

## طراحی و شبیه‌سازی یک رله هوشمند برای تشخیص جزیره الکتریکی

مهرداد حیدری<sup>۱</sup>، دکتر سید قدرت اله سیف السادات<sup>۲</sup> و احسان غریب رضا<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه شهید چمران- اهواز- ایران

mehرداد266@yahoo.com

۲- استادیار، گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه شهید چمران- اهواز- ایران

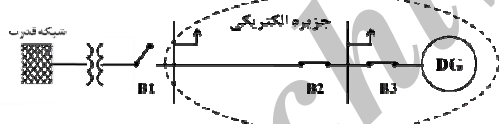
seifossadat@yahoo.com

۳- کارشناس ارشد، گروه برق- دانشکده مهندسی- دانشگاه شهید چمران- اهواز- ایران

ehsan.gharibreza@yahoo.com

**چکیده:** در این مقاله، روش جدیدی، برای تشخیص جزایر الکتریکی بر اساس دسته‌بندی و الگوشناسی در یک شبکه توزیع مورد بررسی و تحقیق قرار می‌گیرد. روش پیشنهادی، برای تشخیص، از سیگنال‌های گذرای تولید شده هنگام وقوع یک جزیره را استفاده می‌کند. شبکه عصبی برای دسته‌بندی رخدادهای گذرا به حالت‌های "جزیره" یا "غیر جزیره" آموزش داده می‌شود. ویژگی‌های مورد نیاز برای دسته‌بندی، از طریق تبدیل موجک گسسته سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان استخراج می‌شوند. روش پیشنهادی روی یک سیستم توزیع ولتاژ متوسط CIGRE با دو نوع DG مختلف آزمایش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش می‌تواند جزیره‌های الکتریکی را خیلی سریع و با دقت تشخیص دهد.

**واژه‌های کلیدی:** جزیره الکتریکی، تبدیل موجک گسسته، شبکه عصبی



شکل (۱): نمایش یک جزیره الکتریکی

اگر بریکر B1 باز شود، در حالی که DG هنوز برقدار و به شبکه نیز متصل باشد (B2 و B3 بسته باشد) یک جزیره الکتریکی تشکیل می‌شود. جزیره‌ای شدن باعث بروز چندین اشکال از لحاظ ایمنی و کیفیت توان می‌شود، مانند تغییرات غیرعادی فرکانس و ولتاژ در جزیره الکتریکی، احتمال ایجاد یک سیستم زمین نشده بسته به اتصالات ترانسفورماتور، احتمال خطرهای ایمنی برای کارکنان تعمیرات. به همین علت، استاندارد IEEE1547-2003 [۱] هنگام تشکیل یک جزیره، جدا شدن فوری DG را توصیه می‌کند. این کار از طریق حفاظت ضدجزیره‌ای عملی می‌گردد که موضوعی تحت تحقیقات گسترده در جهان

### ۱- مقدمه

تولید پراکنده (DG<sup>۱</sup>) طبیعت سیستم توزیع را از پسو به اکتیو تغییر می‌دهد. این امر باعث بروز چندین مشکل فنی شده است. یکی از این مشکلات، تشکیل جزیره الکتریکی است که بدین صورت تعریف می‌شود: "شرایطی که بخشی از سیستم توزیع که شامل بار و تولید پراکنده است، از بقیه سیستم توزیع جدا شود، در حالی که همچنان برقدار باقی بماند". شکل (۱) نمایش ساده‌ای از سیستم توزیع با یک تولید پراکنده (DG) است.

<sup>۱</sup> تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۰/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۱/۳/۲۳

نام نویسنده مسئول: مهرداد حیدری ارجلو

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اهواز - بلوار گلستان -

دانشگاه شهید چمران - دانشکده مهندسی - گروه برق

پیش‌بینی نشده در ریزش‌بکه‌ها شود. بنابراین، روش‌های تشخیص سریع و مطمئن جزیره می‌تواند مزایایی برای توسعه ریزش‌بکه‌ها داشته باشد.

روش‌های تشخیص جزیره مبتنی بر تبدیل موجک پیش از این در مراجع [۳-۷] استفاده شده است. در مراجع [۳] و [۳] مقدار مطلق یک ضریب معین تبدیل موجک با یک آستانه از پیش تنظیم شده مقایسه می‌شود و اگر برای مدت زمانی طولانی‌تر از یک زمان معین بالاتر از آن باشد، یک وضعیت جزیره‌ای اعلام می‌شود. این مقادیر آستانه سیستم، از طریق آزمایش یا بر پایه تجربه مهندسان [۴] به دست می‌آید. یک الگوریتم تشخیص جزیره از نوع ترکیبی بر اساس تبدیل موجک، مخصوص سیستم‌های DG تک‌فاز فتوولتایی در [۵] بحث شده است. یک روش هوشمند در [۶] مورد تحقیق قرار گرفته است که دسته‌بندی کننده تصمیم-درختی را با مجموعه پیچیده‌ای از ویژگی‌ها شامل اعوجاج هارمونیک کل جریان و ولتاژ، گرادیان حاصلضرب ولتاژ در ضریب توان و غیره به کار می‌گیرد. این روش تنها دارای دقت ۸۳/۳۳ درصدی در تشخیص جزیره است.

روش پیشنهادی در این مقاله از روش‌های قبلی متفاوت است. این مقاله، به جای مبتنی بودن بر مقادیر آستانه (تعیین شده به وسیله سعی و خطا) همچنین، استفاده از چندین ضریب موجک متناظر با باندهای فرکانسی مختلف و یا به جای استفاده از مجموعه پیچیده‌ای از شاخص‌ها، روشی جدید، سریع و مطمئن برای تشخیص جزیره الکتریکی ارائه می‌دهد که بر اساس انرژی ضرایب تبدیل موجک سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان در باندهای فرکانسی مختلف هنگام جدا شدن DG از شبکه است و دسته‌بندی کننده شبکه عصبی را برای تشخیص شرایط جزیره‌ای به کار می‌گیرد.

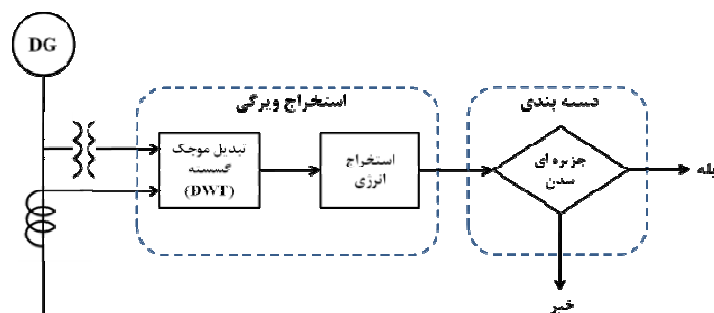
## ۲- کلیات روش پیشنهادی

نمای کلی روش تشخیص پسو جزیره ارائه شده در این مقاله در شکل (۲) نمایش داده می‌شود.

است. هر چند کارکرد جزیره‌ای DG به عنوان یک وضعیت خطرناک شناخته شده است، اما یک ژنراتور یا مجموعه‌ای از ژنراتورها در حالت کارکرد جزیره‌ای ممکن است قادر باشند بخشی از بارهای محلی را هنگام از دست دادن شبکه، تغذیه نمایند. این نوع از عملکرد، به جزیره عمده‌ی مربوط است و شبکه‌هایی با این توانایی معمولاً ریزش‌بکه<sup>۱</sup> نامیده می‌شوند. در ریزش‌بکه‌های واقعی، برای دستیابی به سطح صحیحی از هماهنگی حفاظتی، باید تعادل توان بین تولید و مصرف حفظ شود [۲].

روش‌های تشخیص گوناگونی در مقاله‌ها ارائه شده که به دو گروه کلی تقسیم می‌شوند: گروه اول، روش‌های محلی هستند که خود نیز به دو دسته به نام روش‌های اکتیو و روش‌های پسو تقسیم می‌گردند و گروه دوم روش‌های از راه دور که موسوم به روش‌های مخابراتی هستند. در روش‌های پسو، تصمیم‌گیری بر اساس مقادیر الکتریکی اندازه‌گیری شده نظیر ولتاژ و فرکانس است. در روش‌های تشخیص اکتیو، اغتشاشی به شبکه تزریق می‌گردد و جزیره بر اساس پاسخ سیستم به اغتشاشات تزریق شده تشخیص داده می‌شود. در روش‌های مخابراتی، از سیگنال‌های مخابره شده از وضعیت بریکرها، برای تشخیص حالت جزیره‌ای استفاده می‌شود. روش‌های مخابراتی دارای ناحیه غیر قابل تشخیص ناچیزی هستند، اما مشکل آنها هزینه بالا نسبت به روش‌های دیگر است. روش‌های اکتیو ناحیه غیر قابل تشخیص کوچکی دارند، اما اجرای آنها مشکل است و باعث خرابی کیفیت توان شبکه نیز می‌گردند. روش‌های پسو ارزان هستند، ولی ناحیه غیر قابل تشخیص آنها بزرگتر و تنظیم آستانه آنها مشکل است.

تشخیص سریع و دقیق جزیره‌ها در سیستم توزیع، نخستین گام به سوی بهره برداری جزیره عمده است. در این وضعیت احتمال دارد که بار و تولید جزیره به طور تقریبی برابر باشند. برخی روش‌های پسو در تشخیص جزیره هنگام بروز این تعادل بار یا دچار اشتباه می‌شوند یا زمان زیادی برای تشخیص جزیره‌ها صرف می‌کنند. به عبارت دیگر، حفاظت ضد جزیره‌ای نمی‌تواند بیش از حد حساس باشد، زیرا ممکن است باعث عملیات کنترلی



شکل (۲): نمای کلی روش تشخیص جزیره بر اساس حالات گذرا

تجزیه یک سیگنال به چندین سیگنال در باندهای فرکانسی مختلف امکان‌پذیر می‌شود که به عنوان ضرایب موجک شناخته می‌شوند. تبدیل موجک به دلیل قابلیت طبیعی تنظیم پهنای زمانی موجک مادر به فرکانسش، برای تحلیل حالات گذرا در مقایسه با دیگر روش‌های حوزه فرکانسی مانند تبدیل فوریه پنجره‌ای (WFT<sup>۷</sup>) مناسبتر است [۸-۱۰].

بعلاوه DWT امکان می‌دهد که محدوده‌ای از فرکانس‌ها تنها به صورت یک ثابت استخراج شود. هزینه محاسباتی دستیابی به مجموعه مشابهی از اطلاعات از طریق WFT بسیار بالاتر خواهد بود. مقایسه خوبی از WFT و DWT را در مرجع [۹] می‌توان به دست آورد.

تبدیل موجک گسسته یک سیگنال  $f(k)$  به صورت روابط ریاضی (۱) و (۲) تعریف می‌شود.

$\Phi_{m,n}$  موجک مادر گسسته با فرمول زیر است.

$$DWT_{\Phi} f(m, n) = \sum_k f(k) \Phi_{m,n}^*(k) \quad (1)$$

$$\Phi_{m,n}(k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Phi\left(\frac{k - nb_{0a_0^m}}{a_0^m}\right) \quad (2)$$

$a_0 (> 1)$  و  $b_0 (> 1)$  مقادیر حقیقی ثابت و  $m$  و  $n$

اعداد صحیح مثبت هستند. DWT، با تجزیه سیگنال به تقریب و جزئیات، آن را پردازش می‌کند. تقریب، مجدداً تجزیه می‌شود تا اطلاعات سطح بعدی به دست آید و این روند ادامه می‌یابد. در هر سطح از این تجزیه متوالی، پارامتر  $m$  در معادله (۲) افزایش داده می‌شود تا رزولوشن فرکانسی افزایش یابد. در واقع سیگنال اصلی با عبور از دو فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر به ترتیب به دو سیگنال تقریب و جزئیات تفکیک می‌شود که در شکل (۳) نمایش داده شده

سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان یک شبکه قدرت، دارای خصوصیات منحصربه‌فردی است که نشان دهنده علت آن حادثه گذراست. روش پیشنهادی بر اساس این فرض است که حالات گذرای حادثه جزیره‌ای شدن نیز دارای خصوصیات خاص خود است که از آنها می‌توان برای ارائه یک روش جدید تشخیص حوادث جزیره‌ای از سایر حوادث استفاده نمود. البته، این خصوصیات موجود در سیگنال‌های گذرا، مستقیماً قابل تشخیص نیست. بنابراین به فرایندی برای استخراج ویژگی‌ها نیاز است تا باعث تسریع در پاسخ دسته‌بندی گردد. تبدیل موجک برای این هدف مناسب است. روش‌های الگوشناسی مختلفی از جمله ماشین‌های برداری پشتیبان<sup>۳</sup> و شبکه‌های عصبی و دسته‌بندی کننده تصمیم درختی<sup>۴</sup> برای دسته‌بندی کردن حوادث جزیره‌ای و غیر جزیره‌ای با استفاده از سیگنال‌های گذرا می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۷]. هرچند مطالعاتی در رابطه با مقایسه آنها انجام شده است، اما به علت شرایط متفاوت و تاثیر احتمالات، نمی‌توان به طور قطعی گفت که کدام روش از تمامی جهات برتری دارد.

روش پیشنهادی، از شبکه عصبی برای الگوشناسی و دسته‌بندی استفاده می‌کند. شبکه عصبی مزایایی از جمله تنوع، سادگی و قابلیت آموزش سریع را دارد [۱۶].

## ۲-۱- استخراج ویژگی‌ها با استفاده از تبدیل

### موجک

تبدیل موجک به عنوان ابزار مؤثری برای پردازش سیگنال‌های گذرا که ذاتاً غیرساکن<sup>۵</sup> هستند، در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از تبدیل موجک گسسته (DWT<sup>۶</sup>)،

طراحی و شبیه‌سازی یک رله هوشمند برای تشخیص جزیره الکتریکی

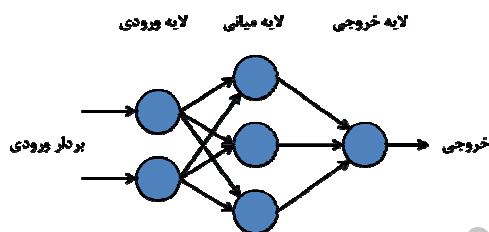
توانایی اصلی شبکه عصبی مصنوعی، آموزش آن طبق الگوهای ارائه شده است. خروجی شبکه عصبی بر اساس رابطه (۳) ساخته می‌شود.

$$y = f(w, x) = \sum_{i=0}^n w_i x_i \quad (3)$$

که  $x_i$  ورودی و  $y$  خروجی است. شبکه عصبی در زمان آموزش با بهینه کردن  $w_i$ ها، نزدیکترین جواب را به خروجی مطلوب می‌یابد؛ به گونه‌ای که مجموع مربع خطاها (E) طبق رابطه (۴) به حداقل قابل قبول برسد.

$$E_p = \sum_p \frac{1}{2} (t_{pj} - o_{pj})^2 \quad (4)$$

که در آن  $t, o, j$  و  $p$  به ترتیب خروجی مطلوب، مقدار واقعی خروجی، نرون خروجی  $j$ ام و ورودی‌های آموزش هستند.

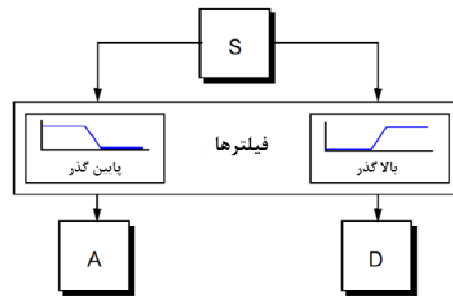


شکل (۴): ساختار کلی شبکه عصبی

تنظیم‌های در نظر گرفته شده برای شبکه عصبی مورد استفاده عبارتند از:

- نوع شبکه عصبی به کار رفته در این مقاله Feed-Forward Back Propagation است.
- تابع آموزش شبکه، TRAINLM انتخاب شده است. این تابع وزن‌ها و بایاس‌ها را مطابق بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt به‌روز می‌کند. TRAINLM تقریباً "سریعترین الگوریتم Back Propagation" است هر چند نسبت به سایر الگوریتم‌ها به حافظه بیشتری نیاز دارد، اما به‌عنوان نخستین انتخاب الگوریتم تحت نظارت پیشنهاد می‌شود.
- تابع کارایی شبکه، میانگین مربع خطاها ( $MSE^A$ ) انتخاب شده است. خطا، اختلاف بین مقدار خروجی مطلوب و مقدار خروجی شبکه عصبی است. هنگام فرآیند آموزش، وزن‌ها و بایاس‌ها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که

است. مرور خوبی از موجک‌ها را می‌توان در مراجع [۱۰-۸] به دست آورد.



شکل (۳): نمایی از تبدیل موجک

## ۲-۲- دسته‌بندی رخدادها با شبکه عصبی

روش‌های تشخیص الگو بر اساس طرح‌های ریاضی بنا شده‌اند تا بر مبنای تجربیات قبلی یا اطلاعات آماری به دست آمده از الگوها، عمل دسته‌بندی اطلاعات را انجام دهند. مسأله دسته‌بندی کردن دارای پنج بخش اصلی زیر است:

- (۱) ویژگی‌ها (متغیرهای مستقل): متغیرهای ورودی؛
- (۲) دسته (متغیر وابسته): نتیجه دسته‌بندی؛
- (۳) مجموعه اطلاعات آموزش: شامل دسته‌ها و ویژگی‌های متناظر؛
- (۴) مجموعه اطلاعات آزمایش: به منظور آزمایش دقت دسته‌بندی کننده؛
- (۵) هزینه خطای دسته‌بندی: هزینه مربوط به دسته‌بندی اشتباه اطلاعات ورودی بعدی.

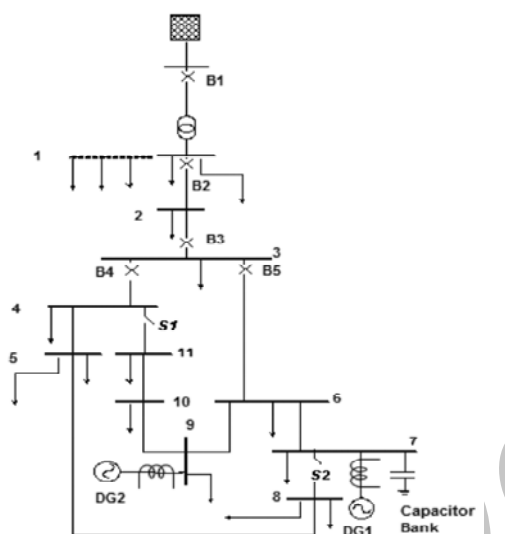
طی چند دهه اخیر، تلاش‌های بسیار جدی برای طراحی مدارات الکترونیکی، که قادر باشند شبکه‌های عصبی زیستی را شبیه‌سازی کنند، صورت گرفته است که به معرفی شبکه‌های عصبی مصنوعی منجر شده است.

هر شبکه عصبی دارای سه لایه کلی است که در هر لایه تعدادی نرون وجود دارد (شکل ۴). لایه ورودی که نشان دهنده اطلاعات ورودی به دسته‌بندی کننده است، برای هر متغیر ورودی، دارای یک نرون است. در لایه میانی احتمال عضویت داده ورودی در دسته‌های مختلف بر اساس آموزش‌های قبلی محاسبه می‌گردد. لایه خروجی احتمالات دسته‌های مختلف را باهم مقایسه می‌کند و بزرگترین آنها را برای پیش‌بینی دسته هدف به کار می‌گیرد.

- تعداد لایه‌های پنهان برابر ۲، تعداد نرون‌های آنها برابر ۱۰، تعداد نرون لایه ورودی برابر تعداد ویژگی‌های مورد نیاز و تعداد نرون لایه خروجی مساوی ۱ است.

### ۳- سیستم و حالت‌های تحت مطالعه

شبکه تحت مطالعه در این مقاله، سیستم توزیع ولتاژ CIGRE متوسط [۱۳] است که در شکل (۵) نشان داده می‌شود.



شکل (۵): سیستم توزیع ولتاژ متوسط CIGRE

این سیستم توزیع دارای دو DG است: یکی با ژنراتور القایی (DG1) با ظرفیت ۱/۵ MVA متصل به باس شماره ۷ همراه با جبران‌کننده خازنی با ظرفیت ۰/۴ AMVar و دیگری ژنراتور سنکرون (DG2) با ظرفیت ۱ MW و ۱۰۰ kVAR متصل به باس ۹ است. تمامی بارهای شبکه به صورت امپدانس ثابت در نظر گرفته می‌شوند. سیستم دارای دو کلید S1 و S2 است (به صورت عادی، باز نگه داشته می‌شود) که این امکان را فراهم می‌سازد تا ساختار شبکه از شعاعی به حلقوی تغییر یابد.

در این مقاله، اطلاعات تحت ساختارهای مختلف سیستم به وسیله باز و بسته بودن کلیدهای S1 و S2 (چهار حالت) جمع آوری می‌شود، در حالی که در مقاله‌های قبلی [۱۴]، تنها باز و بسته بودن کلید S1 در نظر گرفته شده بود. بعلاوه، یک حالت تعادل توانی نیز در نظر گرفته می‌شود،

تابع کارایی شبکه کمینه شود. هر چقدر MSE کمتر باشد، کارایی بهتر خواهد بود.

- تابع یادگیری تطبیقی<sup>۹</sup>، LEARNNGDM انتخاب شد. مبنای ریاضی الگوریتم BackPropagation، روش بهینه‌سازی گرادیان نزولی<sup>۱۰</sup> است. در مورد شبکه‌های عصبی، خطا را به عنوان تابع و وزن‌های شبکه را به عنوان متغیر فرض می‌کنند؛ یعنی در شبکه‌های عصبی، تابعی از تغییرات وزن نرون‌های شبکه است که گرادیان نزولی آن جهت رشد یا نزول تابع خطا را نشان می‌دهد. بنابراین، هر چه مقدار گرادیان نزولی کمتر باشد، کاهش خطا بیشتر است. در این روش آموزش، وزن‌ها و بایاس‌ها در جهتی حرکت داده می‌شوند که شیب تابع خطا منفی شود [۲۱]. اگر LEARNNGDM انتخاب شود؛ یعنی از گرادیان نزولی با گشتاور<sup>۱۱</sup> استفاده کرده‌ایم. در این روش، تغییرات وزن (dW) برای یک نرون با در نظر گرفتن میزان ضریب گشتاور<sup>۱۲</sup> (mc)، تغییرات وزن قبلی (dW<sub>prev</sub>) و ضریب یادگیری<sup>۱۳</sup> (LR) و گرادیان تصادفی برای وزن W (gW) محاسبه می‌شود.

$$dW = mc * dW_{prev} + (1 - mc) * LR * gW \quad (5)$$

- گرادیان نزولی به طور پیش فرض در جعبه ابزار شبکه عصبی (nntools) نرم‌افزار MATLAB مقداری بین ۱ تا ۱۰<sup>-۱۰</sup> است. هرچه این مقدار برای شبکه تحت آموزش کوچکتر باشد، بهتر است، زیرا شیب افزایشی تابع خطا، کمتر می‌گردد و در نتیجه خطا، رشد کمتری با تغییرات وزن دارد.

با افزایش تعداد اجراها<sup>۱۴</sup> مقدار خطای MSE نیز کاهش یافته، به حالت بهینه کارایی دست خواهیم یافت.

- نوع تابع تبدیل، TANSIG انتخاب شد. توابع تبدیل، خروجی لایه را بر اساس ورودی‌اش محاسبه می‌کند.

$$TANSIG(n) = 2 / (1 + \exp(-2 * n)) - 1 \quad (6)$$

این تابع برای جایی که سرعت اهمیت دارد و شکل دقیق تابع تبدیل مهم نباشد، استفاده می‌شود. TANSIG مشابه تابع تانژانت هایپربولیک است، اما سریعتر اجرا می‌شود.

- ۱) باز شدن بریکرهای B2 و B3 پس از وقوع هر کدام از چهار نوع خطا روی باس ۲ (۴ حالت)؛
- ۲) باز شدن بریکر B3، B4 و B5 پس از وقوع هر کدام از چهار نوع خطا روی باس ۳ (۴ حالت)؛
- ۳) باز شدن بریکر B4 و B5؛
- ۴) باز شدن بریکر B3، B4 و B5؛
- ۵) باز شدن بریکر B1؛
- ۶) باز شدن بریکر B2؛
- ۷) باز شدن بریکر B3.

اطلاعات آزمون برای تضمین آزمایش در مقابل تمامی انواع حالات گذرا و ارزیابی الگوریتم پیشنهادی به طور تصادفی از حوادث توصیف شده‌ی فوق استخراج شده است. در آزمایش الگوریتم پیشنهادی، یک روند انتخاب کاملاً تصادفی اعمال شده است تا از خطاهایی که می‌تواند به دلیل اتکا به مجموعه اطلاعات خاصی اتفاق افتد جلوگیری به عمل آید.

#### ۴- الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص جزیره

برای استخراج ویژگی‌های خاص هر حادثه، جریان‌ها و ولتاژهای سه فاز در پایانه‌های هر دو DG اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. سپس تبدیل موجک گسسته (DWT) برای استخراج ویژگی‌های موردنیاز دسته‌بندی به سیگنال‌های گذرای ولتاژ و جریان اعمال می‌گردد. سیگنال‌های جریان و ولتاژ با فرکانس ۱۰ KHz نمونه‌برداری می‌شوند. طی بررسی‌های انجام شده، بر اساس دقت دسته‌بندی، سرعت تشخیص، هزینه و توانمندی سخت افزار مورد نیاز، مشخص گردید که این فرکانس مناسب بوده به فرکانس‌های بالاتر نیاز نیست.

موجک مادر مورد استفاده Daubechie's1 (Db1) است. انتخاب موجک مادر و فرکانس نمونه‌برداری ترکیبی از روند سعی و خطا و تجربیات قبلی است. کاربرد موفقیت‌آمیز خانواده موجک مادر Daubechie's برای استخراج ویژگی‌های حالات گذرای سیستم قدرت در مطالعات بسیاری گزارش شده است [۱۰-۱۲] و [۱۵]. در

این حالتی است که تولید و مصرف در ناحیه جزیره با هم برابر باشند. در این حالت در زمان وقوع پدیده جزیره‌ای شدن، نوسان کمیت‌های الکتریکی، مخصوصاً فرکانس و ولتاژ به دلیل برابر بودن توان مصرفی و توان تولیدی محلی، بسیار کم است و موجب حذف بخشی از ویژگی‌های سیگنال‌ها می‌گردد که تشخیص پدیده مذکور را ممکن است با اشتباه مواجه سازد. از این رو، شبیه‌سازی و مطالعه حالت تعادل توانی در طرح رله پیشنهادی گنجانده می‌شود. بنابراین، رله پیشنهادی در پنج حالت از بهره‌برداری شبکه ارزیابی می‌شود:

- ۱) S1 و S2 باز
  - ۲) S1 باز و S2 بسته
  - ۳) S1 بسته و S2 باز
  - ۴) S1 و S2 بسته
  - ۵) حالت تعادل توانی
- حوادث به دو دسته به نام‌های "غیر جزیره‌ای" و "جزیره‌ای" تقسیم می‌شوند. در شبکه تحت مطالعه تعداد ۳۵۵ حالت مختلف (۷۱ حالت در ۵ ساختار متفاوت شبکه) در نظر گرفته می‌شوند که ۲۶۴ حالت از آنها برای آموزش و ۹۱ حالت برای تست شبکه عصبی ساخته شده استفاده می‌شوند.

۷۱ حالت مذکور شامل ۵۸ حالت غیرجزیره‌ای و ۱۳ حالت جزیره‌ای است.

۵۸ حالت غیر جزیره‌ای شبیه سازی شده، شامل موارد زیر است:

- ۱) بهره برداری عادی؛
- ۲) چهار نوع خطای گذرا شامل سه فاز، دو فاز، دو فاز به زمین و تکفاز به زمین (۴ نوع خطا در ۱۱ باسبار)؛
- ۳) کلیدزنی تمامی بارها (۱۰ باسبار)؛
- ۴) کلیدزنی DGها (دو DG)؛
- ۵) کلیدزنی خازن (۱ باسبار).

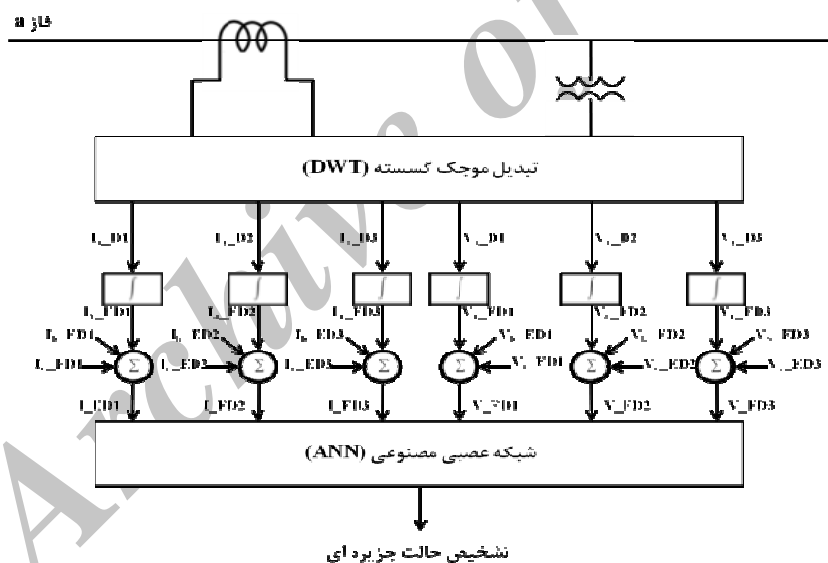
حالات جزیره‌ای شبیه سازی شده (۱۳ حالت) شامل موارد زیر است:

ضرایب موجک روی یک پنجره زمانی  $s/0.1$  به دست می‌آید. به علت استفاده از یک پنجره متحرک در تحلیل، اطلاعات حالت گذرا حفظ می‌شود. طول پنجره زمانی پس از بررسی‌های اولیه به صورت یک مصالحه بین دقت و زمان پاسخ به دست آمده است. در هر سطح تجزیه، انرژی‌های سه فاز جمع می‌شوند تا مقدار انرژی سه فاز را در یک باند فرکانسی خاص تشکیل دهند. این فرایند استخراج ویژگی در شکل (۶) نمایش داده می‌شود. برای سادگی نمایش، فقط جریان فاز  $a$  تا سطح ۳ نشان داده می‌شود. در صورتی که خروجی  $n$  سطح DWT استفاده شود، مقادیر انرژی سه فاز جریان‌ها و ولتاژها، یک فضای  $2n$  بعدی ( $n$  سطح جریان و  $n$  سطح ولتاژ) برای هر ژنراتور ایجاد می‌کند.

هنگام تحقیقات مقدماتی، با مقایسه عملکرد تشخیص جزیره‌ای با چندین نوع موجک مادر Daubechie's، موجک مادر Db1، مناسبتر تشخیص داده شد.

اغتشاش در ثانیه صفر اعمال می‌شود. اختلاف‌های قابل ملاحظه‌ای بین حوادث جزیره‌ای و غیرجزیره‌ای وجود دارد. اما یک طرح مانند آستانه ساده نمی‌تواند برای تمیز دادن بین حوادث جزیره‌ای و غیر جزیره‌ای به کار رود. در نتیجه روش مطمئنی برای تشخیص الگو نیاز است.

استفاده مستقیم ضرایب موجک، که اساساً شکل موج هستند، به عنوان ورودی‌های دسته‌بندی کننده (در این حالت، شبکه عصبی) غیر عملی است. بنابراین، انرژی ضرایب موجک در یک پنجره زمانی که حالت گذرا را شامل می‌شود، به عنوان ویژگی برای دسته‌بندی کننده استفاده می‌شود. انرژی موجک به وسیله انتگرال مربع



شکل (۶): روش استخراج ویژگی رخدادها و دسته‌بندی آنها

سطح  $i$  است. انرژی، حاصل جمع مربع ضرایب موجک است. برای نمونه، درایه  $ED_{ij}$ ، انرژی سطح  $i$ ام از فاز  $j$  است.  $[X_D]_{i \times 1}$  حاصل جمع انرژی ضرایب موجک سه فاز در سطح  $i$  است که رابطه فوق برای سیگنال جریان  $DG1$  تا سطح سه در رابطه (۸) نمایش داده شده است.

$$\begin{bmatrix} I_{DG1D1} \\ I_{DG1D2} \\ I_{DG1D3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ED_{11} & ED_{12} & ED_{13} \\ ED_{21} & ED_{22} & ED_{23} \\ ED_{31} & ED_{32} & ED_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

پس از نمونه‌گیری از ولتاژ و جریان  $DG1$  و  $DG2$ ، تبدیل موجک به این سیگنال‌ها اعمال می‌گردد که در رابطه (۷) به صورت ماتریسی نمایش داده می‌شود.

$$[X_D]_{i \times 1} = [ED]_{i \times 3} [X]_{3 \times 1} \quad (7)$$

در این رابطه  $[x]_{3 \times 1}$  سیگنال ورودی است که می‌تواند هر کدام از کمیت‌های ولتاژ یا جریان  $DG1$  یا  $DG2$  باشد. عملگر  $[ED]_{i \times 3}$  محاسبه انرژی ضرایب تبدیل موجک تا

### ۵- شبیه‌سازی و نتایج

برای شبیه‌سازی شبکه توزیع تحت مطالعه از نرم افزار DigSILENT استفاده شد. DWT مذکور با نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شد. از ۳۵۵ حالت شبیه‌سازی شده در این مقاله، در شکل ۷ یک نمونه از آنها نمایش داده می‌شود. شکل موج ولتاژ و جریان DG1 در شکل (۷-الف) و تبدیل موجک سطوح اول تا سوم آنها به ترتیب در شکل‌های (۷-ب) تا (۷-د) در زمان باز شدن کلیدهای قدرت B2 و B3 پس از وقوع یک خطای ۳ فاز در شین BB2 و در ساختاری که S1 و S2 باز هستند، نشان داده می‌شود.

برای دستیابی به سطح تبدیل موجک مناسب که از نظر سه معیار دقت، سرعت و هزینه محاسباتی قابل قبول باشد، ضریب موجک سیگنال‌ها تا سطح نهم بررسی شد. نمودار دقت دو طرح در سطوح اول تا نهم ضرایب موجک در شکل (۸) نمایش داده شده است.

مشابه همین عبارت برای ولتاژ DG1 و  $\begin{pmatrix} V_{DG1-D1} \\ V_{DG1-D2} \\ V_{DG1-D3} \end{pmatrix}$  و جریان DG2 و  $\begin{pmatrix} I_{DG2-D1} \\ I_{DG2-D2} \\ I_{DG2-D3} \end{pmatrix}$  ولتاژ DG2 و  $\begin{pmatrix} V_{DG2-D1} \\ V_{DG2-D2} \\ V_{DG2-D3} \end{pmatrix}$  به دست می‌آید.

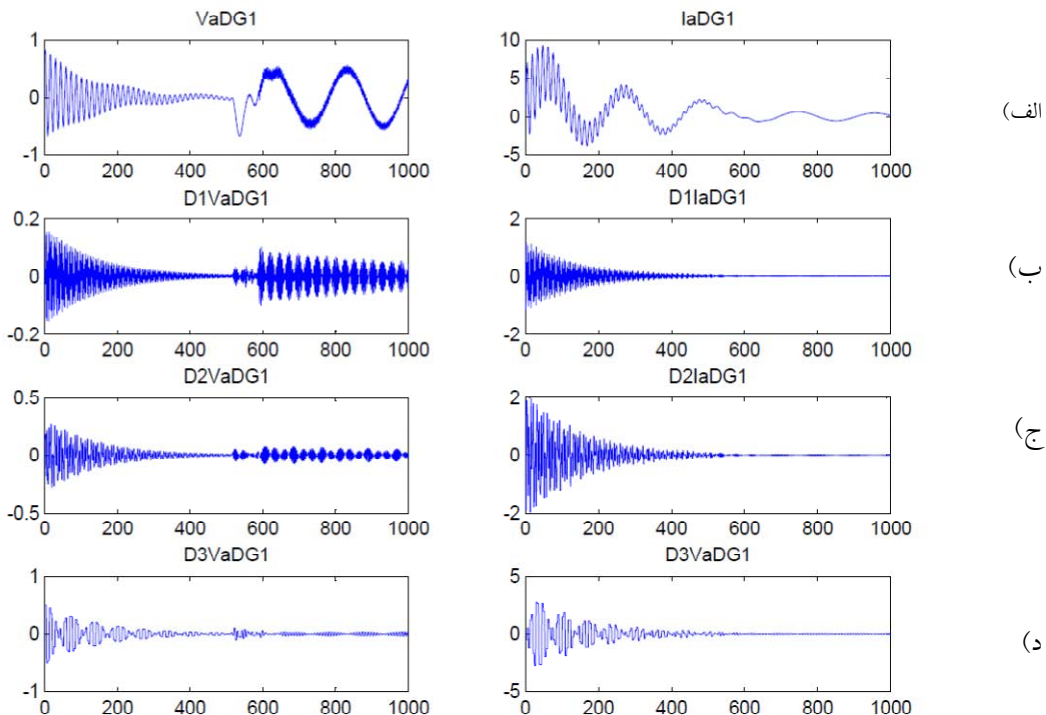
دو طرح مختلف برای الگوریتم پیشنهادی بررسی و آزمایش شده است:

طرح اول: رله اختصاصی

در این طرح برای DG1 (ژنراتور القایی) و DG2 (ژنراتور سنکرون) رله‌های مجزا اختصاص می‌یابند که هرکدام به طور مستقل با ولتاژها و جریان‌های DG متناظر خود آموزش و آزمایش می‌شوند.

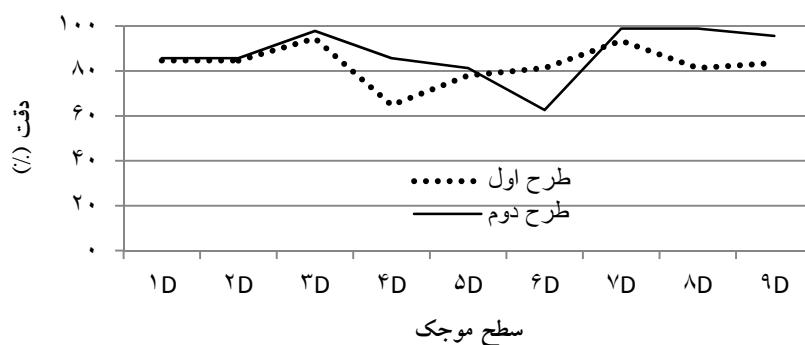
طرح دوم: رله عمومی

با استفاده از سیگنال‌های ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده در دو ژنراتور (DG1 و DG2) یک رله عمومی م مشابه برای هر دو DG طراحی می‌شود. ایده مربوط به طرح عمومی آن است که یک رله به‌گونه‌ای آموزش داده شود که قابل استفاده برای هر دو DG باشد.



شکل (۷): (الف) شکل موج ولتاژ و جریان DG1 (ب، ج و د) تبدیل موجک سطوح اول تا سوم آنها





شکل (۸): نمودار دقت دو طرح در ضرایب موجک ۱ تا ۹

جدول (۲): دقت (%) طرح‌های مورد مطالعه تا سطح سوم

سطح	طرح اول	طرح دوم
D1	۸۴/۶	۸۵/۷
D2	۸۴/۶	۸۵/۷
D3	۹۴/۵	۹۷/۸

ایرادی که می‌توان به طرح دوم علی‌رغم دقت بالا در مقایسه با طرح اول گرفت، این است که دو حالتی که اشتباه تشخیص داده شده، حالت جزیره‌ای بوده است که این عدم تشخیص جزیره، خطرات جدی را برای مصرف کننده، شرکت برق و DG خواهد داشت.

در جدول (۳) تعداد خطای طرح‌های اول و دوم مبتنی بر سطح سه بر حسب حالات مختلف بهره‌برداری نمایش داده شده است.

جدول (۳): تعداد تشخیص‌های نادرست در حالات مختلف

## بهره‌برداری

طرح دوم	طرح اول	ساختار شبکه
۱	۳	تعادل توانی
۰	۰	S1 و S2 باز
۰	۰	S1 بسته و S2 باز
۱	۱	S1 باز و S2 بسته
۰	۱	S1 و S2 بسته
۲	۵	مجموع

در جدول (۱) متوسط دقت دو طرح مختلف نمایش داده می‌شود. همان‌گونه که از این جدول مشاهده می‌شود، در مجموع طرح دوم در تمامی سطوح بجز سطح ششم از دقت بهتری برخوردار است.

جدول (۱): متوسط دقت طرح‌های اول و دوم

طرح	طرح اول	طرح دوم
متوسط دقت	۸۲/۹	۸۸

با در نظر گرفتن سه معیار دقت، سرعت و هزینه محاسباتی و مقایسه دقت سطوح مختلف با دقت متوسط سطح اول تا نهم، مشخص گردید که سطح سوم مناسبترین سطح است.

دقت هر دو طرح تا سطح سوم تبدیل موجک در جدول (۲) ارائه شده است. برای هر طرحی، دقت مربوطه با تقسیم حالات صحیح بر کل حالت‌ها به دست می‌آید. طرح اول در صورتی در تشخیص رخداد، موفق قلمداد می‌شود که هر دو DG پدیده مربوطه را درست تشخیص داده باشند. این نکته می‌تواند توجیهی برای کاهش دقت طرح اول نسبت به طرح دوم باشد. در صورتی که در مرجع [۱۴] به اشتباه برای هر DG جداگانه‌ای محاسبه شده و به این نکته توجهی نداشته است.

## ۶- مقایسه و بحث بر روی نتایج

در مراجع قبلی [۳-۶، ۱۴] کمترین سطح مورد استفاده تبدیل موجک، سطوح چهارم یا پنجم حتی هفتم بوده است، در صورتی که در روش پیشنهادی تنها تا سطح سوم تبدیل موجک استفاده شده است که این امر باعث کاهش محاسبات و افزایش سرعت رله پیشنهادی می‌گردد.

الگوریتم پیشنهادی، با انتخاب تنها سه سطح از تبدیل موجک توانست دقتی نزدیک ۹۸ درصد را ارائه دهد، در حالی که روش هوشمند ارائه شده در مرجع [۶] با وجود به کارگیری مجموعه پیچیده‌ای از ویژگی‌ها توانسته بود به دقت ۸۳/۳۳ درصد دست یابد.

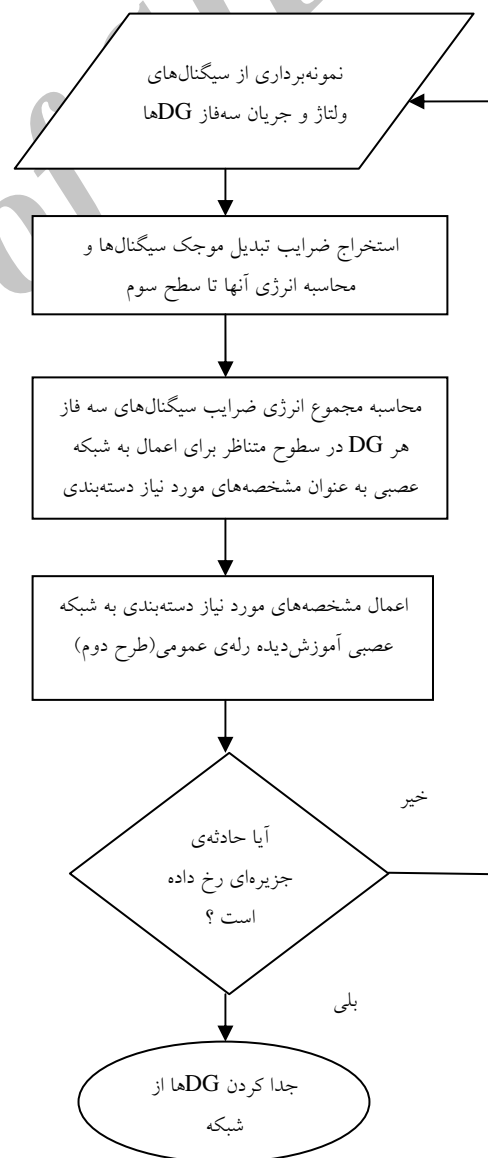
دقت روش پیشنهادی به ظاهر حدود ۱ درصد از دقت مرجع [۱۴] کمتر است. این موضوع به این علت است که الگوریتم پیشنهادی پنج حالت از ساختارهای مختلف بهره‌برداری را در نظر گرفته است، در صورتی که مرجع [۱۴] فقط به دو حالت اکتفا نموده است. علاوه بر این، در روش پیشنهادی، تعریف تشخیص صحیح جزیره منوط به درست بودن تشخیص هر دو DG می‌باشد در حالی که در مرجع [۱۴]، تشخیص صحیح الگوریتم منوط به تشخیص تنها یک DG است، که پیش از این در همین بخش توضیح داده شد.

چندین روش پسیو، از جمله نرخ تغییر فرکانس (ROCOF) [۱۷]، انتقال بردار ولتاژ (VVS) [۱۸]، اضافه/کاهش ولتاژ [۱۹]، اضافه/کاهش فرکانس [۱۹] و رله مبتنی بر دسته‌بندی کننده تصمیم درختی (DT) [۱۴، ۲۰] که بر روی سیستم تحت مطالعه این مقاله (CIGRE) کار کرده‌اند، در مرجع [۲۰] با یکدیگر مقایسه شده‌اند که در جدول (۴) به منظور بیان خلاصه، فقط به ذکر حداکثر دقت از بین دقت‌های مطرح شده برای DG‌های مختلف بسنده می‌شود. همان طور که مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی بیشترین دقت و در نتیجه، قابلیت اطمینان بالاتری نسبت به سایر روش‌های پسیو دارد.

همان طور که جدول ۳ نشان می‌دهد، طرح دوم با آنکه توانسته است نسبت به طرح اول مجموع تعداد تشخیص‌های نادرست را از ۵ به ۲ (۶۰٪) کاهش دهد، علاوه بر این، تعداد تشخیص‌های نادرست در حالت تعادل توانی را (که اکثر رله‌ها در این حالت دچار اشتباه می‌شوند) نیز توانسته است از ۳ به ۱ (۶۶٪) کاهش دهد.

نتایج ارائه‌شده قبلی نشان داد که طرح دوم قادر است دقت بالاتری در تعیین جزیره‌ای شدن ارائه دهد.

با توجه به توضیحات و نتایج حاصل، فلوجارت الگوریتم رله پیشنهادی در شکل (۹) ارائه می‌گردد:



شکل (۹): فلوجارت الگوریتم پیشنهادی

## مراجع

- [1] Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std. 1547-2003, 2003.
- [2] H. H. Zeineldin, E. F. El-Saadany, and M. M. A. Salama, "Distributed generation micro-grid operation: Control & protection" in Proc. Power Systems Conf.: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006, pp. 105–111.
- [3] Y.-H. Liy, T.-S. Luor, S.-J. Huang, and J.-M. Lin, "Method and System for Detecting Stand-Alone Operation of a Distributed Generating System" U.S. Patent 7 342 758, Mar. 2008.
- [4] C.-T. Hsieh, J.-M. Lin, and S.-J. Huang, "Enhancement of islanding-detection of distributed generation systems via wavelet transform-based approaches" Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 30, no. 10, pp. 575–580, Dec. 2008.
- [5] A. Pigazo, V. M. Moreno, M. Liserre, and A. Dell'Aquila, "Wavelet based islanding detection algorithm for single-phase PV distributed generation systems," in Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics, Vigo, Spain, pp. 2409–2413.
- [6] K. El-Arroudi, G. Joós, I. Kamwa, and D. T. McGillis, "Intelligent based approach to islanding detection in distributed generation" IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 2, pp. 828–835, Apr. 2007.
- [7] N. W. A. Lidula, N. Perera, and A. D. Rajapakse, "Investigation of a fast islanding detection methodology using transient signals" in Proc. IEEE Power Energy Soc. General Meet., 2009, pp. 1–6.
- [8] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.
- [9] A. Graps, "An introduction to wavelets," Comput. Sci. Eng., vol. 2, no. 2, pp. 50–61, Jun. 1995.
- [10] C. H. Kim and R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems—Part 1: General introduction to the wavelet transforms," IEEE Power Eng. J., vol. 14, no. 2, pp. 81–87, Apr. 2000.
- [11] C. H. Kim and R. Aggarwal, "Wavelet transforms in power systems—Part 2: Examples of application to actual power system transients," IEEE Power Eng. J., vol. 15, no. 4, pp. 193–202, Apr. 2000.
- [12] H.A. Darwish, M. H. Farouk, A.-M. I. Taalab, and N.M. Mansour, "Investigation of real-time implementation of DSP-based dwt for power system protection," in Proc. IEEE

جدول (۴): مقایسه دقت چندین رله تشخیص جزیره پسیو

حد اکثر دقت تشخیص (درصد)	رله تشخیص جزیره
۷۸/۸۱	اضافه/کاهش ولتاژ
۹۰/۲۴	اضافه/کاهش فرکانس
۷۴/۰۵	(VVS) انتقال بردار ولتاژ
۹۳/۸۱	(ROCOF) نرخ تغییر فرکانس
۹۶/۴۳	رله مبتنی بر دسته‌بندی کننده DT
۹۷/۸	رله پیشنهادی

## ۷- نتیجه گیری

یک روش تشخیص جزیره‌ای سریع و مطمئن براساس انرژی ضرایب موجک سیگنال‌های گذرا ارائه شد. یک دسته‌بندی کننده شبکه عصبی آموزش دیده شده، قادر به تشخیص موفقیت آمیز رخداد های گذرای تولید شده به صورت "جزیره ای" و "غیر جزیره ای" با استفاده از انرژی وابسته به ضرایب موجک است.

رله پیشنهادی در پنج حالت از بهره‌برداری شبکه که در واقع تمام حالات ممکن آن را پوشش می‌دهد، ارزیابی شده است. در این مقاله دو طرح مختلف، بررسی شدند. در طرح اول، رله هر DG با سیگنال‌های DG متناظر خود آموزش و آزمایش شد، اما در طرح دوم، رله هر DG با سیگنال‌های هر دو DG آموزش و آزمایش شدند که در مجموع، طرح دوم، رله موفق تری بود.

نتایج الگوریتم پیشنهادی با نتایج روش‌های پسیو رایج مقایسه شد. الگوریتم پیشنهادی توانست دقتی نزدیک به ۹۸ درصد را ارائه دهد که با مقایسه مشخص گردید که نسبت به رله‌های دیگر دقیق تر است. علاوه بر این، با انتخاب تنها سه سطح از تبدیل موجک به علت استفاده از سطوح کمتری نسبت به مقاله‌های قبلی، سریع تر نیز هست. با توجه به زمان نمونه برداری که برابر ۰/۰۱ ثانیه است، برای تمامی حالات تست، زمان پاسخ رله حدود نیم سیکل تخمین زده می‌شود.

زیرنویس‌ها

- 
- <sup>1</sup> Distributed Generation (DG)
  - <sup>2</sup> Microgrid
  - <sup>3</sup> Support Vector Machines
  - <sup>4</sup> Decision-Tree(DT)
  - <sup>5</sup> Non Stationary
  - <sup>6</sup> Discrete Wavelet Transform
  - <sup>7</sup> Windowed Fourier Transform
  - <sup>8</sup> Mean of Squared Errors(MSE)
  - <sup>9</sup> Adaption Learning Function
  - <sup>10</sup> Gradient Descent
  - <sup>11</sup> Gradient Descent with Momentum
  - <sup>12</sup> Momentum Constant
  - <sup>13</sup> Learning Rate(LR)
  - <sup>14</sup> Epoch
  - <sup>15</sup> Rate Of Change Of Frequency(ROCOF)
  - <sup>16</sup> Voltage Vector Shift(VVS)
  - <sup>17</sup> Over/Under Voltage
  - <sup>18</sup> Over/Under Frequency
  - <sup>19</sup> Decision Tree Classifier

Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf. Exhibit., 2005/2006, pp. 1258–1263.

[13] CIGRE C6.04.02 Task Force, Benchmark modeling and simulation for analysis, design, and validation of distributed energy systems. Sep. 2006.

[14] N. W. A. Lidula, A. D. Rajapakse, "A Pattern Recognition Approach for Detecting Power Islands Using Transient Signals—Part I: Design and Implementation" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 4, OCTOBER 2010, pp.3070-3077.

[15] N. Perera and A. D. Rajapakse, "Rapid isolation of faults in power networks with distributed generators," M.Sc. dissertation, Univ. Manitoba, Winnipeg, MB, Canada, May 2007.

[16] N. W. A. Lidula, A. D. Rajapakse, "Fast and Reliable Detection of Power Islands Using Transient Signals", Fourth International Conference on Industrial and Information Systems, ICIS 2009, 28-31 December 2009, Sri Lanka

[17] Vieira J.C.M., Freitas W., Xu W., Morelato A.: "Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region", IEEE Trans. Power Delivery, 2006, 21, (4), pp. 1878–1884

[18] Singam B., Huil.Y.: "Assessing SMS and PJD schemes of anti-islanding with varying quality factor". IEEE Power and Energy Conf., November 2006, pp. 196–201

[19] Freitas W., XU W., Affonso C.M., Huang Z.: "Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications", IEEE Trans. Power Delivery, 2005, 20, (2), pp. 1315–1324

[20] N. W. A. Lidula, A. D. Rajapakse, "A Pattern Recognition Approach for Detecting Power Islands Using Transient Signals—Part II: Performance Evaluation" IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, this article has been accepted for inclusion in a future issue of this journal. 2012 IEEE Xplore Digital Library

[21] Laurene V. Fausett "Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms And Applications", 1993 .