

طراحی رله تشخیص جزیره‌ای برای ژنراتور سنکرون با استفاده از آنالیز ناحیه‌ای دوبعدی انرژی سیگنال‌های تبدیل موجک

بهرروز صبحانی^۱، دانشجوی دکتری؛ حسین شایقی^۲، استاد؛ عادل اکبری^۳، دانشیار

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - b.sobhany@gmail.com

۲- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - hshayeghi@gmail.com

۳- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران - akbarimajd@uma.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی برای تشخیص شرایط جزیره‌ای تولیدات پراکنده با ژنراتور سنکرون بر اساس تحلیل زمان فرکانس انجام گرفته است. روش پیشنهادی پارامترهای خروجی تولیدات پراکنده را به شکل محلی اندازه‌گیری کرده و این سیگنال‌ها را در حوزه زمان فرکانس بررسی می‌کند. این روش برای تشخیص شرایط جزیره‌ای از ناحیه‌بندی دوبعدی تغییرات انرژی ضرایب سیگنال‌های تبدیل موجک نرخ تغییرات توان استفاده می‌کند. بر اساس ورود و خروج انرژی سیگنال‌های موردنظر از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر و زمان آن‌ها، تشخیص شرایط جزیره‌ای انجام می‌گیرد. برای توسعه الگوریتم پیشنهادی، آزمایش‌های جزیره‌ای در کنار حالت‌های مختلف کلیدزنی (خازن، موتور و بارهای خطی و غیرخطی) در شرایط مختلف بارگذاری سیستم انجام گرفته و با تحلیل انرژی ضرایب تبدیل موجک در سطوح متفاوت با استفاده از موجک‌های مادر مختلف سیگنال‌های مناسب برای تشخیص استخراج شده است. ارزیابی کارایی رله پیشنهادی روی سیستم مطالعه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی علاوه بر تشخیص دقیق شرایط جزیره‌ای، احتمال اشتباه پایین‌تری نسبت به روش‌های دیگر در شرایط کلیدزنی در شبکه دارد.

واژه‌های کلیدی: تشخیص جزیره‌ای، تولیدات پراکنده، ریزشبکه، تحلیل انرژی، تبدیل موجک.

Designing of Islanding Detection Relay for Synchronous Generator using Zones Analysis of Two-dimensional Wavelet Signal Energy

Behrooz Sobhani¹, PhD Student; Hossein Shayeghi², Professor; Adel Akbarimajd³, Associate Professor

1- Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: b.sobhany@gmail.com

2- Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: hshayeghi@gmail.com

3- Faculty of Technical and Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran, Email: akbarimajd@uma.ac.ir

Abstract: This paper presents a novel time-frequency analysis based technique for detection of synchronous generator islanding conditions. In the proposed method the output signals of Distributed Generation are measured locally and analyzed in time-frequency domain. In order to detection of islanding condition, the proposed method is used of energy variations of the rate of change of active power wavelet coefficients signal in a two-dimensional form. By considering the place of signals in any time, the islanding condition could be detected. At first, all possible linear and nonlinear load switching, motor starting, capacitor bank switching, and islanding conditions, are simulated and the required detection parameters measured. Using the discrete wavelet theory, the energy of any decomposition level of all mother wavelet for parameters detection is calculated. From of these signals, the best of them are selected for ANFIS training for islanding. Simulation results confirm the performance of the proposed detection algorithm in comparison with existing methods in islanding and switching conditions.

Keywords: Islanding detection, Microgrid system, Distributed generation, Energy analysis, Wavelet transform.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۱۱/۰۷ و ۱۳۹۳/۱۲/۰۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۲/۲۴

نام نویسنده مسئول: حسین شایقی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اردبیل - انتهای خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده فنی مهندسی.

۱- مقدمه

افزایش آلودگی محیط‌زیست، افزایش قیمت انرژی فسیلی و کاهش روزافزون حجم این منابع، نگرانی‌های زیاد در مورد نیروگاه‌های متمرکز به وجود آورده است [۱]. همچنین، این مشکلات در کنار مزایای تولیدات پراکنده و پیشرفت روزافزون تکنولوژی‌های مربوط به انرژی‌های نو از دلایلی هستند که باعث می‌شوند تا تعداد منابع تولیدات پراکنده متصل به شبکه در سرتاسر جهان روزبه‌روز افزایش یابد [۲]. اما محققان به تازگی دریافته‌اند که نصب منابع تولیدات پراکنده به‌صورت تکی می‌تواند بیش از اینکه مشکلات سیستم را حل کند، مشکلاتی به سیستم اضافه کند [۳]. به همین منظور پیشنهاد می‌گردد این منابع به‌صورت ریزشبکه مورد استفاده قرار گیرد [۴].

یکی از مزایای ریزشبکه کارکرد آن به‌صورت متصل و جدا از شبکه (جزیره‌ای) است [۵]. اما وقوع جزیره‌ای در یک ریزشبکه را می‌توان به دو نوع عمدی یا تصادفی تقسیم‌بندی کرد. در شرایطی که حالت جزیره‌ای به شکل عمدی انجام گیرد می‌توان تعادل توان در داخل ریزشبکه را کنترل کرد به نوعی که میزان مصرف و تولید در داخل ریزشبکه برابر باشد و سپس استراتژی کنترلی تغییر یابد [۶]. اما در شرایط که جزیره‌ای ناخواسته باشد در این صورت تولیدات پراکنده باید بتوانند شرایط جزیره‌ای را خود تشخیص دهند و تدابیر لازم را پس از وقوع جزیره‌ای انجام دهند. در شرایط کلی روش‌های تشخیص شرایط جزیره‌ای به سه بخش اکتیو، پسیو و مخابراتی تقسیم‌بندی می‌شوند.

روش‌های مخابراتی: برای تشخیص، روش‌های ایمن و تقریباً با خطای خیلی پایین هستند. این روش‌ها بر اساس مخابره سیگنال بین تولید پراکنده و شبکه سراسری عمل می‌کنند. اما مشکل عمده این روش‌ها هزینه بسیار بالای آن‌ها است. زیرا که فراهم کردن بستر مخابراتی برای هر تولید پراکنده با هر ظرفیتی کاری بسیار غیرمنطقی و نامعقول است [۷-۸].

روش‌های اکتیو: بیشتر برای منابع تولید پراکنده با مبدل‌های واسط کارایی دارند. عملکرد روش‌های اکتیو معمولاً بر اساس تزریق اغتشاش و فیدبک مثبت استوار است. در این روش‌ها معمولاً یک سیگنال اغتشاشی به سیستم تزریق می‌گردد. زمانی که تولید

پراکنده به شبکه سراسری متصل باشد. این سیگنال‌ها توانایی ایجاد اختلال در کار سیستم را نخواهند داشت زیرا که شبکه سراسری ولتاژ و فرکانس را تثبیت کرده است. اما زمانی که سیستم تولید پراکنده جدا از شبکه باشد در این صورت تأثیر این سیگنال اغتشاش در خروجی رفته‌رفته افزایش می‌یابد و در نتیجه باعث ناپایداری فرکانسی یا ولتاژی سیستم می‌گردد. علاوه بر این که این روش‌ها نیاز طراحی مدارات پیچیده‌ای برای ایجاد نوسان در خروجی تولیدات پراکنده هستند و کیفیت توان خروجی را پایین می‌آورند، برای سیستم ریزشبکه نیز کارایی ندارند زیرا که باید ریزشبکه پس از جزیره‌ای به ناپایداری کشیده نشود و به کار عادی خود ادامه داده و خود را با شرایط جدید وفق دهد. جدول ۱ برخی از روش‌های اکتیو را نشان می‌دهد.

روش‌های پسیو: این روش تشخیص بر اساس اندازه‌گیری محلی سیگنال و پردازش این سیگنال‌ها استوار است. این روش‌ها بهترین روش برای تشخیص شرایط جزیره‌ای هم از لحاظ هزینه و هم از نظر ملاحظات فنی می‌باشند. اما ضعف عمده این روش‌ها بالا بودن خطای تشخیص و تشخیص اشتباه است. همچنین در این روش‌ها انتخاب یک مقدار آستانه نیز از ضعف عمده آن‌هاست. برخی از این روش‌ها به همراه مزایا و مشکلات آن‌ها در جدول ۲ آمده است.

اما روش‌هایی بر اساس ترکیب روش‌های اکتیو و پسیو وجود دارند که به روش‌های ترکیبی شناخته می‌شوند. این نوع روش‌های تشخیص بر اساس ترکیبی از روش‌های پسیو و اکتیو است. در این روش‌ها ابتدا پارامتری از شبکه سنجیده می‌شود و در صورتی که مقدار پارامتر از حد معینی خارج گردد در این صورت یک اغتشاش به سیستم اعمال می‌کند و منتظر پاسخ سیستم می‌شود و در صورتی که سیستم به سمت ناپایداری رود در این صورت رله‌های ولتاژی و فرکانسی شرایط جزیره‌ای را تشخیص می‌دهد و در غیر این صورت اغتشاش از سیستم برداشته می‌شود و سیستم به کار خود ادامه می‌دهد. این روش‌ها عملکرد بهتری نسبت به روش‌های اکتیو و پسیو دارند اما به دلیل آن‌که سیستم را ناپایدار می‌کنند برای ریزشبکه‌ها مناسب نیستند.

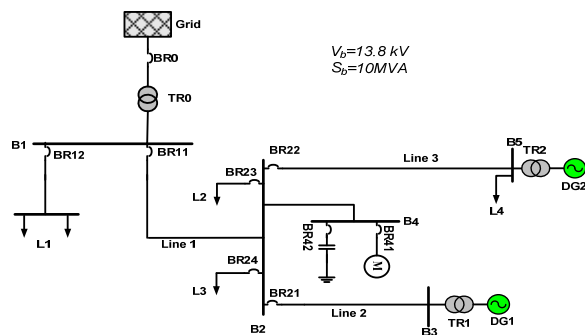
جدول ۱: روش‌های اکتیو شرایط جزیره‌ای

روش اکتیو	پارامتر اندازه‌گیری برای تشخیص	پیاده‌سازی و سرعت	ناحیه عدم تشخیص
اندازه‌گیری امپدانس [۹]	امپدانس	راحت	برای ضریب کیفیت بالا-بزرگ
SMS [۹]	فاز PCC	متوسط و کند	برای ضریب کیفیت بالا-بزرگ
AFD [۱۰]	انحراف بین جریان و ولتاژ	راحت و متوسط	برای ضریب کیفیت بالا-بزرگ
SFS [۱۱]	شیفت فرکانسی با فیدبک مثبت	سخت و نسبتاً سریع	برای ضریب کیفیت بالا
SVS [۱۱]	اندازه ولتاژ	متوسط و سریع	خیلی کم
APS [۹]	فرکانس ولتاژ ترمینال	متوسط و سریع	برای بارهای اندوکتانسی زیاد
جریان تزریقی [۱۲]	سیگنال اغتشاش در محورهای d و q	سخت و سریع	برای ضریب کیفیت بزرگ‌تر از ۳

جدول ۲: روش‌های پس‌پسوی شرایط جزیره‌ای

عنوان روش	مشخصات و خصوصیات روش	عنوان روش	مشخصات و خصوصیات روش
نرخ تغییرات توان خروجی [۱۳]	- پایین بودن کارایی در شرایط تعادل بار و تولید - احتمال بالای اشتباه در شرایط تغییرات بار - تنظیم ضریب آستانه تشخیص خیلی مشکل است - وابستگی اندازه آستانه به شرایط کار و نقطه کار	اعوجاج هارمونیکی کل [۱۷]	- وابستگی شدید به بار شبکه - وابستگی شدید به نویزولژی شبکه و شرایط بار - احتمال اشتباه در شرایط بارگذاری نامتعادل - ناحیه عدم تشخیص کم‌تر است.
نرخ تغییرات فرکانس [۱۴]	- ناحیه عدم تشخیص بالا و تعیین مقدار آستانه مشکل - احتمال خطا در تشخیص زیاد است. - ناحیه عدم تشخیص بیش‌تر از تغییرات توان است. - وابستگی مقدار آستانه به شرایط بهره‌برداری از شبکه	تشخیص شرایط جزیره‌ای بر اساس استفاده از تبدیل موجک ولتاژ [۱۸]	- نیاز به انتخاب مقدار آستانه - حساسیت زیاد به نویز اندازه‌گیری و نویز سیگنال - خطای زیاد برای کلیدزنی بارهای غیرخطی
روش تشخیص بر اساس تبدیل موجک برای سیستم فتولتائیک [۱۵]	- حساسیت آن بیش‌تر از دو روش قبل بیشتر است - حساسیت در برابر تغییرات ناگهانی بار کم‌تری دارد. - تعداد تشخیص‌های اشتباه کم‌تر از دو روش قبل است. - ناحیه عدم تشخیص بزرگ	تشخیص بر اساس تبدیل موجک شرایط گذرا [۱۹] و [۲۰]	- اشتباه برای بارهای موتوری - نیاز به آزمایش زیاد برای یادگیری - احتمال اشتباه کم‌تر در مقایسه با دیگر روش‌ها - اشتباه روش در نویزهای خاص
روش هارمونیک‌ها [۱۶]	- وابستگی شدید به بار شبکه - تعیین آستانه بسیار مشکل - خطا در تشخیص در شرایط هارمونیکی بودن شبکه	نرخ تغییرات اختلاف فاز ولتاژ و جریان [۲۱]	- قابلیت تشخیص خوب - گران‌تر از بقیه روش‌ها و نیاز به تعیین آستانه - حساس به بارهای غیرخطی

گرفته شده است. اطلاعات این سیستم به صورت جزئی در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده است. تمامی مقادیر بیان شده در این جدول برای ژنراتور سنکرون برحسب پریونیت است.



شکل ۱: دیاگرام تک خطی سیستم ریز شبکه مورد مطالعه

جدول ۳: پارامترهای مربوط به تولیدات پراکنده و نقطه اتصال

تولید پراکنده با مبدل واسط		ژنراتور سنکرون			
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۲/۵ MVA	توان نامی	۰/۲	X_{ik}	۰/۰۰۵۲	R_i
۱/۵ mΩ	مقاومت سری	۲	X_{q1}	۲/۸۶	X_{d1}
۳۰۰ μH	اندوکتانس	۰/۰۲۸۴	X_{ik1q1}	۰/۰۲۰۸	X_{ikd1}
۱۹۸۰ HZ	فرکانس f_c	۰/۰۰۱	X_{ik2q1}	۰/۶۱۵۷	X_{ikd1}
۱۵۰۰ V	ولتاژ منبع DC	۱/۸۲۸۴	X_{k1q1}	۲/۶۸	X_{k1d1}
۶۰۰ V	ولتاژ ترینال	۱/۸۰۱۰	X_{k2q1}	۳/۲۷۵۷	X_{k2d1}
۴ MVA	ترانسفورماتور	۰/۰۰۵۷	R_{k1q1}	۰/۱۳۸۱	R_{k1d1}
۰/۶/۱۳/۸ Y/D	نسبت تبدیل	۰/۰۰۱۵	R_{k2q1}	۰/۰۰۲۶	R_{k2d1}
۰/۶۷۴ ± ۴/۴	امپدانس ترانسفورماتور	۰	D	۲/۹	H

در این مقاله با استفاده از تحلیل انرژی ضرایب موجک و ناحیه بندی این تغییرات در یک تحلیل دوعده‌ای، شرایط جزیره‌ای منابع تولید پراکنده با ژنراتور سنکرون تشخیص داده می‌شود. به منظور کاهش ناحیه عدم تشخیص و کم کردن تشخیص‌های اشتباه، از تغییرات انرژی ضرایب تبدیل موجک و از نواحی مختلف تشخیص استفاده شده است. همچنین به دلیل انتخاب سیگنال مناسب و بررسی قدرت روش پیشنهادی، تحلیل‌های متفاوت با استفاده از انواع موجک‌های مادر در شرایط مختلف کلیدزنی و جزیره‌ای انجام گرفته است. نرخ تغییرات انرژی سیگنال‌های تغییرات توان خروجی در هر لحظه از زمان سنجیده شده و با استفاده از تبدیل موجک مورد مطالعه می‌گیرد و نشان داده می‌شود که تغییرات این سیگنال‌ها برای حالت جزیره‌ای با شرایط کلیدزنی دیگر در شبکه متفاوت است. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، نتایج الگوریتم پیشنهادی با روش‌های دیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرد. ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر تشخیص دقیق شرایط جزیره‌ای، روش پیشنهادی احتمال اشتباه پایین‌تری برای تشخیص جزیره‌ای نسبت به روش‌های دیگر در شرایط کلیدزنی در شبکه دارد.

۲- شبکه مورد مطالعه

دیاگرام تک خطی ریز شبکه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم شامل ۵ باس در سطح ولتاژ ۱۳/۸ کیلوولت، یک باس (نقطه اتصال PCC) در سطح ولتاژ ۶۹ کیلوولت و دو تولید پراکنده است. تولید پراکنده DG1 ژنراتور سنکرون با قدرت ۵ مگاوات و تولید پراکنده DG2 بر اساس مبدل واسط به قدرت نامی ۲/۵ مگاوات است. همچنین چهار بار L1 تا L4 (بارهای L2 و L4 از نوع بارهای خطی و L3 بار غیرخطی) در شبکه قرار گرفته‌اند. بارهای خطی از نوع مقاومتی - سلفی - خازنی و بارهای غیرخطی نیز مصرف کننده جریان مستقیم با یکسوسازها در نظر

مقیاس (C_j) بسته به انتخاب نوع موجک مادر و مرحله تجزیه به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$c_j(k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H_1(m-2k)c_{j+1}(m) \quad (1)$$

$$d_j(k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} H_2(m-2k)c_{j+1}(m) \quad (2)$$

در این رابطه H_1 و H_2 به ترتیب فیلتر پایین‌گذر و فیلتر بالاگذر هستند. همچنین انرژی ضرایب ویولت (E_{d_j}) و مقیاس (E_{c_0}) نیز با استفاده از رابطه پارسوال و به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$E_{c_0} = \sqrt{\sum_k |c_0(k)|^2} \quad (3)$$

$$E_{d_j} = \sqrt{\sum_k |d_j(k)|^2} \quad (4)$$

انرژی هر یک از ضرایب بیان‌شده در هر مرحله برای سیگنال موردنظر محاسبه می‌گردد و در نهایت بر اساس این سیگنال‌ها شرایط جزیره‌ای تشخیص داده می‌شود که در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود.

۳-۲- رویدادهای مورد مطالعه

به‌منظور ارائه یک روش مطلوب برای تشخیص شرایط جزیره‌ای با استفاده از روش‌های پس‌یو، باید تمام شرایط و اتفاقات ممکنه در شبکه مورد مطالعه قرار گیرد که روش پیشنهادی برای رویدادهای جزیره‌ای حتماً شرایط را تشخیص دهد و برای شرایط غیر جزیره‌ای دچار اشتباه نگردد. در مطالعه پیشنهادی نیز رویدادهایی که ممکن است در شبکه اتفاق افتد به شرح زیر مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرد:

- رویدادهای جزیره‌ای
 - باز شدن کلید BR0 و وقوع جزیره‌ای
 - وقوع شرایط جزیره‌ای با باز شدن کلید BR11
- تمامی رویدادهای بیان‌شده در شبکه برای حالت جزیره‌ای به ازای بارهای مختلف، ظرفیت مختلف خازنی در شبکه، حضور یا عدم حضور موتور الکتریکی در شبکه انجام گرفته است که در مجموع ۱۵۰ حالت شرایط جزیره‌ای برای سیستم مورد مطالعه شبیه‌سازی شده و اطلاعات مربوط به هر یک از این حالت‌ها ضبط گردیده است.
- رویدادهای غیر جزیره‌ای
 - در برخی از شرایط شبکه، رله پیشنهادی ممکن است دچار اشتباه شده و شرایط غیر جزیره‌ای را حالت جزیره‌ای تشخیص دهد. در مجموع شرایطی که برای حالت‌های غیر جزیره‌ای در سیستم برای مطالعه اشتباهات رله پیشنهادی تعیین شده است به شرح زیر است:
 - ورود و خروج بار از شبکه توسط باز و بست کلیدهای BR12، BR23 و BR24 که هم بارهای خطی و هم بارهای غیرخطی را شامل می‌گردد.
 - استارت و خروج موتور الکتریکی از شبکه توسط باز و بست کلید BR41

همچنین یک دستگاه موتور الکتریکی القایی و یک دستگاه بانک خازنی در باس شماره ۲ این ریزشبهه برای تزریق توان راکتیو قرار گرفته است. سطح ولتاژ پایه برای این ریزشبهه ۱۳/۸ کیلوولت و توان پایه نیز ۱۰ مگاوات آمپر در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: پارامترهای مربوط به تولیدات پراکنده و نقطه اتصال

نقطه اتصال PCC		مشخصات توان و ترانسفورماتور ژنراتور سنکرون	
توان نامی	۵ MVA	سطح ولتاژ	۶۹ kV
قدرت ترانسفورماتور	۷/۵ MVA	توان اتصال کوتاه	۱۰۰۰ MVA
نسبت تبدیل	۲/۴ / ۱۳/۸ Y/D	نسبت X/R	۲۲/۲
امپدانس	۰/۷۶۵+j۴/۳	قدرت ترانسفورماتور	۱۵ MVA
		نسبت تبدیل	۶۹/۱۳/۸ Y/D

جدول ۵: اطلاعات مربوط به خطوط و بارها

اطلاعات مربوط به بارها		اطلاعات مربوط به خطوط	
شماره بار	شماره بار	ماکزیمم توان بار	
		راکتیو	اکتیو
L1	۱/۸	۱/۱	خط شماره ۱
L2	۲/۴	۱/۵	خط شماره ۲
L3	۱/۲	۰	خط شماره ۳
L4	۱	۰/۴	خط شماره ۴

۳-۳- ابزار ریاضی و رویدادها

در این بخش از مقاله نحوه تحلیل و عملکرد رله پیشنهادی برای تشخیص شرایط جزیره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. به دلیل آن‌که عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر اساس تحلیل انرژی ضرایب تبدیل موجک توان است در ابتدا مرور کلی به تحلیل تبدیل موجک انجام می‌گیرد.

۳-۱- محاسبه انرژی ضرایب تبدیل موجک

تبدیل موجک یک ابزار تحلیل قدرتمند ریاضی است که به‌منظور تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش تحلیل سیگنال موردنظر به یک سری سیگنال‌های پایه تجزیه می‌شود [۲۲]. این سیگنال‌های پایه کاملاً وابسته به انتخاب نوع موجک مادر است. در این تئوری برخلاف سری فوریه، اطلاعات زمانی از بین نمی‌رود. همچنین برخلاف تبدیل فوریه کوتاه‌مدت که عرض پنجره‌های تحلیل ثابتی دارند، تبدیل موجک عرض پنجره متغیری داشته و می‌تواند توسط تئوری بانک فیلتر توصیف گردد [۲۳].

هر سیگنال در هر مرحله به دو مؤلفه فرکانس بالا و پائین تجزیه می‌گردد. در مرحله بعدی مؤلفه فرکانس پایین خود به دو قسمت فرکانس بالا (ویولت) و فرکانس پایین (مقیاس) تجزیه شده و بسته به مراحل تجزیه، این تجزیه ادامه خواهد یافت [۲۴]. ضرایب ویولت (d_j) و

$$E_{signal} = \begin{bmatrix} E_{d_0}^1 & E_{d_1}^1 & \dots & E_{d_{j-1}}^1 \\ E_{d_0}^2 & E_{d_1}^2 & \dots & E_{d_{j-1}}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{d_0}^N & E_{d_1}^N & \dots & E_{d_{j-1}}^N \end{bmatrix}_{N \times J} \quad (9)$$

که در آن N تعداد حالات شبیه‌سازی بوده و J تعداد ضرایب تجزیه است. با استفاده از این ماتریس انحراف معیار سیگنال‌های جزیره‌ای ($ISSD$) محاسبه می‌گردد. برای این کار لازم است که در ابتدا فاکتور میانگین مربعات خطا به صورت زیر تعریف شود:

$$S_{d_i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (E_{d_k} - \overline{E_{d_i}})^2 \quad (10)$$

که در آن:

$$\overline{E_{d_i}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (E_{d_k}) \quad (11)$$

سپس فاکتور $ISSD$ به صورت زیر قابل تعریف است:

$$ISSD_{d_i} = \sqrt{S_{d_i}} \quad (12)$$

برای سیگنال‌های مختلف این فاکتور حساب شده و در جدول ۶ آمده است.

- انحراف معیار بین سیگنال‌های جزیره‌ای و غیرجزیره‌ای

($CINSSD$)

اما یک فاکتور دیگر بین شرایط جزیره‌ای و غیر جزیره‌ای تعریف می‌گردد. این ضریب اختلاف بین انرژی‌های سیگنال‌های شرایط جزیره‌ای و غیر جزیره‌ای را نمایش می‌دهد. ضریب $CINSSD$ برای هر یک از ضرایب ویولت به صورت زیر قابل تعریف است:

$$CINSSD_{d_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (E_{d_k} - E_{d_i}^{islanding})^2} \quad (13)$$

سیگنالی برای آنالیز مناسب‌تر از بقیه است که ضریب $ISSD$ کوچک‌تر و ضریب $CINSSD$ بزرگ‌تری داشته باشد. به همین منظور نسبت ضرایب $ISSD$ به $CINSSD$ محاسبه گشته و بزرگ بودن این ضریب به معنای مناسب بودن سیگنال برای تشخیص خواهد بود. پس از شبیه‌سازی تمام رویدادهای موردنظر، سیگنال‌های ضبط‌شده برای تمامی ۳۶۰ حالت با استفاده انواع تبدیل موجک‌ها شامل هار، دابیشز، سیملت و ... در سطوح تجزیه مختلف تحلیل شده و نحوه تغییرات انرژی این ضرایب مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۶ نتایج مربوط به موجک مادر هار و برای سه گروه از سیگنال‌ها نمایش داده شده است. چون انرژی سیگنال‌ها رفته‌رفته کوچک‌تر می‌شوند در این جدول تا ضریب d_6 مقادیر آورده شده‌اند و سیگنال‌های بعدی به دلیل آن که ممکن است به دلیل داشتن مقدار پایین در شرایط نویزی عملکرد ضعیفی داشته باشند انتخاب نمی‌گردند. از بین این نتایج مشخص است که ضریب d_2 از نرخ تغییرات توان اکتیو و راکتیو برای تشخیص شرایط جزیره‌ای انتخاب می‌گردد.

- کلیدزنی بانک خازنی توسط باز و بست کلید BR42

- خروج ناگهانی تولید پراکنده DG2 با باز شدن کلید BR22

تمامی شرایط غیرجزیره‌ای نیز در شرایط مختلف بار شبکه انجام یافته است که در مجموع ۲۱۰ شرایط غیرجزیره‌ای در این مقاله شبیه‌سازی شده و اطلاعات مربوط به آن‌ها ضبط گردیده است.

۴- رله تشخیص جزیره‌ای پیشنهادی

۴-۱- تحلیل اطلاعات

پس از مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه و ذخیره سیگنال‌های ممکنه از نتایج شبیه‌سازی، این سیگنال‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سیگنال‌هایی که برای هر یک از رویدادها ذخیره شده‌اند در رابطه (۵) نشان داده شده‌اند.

$$S_R^k = [\Delta V \quad \Delta f \quad \frac{\partial f}{\partial t} \quad \frac{\partial P}{\partial t} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} \quad \frac{\partial V_d}{\partial t} \quad \frac{\partial V_q}{\partial t} \quad THD_v \quad THD_i \quad \frac{\partial \delta}{\partial t}] \quad (5)$$

که در آن ΔV و Δf انحراف ولتاژ و فرکانس، $\frac{\partial f}{\partial t}$ ، $\frac{\partial P}{\partial t}$ و $\frac{\partial Q}{\partial t}$ نرخ تغییرات فرکانس، توان اکتیو و توان راکتیو، و $\frac{\partial V_d}{\partial t}$ و $\frac{\partial V_q}{\partial t}$ نرخ تغییرات ولتاژ محور d و q ، THD_v و THD_i اعوجاج هارمونیکی ولتاژ و جریان و در نهایت $\frac{\partial \delta}{\partial t}$ نرخ تغییرات فاز است.

۴-۲- انتخاب سیگنال

به منظور انتخاب سیگنال مناسب، در این مقاله از مفهوم خطای میانگین مربعات مقادیر انرژی سیگنال‌ها در شرایط جزیره‌ای و غیر جزیره‌ای استفاده شده است. بدین گونه که ضرایب ویولت سیگنال موردنظر $x(n)$ در سطوح تجزیه $J = [0 \ 1 \ 2 \ \dots \ j-1]$ تعیین می‌گردد. از روی این ضرایب تعیین‌شده ماتریس ضرایب به صورت زیر تشکیل می‌گردد:

$$\alpha_{coeff} = [d_0 \quad d_1 \quad \dots \quad d_{j-1}] \quad (6)$$

که در این رابطه هر یک از ضرایب d_0 تا d_{j-1} به صورت بردار گسسته زمان است که مطابق قضیه پارسوال، انرژی هر یک از این ضرایب به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$E_{d_j} = \sqrt{\sum_k |d_j(k)|^2} \quad (7)$$

سپس بردار انرژی ضرایب ویولت به صورت زیر قابل تعریف است.

$$E_{\alpha_{coeff}} = [E_{c_0} \quad E_{d_0} \quad E_{d_1} \quad E_{d_2} \quad \dots \quad E_{d_{j-2}} \quad E_{d_{j-1}}] \quad (8)$$

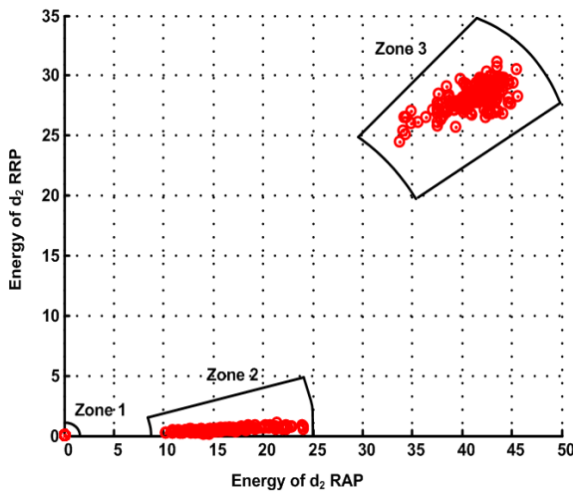
- انحراف معیار سیگنال‌های جزیره‌ای ($ISSD$)

این محاسبات انرژی برای شرایط مختلف جزیره‌ای استفاده شده و انرژی هر یک از ضرایب در شرایط مختلف جزیره‌ای محاسبه می‌گردد و سپس ماتریس انرژی ضرایب ویولت به شکل زیر تشکیل می‌گردد:

جدول ۶: نتایج CNISSD و ISSD سیگنال‌های توربین بادی

	$\frac{\partial P}{\partial t} + j \frac{\partial Q}{\partial t}$			$\Delta V_d + j \Delta V_q$			$THD_v + jTHD_i$		
	ISSD	CINSSD	ISSD/CINSSD	ISSD	CINSSD	ISSD/CINSSD	ISSD	CINSSD	ISSD/CINSSD
d_0	۲/۷۳	۱۱/۸۷	۴/۳۴۸	۱/۶۴	۱۷/۰۲۵	۱۰/۳۸	۴/۱۲۵	۱۱/۱۳	۲/۷۰
d_1	۱/۸۵	۲۷/۱۱	۱۴/۶۵۴	۴/۲۶	۱۱/۵۹	۲/۷۲	۳/۵۲۳	۱۰/۸۵۶	۲/۰۸۲
d_2	۱/۰۵	۲۱/۸۶	۲۰/۴۰۹	۲/۶۵	۹/۳	۳/۵۲	۲/۱۸	۷/۹۷۶	۳/۶۶۵
d_3	۱/۵۶	۶/۱	۳/۹۱	۰/۴۵	۴/۰۶۲	۹/۰۲۳	۱/۴۵	۰/۸۵۷	۰/۵۹
d_4	۳/۴۸	۷/۵۴	۲/۱۷	۰/۱۲۲	۰/۵۱۸	۴/۲۵	۰/۱۳	۰/۲۶۷	۲/۰۴۳
d_5	۱/۱	۳/۶۳	۳/۳	۰/۳۴	۰/۴۹۵۵	۱/۴۵۷۴	۰/۰۸۹	۰/۰۲	۰/۲۲۵۸
d_6	۰/۴۶	۱/۴۵	۳/۱۵	۰/۸۵	۰/۹۶	۱/۱۳	۰/۰۶۴	۰/۰۸۲	۱/۲۷۵

موردنظر بررسی شده و الگوریتم تشخیص به صورت فلوجارت نشان داده شده در شکل ۴ پیشنهاد می‌گردد. در روش پیشنهادی ابتدا سیگنال‌های نرخ تغییرات توان اکتیو و راکتیو از پایانه‌های تولید پراکنده در هر لحظه از زمان دریافت و با استفاده از آنالیز تبدیل موجک، انرژی موج ضریب دوم ویولت‌ها را برای هر دوره زمانی محاسبه می‌گردد. این کار در هر لحظه از زمان برای بازه ۰/۳ ثانیه‌ای از سیگنال‌های ورودی انجام می‌گیرد (تقریباً برای سیستم مورد مطالعه پس از ۰/۳ ثانیه میرایی کامل اتفاق می‌افتد (زمان نشست)).



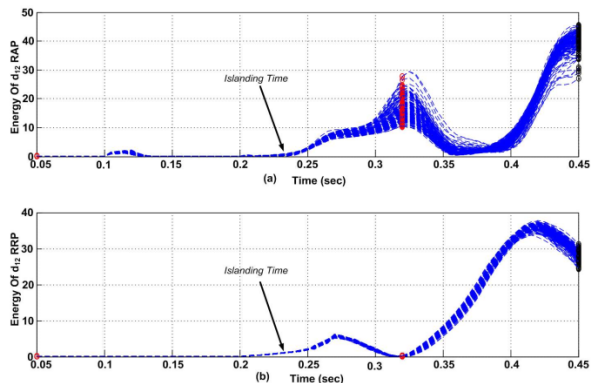
شکل ۳: نحوه تغییرات انرژی دوم ضریب ویولت با موجک مادر هر نرخ تغییرات توان اکتیو و راکتیو نسبت به همدیگر

در شکل ۵ پاسخ سیستم به تغییرات پله بار در شرایط جزیره‌ای نشان داده شده است. این شکل پاسخ گذرای ولتاژ باس خروجی تولیدات پراکنده را پس از وقوع تغییرات پله تا زمان میرایی آن نمایش می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که برای این تغییرات پله به اندازه ۱۰٪ بار نامی، ولتاژ نوسانی را در شرایط گذرا طی کرده و تقریباً پس از گذشت مدت زمان ۰/۳ ثانیه به مقدار ماندگار می‌رسد.

رفتار این سیگنال‌ها در تمامی حالت‌های جزیره‌ای در شکل ۲-a و ۲-b نشان داده شده است. اما برای پیشنهاد یک روش ایمن سیگنال‌های مذکور برحسب همدیگر در یک صفحه دوبعدی ترسیم شده و رفتار این سیگنال‌ها تحلیل می‌شود. نحوه رفتار آن‌ها و پیشنهاد برای تشخیص در قسمت بعدی توضیح داده شده است.

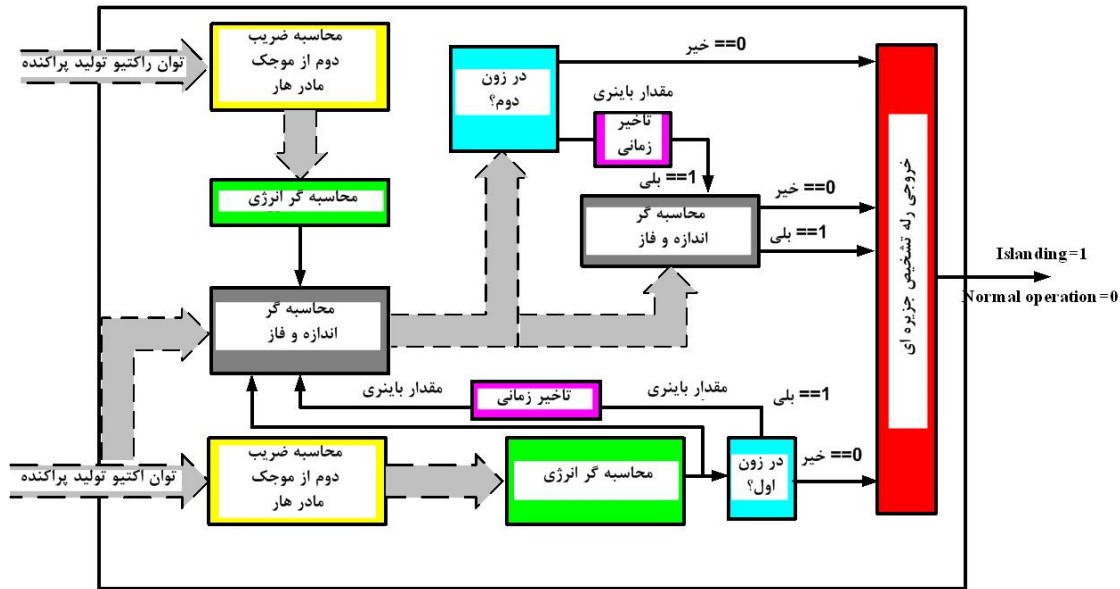
۳-۴- پیشنهاد الگوریتم

با بررسی رفتار سیگنال‌های انتخاب شده برای تشخیص شرایط جزیره‌ای مشخص می‌گردد که سیگنال‌های موردنظر در شرایط جزیره‌ای تغییرات مشابهی دارند. شکل ۳ نحوه تغییرات این سیگنال‌ها را نمایش می‌دهد. با وقوع جزیره‌ای در تمامی شرایط سیگنال‌ها از ناحیه ۱ مشخص شده خارج شده و وارد ناحیه ۲ می‌شوند سپس این تغییرات ادامه پیدا کرده و در نهایت وارد ناحیه ۳ می‌شوند. کل این زمان برای سیستم پیشنهادی ۰/۳ ثانیه طول می‌کشد.



شکل ۲: نرخ تغییرات انرژی موج‌های دومین ضرایب نرخ تغییرات توان اکتیو و راکتیو نسبت به زمان

به منظور پیشنهاد یک روش ایمن در تشخیص و جلوگیری از وقوع هرگونه عملکرد اشتباه، تغییرات سیگنال‌های پیشنهادی در زمان‌های



شکل ۶: ساختار داخلی رله پیشنهادی

۵-۱- شرایط جزیره‌ای

جدول ۷: نتایج تشخیص شرایط جزیره‌ای با استفاده از چند روش تشخیص و روش پیشنهادی

روش تشخیص	تعداد کل حالت‌ها	تعداد تشخیص صحیح	درصد تشخیص
رله پیشنهادی	۱۵۰	۱۵۰	۱۰۰٪
اعوجاج هارمونیک کل [۱۵]	۱۵۰	۱۲۲	۸۱.۳٪
نرخ تغییرات فرکانس [۱۸]	۱۵۰	۱۳۱	۸۷.۳٪
نرخ تغییرات اختلاف زاویه [۱۷]	۱۵۰	۱۴۳	۹۵.۳٪

۵-۲- شرایط غیر جزیره‌ای

برای بهتر نشان دادن نتایج روش پیشنهادی، نتایج این بخش برای شرایط مختلف کلیدزنی در شبکه به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط بررسی شده برای کلیدزنی بار، راه‌اندازی موتور و سوئیچ خازن است. کل حالات بررسی شده برای این حالات به ازای بارهای مختلف شبکه و قدرت‌های مختلف بارها، موتورها و خازن‌ها در مجموع ۲۱۰ حالت است.

از بین این نتایج رله پیشنهادی فقط یک تشخیص اشتباه در شرایط خروج تولید پراکنده دیگر از شبکه دارد. اما همان‌طور که در جدول ۸ نیز نشان داده شده است. هر یک از رله‌های دیگر خطاهای بیشتری نسبت به رله‌های پیشنهادی دارد. با مقایسه این روش‌ها واضح است که از نظر تعداد تشخیص‌های اشتباه نیز روش پیشنهادی شرایط مطلوبی دارد.

همان‌طور که در بخش‌های بالا بیان شد، ۱۵۰ حالت جزیره‌ای برای سیستم بررسی گردیده است؛ که ۷۵ حالت مربوط به باز شدن کلید BR0 و بقیه مربوط به وقوع شرایط جزیره‌ای با باز شدن کلید BR11 است. شرایط مختلف بارها در رویدادهای مذکور نیز مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین رویدادهای جزیره‌ای پس از وقوع خطا با مقاومت بزرگ نیز در این رویدادها مدنظر قرار گرفته است. برای خطاها با مقاومت کم نیز رله‌های ولتاژی و فرکانسی خیلی راحت می‌توانند این شرایط را تشخیص دهند. به‌منظور نشان دادن کارایی روش پیشنهادی، در آزمایش‌های انجام‌یافته در شرایط جزیره‌ای، تعادل بین مصرف و تولید قبل از وقوع جزیره‌ای برقرار گردیده است. بدین مفهوم که بار ریزشکته برای آزمایش‌ها به‌گونه‌ای انتخاب گردیده است که میزان تولید و مصرف توان در داخل ریزشکته اختلاف اندکی داشته یا باهم برابر باشد و ولتاژ و فرکانس ریزشکته پس از جزیره‌ای از حد مجاز خارج نگردد (ناحیه عدم تشخیص). زیرا اگر شرایط باری در خارج از ناحیه عدم تشخیص باشد، رله‌های ولتاژی و فرکانسی مجاز به تشخیص آن خواهند بود. در ۱۵۰ آزمایش انجام‌یافته در ریزشکته در این مقاله بیش از ۹۰ درصد آزمایش‌ها برای شرایطی انجام یافته است که بار در داخل ریزشکته با مجموع میزان تولید دو منبع برابر بوده یا اختلاف کمتری داشته باشد. همچنین ۱۰ درصد بقیه هم نزدیک به شرایط عدم تشخیص است تا ناحیه عدم تشخیص به‌خوبی پوشانده شود.

نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی و ۳ رله دیگر در جدول ۷ ارائه شده است. با توجه به جدول فوق در تمامی شرایط جزیره‌ای رله پیشنهادی قادر به تشخیص شرایط جزیره‌ای بوده است. اما رله‌های دیگر در برخی از شرایط (در شرایط تعادل توان اکتیو و راکتیو در داخل ریزشکته) قادر به تشخیص شرایط جزیره‌ای نیستند.

جدول ۸: نتایج تشخیص شرایط غیر جزیره‌ای با استفاده از چند روش تشخیص و روش پیشنهادی

روش تشخیص	کلید زنی بار خطی			کلید زنی بار غیرخطی و خروج تولید پراکنده دیگر			استارت موتور			کلید زنی بانک خازنی			تعداد کل حالت‌ها		
	درصد تشخیص درست/	حالت‌های تشخیص اشتباه	حالت‌های بررسی شده	درصد تشخیص درست/	حالت‌های تشخیص اشتباه	حالت‌های بررسی شده	درصد تشخیص درست/	حالت‌های تشخیص اشتباه	حالت‌های بررسی شده	درصد تشخیص درست/	حالت‌های تشخیص اشتباه	حالت‌های بررسی شده	درصد تشخیص درست/	حالت‌های تشخیص اشتباه	حالت‌های بررسی شده
رله پیشنهادی	۱۰۰	۰	۵۰	۹۸/۳	۱	۶۰	۱۰۰	۰	۵۰	۱۰۰	۰	۵۰	۹۹/۵	۱	۲۱۰
اعوجاج هارمونیک کل [۱۵]	۹۶	۲	۵۰	۷۱/۷	۱۷	۶۰	۹۲	۴	۵۰	۸۸	۶	۵۰	۸۶/۲	۲۹	۲۱۰
نرخ تغییرات فرکانس [۱۸]	۱۰۰	۰	۵۰	۹۶/۷	۲	۶۰	۹۰	۵	۵۰	۹۸	۱	۵۰	۹۶/۲	۱۸	۲۱۰
نرخ تغییرات اختلاف زاویه [۱۷]	۱۰۰	۰	۵۰	۹۶/۷	۲	۶۰	۹۴	۳	۵۰	۹۸	۱	۵۰	۹۷/۱	۶	۲۱۰
استفاده از تبدیل موجک ولتاژ [۱۹]	۱۰۰	۰	۵۰	۸۶/۷	۸	۶۰	۹۸	۱	۵۰	۹۸	۱	۵۰	۹۹	۲	۲۱۰

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی بر اساس تحلیل تغییرات انرژی دوبعدی با استفاده از تبدیل موجک برای تشخیص شرایط جزیره‌ای تولیدات پراکنده پیشنهاد گردید. سیستم ریزشبهه با دو نوع متفاوت تولید پراکنده که در بخش شبکه مورد مطالعه نشان داده شد، مدل‌سازی گردید تا تأثیر وقایع ایجاد شده در اثر کلیدزنی تولید پراکنده دیگر نیز بررسی گردد. در قسمت نتایج نشان داده شد که با استفاده از روش پیشنهادی نتایج تشخیص درست شرایط جزیره‌ای به مراتب بهتر از روش‌های متداول دیگر است. همچنین با توجه به ناحیه بندی دوبعدی، میزان خطا در تشخیص نیز بسیار کاهش یافته است.

ارزیابی تشخیص‌های اشتباه نشان می‌دهد که عملکرد این روش نسبت به روش‌های قبلی، از دقت مناسبی برخوردار است. همچنین از لحاظ سرعت تشخیص، الگوریتم پیشنهادی از سرعت مناسبی برخوردار است.

مراجع

- [1] R. Baghipour, and M. Hosseini, "An improved under frequency load shedding scheme in distribution networks with distributed generation," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, pp. 22-31, 2014.
- [2] R. Kazemzadeh, E. Najafi Aghdam, M. Fallah, and Y. Hashemi, "Reliability assessment of distribution systems in presence of microgrids considering generation and load demand uncertainties," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*, vol. 2, pp. 81-90, 2014.
- [3] Xu. Wilsun, M. Konrad, and M. Sylvain, "An assessment of DG islanding detection methods and issues for Canada," *CETC-Varenes -074 (TR) 411-INVERT*, pp. 1-6, 2004.
- [4] H. Vahedi, A. Jalilvand, R. Noroozian, and G.B. Gharehpetian, "Islanding detection for inverter-based distributed generation using a hybrid SFS and Q-f method," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 5, pp. 2280-2285, 2010.
- [5] M.E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," *IEEE Trans on Energy Conversions*, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, 1999.
- [6] S.T. Mak, "A new method of generating TWACS type outbound signals for communication on power distribution networks," *IEEE Trans on Power App System*, vol. 103, pp. 2134-2140, 1984.
- [7] W. Xu, G. Zhang, C. Li, W. Wang, G. Wang, and J. Kliber, "A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators-Part I: scheme and analysis," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1758-1766, 2007.
- [8] H.H. Zeineldin, T.A. Galil, E.F. El-Saadany, and M.M.A. Salama, "Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT," *Electric Power System Research*, vol. 77, pp. 155-162, 2007.
- [9] S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, and P.A. Crossley, "Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: a comprehensive survey," *Electric Power System Research*, vol. 79, pp. 1-9, 2009.
- [10] L. Lopes, and Y. Zhang, "Islanding detection assessment of multi-inverter systems with active frequency drifting methods," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 480-486, 2008.
- [11] V. John, Z. Ye, and A. Kolwalkar, "Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis," *Trans on Power Electronic*, vol.19, pp. 1177-1183, 2004.

- [20] P.K. Ray, N. Kishor, and S.R. Mohanty, "Islanding and power quality disturbance detection in grid-connected hybrid power system using wavelet and -transform," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1082-1094, 2012.
- [21] A. Samui, and S.R. Samantaray, "Assessment of ROCPAD relay for islanding detection in distributed generation," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 2, pp. 391-398, 2011.
- [22] A. Ukil, and R. Zivanović, "Abrupt change detection in power system fault analysis using adaptive whitening filter and wavelet transform," *Electric Power System Research*, vol. 76, pp. 815-823, 2006.
- [۲۳] حسین شایقی و بهروز صبحانی، «حفاظت ضد جزیره‌ای با استفاده از تبدیل موجک نرخ تغییرات فرکانس برای سیستم سیمولاتور توربین بادی»، نشریه سامانه‌های غیرخطی در مهندسی برق، دوره ۲، شماره ۱، ص ۹۸-۱۱۲، ۱۳۹۳.
- [24] W.G. Morsi, and M.E. El-Hawary, "Novel power quality indices based on wavelet packet transform for non-stationary sinusoidal and non-sinusoidal disturbances," *Electric Power System Research*, vol. 80, pp. 753-759, 2010.
- [25] W. Zhao, Y.H. Song, and W.R. Chen, "Improved GPS traveling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis," *Electric Power Energy System*, vol. 23, pp. 403-411, 2001.
- [26] H. Shayeghi, and B. Sobhani, "Zero NDZ assessment for anti-islanding protection using wavelet analysis and neuro-fuzzy system in inverter based distributed generation," *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 616-625, 2014.
- [12] G.H. González, and R. Iravani, "Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources," *IEEE Trans Power Delivery*, vol. 21, pp.1698-1705, 2006.
- [13] F. Hashemi, N. Ghadimi, and B. Sobhani, "Islanding detection for inverter-based DG coupled with using an adaptive neuro-fuzzy inference system," *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 45, pp. 443-455, 2013.
- [14] K. El-Arroudi, G. Joós, I. Kamwa, D.T. McGillis, "Intelligent based approach to islanding detection in distributed generation," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 22, pp. 825-835, 2007.
- [15] A. Pigazo, M. Liserre, R.A. Mastromauro, V.M. Moreno, and A.D. Aquila, "Wavelet-based islanding detection in grid-connected PV systems," *IEEE Trans on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4445-4455, 2009.
- [16] S.P. Chowdhury, S. Chowdhury, and P.A. Crossley, "Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: a comprehensive survey," *Electric Power System Research*, vol. 79, pp. 1-9, 2009.
- [17] H.K. Karegar, and A. Shataee, "Islanding detection of wind farms by THD," *IEEE Conference on DRPT*, Nanjing, China, pp. 6-9, 2008.
- [18] H.K. Karegar, and B. Sobhani, "Wavelet transform method for islanding detection of wind turbines" *Renewable Energy*, vol. 38, pp. 94-106, 2012.
- [19] A.L.N. Widanagama, and A.D. Rajapakse, "A pattern-recognition approach for detecting power islands using transient signals-Part II: performance evaluation," *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pp. 1071-1080, 2012.