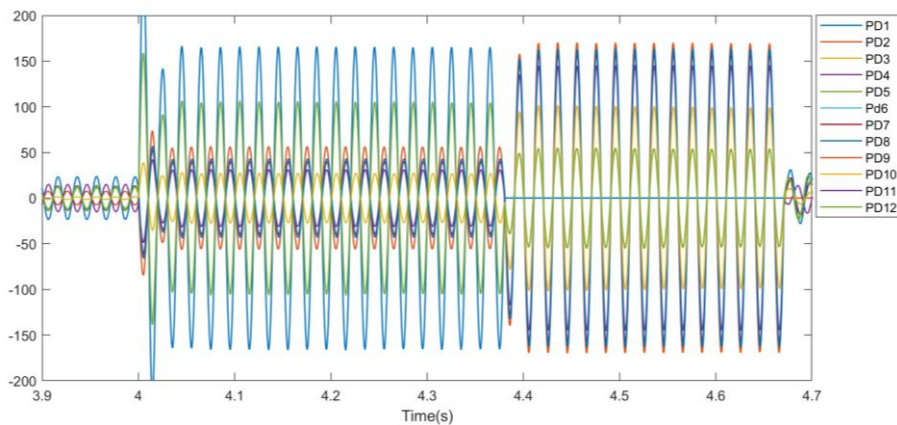


شکل (۱۱): جریان خروجی منابع در حالت خطای نامتقارن تک‌فاز به زمین و اعمال روش پیشنهادی

Figure (11): The output current of the sources in the case of an unbalanced single-phase fault to ground and the application of the proposed method

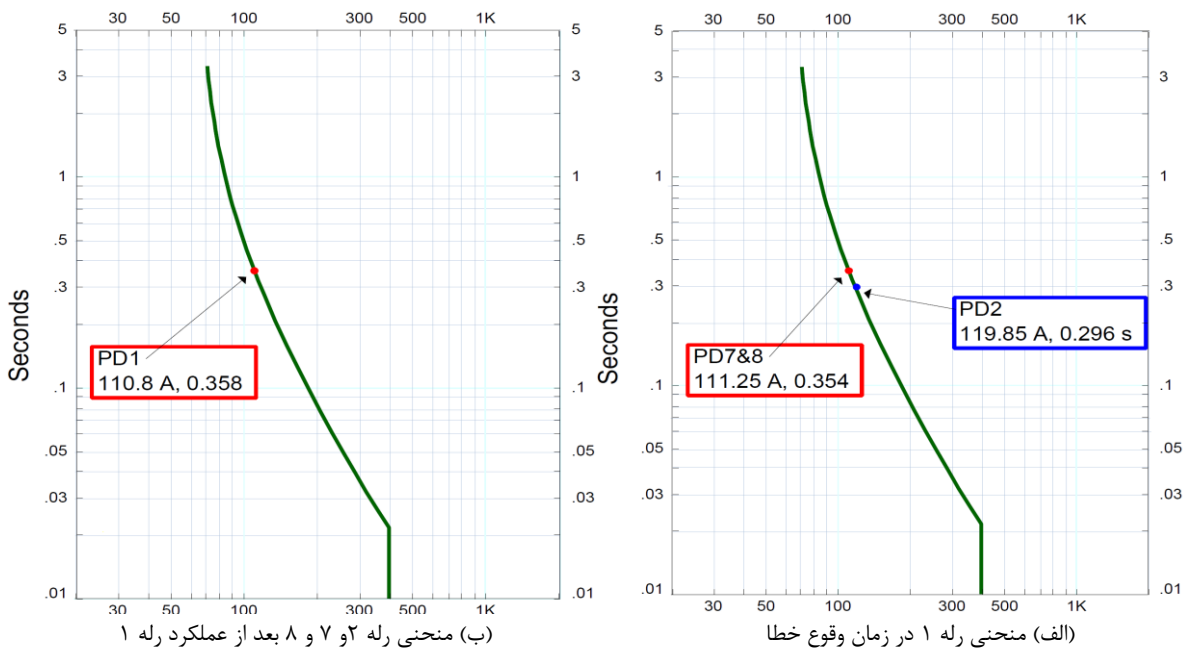
همان‌طور که مشخص است روش محدودسازی وقتی پیشنهادی در برابر این نوع خطا نیز به‌درستی عمل می‌کند و از آنجایی که روش پیشنهادی در قاب مرجع فاز پیاده‌سازی شده است، کنترل مستقل هر فاز در این قاب امکان جبران همزمان مولفه-های توالی مثبت، منفی و صفر را فراهم می‌کند. از طرف دیگر مطابق شکل (۱۲) مشخص است که در زمان وقوع خطای تک‌فاز به زمین مقدار جریان عبوری از رله‌ی ۱ برابر  $110/8$  آمپر است که طبق منحنی (۱۳) در زمان  $0/358$  ثانیه بعد از وقوع خطا به‌عنوان نزدیک‌ترین رله به خطا به‌درستی عمل می‌کند. بعد از عملکرد رله ۱ بیشترین جریان از رله ۲ عبور می‌کند که در زمان  $0/296$  ثانیه بعد از عملکرد رله ۱ به‌درستی عمل می‌کند و هماهنگی حفاظتی برقرار می‌شود.





شکل (۱۲): جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در حالت خطای تک‌فاز به زمین و اعمال روش پیشنهادی

Figure (12): Current passing through protective equipment in single-phase fault mode to ground and applying the proposed method

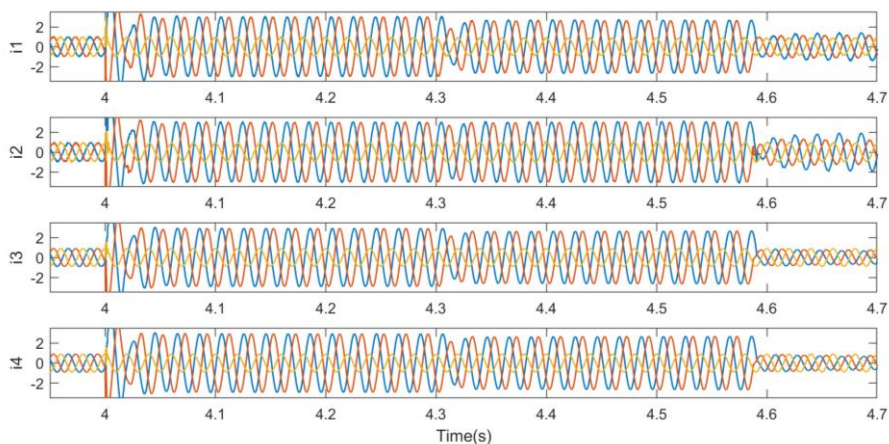


شکل (۱۳): منحنی رله‌های حفاظتی در حالت خطای تک‌فاز و اعمال روش پیشنهادی

Figure (13): Curve of protection relays in single-phase fault mode and application of the proposed method, (a) Relay curve 1 at the time of error, (b) Curves of relays 2, 7 and 8 after relay operation 1

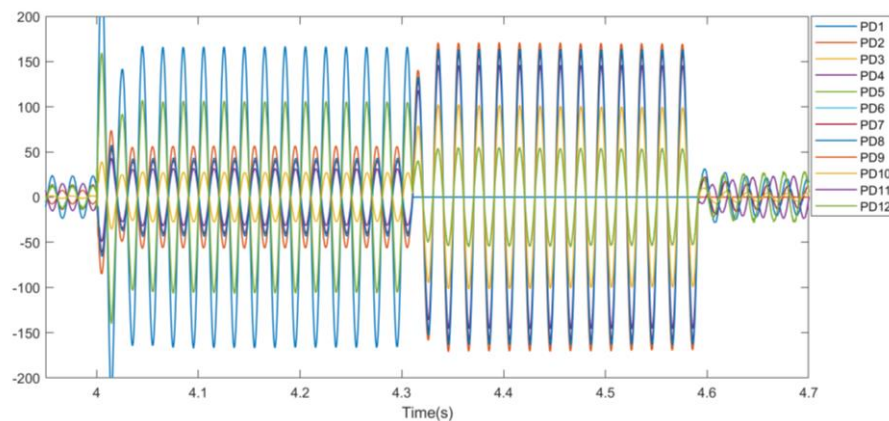
#### ۴-۵- عملکرد روش پیشنهادی در برابر خطاهای دوفاز به زمین

شکل‌های (۱۴) جریان خروجی هر یک از منابع را در حالت خطای نامتقارن دوفاز به زمین نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است روش محدودسازی وقتی پیشنهادی در این حالت نیز به درستی عمل می‌کند و از آنجایی که روش پیشنهادی در قاب مرجع فاز پیاده‌سازی شده است، کنترل مستقل هر فاز در این قاب امکان جبران همزمان مولفه‌های توالی مثبت، منفی و صفر را فراهم می‌کند. از طرف دیگر مطابق شکل (۱۵) مشخص است که در زمان وقوع خطای دوفاز به زمین مقدار جریان عبوری از رله‌ی ۱ برابر ۱۱۷/۳۷ آمپر است که مطابق منحنی (۱۶) در زمان ۰/۳۰۳ ثانیه بعد از وقوع خطا به‌عنوان نزدیک‌ترین رله به خطا به درستی عمل می‌کند. بعد از عملکرد رله ۱ بیشترین جریان از رله ۲ عبور می‌کند که در زمان ۰/۲۸۳ ثانیه بعد از عملکرد رله ۱ به درستی عمل می‌کند و هماهنگی حفاظتی در این حالت نیز با اعمال روش پیشنهادی برقرار می‌شود.



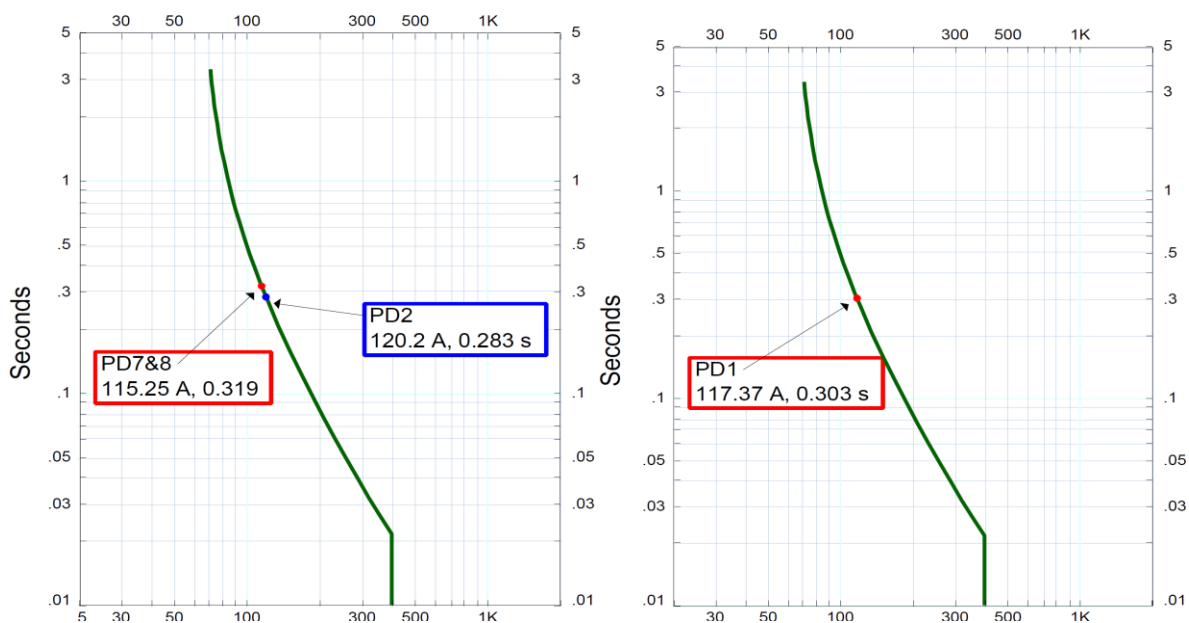
شکل (۱۴): جریان خروجی منابع در حالت خطای نامتوازن دو فاز به زمین و اعمال روش پیشنهادی

Figure (14): Source output current in two-phase asymmetric fault mode to ground and apply the proposed method



شکل (۱۵): جریان عبوری از تجهیزات حفاظتی در حالت خطای دو فاز به زمین و اعمال روش پیشنهادی

Figure (15): Current passing through protection equipment in two-phase fault mode to ground and applying the proposed method



(ب) منحنی رله ۲ و ۷ و ۸ بعد از عملکرد رله ۱

(الف) منحنی رله ۱ در زمان وقوع خطا

شکل (۱۶): منحنی رله‌های حفاظتی در حالت خطای دو فاز و اعمال روش پیشنهادی

Figure (16): Curve of protection relays in two-phase fault mode and application of the proposed method, (a) Relay curve 1 at the time of error, (b) Curves of relays 2, 7 and 8 after relay operation 1

## ۶- نتیجه‌گیری

مزایای فنی و زیست محیطی ریزشبه‌های حلقوی منجر به انجام تحقیقات زیادی در زمینه استفاده بیشتر از ظرفیت‌ها برای برطرف کردن چالش‌های فنی این فناوری جدید و در حال پیشرفت شده است. با توجه به اهمیت وقوع خطا در ریزشبه‌های مبتنی بر اینورتر با آرایش حلقوی، در این مقاله یک روش حفاظتی بر اساس کنترل منابع اینورتری پیشنهاد شد. تجهیزات حفاظتی مورد استفاده در این مقاله از نوع رله‌های اضافه جریان ساده است که دارای تنظیمات یکسانی هستند. بنابراین برای برقراری هماهنگی حفاظتی باید از رله‌های نزدیک‌تر به خطا جریان بزرگتری عبور کند. استراتژی پیشنهادی در این مقاله بر اساس کنترل اینورتر منابع است. برای رسیدن به این هدف از اصلاح محدودکننده‌های موجود استفاده شده است. در واقع با اصلاح حلقه‌ی امیداندس مجازی یک محدودسازی وفقی جریان اعمال می‌گردد به طوری که سهم جریان خطای هر منبع با توجه به موقعیت هر منبع نسبت به محل خطا محدود می‌گردد و باعث عبور جریان بیشتر از رله‌های نزدیک به خطا می‌گردد. عملکرد صحیح روش پیشنهادی در شرایط مختلف خطا برای یک ریزشبه‌حلقوی با توجه نتایج شبیه‌سازی اثبات شده است. این نتایج نشان می‌دهد استفاده از محدودسازی وفقی باعث برقراری هماهنگی حفاظتی در ریزشبه‌های حلقوی بدون نیاز به تجهیزات حفاظتی اضافی و تغییر ساختار حفاظتی می‌شود. با توجه به طرح‌های موجود برای ریزشبه‌های اینورتری جزیره‌ای و استفاده از آرایش حلقوی برای محقق شدن مزایای ریزشبه‌ها، بررسی تاثیر سیستم کنترل بر سیستم حفاظت و اصلاح سیستم کنترل به منظور پاک‌سازی خطا می‌تواند مورد توجه بیشتر قرار بگیرد. به‌عنوان مثال بررسی امکان تغییر ضرایب مشخصه افتی برای منابع مختلف در طی خطا و به صورت وفقی نیز می‌تواند در ادامه مد نظر قرار بگیرد.

## References

## مراجع

- [1] M. Salari, F. Haghghatdar-Fesharaki, "Optimal placement and sizing of distributed generations and capacitors for reliability improvement and power loss minimization in distribution networks", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 83-94, Autumn 2020..
- [2] G. Shahgholian, Z. Azimi, "Analysis and design of a DSTATCOM based on sliding mode control strategy for improvement of voltage sag in distribution systems", *Electronics*, vol. 5, no. 3, pp. 1-12, 2016 (doi: 10.3390/electronics5030041).
- [3] W. Huang, N. Zhang, J. Yang, Y. Wang, C. Kang, "Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 1452-1464, March 2019 (doi: 10.1109/TSG.2017.2767860).
- [4] G. Shahgholian, "Analysis and simulation of dynamic performance for DFIG-based wind farm connected to a distribution system", *Energy Equipment and Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 117-130, June 2018 (doi: 10.220-59/EES.2018.31531).
- [5] S. Yang, P. Wang, Y. Tang, L. Zhang, "Explicit phase lead filter design in repetitive control for voltage harmonic mitigation of VSI-based islanded microgrids", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 817-826, Jan. 2017 (doi: 10.1109/TIE.2016.2570199).
- [6] J. Faiz, G. Shahgholian, M. Ehsan, "Stability analysis and simulation of a single-phase voltage source UPS inverter with two-stage cascade output filter", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 18, no. 1, pp. 29-49, Jan. 2008 (doi: 10.1002/etep.160).
- [7] R. Kolluri, I. Mareels, T. Alpcan, M. Brazil, J. Hoog, D. Thomas, "Power sharing in angle droop controlled microgrids", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 6, pp. 4743-4751, Nov. 2017 (doi: 10.1109/TPW-RS.2017.2672569).
- [8] B. Keyvani-Boroujeni, G. Shahgholian, B. Fani, "A distributed secondary control approach for inverter-dominated microgrids with application to avoiding bifurcation-triggered instabilities", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3361-3371, Dec. 2020 (doi: 10.1109/JESTPE.2020.2974756).
- [9] B. Fani, M. Dadkhah, A. Karami, "Adaptive protection coordination scheme against the staircase fault current waveforms in PV-dominated distribution systems", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol.12, no. 9, May 2018 (doi: 10.1049/iet-gtd.2017.0586).
- [10] B. Khajeh-Shalaly, G. Shahgholian, "A multi-slope sliding-mode control approach for single-phase inverters under different loads", *Electronics*, vol. 5, no. 4, Oct. 2016 (doi: .org/10.3390/electronics5040068).



- [11] S. D. Kermany, M. Joorabian, S. Deilami, M. A. S. Masoum, "Hybrid islanding detection in microgrid with multiple connection points to smart grids using fuzzy-neural network", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2640-2651, July 2017 (doi: 10.1109/TPWRS.2016.2617344).
- [12] H. Pan, Q. Teng, D. Wu, "MESO-based robustness voltage sliding mode control for AC islanded microgrid", *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 83-93, June 2020 (doi: 10.23919/CJ-EE.2020.000013).
- [13] D. E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A. H. Etemadi, C. A. Canizares, R. Iravani, M. Kazerani, A. H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, G. A. Jiménez-Estévez, N. D. Hatziargyriou, "Trends in microgrid control", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 5, No. 4, pp. 1905-1919, July 2014 (doi: 10.1109/TSG.2013.2295514).
- [14] S. Zamanian, S. Sadi, R. Ghaffarpour, A. Mahdavian, "Inverter-based microgrid dynamic stability analysis considering inventory of dynamic and static load models", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 44, pp. 91-109, Winter 2021 (in Persian).
- [15] Y. C. C. Wong, C. S. Lim, M. D. Rotaru, A. Cruden, X. Kong, "Consensus virtual output impedance control based on the novel droop equivalent impedance concept for a multi-bus radial microgrid", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 35, no. 2, pp. 1078-1087, June 2020 (doi: 10.1109/TEC.2020.2972002).
- [16] L. Che, X. Zhang, M. Shahidehpour, A. Alabdulwahab, Y. Al-Turki, "Optimal planning of loop-based microgrid topology", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1771-1781, July 2017 (doi: 10.1109/TSG.2015.2508058).
- [17] L. Xindong, M. Shahidehpour, "Protection scheme for loop-based microgrid", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 8, No. 3, pp. 1340-1349, May 2017 (doi: 10.1109/TSG.2016.2626791).
- [18] S. Gorji, S. Zamanian, M. Moazzami, "Techno-economic and environmental base approach for optimal energy management of microgrids using crow search algorithm", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 49-68, Autumn 2020 (in Persian).
- [19] F. Mumtaz, I. S. Bayram, "Planning, operation, and protection of microgrids: An overview", *Energy Procedia*, vol. 107, pp. 94-100, Feb. 2017 (doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.137).
- [20] P. T. Manditereza, R. C. Bansal, "Protection of microgrids using voltage-based power differential and sensitivity analysis", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 118, Article Number: 105756, June 2020 (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105756).
- [21] M. A. Redfern, H. Al-Nasser, "Protection of micro-grids dominated by distributed generation using solid state converters", *Proceeding of the IEEE/DPSP*, pp. 670-674, Glasgow, UK, Mar. 2008 (doi: 10.1049/cp:20080119).
- [22] N. Villamagna, P. A. Crossley, "A CT saturation detection algorithm using symmetrical components for current differential protection", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 1, pp. 38-45, Jan. 2006 (doi: 10.1109/TPWRD.2005.848654).
- [23] P. A. Venikar, M. S. Ballal, B. S. Umre, H. M. Suryawanshi, "Symmetrical components based advanced scheme for detection of incipient inter-turn fault in transformer", *Proceeding of the IEEE/CATCON*, pp. 127-132, Bangalore, India, Dec. 2015 (doi: 10.1109/CATCON.2015.7449521).
- [24] H. Nikkhajoei, R. H. Lasseter, "Microgrid fault protection based on symmetrical and differential current components", *Public Interest Energy Research, California Energy Commission*, Dec. 2006.
- [25] S. Kar, S.R. Samantaray, "Time-frequency transform-based differential scheme for microgrid protection", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 8, no. 2, pp. 310-320, Feb. 2014 (doi: 10.1049/iet-gtd.2013.0180).
- [26] S. R. Samantaray, G. Joos, I. Kamwa, "Differential energy based microgrid protection against fault conditions", *Proceeding of the IEEE/ ISGT*, Washington, DC, USA, Jan. 2012 (doi: 10.1109/ISGT.2012.61-75532).
- [27] W. Huang, T. Nengling, X. Zheng, C. Fan, X. Yang, B. J. Kirby, "An impedance protection scheme for feeders of active distribution networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1591-1602, Aug. 2014 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2322866).
- [28] E. Casagrande, W. L. Woon, H. H. Zeineldin, D. Svetinovic, "A differential sequence component protection scheme for microgrids with inverter-based distributed generators", *IEEE Trans. Smart grid*, vol. 5, no. 1, pp. 29-37, Jan. 2014 (doi: 10.1109/TSG.2013.2251017).
- [29] N. Yadav, N. R. Tummuru, "A real-time resistance based fault detection technique for zonal type low-voltage dc microgrid applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 6815-6824, Nov.-Dec. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.3017564).
- [30] R. Bhargav, B. R. Bhalja, C. P. Gupta, "Novel fault detection and localization algorithm for low-voltage dc microgrid", *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 7, pp. 4498-4511, July 2020 (doi: 10.1109/TII.2019.2942426).

- [31] W. Huang, T. Nengling, X. Zheng, C. Fan, X. Yang, B. J. Kirby, "An impedance protection scheme for feeders of active distribution networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1591-1602, Aug. 2014 (doi: 10.1109/TPWRD.2014.2322866).
- [32] S. Voima, K. Kauhaniemi, "Using Distance protection in smart grid environment", *Proceeding of the IEEE/ISGT, Istanbul, Turkey*, pp. 1-6, Oct. 2014 (doi: 10.1109/ISGTEurope.2014.7028904).
- [33] H. F. Habib, C. R. Lashway, O. A. Mohammed, "A review of communication failure impacts on adaptive microgrid protection schemes and the use of energy storage as a contingency", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 54, no. 2, pp. 1194-1207, March-April 2018 (doi: 10.1109/TIA.2017.2776858).
- [34] O. V. Gnana Swathika, S. Hemamalini, "Prims-aided dijkstra algorithm for adaptive protection in microgrids", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 4, pp. 1279-1286, Dec. 2016 (doi: 10.1109/JESTPE.2016.2581986).
- [35] A. Oudalav, A. Fidigatti, "Adaptive network protection in microgrids", *International Journal of Distributed Energy Resources*, vol. 5, pp. 201-225, 2009.
- [36] T. S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, "A microgrid protection system with central protection unit and extensive communication", *Proceeding of the IEEE/EEELC*, pp. 1-4, Rome, Italy, May 2011 (doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874777).
- [37] S. M. Brahma, A. A. Girgis, "Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 56-63, Jan. 2004 (doi: 10.1109/TPWRD.2003.820204).
- [38] Y. Han, X. Hu, D. Zhang, "Study of adaptive fault current algorithm for microgrid dominated by inverter based distributed generators", *Proceeding of the IEEE/PEDG*, pp. 852-854, Hefei, China, June 2010 (doi: 10.1109/PEDG.2010.5545889).
- [39] H. Lin, K. Sun, Z.H. Tan, C. Liu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, "Adaptive protection combined with machine learning for microgrids", *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 13, no. 6, pp. 770-779, 2019 (doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6230).
- [40] M. S. Rahman, T. Orchi, S. Saha, M. E. Haque, "Cooperative multiagent based distributed power sharing strategy in low-voltage microgrids", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 3285-3296, July-Aug. 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2986449).
- [41] H. S. V. S. K. Nunna, A. Sesetti, A. K. Rathore, S. Doolla, "Multiagent-based energy trading platform for energy storage systems in distribution systems with interconnected microgrids", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 3207-3217, May-June 2020 (doi: 10.1109/TIA.2020.2979782).
- [42] A. Zidan, E. F. El-Saadany, "A cooperative multiagent framework for self-healing mechanisms in distribution systems", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1525-1539, Sept. 2012 (doi: 10.1109/TSG.2012.2198247).
- [43] E. Abbaspour, B. Fani, E. Heydarian-Forushani, "A bi-level multi agent based protection scheme for distribution networks with distributed generation", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 112, pp. 209-220, Nov. 2019 (doi: 10.1016/j.ijepes.2019.05.001).
- [44] B. Fani, H. Bisheh, "Local penetration-free control approach against numerous changes in PV generation level in MAS-based protection schemes", *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 7, pp. 1197-1204, 2019 (doi: 10.1049/iet-rpg.2018.6083).
- [45] B. Fani, E. Abbaspour, A. Karami-Horestani, "A fault-clearing algorithm supporting the MAS-based protection schemes", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 103, pp. 257-266, Dec. 2018 (doi: 10.1016/j.ijepes.2018.06.001).
- [46] M. H. Cintuglu, T. Ma, O. A. Mohammed, "Protection of autonomous microgrids using agent-based distributed communication", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 351-360, Feb. 2017 (doi: 10.1109/TPWRD.2016.2551368).
- [47] Z. Liu, C. Su, H. K. Høidalen, Z. Chen, "A multiagent system-based protection and control scheme for distribution system with distributed-generation integration", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 32, no. 1, pp. 536-545, Feb. 2017 (doi: 10.1109/TPWRD.2016.2585579).
- [48] W. K. A. Najy, H. H. Zeineldin, W. L. Woon, "Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677, April 2013 (doi: 10.1109/TIE.2012.2192893).
- [49] B. Nathaniel, G. Timothy, "Comparison of current limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3786-3797, July 2014 (doi: 10.1109/TPEL.2013.2279162).
- [50] I. Sadeghkhani, M. E. Hamedani-Golshan, J. M. Guerrero, A. Mehrizi-Sani, "A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 8, No. 5, pp. 2318-2148, Sept. 2017 (doi: 10.1109/TSG.2016.2517201).

- <sup>۱</sup> Distributed generation
- <sup>۲</sup> Greenhouse gases
- <sup>۳</sup> Electric market
- <sup>۴</sup> Renewable energy
- <sup>۵</sup> Voltage source inverter
- <sup>۶</sup> Distribution systems
- <sup>۷</sup> Microgrid
- <sup>۸</sup> Island mode
- <sup>۹</sup> Radial structure
- <sup>۱۰</sup> Loop structure
- <sup>۱۱</sup> Adaptive protection
- <sup>۱۲</sup> Support vector machine
- <sup>۱۳</sup> Multi-agent systems
- <sup>۱۴</sup> Self-healing
- <sup>۱۵</sup> Adaptive virtual impedance