

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۴

طراحی و ارزیابی یک روش تشخیص جزیره‌ای ترکیبی برای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر

محمد رضا گلشن‌آرا^۱، حسین هژبری^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

golshan0057@gmail.com

^۲ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

hhojabri@uk.ac.ir

چکیده: پیشرفت‌های اخیر در فناوری منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدید ساختار در بازار برق باعث افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر شده است. استفاده از این منابع انرژی مزایای زیادی از قبیل افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان و پیک‌سایی را به همراه دارد. اما یکی از اصلی‌ترین معایب این منابع انرژی، تشخیص حالت جزیره‌ای است. حالت جزیره‌ای زمانی اتفاق می‌افتد که شبکه اصلی به هر دلیلی قطع شود و آن قسمت از شبکه که شامل منابع تولید پراکنده است، به صورت مستقل از شبکه اصلی، بارهای محلی را تأمین کند. رخداد جزیره ناخواسته باعث بروز مسائلی همچون تداخل حفاظتی و آسیب دیدگی تجهیزات مصرف‌کننده می‌شود؛ در نتیجه تشخیص بموقع این حالت و قطع منابع تولید پراکنده برای جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات ضروری است. در این مقاله یک روش ترکیبی جدید برای تشخیص حالت جزیره‌ای منابع تولید پراکنده آورده شده است. به گونه‌ای که چنانچه در مرحله اول نرخ تغییرات فرکانس از حد آستانه فراتر رود، در مرحله دوم، روش تغییر توان اکتیو بهبودیافته فعال می‌شود. سپس اگر با تغییر مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده، دامنه ولتاژ تغییر کرد، رخداد جزیره تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink پیاده‌سازی و شبیه‌سازی شده و تحت شرایط مختلف از قبیل کلیدزنی بار، راه‌اندازی موتور، حالت چند DG، کمبود و بیشبود ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده کارایی روش پیشنهادی را در تشخیص جزیره تحت این شرایط نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، تشخیص جزیره، روش ترکیبی، نرخ تغییرات فرکانس، تغییر توان اکتیو بهبودیافته.

۱. مقدمه

تعیین می‌کنند. محدودیت‌های سخت‌افزاری، محاسبات پیچیده و تأخیر زمانی از معایب اصلی این دسته از روش‌هاست. روش‌های محلی نیز بر اساس اندازه‌گیری تغییرات کمیت‌های الکتریکی همچون ولتاژ، فرکانس، امپدانس و سایر کمیت‌های الکتریکی و مقایسه آن‌ها با مقدار آستانه رخداد جزیره را تعیین می‌کنند. از آنجا که پیاده‌سازی این دسته از روش‌ها ساده بوده و هزینه بالایی را تحمیل نمی‌کند، اکثر واحدهای تولید پراکنده برای تشخیص رخداد جزیره از آن‌ها استفاده می‌کنند. روش‌های محلی خود به سه دسته روش‌های پسیو، اکتیو و ترکیبی تقسیم‌بندی می‌شوند [۷].

روش‌های پسیو بر اساس پایش و اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی شبکه از قبیل ولتاژ، فرکانس، هارمونیک در نقطه اتصال مشترک^۲ (PCC) و مقایسه آن‌ها با مقادیر آستانه از پیش تعیین شده عمل می‌کنند. ایده اصلی این روش‌ها این است که برخی تغییرات در مقادیر اندازه‌گیری شده معمولاً در طول گذار به حالت جزیره‌ای اتفاق می‌افتد. رخداد جزیره زمانی تشخیص داده می‌شود که برخی از پارامترها، از حد مشخص از پیش تعیین شده تجاوز کنند. این دسته از روش‌های تشخیص را می‌توان هم بر روی منابع اینورتری و هم منابع غیراینورتری پیاده‌سازی کرد [۴]. از مزایای این روش‌ها می‌توان به پیاده‌سازی ساده (نیاز نداشتن به کنترل‌کننده اضافی)، سرعت تشخیص بالا، کاهش نیافتن کیفیت توان خروجی و هزینه بسیار پایین آن‌ها اشاره کرد. از مشکلات آن‌ها نیز می‌توان به ناحیه غیرقابل تشخیص^۳ (NDZ) نسبتاً بزرگ در مقایسه با روش‌های اکتیو و همچنین کاهش اثربخشی هنگام متعادل بودن توان تولیدی و مصرفی در حالت جزیره به دلیل عدم قابل ملاحظه بودن تغییرات پارامترهای الکتریکی تعیین‌کننده در صورت وقوع حالت جزیره نسبت به شرایط عملکرد عادی و متصل به شبکه اشاره کرد [۲ و ۴]. منظور از NDZ ناحیه‌ای است که روش تشخیص حالت جزیره‌ای قادر به تشخیص رخداد جزیره در آن محدوده نخواهد بود؛ به عبارت دیگر اگر پارامترهای تعیین‌کننده در این ناحیه قرار گیرند، رخداد جزیره تشخیص داده نمی‌شود. از جمله روش‌های پسیو می‌توان به حفاظت ولتاژی و فرکانسی [۸]، اندازه‌گیری نرخ تغییرات توان راکتیو [۹] و اندازه‌گیری اعوجاج هارمونیک [۱۰] اشاره کرد.

در روش‌های اکتیو از تزریق اختلال در خروجی اینورتر و اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی همچون ولتاژ، فرکانس و

امروزه با توجه به قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و بحران آلودگی هوا، استفاده از منابع تولید پراکنده به‌ویژه منابع تجدیدپذیر توسعه یافته است و دولت‌ها مشوق‌هایی برای استفاده هرچه بیشتر از این منابع انرژی قرار داده‌اند. تولید پراکنده^۱ (DG) را می‌توان به صورت یک منبع تولید مقیاس کوچک که نزدیک به بار نصب شده و قابلیت تعامل با شبکه برای تزریق توان یا خودمصرفی را دارد تعریف کرد. از مزایای استفاده از منابع تولید پراکنده می‌توان به کاهش تلفات شبکه، افزایش کیفیت توان، کاهش انتشار کربن، قیمت کمتر انرژی به دلیل نزدیکی به بار و در نهایت افزایش بهره‌وری و پایداری شبکه اشاره کرد. منابع تولید پراکنده به دو دسته منابع تولید پراکنده اینورتری و غیراینورتری دسته‌بندی می‌شوند [۱].

استفاده از منابع تولید پراکنده موجب بروز مسائلی در کنترل و حفاظت آن‌ها به‌ویژه تشخیص عملکرد جزیره‌ای شده است. جزیره زمانی رخ می‌دهد که شبکه اصلی قطع شود و تولیدات پراکنده به صورت محلی بارهای محلی را تغذیه کنند. این حالت باعث بروز مشکلاتی همچون تداخل حفاظتی به دلیل برق‌دار شدن تجهیزات از پایین دست، آسیب به تجهیزات مصرف‌کننده و خطرات مربوط به کارکنان مشغول به کار می‌شود. همچنین در صورت اتصال مجدد شبکه نیاز به سنکرون‌سازی مجدد منبع تولید پراکنده است [۲-۴]. در نتیجه تشخیص بموقع و قطع DG برای جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات ضروری است. طبق استاندارد IEEE Std.1547 حالت جزیره‌ای باید حداکثر در مدت زمان دو ثانیه تشخیص داده شده و واحد تولید پراکنده توسط رله حفاظتی قطع شود [۵].

روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای به سه دسته اصلی روش‌های کنترل از راه دور، روش‌های پردازش سیگنال و روش‌های محلی تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های کنترل از راه دور بر اساس ارتباط بین واحد تولید پراکنده، شبکه اصلی و نظارت بر تجهیزات حفاظتی عمل می‌کنند. این روش‌ها از دقت بیشتری در تشخیص جزیره نسبت به سایر روش‌ها دارند، اما به دلیل هزینه بالای سرمایه‌گذاری و پیاده‌سازی دشوار نسبت به سایر روش‌ها توجیه اقتصادی ندارند [۶ و ۷]. روش‌های پردازش سیگنال بر اساس استخراج ویژگی‌های مورد نظر از شکل موج‌های ولتاژ و جریان، و طبقه‌بندی و تجزیه و تحلیل آن‌ها رخداد جزیره را

مورد استفاده قرار می‌گیرد تا رخداد جزیره تشخیص داده شود. در این مرحله چنانچه با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده، ولتاژ PCC از مقدار آستانه کمتر شود، رله منبع تولید پراکنده را قطع کرده و رخداد جزیره توسط روش پیشنهادی تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهاد شده علاوه بر حفظ کیفیت توان و پایداری سیستم سعی در کاهش اثرات نامطلوب سایر روش‌ها را نیز دارد. برای نمونه، با مقایسه روش پیشنهادی با روش جریان هارمونیک فرکانس بالا، اغتشاشات ناشی از جریان هارمونیک فرکانس بالا موجب افزایش تلفات در ماشین‌های الکتریکی و ترانسفورماتورها و در نهایت کاهش راندمان این تجهیزات می‌شود. همچنین در صورت وجود خازن در شبکه یا بالا بودن ضریب کیفیت بار یا وجود فیلتر فعال هارمونیک، این روش کارایی خود را از دست می‌دهد. درحالی‌که در روش پیشنهادی با کاهش مؤلفه اصلی جریان خروجی اینورتر و اندازه‌گیری ولتاژ PCC رخداد جزیره تشخیص داده می‌شود.

در ادامه مقاله در بخش دوم به بررسی سیستم مورد مطالعه و سیستم کنترلی یک واحد تولید پراکنده پرداخته شده است. در بخش سوم اساس کار روش پیشنهادی تشریح شده است. در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های وقوع جزیره، کلیدزنی بار، راه‌اندازی موتور و سایر حالات آورده شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری کلی این مقاله ارائه شده است.

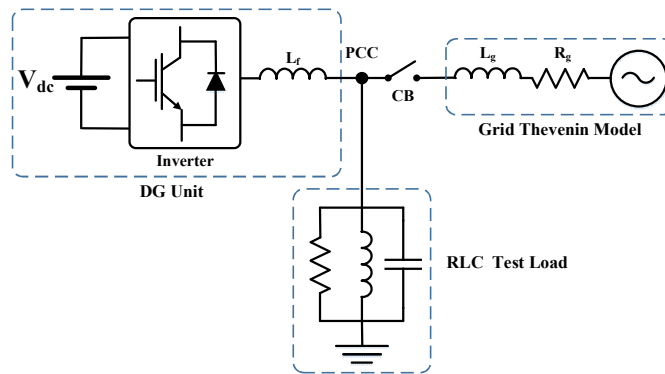
۲. سیستم مورد مطالعه

سیستم مورد مطالعه که روش پیشنهادی بر روی آن پیاده‌سازی شده، در شکل (۱) نشان داده شده است. منبع تولید پراکنده مورد مطالعه یک منبع تولید پراکنده کانورتور است که توسط یک منبع DC به همراه اینورتر سه‌فاز مدل‌سازی شده است. فیلتر سلفی L_f در خروجی اینورتر برای کاهش هارمونیک‌های ناشی از کلیدزنی استفاده شده است. این منبع توسط کلید CB به شبکه اصلی متصل می‌شود و با باز شدن کلید حالت جزیره‌ای اتفاق می‌افتد. شبکه اصلی به صورت مدار معادل تونن و با استفاده از یک منبع ولتاژ سه فاز متعادل سری با امپدانس مقاومتی سلفی R_g, L_g مدل‌سازی شده است. برای مدل‌سازی بار محلی، موازی با منبع تولید پراکنده یک بار سه‌فاز RLC موازی قرار گرفته است، به‌گونه‌ای که اگر توان تولیدی DG با توان مصرفی بار برابر باشد، هنگام باز شدن کلید اصلی شبکه، تغییر در کمیت‌های الکتریکی ناچیز بوده و تشخیص جزیره را دشوار می‌سازد [۲۰].

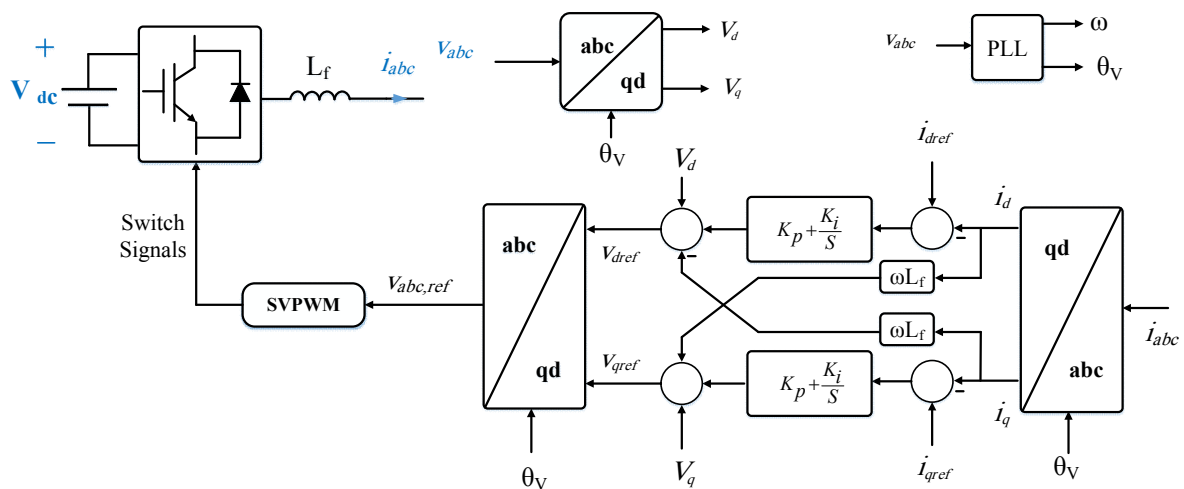
امپدانس برای آشکارسازی حالت جزیره‌ای استفاده می‌شود. چنانچه با تزریق اختلال تأثیرپذیری متغیرهای سیستم ناچیز و محدود باشد می‌توان گفت که شرایط کار عادی بوده و DG به شبکه اصلی متصل است، ولی در صورتی که تأثیرپذیری متغیرهای شبکه قابل ملاحظه باشد، منبع تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای قرار گرفته است. این نوع روش‌ها بیشتر در منابع اینورتری کاربرد دارند. این روش‌ها نسبت به روش‌های پسیو از NDZ کمتری برخوردارند. از طرف دیگر به دلیل اندازه‌گیری و تزریق اختلال به سیستم قدرت، تجهیزات مختلفی از جمله کنترل‌کننده‌ها، تجهیزات اندازه‌گیری و الکترونیک قدرت اضافی مورد نیاز است. این مسئله باعث افزایش هزینه و پیچیدگی سیستم و به‌ویژه افزایش زمان تشخیص، به دلیل نیاز به مشاهده پاسخ سیستم قدرت به اغتشاشات می‌شود. در نتیجه پایداری شبکه در این دسته از روش‌ها تا حدودی کاهش می‌یابد [۲، ۳ و ۱۱]. از روش‌های اکتیو می‌توان به اندازه‌گیری تغییرات زاویه فاز ولتاژ [۱۲]، تزریق جریان هارمونیک فرکانس بالا و اندازه‌گیری امپدانس شبکه [۱۳]، تزریق توان راکتیو و اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس [۱۴] و تغییر فرکانس ساندا اشاره کرد [۱۵ و ۱۶].

در روش‌های ترکیبی از ترکیب روش‌های پسیو و اکتیو استفاده می‌شود. هنگام تشخیص وقوع جزیره روش‌های پسیو در مرحله اول و روش‌های اکتیو در مرحله دوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. این روش‌ها دارای ناحیه NDZ بسیار کوچکی بوده و نسبت به روش‌های پسیو و اکتیو از خطای تشخیص کمتری برخوردارند. همچنین کاهش کیفیت توان خروجی DG در صورت استفاده از مرحله دوم یعنی روش‌های اکتیو اتفاق می‌افتد، زیرا اختلالات زمانی تزریق می‌شوند که به تشخیص حالت جزیره‌ای توسط روش پسیو مشکوک باشند. با این حال پیاده‌سازی این نوع روش‌ها دشوار بوده و هزینه سیستم و مدت‌زمان تشخیص را افزایش می‌دهند [۷]. تعدادی از روش‌های ترکیبی عبارت‌اند از: اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس و تغییر فرکانس حالت لغزشی [۱۷]، اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس و تزریق جریان هارمونیک فرکانس بالا [۱۸]، اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس و تغییر فرکانس ساندا [۱۹].

در مقاله حاضر یک روش ترکیبی جدید ارائه شده است، به‌گونه‌ای که اگر در مرحله اول نرخ تغییرات فرکانس از حد آستانه بیشتر شود، در مرحله دوم روش تغییر توان اکتیو بهبودیافته



شکل (۱): طرحواره ساده سیستم مورد مطالعه



شکل (۲): بلوک دیاگرام سیستم کنترلی واحد تولید پراکنده

dq متناسب‌اند. در هر لحظه دو مؤلفه جریان DG در حوزه dq با مقادیر مرجع یعنی i_{dref} و i_{qref} مقایسه شده و مقادیر جریان خطا تولیدشده به کنترل‌کننده‌های جریان منتقل می‌شود. کنترل‌کننده‌های جریان، ولتاژهای مرجع خروجی یعنی v_{dref} و v_{qref} را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کنند که خطا صفر شود. سپس این مقادیر با استفاده از عکس تبدیل پارک به حوزه abc منتقل و در نهایت به مدولاتور منتقل شده تا خروجی اینورتر را تنظیم کنند. مقادیر جریان‌های مرجع در حوزه dq به‌ترتیب از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند.

$$i_{dref} = \frac{2}{3V_d} (P_{ref}) \quad (3)$$

$$i_{dref} = -\frac{2}{3V_d} (Q_{ref}) \quad (4)$$

از آنجا که DG معمولاً در ضریب توان واحد مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد، توان راکتیو Q_{ref} و در نتیجه i_{qref} برابر صفر و توان اکتیو مطلوب P_{ref} متناسب با i_{dref} بوده و با استفاده از رابطه (۳) به شبکه تزریق می‌شود [۲۰].

۱.۲. ساختار کنترلی یک واحد تولید پراکنده

سیستم کنترلی DG در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل، سیستم کنترلی این منبع تولید پراکنده در حوزه dq پیاده‌سازی شده و متشکل از دو حلقه کنترل جریان محور d و q است. برای این منظور جریان خروجی DG با استفاده از تبدیل پارک به حوزه dq منتقل می‌شود. برای تبدیل پارک محور d در راستای ولتاژ شبکه قرار گرفته است که در این صورت مؤلفه q ولتاژ (V_q) صفر می‌شود. توان لحظه‌ای اکتیو و راکتیو واحد تولید پراکنده در حوزه dq به‌ترتیب از روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

$$P = \frac{3}{2} V_d i_d \quad (1)$$

$$Q = -\frac{3}{2} V_d i_q \quad (2)$$

در این روابط P و Q به‌ترتیب توان اکتیو و راکتیو، V_d و V_q ولتاژ نقطه PCC و i_d و i_q جریان خروجی DG در حوزه dq هستند. از روابط (۱) و (۲) می‌توان دریافت که توان اکتیو و راکتیو تولیدی DG به‌ترتیب با مقادیر i_d و i_q جریان تولیدی در حوزه

۳. ساختار و اجزای روش پیشنهادی

همان طور که در مقدمه اشاره شد، روش‌های پسیو و اکتیو هریک مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. روش‌های پسیو تأثیر مخربی روی کیفیت توان ندارند اما در مقابل دارای ناحیه غیرقابل تشخیص بزرگی هستند. روش‌های اکتیو از دقت بیشتری در تشخیص جزیره برخوردارند اما به دلیل تزریق پیوسته اختلال، کیفیت توان سیستم را کاهش می‌دهند؛ در نتیجه با ترکیب این دو نوع روش نه تنها می‌توان از مزایای هر دو بهره‌مند شد بلکه می‌توان تا حد زیادی اثرات نامطلوب آن‌ها را کاهش داد. در این قسمت ابتدا درباره عملکرد روش‌های پسیو و اکتیو به‌کاررفته، جداگانه بحث می‌شود و سپس اساس کار روش ترکیبی پیشنهادی به‌طور کامل تشریح خواهد شد.

۱.۳. روش نرخ تغییرات فرکانس

این روش بر اساس اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس نسبت به زمان (df/dt) در نقطه PCC و مقایسه آن با مقدار آستانه، رخداد جزیره را تعیین می‌کند. در این روش نرخ تغییرات فرکانس نسبت به زمان در طی چند سیکل (معمولاً ۲ تا ۵۰ سیکل) اندازه‌گیری می‌شود. سپس سیگنال اندازه‌گیری شده از فیلتر پایین گذر عبور داده می‌شود تا نویزهای ایجاد یا تقویت شده توسط مشتق‌گیر و حالت‌های گذرای ناشی از تغییرات فرکانس بالای سیستم قدرت حذف شوند. علاوه بر این برای جلوگیری از تشخیص اشتباه در هنگام خطای اتصال کوتاه، شرط حداقل ولتاژ هم به‌صورت همزمان با نرخ تغییرات فرکانس بررسی می‌شود. در صورتی که نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه تعیین شده بیشتر شود، رخداد جزیره تشخیص داده می‌شود و رله حفاظتی DG را قطع می‌کند. این روش را به‌اختصار با $ROCOF^1$ نشان می‌دهند. هزینه پیاده‌سازی کم، سرعت تشخیص بالا و حفظ کیفیت توان از مزایای این روش هستند. در مقابل NDZ این روش بزرگ است چراکه این روش نمی‌تواند تشخیص دهد که تغییرات فرکانس به دلیل تغییرات بار محلی رخ داده یا به دلیل جدا شدن DG از شبکه اصلی؛ در نتیجه تعیین حد آستانه مناسب کار بسیار دشواری است [۱۹ و ۲۱].

۲.۳. روش تغییر توان اکتیو بهبودیافته

در منابع تولید پراکنده چنانچه DG به شبکه اصلی متصل باشد،

توان اکتیو با فرکانس و توان راکتیو با ولتاژ متناسب بوده و با تغییر توان حقیقی تغییرات ولتاژ ناچیز خواهد بود، ولی در حالت جزیره‌ای طبق رابطه (۵) توان اکتیو با ولتاژ و طبق رابطه (۶) توان راکتیو با فرکانس متناسب است.

$$P = \frac{V_{LL}^2}{R} \quad (5)$$

$$Q = V_{LL}^2 \left(\frac{1}{2\pi fL} - 2\pi fC \right) \quad (6)$$

که P و Q توان اکتیو و راکتیو DG و V_{LL} و f به ترتیب ولتاژ خط و فرکانس PCC هستند. R، L و C به ترتیب مقادیر مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی بار RLC هستند. روش تغییر توان اکتیو^۲ (RPS) اولین مرتبه در [۲۳] ارائه شده است. طبق [۲۳] در مرحله دوم توان خروجی DG متناسب با نرخ شیب ژنراتور^۳ (حدود ۴٪) در هر ثانیه افزایش یا کاهش می‌یابد. سپس متوسط نرخ تغییرات ولتاژ در طی ۲۰ سیکل اندازه‌گیری شده و چنانچه این کمیت از مقدار آستانه بیشتر شود، رخداد جزیره تشخیص داده می‌شود. روش تغییر توان اکتیو بهبودیافته^۴ (IRPS) بر اساس تغییر مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده و اندازه‌گیری ولتاژ PCC و مقایسه آن با مقدار آستانه عمل می‌کند. در این روش، مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده با شیب مشخص و ثابت کاهش یافته، سپس دامنه ولتاژ PCC اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی، دامنه ولتاژ نیز افت کرده، از مقدار آستانه کمتر شود، رخداد جزیره تشخیص داده می‌شود؛ در صورتی که با کاهش جریان خروجی، دامنه ولتاژ PCC ثابت باقی ماند و می‌توان نتیجه گرفت که واحد تولید پراکنده به شبکه اصلی متصل است. از آنجا که در این روش، جریان خروجی پیوسته تغییر می‌کند، نمی‌توان به‌تنهایی آن را بر روی اینورتر پیاده‌سازی کرد زیرا موجب کاهش بازده الگوریتم‌های MPPT و صدمه به تجهیزات مصرف‌کننده می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به NDZ کوچک و توانایی تشخیص جزیره به‌ویژه هنگام برابری توان تولیدی و مصرفی اشاره کرد.

۳.۳. روش ترکیبی پیشنهادی

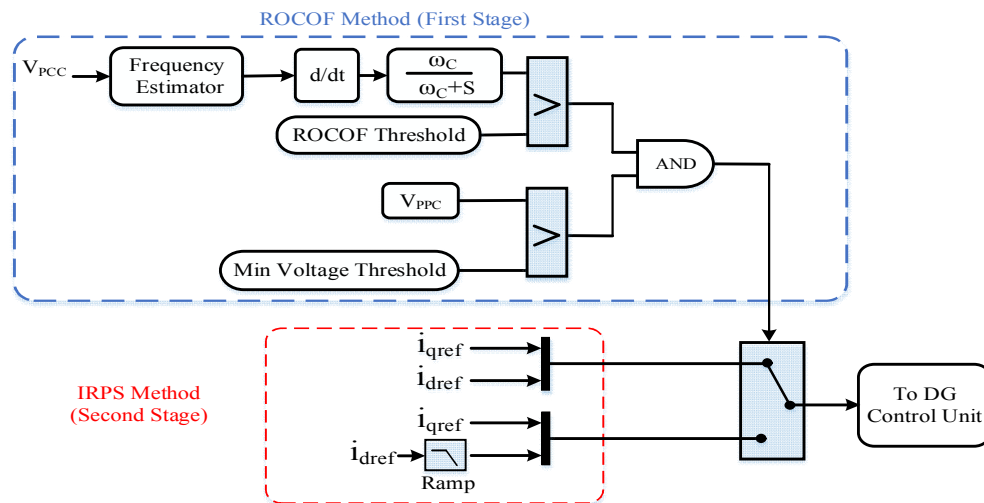
همان طور که تشریح شد، روش‌های پسیو و اکتیو هریک مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. ترکیب این دو روش برای دستیابی به مزایای هر دو، دسته جدیدی از روش‌های تشخیص جزیره‌ای را

2. Real Power shift
3. Ramp Rate
4. Improved Real Power Shift

1. Rate of Change of Frequency

روش ROCOF نرخ تغییرات فرکانس را در هر لحظه اندازه‌گیری می‌کند و چنانچه از مقدار آستانه فراتر رود، بلافاصله روش IRPS فعال می‌شود. با فعال شدن روش IRPS در مرحله دوم، چنانچه با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده، ولتاژ PCC ثابت باقی ماند، واحد تولید پراکنده به شبکه اصلی متصل است ولی اگر با کاهش جریان خروجی دامنه ولتاژ PCC نیز افت کرد، رخداد جزیره توسط روش پیشنهادی تشخیص داده می‌شود. روش پیشنهادی تنها در صورتی دارای NDZ می‌باشد که هنگام رخداد جزیره و نزدیکی توان تولیدی و مصرفی نرخ تغییرات فرکانس از $1/2 \text{ Hz/s}$ کمتر باقی بماند.

به وجود آورده که به آن‌ها روش‌های ترکیبی می‌گویند. روش پیشنهادی این مقاله به صورت ترکیبی از دو روش ROCOF و IRPS عمل می‌کند. از آنجا که روش ROCOF به دلیل نداشتن دقت کافی، توانایی تشخیص رخداد جزیره را از سایر اتفاقات شبکه ندارد، با ترکیب آن با روش IRPS معایب ROCOF پوشش داده می‌شود. همچنین در این روش، کیفیت توان نسبت به زمانی که جریان به طور پیوسته تغییر کند، کمتر کاهش می‌یابد. در مقابل مدت زمان تشخیص این روش نسبت به زمانی که هر یک از روش‌های پسیو و اکتیو به صورت جداگانه استفاده شوند، افزایش می‌یابد. در نهایت به واسطه ترکیب این دو روش، ناحیه غیرقابل تشخیص تا حد زیادی کاهش می‌یابد. عملکرد روش پیشنهادی مطابق شکل (۳) به این صورت است که در مرحله اول،



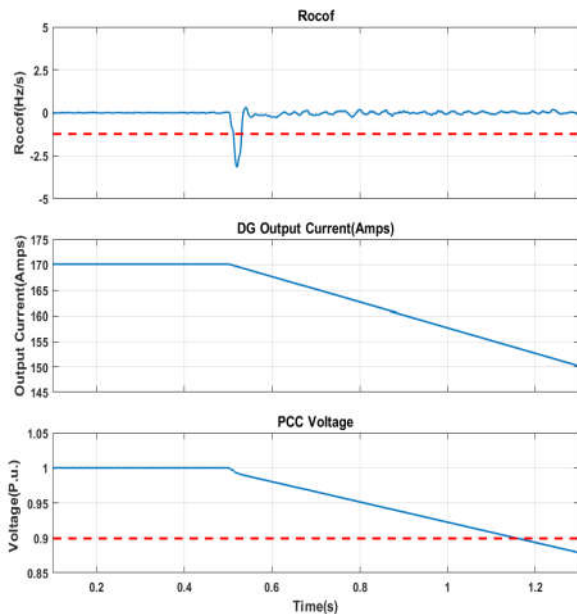
شکل (۳): طرح‌واره روش ترکیبی پیشنهادی

R, L و C در [۱۲] آمده است.

۴. شبیه‌سازی

در این قسمت با استفاده از سیستم ارائه شده در شکل (۱) به بررسی درستی و صحت عملکرد روش پیشنهادی در محیط Matlab/Simulink پرداخته شده است. پارامترهای شبکه، DG، بار RLC اصلاح شده و سایر مقادیر مورد نیاز در جدول (۱) آورده شده است [۲۴]. همان طور که پیش‌تر ذکر شد، در حالت جزیره‌ای توان راکتیو با فرکانس متناسب بوده و یک بار RLC در فرکانس تشدید خود هیچ توان راکتیوی مصرف نمی‌کند. بنابراین باید مقادیر بار RLC باید به گونه‌ای تنظیم شوند تا فرکانس تشدید بار به فرکانس شبکه نزدیک باشد؛ تا در صورت رخداد جزیره تغییرات فرکانس بسیار محدود بوده و به دنبال آن ROCOF نیز ناچیز باشد. تغییرات ناچیز ROCOF تشخیص رخداد جزیره را توسط روش ترکیبی پیشنهادی دشوار می‌سازد. روابط لازم برای محاسبه مقادیر

جدول (۱): مشخصات سیستم مورد مطالعه		
۸KHz	فرکانس کلیدزنی	کمیت‌های DG
$K_p=20$ $K_f=0.01$	ضرایب کنترل‌کننده	
۹۰۰V	ولتاژ لینک DC	
۱۰۰KW	توان تولیدی	
۲/۱mH	راکتانس فیلتر	کمیت‌های شبکه
۴۸۰V	ولتاژ خط	
۶۰Hz	فرکانس شبکه	
$L_g=3\text{mH}$ $R_g=0.02 \Omega$	امپدانس شبکه	کمیت‌های بار
$L=0.004074 \text{ H}$ $C=0.001726 \text{ F}$ $R=2/304 \Omega$	مقادیر بار RLC	
۱/۵	ضریب کیفیت	
۱KHz	فرکانس قطع فیلتر ROCOF	



شکل (۴): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی DG و ولتاژ PCC هنگام رخداد جزیره

۲.۴. قطع و وصل بار

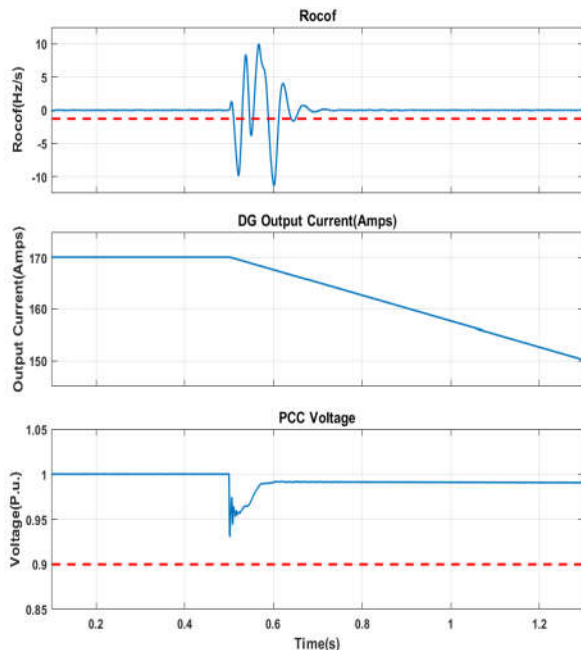
هدف از این آزمایش، حصول اطمینان از حساسیت نداشتن روش پیشنهادی نسبت به قطع و وصل بار است. به عبارت دیگر زمانی که DG به شبکه اصلی متصل است، با قطع و وصل بار، روش پیشنهادی نباید اشتباه تشخیص دهد و اعلام حالت جزیره‌ای نماید. برای اطمینان از صحت عملکرد روش پیشنهادی در شرایط مختلف، در این قسمت سه بار متفاوت پس‌فاز، مقاومتی و پیش‌فاز در نظر گرفته شده است. مشخصات این سه بار در جدول (۲) آورده شده است. برای هر سه بار شبیه‌سازی به صورت جداگانه تکرار شده است. بار در ثانیه ۰/۵ به نقطه PCC متصل و در ثانیه ۱/۵ جدا می‌شود. نرخ تغییرات فرکانس، دامنه ولتاژ PCC و توان اکتیو خروجی DG در این حالت در شکل (۵) آمده است. مطابق این شکل با اتصال بار در ثانیه ۰/۵ نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه فراتر رفته و روش IRPS بلافاصله فعال شده است؛ اما با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی DG ولتاژ PCC ثابت باقی می‌ماند. با برداشته شدن بار در ثانیه ۱/۵ ولتاژ PCC دو مرتبه به ۱p.u باز می‌گردد. مطابق شکل (۵) اگرچه با کاهش مؤلفه حقیقی جریان، توان اکتیو خروجی منبع تولید پراکنده کاهش یافته است، اما افت ولتاژ ایجاد شده در نقطه PCC بین ثانیه ۰/۵ تا ۱/۵، به دلیل کلیدزنی بار است و تأثیر کاهش جریان خروجی واحد تولید پراکنده بر افت ولتاژ PCC بسیار ناچیز است.

در روش پیشنهادی مقدار آستانه ROCOF تا حد ممکن پایین در نظر گرفته شده است تا در صورت رخداد هرگونه اتفاق در شبکه روش دوم را فعال کند. همان طور که پیش‌تر ذکر شد، برای جلوگیری از تشخیص اشتباه در هنگام خطای اتصال کوتاه، شرط حداقل ولتاژ هم به صورت همزمان با نرخ تغییرات فرکانس بررسی می‌شود. مقدار آستانه نرخ تغییرات فرکانس و حداقل ولتاژ به ترتیب $1/2 \text{ Hz/s}$ و $0/85 \text{ p.u.}$ در نظر گرفته شده است [۱۹]. در صورت فعال شدن روش IRPS، جریان خروجی اینورتر با شیب 25 A/s کاهش می‌یابد و چنانچه ولتاژ PCC از $0/9 \text{ p.u.}$ کمتر شود، جزیره اتفاق می‌افتد. شیب کاهش جریان به صورت تجربی به دست آمده است و حدود آستانه ولتاژ و نرخ تغییرات فرکانس به مشخصات فنی شبکه بستگی دارند. فرکانس قطع فیلتر ROCOF نیز به صورت تجربی به نحوی انتخاب شده است که نویزهای ایجاد یا تقویت شده توسط مشتق‌گیر را حذف کند. برای بررسی صحت و دقت روش پیشنهادی، این روش تحت شرایط مختلفی از قبیل رخداد جزیره، کلیدزنی بار، راه‌اندازی موتور، حالت چند DG و کمبود و بیشبود ولتاژ، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۱.۴. تشخیص رخداد جزیره

شبیه‌سازی اول برای بررسی عملکرد روش پیشنهادی در تشخیص رخداد جزیره انجام شده است. برای این منظور، جزیره در ثانیه ۰/۵ با باز شدن کلید اتفاق افتاده است. شکل (۴) خروجی ROCOF، تغییرات جریان خروجی DG و دامنه ولتاژ PCC را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) با باز شدن کلید در ثانیه ۰/۵، نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه $1/2 \text{ Hz/s}$ بیشتر شده و بلافاصله روش IRPS فعال شده است. با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحد تولید پراکنده ولتاژ PCC نیز کاهش یافته و چون ولتاژ از مقدار آستانه $0/9 \text{ p.u.}$ کمتر شده، رخداد جزیره توسط روش پیشنهادی تشخیص داده شده است. با توجه به شکل (۴) می‌توان گفت که روش پیشنهادی در مدت‌زمان تقریبی 670 ms رخداد جزیره را تشخیص داده است که با استاندارد IEEE Std. 1547 مطابقت دارد.

پیشنهادی توانایی تشخیص رخداد جزیره را از راه‌اندازی موتور نیز دارد.



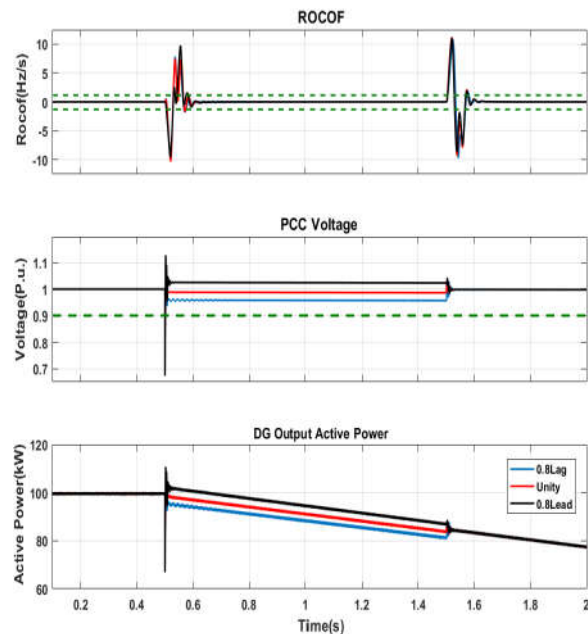
شکل (۶): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی هر DG و ولتاژ PCC در حالت راه‌اندازی موتور

۴.۴. حالت چند DG

یکی از حالات دیگری که باید روش پیشنهادی را تحت آن مورد بررسی قرار داد، حالتی است که چندین DG با روش تشخیص مشابه به یک نقطه از سیستم قدرت متصل باشند. در این حالت ممکن است روش‌های تشخیص دو منبع باهم تداخل داشته، رخداد جزیره را تشخیص ندهد یا زمانی که هیچ جزیره‌ای رخ ندهد است، منجر به تشخیص اشتباه شوند. علاوه بر این، تداخل واحدهای تولید پراکنده ممکن است بر روی دقت تشخیص سیستم به ویژه ناحیه غیرقابل تشخیص تأثیر گذارد. مطابق شکل (۷) دو DG با ظرفیت ۱۰۰kW و ۵۰kW و روش تشخیص مشابه به یک نقطه از سیستم قدرت متصل‌اند. از آنجا که توان تولیدی واحد تولید پراکنده دوم نصف واحد تولید پراکنده اول است، شیب کاهش جریان برای واحد تولید پراکنده دوم نصف واحد اول و برابر با ۱۲/۵A/s انتخاب شده است. با توجه به اینکه مجموع توان تولیدی در این حالت برابر ۱۵۰kW است، مشخصات بار RLC برای بررسی این حالت طبق جدول (۳) اصلاح شده است. نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی هر DG و ولتاژ PCC برای این حالت در شکل (۸) نشان داده شده است. مطابق شکل (۸) با باز شدن کلید در ثانیه ۰/۵ و رخداد جزیره، نرخ تغییرات فرکانس از ۱/۲Hz/s فراتر رفته و با کاهش مؤلفه

جدول (۲): مشخصات بار

بار	توان (KVA)	ضریب توان
حالت اول	۱۲۰	۰/۸ پس فاز
حالت دوم	۱۲۰	واحد
حالت سوم	۱۲۰	۰/۸ پیش فاز

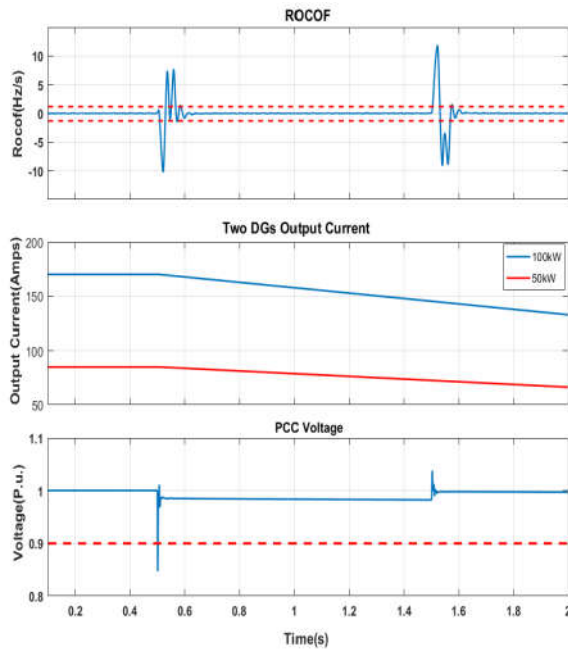


شکل (۵): نرخ تغییرات فرکانس، دامنه ولتاژ و توان اکتیو خروجی در حالت کلیدزنی بار برای سه حالت پس فاز، مقاومتی و پیش فاز

۳.۴. راه‌اندازی موتور

یکی از حالات دیگری که باید روش پیشنهادی تحت آن مورد بررسی قرار گیرد، راه‌اندازی موتور است. هدف از انجام این آزمایش آن است که اطمینان حاصل شود که روش پیشنهادی نسبت به راه‌اندازی موتور حساس نیست و دچار تشخیص اشتباه نمی‌شود. برای این آزمایش یک موتور القایی به مشخصات ۴۸۰V، ۶۰Hz، ۱۷۸۶RPM، ۱۵۰HP در ثانیه ۰/۵ روشن می‌شود [۱۹]. نتایج شبیه‌سازی راه‌اندازی موتور در شکل (۶) آورده شده است. مطابق این شکل با راه‌اندازی موتور در ثانیه ۰/۵ دامنه ولتاژ PCC نوسان کرده تا اینکه پس از رسیدن به حالت ماندگار اندکی افت می‌کند. با راه‌اندازی موتور نرخ تغییرات فرکانس از حد آستانه ۱/۲Hz/s بیشتر شده و بلافاصله روش IRPS فعال می‌شود. اما با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی ولتاژ PCC ثابت باقی می‌ماند. در نتیجه، افت ولتاژ ایجاد شده به دلیل راه‌اندازی موتور بوده و تأثیر کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی DG بر افت ولتاژ PCC پس از راه‌اندازی موتور بسیار ناچیز است. پس می‌توان گفت که روش

تغییرات فرکانس از حد آستانه $1/2 \text{ Hz/s}$ بیشتر شده و بلافاصله روش IRPS فعال می‌شود. اما با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی واحدهای تولید پراکنده، ولتاژ PCC ثابت باقی می‌ماند و با برداشته شدن بار در ثانیه $1/5$ ولتاژ PCC به مقدار نامی بازمی‌گردد. در نتیجه، افت ولتاژ ایجاد شده به دلیل کلیدزنی بار بوده و روش پیشنهادی توانایی تشخیص رخداد جزیره را از سایر اتفاقات شبکه دارد.

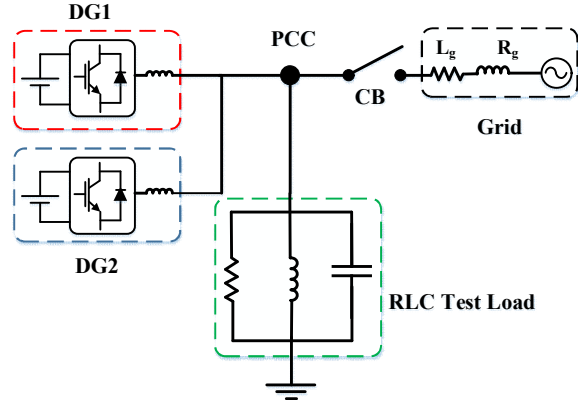


شکل (۹): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی هر DG و ولتاژ PCC در حالت کلیدزنی بار و در حالت چند DG

۵.۴. پیشبود ولتاژ

هدف از این آزمایش حصول اطمینان از این است که روش پیشنهادی نسبت به پیشبود ولتاژ حساس نیست و دچار تشخیص اشتباه نمی‌شود. در این حالت پیشبود ولتاژ در ثانیه $0/5$ رخ داده و در ثانیه $1/5$ برطرف شده است. نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی DG و ولتاژ PCC در این حالت در شکل (۱۰) نشان داده شده است. با رخداد خطای پیشبود ولتاژ، نرخ تغییرات فرکانس از حد آستانه بیشتر شده و بلافاصله روش IRPS فعال می‌شود. اما با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی DG ولتاژ PCC ثابت باقی می‌ماند. با برداشته شدن خطا در ثانیه $1/5$ ولتاژ به 1 p.u. بازمی‌گردد. با توجه به شکل (۱۰) می‌توان گفت که اضافه ولتاژ ایجاد شده در PCC بین ثانیه‌های $0/5$ تا $1/5$ ناشی از رخداد خطا بوده و از آنجا که با کاهش مؤلفه حقیقی جریان خروجی، ولتاژ از $0/9 \text{ p.u.}$ کمتر نشده است، روش پیشنهادی دچار تشخیص اشتباه نمی‌گردد.

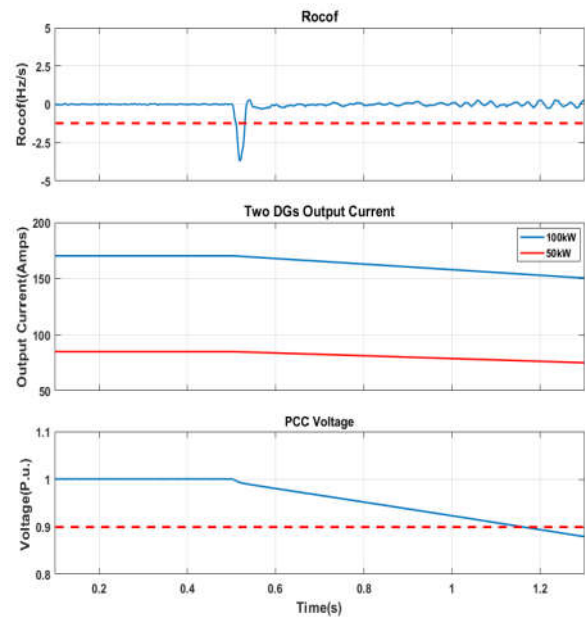
حقیقی، جریان خروجی هر دو واحد تولید پراکنده ولتاژ نقطه PCC نیز کاهش می‌یابد تا زمانی که از حد آستانه $0/9 \text{ p.u.}$ کمتر شده و رخداد جزیره توسط روش پیشنهادی تشخیص داده شده است.



شکل (۷): رخداد جزیره با در نظر گرفتن دو DG

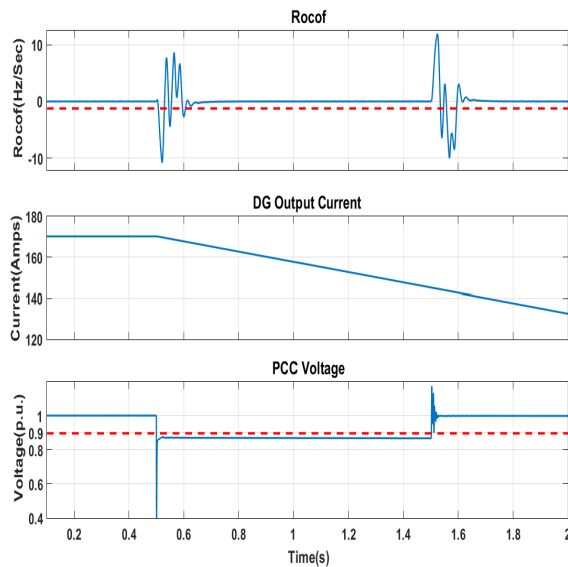
جدول (۳): مشخصات بار در حالت دو DG

R(Ω)	L(H)	C(F)
۱/۵۳۶	۰/۰۰۲۷۱۶	۰/۰۰۲۵۹۰۴

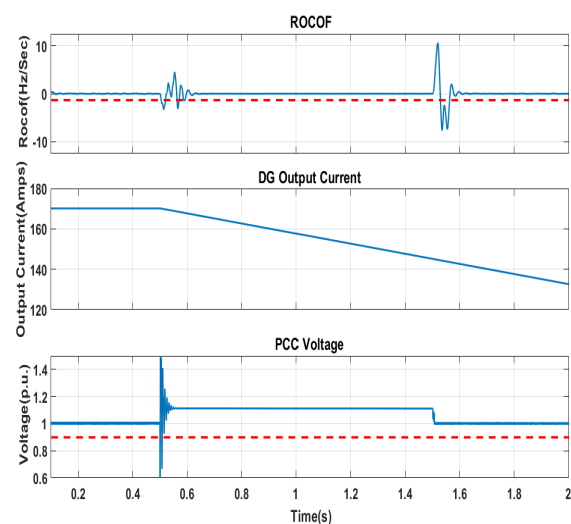


شکل (۸): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی هر DG و ولتاژ PCC در حالت چند DG

در ادامه، کلیدزنی بار برای حالت چند DG نیز بررسی شده است؛ زیرا اختلالات ناشی از کلیدزنی بار می‌تواند موجب تشخیص اشتباه شود. باری با ظرفیت 150 kW و ضریب توان واحد در ثانیه $0/5$ به PCC متصل و در ثانیه $1/5$ از شبکه جدا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی این حالت در شکل (۹) آورده شده است. مطابق شکل (۹) به دلیل اتصال بار در ثانیه $0/5$ ولتاژ PCC افت کرده، نرخ



شکل (۱۱): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی و ولتاژ PCC هنگام رخداد خطای کمبود ولتاژ



شکل (۱۰): نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی DG و ولتاژ PCC هنگام رخداد خطای بیشبود ولتاژ

۶.۴. کمبود ولتاژ

هدف از این آزمایش حصول اطمینان از این است که روش پیشنهادی نسبت به خطای کمبود ولتاژ حساس نیست؛ به عبارت دیگر زمانی که DG به شبکه اصلی متصل است، با رخداد خطای کمبود ولتاژ روش پیشنهادی نباید اشتباه تشخیص داده شود و اعلام حالت جزیره‌ای نکند. خطای کمبود ولتاژ در ثانیه ۰/۵ رخ داده و در ثانیه ۱/۵ برداشته شده است.

شکل (۱۱) نرخ تغییرات فرکانس، جریان خروجی DG و ولتاژ PCC را هنگام رخداد خطا نشان می‌دهد. با رخداد خطا در ثانیه ۰/۵ نرخ تغییرات فرکانس از مقدار آستانه فراتر رفته و روش IRPS بلافاصله فعال می‌شود. اما با کاهش جریان خروجی DG ولتاژ PCC ثابت باقی مانده است تا اینکه با برداشته شدن خطا در ثانیه ۱/۵ ولتاژ به ۱ p.u. بازمی‌گردد. در نتیجه، افت ولتاژ ایجاد شده در نقطه PCC بین ثانیه ۰/۵ تا ۱/۵ به دلیل رخداد کمبود ولتاژ بوده و تأثیر کاهش جریان خروجی واحد تولید پراکنده بر افت ولتاژ PCC بسیار ناچیز است. از آنجا که کاهش نسبی ولتاژ به دلیل تغییر مؤلفه حقیقی جریان از ۰/۱ p.u. کمتر است، روش پیشنهادی دچار تشخیص اشتباه نمی‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش ترکیبی جدید برای تشخیص رخداد جزیره‌ای منابع تولید پراکنده ارائه شده است. روش پیشنهادی بر اساس ترکیب نرخ تغییرات فرکانس به‌عنوان روش پس‌پس در مرحله اول و روش تغییر توان اکتیو بهبودیافته به‌عنوان روش اکتیو در مرحله دوم عمل می‌کند. روش ترکیبی پیشنهادی مزایای هر دو روش پس‌پس و اکتیو را حفظ می‌کند و عملکرد بهتری نسبت به هر دوی آن‌ها دارد. همچنین دقت پایین، NDZ بزرگ و تضعیف کیفیت توان توسط روش ترکیبی اصلاح شده است. این روش رخداد جزیره را در مدت زمان تقریبی ۶۷۰ ms تشخیص داده که با استاندارد IEEE Std. 1547 مطابقت دارد. روش پیشنهادی در حالت‌های مختلفی از قبیل کلیدزنی بار، راه‌اندازی موتور القایی، حالت چند DG و کمبود و بیشبود ولتاژ مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی توانایی روش پیشنهادی را در تشخیص حالت جزیره و تفکیک آن از سایر اتفاقات نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Islam, M. M., Nagrial, M., Rizk, J. and Hellany, A. "Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems", Sustainability, Vol. 13, No. 16, pp. 1-45, 2021.
- [2] Kim, M. S., Haider, R., Cho, G. J., Kim, C. H., Won, C. Y. and Chai, J. S. "Comprehensive review of islanding detection methods for distributed generation systems", Energies, Vol. 12, No. 5, pp. 1-21, 2019.
- [3] Bharti, I.P., Singh, N. K., Gupta, O. H., and Singh, A. K., "Developments in Islanding Detection and Its

- Comparison: A Comprehensive Review*", 2021 IEEE 8th [15] Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON), pp. 1-10, 2021.
- [4] Naraghipour, K., Ahmed, K. and Booth, C. "A comprehensive review of islanding detection methods for distribution systems", 2020 9th International Conference [16] on Renewable Energy Research and Application (ICRERA), pp. 428-433, 2020.
- [5] Hatata, A. Y., Abd-Raboh, E. H. and Sedhom, B. E. "A review of anti-islanding protection methods for [17] renewable distributed generation systems", *J. Electr. Eng.*, vol. 16, No. 1, pp. 235-246, 2016.
- [6] Abokhalil, A. G., Awan, A. B. and Al-Qawasmi, A. R. "Comparative study of passive and active islanding [18] detection methods for PV grid-connected systems", *Sustain*, Vol. 10, No. 6, pp. 1-15, 2018.
- [7] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Standard 1547-2003, Jul. 2003. [19]
- [8] Zamani, R., Golshan, M. E. H., Alhelou, H. H. and Hatziaargyriou, N. "A novel hybrid islanding detection method using dynamic characteristics of synchronous generator and signal processing technique", *Electric Power Systems Research*, Vol. 175, PP. 1-9, 2019.
- [9] R. Zamani, M. E. H. Golshan, H. H. Alhelou and N. Hatziaargyriou. "A novel hybrid islanding detection method using dynamic characteristics of synchronous generator and signal processing technique", *Electric Power Systems Research*, Vol. 175, PP.1-9, 2019.
- [10] Zeineldin, H. H. and Kirtley, J. L. "Performance of the OVP/UVP and OFP/UFP method with voltage and [21] frequency dependent loads", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 24, No. 2, pp. 772-778, 2009.
- [11] Nikolovski, S., Baghaee, H. R., and Mlakić, D. "Islanding detection of synchronous generator-based [22] dgs using rate of change of reactive power", *IEEE Syst. J.*, Vol. 13, No. 4, pp. 1-11, 2018.
- [12] Haider, R., Kim, C. H., Ghanbari, T. and Bukhari, S. B. A. "Harmonic-signature-based islanding detection in grid-connected distributed generation systems using Kalman filter", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 12, No. 15, pp. 1813-1822, 2018. [23]
- [13] Valsamas, F., Voglitsis, D., Rigogiannis, N., Papanikolaou, N. and Kyritsis, A. "Comparative study of active anti-islanding schemes compatible with MICs in the prospect of high penetration levels and weak grid conditions", in *IET Generation, Transmission & [24] Distribution*, Vol. 12, No. 20, pp. 4589-4596, 2018.
- [14] Pourbabak, H. and Kazemi, A. "Islanding detection method based on a new approach to voltage phase angle of constant power inverters", *IET Gener. Transm. [25] Distrib.*, Vol. 10, No. 5, pp. 1190-1198, 2016.
- Jia, K., Wei, H., Bi, T., Thomas, D. W. and Sumner, M. "An islanding detection method for multi-dg systems based on high-frequency impedance estimation", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 8, No. 1, pp. 74-83, 2017.
- Raipala, O., Mäkinen, A., Repo, S. and Järventausta, P. "An anti-islanding protection method based on reactive power injection and ROCOF", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 32, No. 1, pp. 401-410, 2017.
- Vahedi, H., Karrari, M. and Gharehpetian, G. B. "Accurate SFS parameter design criterion for inverter-based distributed generation", in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 31, No. 3, pp. 1050-1059, 2016.
- Zeineldin, H. H. and Salama, M. M. "Comments on "Impact of Load Frequency Dependence on the NDZ and Performance of the SFS Islanding Detection Method", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 9, pp. 7277-7279, 2017.
- [19] Akhlaghi, S., Sarailoo, M., Akhlaghi, A. and Ghadimi, A. A. "A novel hybrid approach using sms and ROCOF for islanding detection of inverter-based DGs", 2017 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Champaign, IL, pp. 1-7, 2017.
- [۲۰] اصطهباناتی، سحر، برخوردار یزدی، مجتبی و محمدی، سیدمحمدعلی، هژبری، حسین، «تشخیص عملکرد جزیره‌های در یک ریزشکه با استفاده از روش ترکیبی (اندازه‌گیری نرخ تغییرات فرکانس و محاسبه امیدانس فرکانس بالا)»، پنجمین کنفرانس مهندسی دانش‌بنیان و نوآوری، تهران، اسفند ۱۳۹۷.
- Khodaparastan, M., Vahedi, H., Khzaeeli, F., and Oraee, H. "A novel hybrid islanding detection method for inverter-based DGs using SFS and ROCOF", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 32, No. 5, pp. 2162-2170, 2017.
- Samet, H., Hashemi, F. and Ghanbari, T. "Islanding detection method for inverter-based distributed generation with negligible non-detection zone using energy of rate of change of voltage phase angle", in *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 9, No. 15, pp. 2337-2350, 2015.
- Vieira, J. C., Freitas, W., Huang, Z., Xu, W. and Morelato, A. "Formulas for predicting the dynamic performance of ROCOF relays for embedded generation applications", *Inst. Eng. Technol.*, Vol. 153, No. 4, pp. 399-406, 2006.
- Zeineldin, H. H. "A Q-f droop curve for facilitating islanding detection of inverter-based distributed generation", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 3, pp. 665-673, 2009.
- Mahat, P., Chen, Z. and Bak-Jensen, B. "A hybrid islanding detection technique using average rate of

voltage change and real power shift", IEEE Trans. Power Deliv Vol. 24, No. 2, pp. 764–771, 2009.

and nondetection zones", in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, pp. 1515-1523, July 2006.

- [26] Zeineldin, H. H., El-Saadany, E. F. and Salama, M. M. A. "*Impact of DG interface control on islanding detection*