

یک روش بهینه برای تعیین وضعیت اتصال ریزشبهه به شبکه سراسری با استفاده از اطلاعات محلی

نادر هاتفی ترشیزی^۱، دانشجوی دکتری؛ حمیدرضا نجفی^۲، دانشیار؛ عباس صابری نوقایی^۳، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- n.hatefi@birjand.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- h.r.najafi@birjand.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه بیرجند- بیرجند- ایران- a.saberi@birjand.ac.ir

چکیده: به منظور عملکرد مناسب سیستم کنترل و حفاظت ریزشبهه، لازم است تغییر وضعیت اتصال ریزشبهه به شبکه سراسری در کمترین زمان ممکن شناسایی شود. در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی به منظور تعیین پارامترهای ورودی روش کلاسه‌بندی به کمک اطلاعات محلی پیشنهاد شده است. هدف مسئله بهینه‌سازی، حداقل کردن زمان تشخیص و افزایش دقت تشخیص است. همچنین در روش کلاسه‌بندی سه حالت وقوع جزیره، اتصال مجدد به شبکه و سایر رخدادها در نظر گرفته شده است. تابع هدف این مسئله به صورت مجموع وزن دار ضریب زمان و خطای تشخیص رله تعریف شده است. با توجه به این که ورودی‌های مسئله تشخیص می‌توانند پارامترهای مختلف شبکه مانند فرکانس، ولتاژ، جریان، توان و یا مؤلفه‌های توالی آن‌ها و یا نرخ تغییرات آن‌ها باشند، متغیرهای مسئله بهینه‌سازی، تعداد و نوع پارامترهای ورودی مسئله کلاسه‌بندی در نظر گرفته شده است. از الگوریتم ژنتیک برای حل این مسئله بهینه‌سازی و از روش ماشین بردار پشتیبان برای کلاسه‌بندی استفاده شده است. به منظور بررسی صحت روش پیشنهادی، حالات مختلفی از شرایط بهره‌برداری ریزشبهه در نظر گرفته شده و در هر حالت، رخدادهای متفاوتی مدل‌سازی شده‌اند. مقایسه نتایج حاصله با نتایج سایر مقالات برتری روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: اتصال مجدد، اطلاعات محلی، ماشین بردار پشتیبان، تشخیص جزیره‌ای، ریزشبهه، الگوریتم ژنتیک.

An Optimal Approach for Determining Microgrid State of Connection to Utility with Local Information

Nader Hatefi Torshizi¹, PhD Candidate; Hamidreza Najafi², Associate professor; Abbas Saberi noghabi¹, Assistant professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: n.hatefi@birjand.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: h.r.najafi@birjand.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran, Email: a.saberi@birjand.ac.ir

Abstract: For correct performance of protection and control systems in microgrids, the islanding conditions should be identified as soon as possible. In this paper, an optimal method is proposed to determine the input parameters of classification method by using local information. The goal of optimization is to minimize the time and maximize the precision of microgrid connection state detection. Also, in classification method, three states, i.e. islanding, reconnecting to the utility and other events are considered. The objective function of this problem is defined as summation of weighted time factor and detection error. The inputs of the islanding detection problem can be a large number of network parameters such as frequency, voltage, current, power, their sequence components or the rate of change. Consequently, the variables of the classification problem are the number and type of input parameters of the classification problem. The genetic algorithm is used to solve this optimal problem, and support vector machine is used for the classification. In order to assess the validity of the proposed method, different situations are considered for the operation of the grid, and in each case, different events are modeled. The results are compared with the methods of other papers, and the advantage of the suggested method is shown.

Keywords: Genetic algorithm, islanding detection, local information, microgrid, reconnection, support vector machine.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۳

نام نویسنده مسئول: عباس صابری نوقایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بیرجند - دانشگاه بیرجند - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه برق.

۱- مقدمه

با به کارگیری تولیدات پراکنده در شبکه‌های توزیع، این شبکه‌ها حالت مصرف‌کنندگی و غیرفعال بودن را از دست داده و به عنوان شبکه‌های توزیع فعال، شناخته می‌شوند. ریزشبکه یک سیستم قدرت کوچک شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده و بارها در سطح توزیع است. ریزشبکه دو حالت بهره‌برداری متصل به شبکه^۱ و جزیره‌ای^۲ دارد [۱]. حالت بهره‌برداری جزیره‌ای ممکن است به صورت عمدی و یا به شکل ناخواسته رخ دهد [۲].

زمانی که ریزشبکه به شبکه اصلی متصل است، ریزشبکه به تبادل اقتصادی توان با شبکه سراسری می‌پردازد. در نتیجه، بارهای درون ریزشبکه، توسط منابع تولید پراکنده و شبکه اصلی به صورت مشترک تغذیه خواهند شد [۳]. در حالت جزیره‌ای نیز، درصدی از بارهای محلی توسط منابع تولید پراکنده تغذیه می‌شوند [۴].

با وجود مزایای متعدد در استفاده از ریزشبکه‌ها، مشکلاتی در زمینه حفاظت این شبکه در مقایسه با سیستم توزیع سنتی وجود دارد [۵]. از جمله این مشکلات می‌توان به تغییر جریان خطا در حالت اتصال به شبکه و جزیره‌ای اشاره نمود [۶-۸]. این مشکل منجر به ناهماهنگی در عملکرد رله‌های اضافه جریان در شرایط جزیره‌ای می‌شود. یک راه کار برای رفع این مشکل، استفاده از رله‌های تطبیقی است. این گونه رله‌ها، ابتدا حالت متصل به شبکه یا جزیره‌ای را تشخیص داده و سپس تنظیمات مربوط به آن حالت را فعال می‌کنند. بنابراین، رله تطبیقی باید نه تنها تغییر حالت از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای را تشخیص دهد، بلکه باید اتصال مجدد به شبکه را نیز تشخیص دهد. لذا در این مقاله، یک رله جهت تشخیص وضعیت اتصال ریزشبکه به شبکه سراسری برای رله تطبیقی پیشنهاد شده است.

روش‌های تشخیص جزیره‌ای و اتصال شبکه، با نظارت بر یک یا چند پارامتر و ارزیابی تغییرات آن‌ها، تغییر وضعیت اتصال ریزشبکه را تعیین می‌کنند. روش‌های تشخیص، براساس محل اندازه‌گیری پارامترها به دو دسته محلی^۳ و غیرمحلی^۴ تقسیم می‌شوند.

مکانیسم تشخیص در روش‌های غیرمحلی، ساده‌تر و دقیق‌تر است؛ اما به دلیل نیازمندی به سیستم‌های ارتباطی، قابلیت اطمینان کم‌تری داشته و هزینه پیاده‌سازی آن‌ها بسیار زیاد است؛ اما روش‌های محلی فقط براساس اطلاعات اندازه‌گیری شده در محل رله، وقوع جزیره یا اتصال مجدد را تشخیص می‌دهند.

برای افزایش دقت در تشخیص، باید از پارامترهایی استفاده نمود که خواص آن‌ها در صورت وقوع رخداد جزیره‌ای، تغییرات بیشتری داشته‌باشند. افزایش تعداد پارامترها برای تشخیص حالت جزیره‌ای، از یک طرف دقت تشخیص را افزایش داده و از طرف دیگر، هزینه ساخت رله و سرعت عملکرد رله را نیز افزایش می‌دهد. بنابراین، در این مقاله، تعداد پارامترهای تشخیص جزیره‌ای به نحوی بهینه تعیین می‌گردد که دقت حداکثر شده و زمان تشخیص حداقل شود.

در این مقاله، یک روش بهینه برای تشخیص وضعیت اتصال ریزشبکه به شبکه سراسری پیشنهاد شده است. در این روش، یک مسئله بهینه‌سازی با هدف کمینه‌سازی خطای تشخیص، حجم محاسبات و پردازش‌های رله تعریف گردیده است. به این منظور، شاخص‌هایی برای تعیین دقت تشخیص و میزان پردازش‌های لازم براساس تعداد پارامترها پیشنهاد شده است. در الگوریتم رله، وضعیت اتصال ریزشبکه به کمک روش کلاسه‌بندی ماشین بردار پشتیبان (SVM)^۵ تشخیص داده می‌شود. حداقل تعداد و نوع پارامترهای ورودی روش کلاسه‌بندی، توسط روش بهینه‌سازی مشخص می‌شود. مسئله بهینه‌سازی ایجاد شده، یک مسئله غیرخطی دوهدفه است که به کمک الگوریتم ژنتیک قابل حل است.

به منظور بررسی دقت روش کلاسه‌بندی، شرایط بهره‌برداری مختلف، قبل و بعد از وقوع حالت جزیره‌ای و همچنین، رخداد‌های دیگری مانند ورود و خروج بارهای مختلف و منابع تولید پراکنده، وقوع خطا و ... شبیه‌سازی شده است.

در این مقاله، علاوه بر تشخیص وقوع حالت جزیره‌ای، اتصال مجدد ریزشبکه به شبکه اصلی نیز شناسایی می‌شود. بنابراین، رله‌های تطبیقی موجود در شبکه در هر لحظه می‌توانند وضعیت اتصال ریزشبکه را تشخیص داده و تنظیمات مربوطه را فعال نمایند.

۲- انواع روش‌های محلی تشخیص حالت جزیره‌ای

در این روش‌ها، با اندازه‌گیری محلی برخی پارامترهای حساس در سیستم و مقایسه پیوسته آن‌ها، وضعیت اتصال ریزشبکه تشخیص داده می‌شود. این گونه روش‌ها نیز براساس مکانیسم عملکردشان به دو دسته روش‌های فعال^۶ و روش‌های غیرفعال^۷ تقسیم می‌شوند.

در روش‌های غیرفعال، تغییر شدید در اندازه برخی از پارامترهای سنجش شده در شین PCC و عبور از حدود مرزی از پیش تعیین شده، به عنوان شاخصی برای تشخیص وقوع یا عدم وقوع جزیره استفاده می‌شود [۹]. در [۱۰] از مقایسه نوسان فرکانس با حدود آستانه از پیش تعیین شده برای تشخیص وقوع جزیره استفاده شده است؛ اما در روش ارائه شده در [۱۱، ۱۲] اگر اندازه نوسانات فرکانس منبع تولید پراکنده بزرگ‌تر از صفر شود و در این شرایط، ضریب میرایی از یک حد آستانه فراتر رود، وقوع جزیره قطعی می‌شود. در [۱۳] از نرخ تغییرات فرکانس (ROCOF)^۸، در [۱۴] از تغییر فاز به وجود آمده در ولتاژ شین PCC (ROCOVPA)^۹ و در [۱۵] تغییرات اختلاف زاویه بین مؤلفه‌های توالی مثبت فاز ولتاژ و جریان استفاده شده است. نقاط ضعف این روش‌ها، محدودیت کاربرد، فقط برای IBDGها و نیاز به شبیه‌سازی‌های گسترده و مدل‌سازی انواع حالات برای تعیین دقیق مقادیر آستانه است. همچنین، پارامترهای دیگری از قبیل دامنه هارمونیک پنجم [۱۶]، حداقل مربعات خطا در یک چرخه کامل (FCLES)^{۱۰} [۱۷]، تخمین ولتاژ و تخمین مقاومت و راکتانس به کمک دو نمونه پیاپی اندازه‌گیری شده به ترتیب در [۱۸، ۱۹]، نرخ تغییر جریان‌های توالی مثبت

توان راکتیو (کارکرد منبع تولید پراکنده در ضریب قدرت‌های غیرواحد) است.

در دسته‌ای از روش‌های فعال موسوم به انحراف فرکانس اکتیو (AFD)^{۱۳}، اغتشاش (هارمونیک جریان) به جریان خروجی مبدل‌های منابع تولید پراکنده در لحظه‌ای که شکل موج جریان صفر می‌شود، تزریق می‌گردد. این اغتشاش منجر به انحراف زاویه فاز مؤلفه اصلی جریان می‌شود [۲۹]. در [۳۰] از چهار پارامتر تغییرات ولتاژ، نرخ تغییرات ولتاژ، نسبت ولتاژ توالی مثبت به ولتاژ توالی منفی و هارمونیک ولتاژ برای تشخیص استفاده شده است. همچنین در مراجع [۳۱، ۳۲] یک روش فعال برای تشخیص وقوع جزیره با استفاده انحراف فرکانس اکتیو موسوم به AFDPF^{۱۴} ارائه شده است. در سرعت تشخیص وقوع جزیره و میزان کاهش NDZ در روش فوق، با میزان انحراف در زاویه فاز جریان (دامنه اغتشاش تزریقی) وابسته است.

در [۳۳] نیز از روش ترکیبی شامل تزریق اغتشاش و اندازه‌گیری تغییرات انرژی سیگنال‌های سنجش شده از فرکانس، زاویه، توان اکتیو، توان راکتیو، هارمونیک ولتاژ و جریان، ولتاژ توالی d و q جهت تشخیص استفاده شده است.

در مجموع، مزایای عمده روش‌های فعال، عدم وابستگی به نامتعادلی توان در فرآیند شناسایی وقوع جزیره و کاهش نواحی غیرقابل تشخیص می‌باشند؛ اما مهم‌ترین مشکل روش‌های فعال عبارت‌اند از:

- کاهش کیفیت توان
- افزایش زمان تشخیص وقوع جزیره‌ای
- وابستگی کارایی روش به دامنه اغتشاش تزریقی و حدود آستانه ازپیش‌تعیین شده.

با توجه به این که پس از وقوع حالت جزیره‌ای، مجدداً ریزشکبه به شبکه اصلی متصل می‌شود، در این مقاله علاوه بر تشخیص وقوع جزیره‌ای، حالت اتصال به شبکه سراسری نیز تشخیص داده شده است.

۳- سیستم مورد مطالعه

برای پیاده‌سازی روش پیشنهادی، از یک ریزشکبه دارای منابع تولید پراکنده (شامل IBDG و SDG) استفاده شده که اطلاعات آن در [۳۴] موجود است.

این ریزشکبه دارای دو منبع تولید پراکنده سنکرون (DG1 و DG2) مجهز به سیستم کنترل فرکانس و یک مزرعه بادی دارای مبدل الکترونیکی (DG3) است. همچنین، مزرعه بادی DG4 از نوع DFIG در نظر گرفته شده است. ریزشکبه مذکور قابلیت تغییر ساختار به نوع حلقوی توسط کلیدهای CB_LOOP1 و CB_LOOP2 را داشته و توسط شین PCC به شبکه سراسری متصل است.

این ریزشکبه در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است. رله R-1 در ابتدای خط DL-1 به‌عنوان یک رله نمونه برای بررسی و مقایسه روش‌ها در نظر گرفته می‌شود.

(ROCPSTI)^{۱۱} و منفی (ROCNSI)^{۱۲} [۲۰] برای تشخیص جزیره‌ای استفاده شده است.

در [۲۱، ۲۲] با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی و خواص استخراج شده از سیگنال‌های انرژی ولتاژ و جریان نمونه‌برداری شده در محل منبع، وقوع جزیره‌ای شناسایی شده است. مشکلات عمده این مرجع، نیاز به حجم زیادی از پردازش سیگنال‌ها و نمونه‌برداری فقط در محل رله می‌باشند.

مشکلات روش‌های غیرفعال عبارت‌اند از:

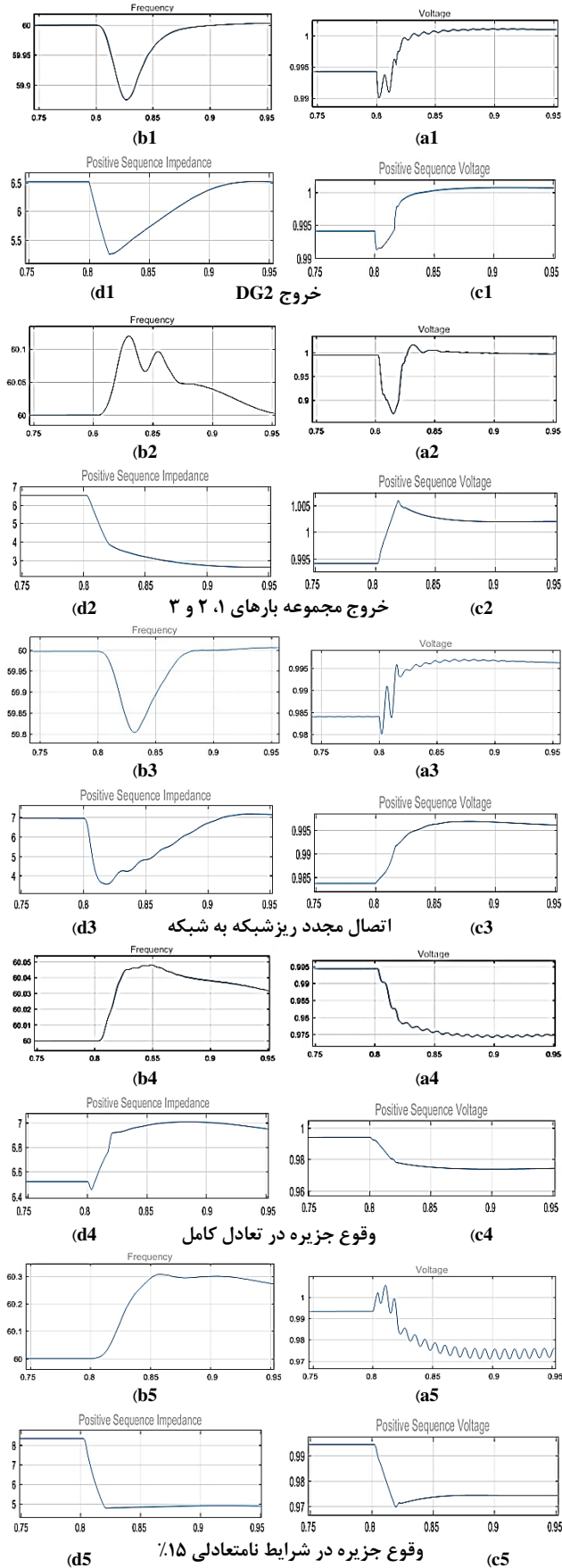
- وجود نواحی غیرقابل تشخیص (NDZ)
- اکثر روش‌های غیرفعال پیشنهادی برای تشخیص وقوع جزیره، فقط برای یک نوع خاصی از منابع تولید پراکنده (SDG یا IBDG) مناسب می‌باشند.
- تعیین مقدار آستانه مناسب برای تشخیص جزیره‌ای

در روش‌های فعال، با تزریق هدفمند اغتشاش‌های کوچک به ریزشکبه (همانند هارمونیک‌های جریان، مؤلفه‌های توالی منفی، توان اکتیو و راکتیو و ...) نوسانات ایجاد شده در پارامترهای سیستم، نظارت و اندازه‌گیری می‌شود. اگر دامنه این نوسانات از مقادیر مشخص شده عبور کنند، وقوع جزیره شناسایی می‌شود. در صورت اتصال ریزشکبه‌ها به شبکه سراسری، به‌دلیل سختی سیستم، دامنه نوسان‌های ایجاد شده در پارامترهای سیستم بسیار محدود است؛ اما در شرایط وقوع جزیره به دلیل کاهش شدید سختی سیستم، دامنه این نوسان‌ها افزایش خواهند یافت. به‌عبارتی، نحوه پاسخ سیستم به این اغتشاش‌ها، شاخصی برای تشخیص وقوع جزیره است [۲۳].

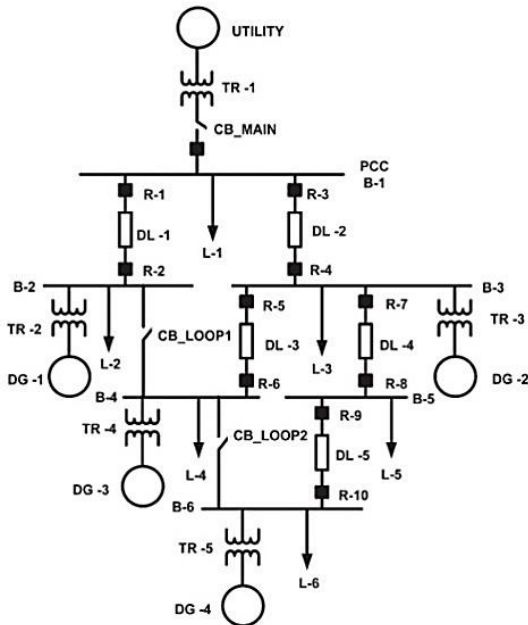
از طرف دیگر، دامنه اغتشاش‌ها نباید به‌حدی باشد که مشکلات کیفیت توان و ... ایجاد شود. به‌دلیل وجود سیستم‌های کنترلی استفاده شده در IBDG، روش‌های فعال به‌سادگی قابل پیاده‌سازی بر این دسته از منابع تولید پراکنده می‌باشند. اغتشاش موردنظر می‌تواند افزایش یا کاهش دامنه جریان خروجی IBDG‌ها باشد [۲۴].

در مرجع [۲۵] براساس نسبت ولتاژ شین PCC به ولتاژ شبکه سراسری، حداقل و حداکثر جریان اغتشاش موردنیاز محاسبه شده و به سیستم تزریق می‌شود. اگر دامنه ولتاژ در محدوده غیرمجاز قرار گیرد، وقوع جزیره شناسایی می‌شود.

در [۲۶] با تزریق جریان توالی منفی و اندازه‌گیری تغییرات فرکانس ولتاژ استاتور توربین بادی به‌عنوان شاخص تشخیص شرایط جزیره‌ای استفاده شده است. مهم‌ترین محدودیت‌های این روش، قابلیت پیاده‌سازی به ریزشکبه‌های دارای DFIG بوده و نیاز به اطلاعات اندازه‌گیری شده در محل منبع است. در [۲۷] و [۲۸] از ایجاد نامتعادلی توان (افزایش یا کاهش هم‌جهت هر دو توان اکتیو و راکتیو) استفاده شده که مزیت آن‌ها، حذف NDZ و افزایش سرعت تشخیص وقوع جزیره نسبت به سایر روش‌های فعال است؛ اما مهم‌ترین عیب این روش، محدودیت کاربرد فقط برای ریزشکبه‌های دارای IBDG با قابلیت کنترل



شکل ۲: تأثیر رخداد های مختلف بر فرکانس و ولتاژ از دیدگاه R-1



شکل ۱: ساختار ریزشکه IEC دارای انواع منابع تولید پراکنده [۳۴]

۴- تأثیر وقوع رخداد بر پارامترهای ریزشکه

در این قسمت، تأثیر وقوع رخداد حالت جزیره‌ای و رخداد اتصال مجدد ریزشکه با سایر رخدادها مانند خروج بار و خروج DG بر پارامترهای ریزشکه شامل ولتاژ فاز، فرکانس، توان اکتیو و راکتیو، ولتاژ و امپدانس توالی مثبت در شرایط بهره‌برداری متفاوت، بررسی می‌شود. پارامترهای مختلفی به منظور تشخیص حالت جزیره‌ای ارزیابی شده است. برای مدل‌سازی رخداد جزیره‌ای، دو حالت تعادل کامل و نامتعادلی ۱۵ درصدی بین تولید و مصرف درون ریزشکه در نظر گرفته شده است.

شش رخداد شامل خروج منابع تولید پراکنده، خروج مجموعه بارهای ۱، ۲ و ۳، اتصال مجدد ریزشکه به شبکه سراسری و وقوع حالت جزیره‌ای در حالت تعادل کامل و نامتعادلی ۱۵ درصد ارزیابی گردید. در شکل ۲ قسمت‌های a, b, c و d به ترتیب تغییرات اندازه ولتاژ، فرکانس، ولتاژ و امپدانس توالی مثبت به‌ازای شش رخداد اشاره‌شده از دیدگاه رله R-1 نمایش داده شده است.

همچنین، در جدول ۱ نتایج حاصل از تغییرات ولتاژ، فرکانس، توان اکتیو و راکتیو، ولتاژ و امپدانس توالی مثبت برای این شش رخداد آورده شده است. طبق این نتایج مشاهده می‌شود که وقوع رخداد جزیره‌ای در شرایط تعادل کامل بین تولید و مصرف، نوسان فرکانسی در حدود ۰/۰۵ هرتز ایجاد می‌کند. در صورتی‌که در شرایط خروج بار و خروج DG، تغییرات فرکانس بیش‌تر از این مقدار است. در نتیجه، تشخیص جزیره‌ای تنها به‌وسیله فرکانس امکان‌پذیر نیست. این شرایط برای تغییرات ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو نیز برقرار بوده و در حالت وقوع جزیره‌ای (در شرایط تعادل کامل) تغییرات این پارامترها کم‌تر از رخداد های خروج بار و خروج منبع تولید پراکنده می‌باشند.

جدول ۲: شاخص‌های استفاده‌شده جهت تعیین وضعیت اتصال

ریزشبکه		
اندیس	نام شاخص	h
I	دامنه جریان	۰/۵
I ¹	دامنه جریان فرکانس اصلی	۱
I ³	دامنه جریان هارمونیک سوم	۱
ΔI ¹	فاز جریان فرکانس اصلی	۱
ΔI ³	فاز جریان هارمونیک سوم	۱
V	دامنه ولتاژ	۰/۵
V ¹	دامنه ولتاژ فرکانس اصلی	۱
V ³	دامنه ولتاژ هارمونیک سوم	۱
ΔV ¹	فاز ولتاژ فرکانس اصلی	۱
ΔV ³	فاز ولتاژ هارمونیک سوم	۱
THDV	اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ	۱
THDI	اعوجاج هارمونیک کل جریان	۱
PF ¹	ضریب قدرت فرکانس اصلی	۱
PF ³	ضریب قدرت هارمونیک سوم	۱
I ₊	جریان توالی مثبت	۱/۲
I ₋	جریان توالی منفی	۱/۲
I ₀	جریان توالی صفر	۱/۲
V ₊	ولتاژ توالی مثبت	۱/۲
V ₋	ولتاژ توالی منفی	۱/۲
V ₀	ولتاژ توالی صفر	۱/۲
Z ₊	امپدانس توالی مثبت	۱/۲
Z ₋	امپدانس توالی منفی	۱/۲
Z ₀	امپدانس توالی صفر	۱/۲
Z _{ph}	امپدانس فاز	۱/۲
Z _L	امپدانس خط	۱
ΔZ _{ph}	زاویه امپدانس	۱
I ₊ /I ₋	نسبت جریان توالی مثبت به منفی	۱/۲
I ₋ /I ₀	نسبت جریان توالی منفی به صفر	۱/۲
V ₊ /V ₋	نسبت ولتاژ توالی مثبت به منفی	۱/۲
V ₊ /V ₀	نسبت ولتاژ توالی مثبت به صفر	۱/۲
V ¹ /P	نسبت ولتاژ فرکانس اصلی به توان اکتیو	۱
V ¹ /Q	نسبت ولتاژ فرکانس اصلی به توان راکتیو	۱
V ¹ /f	نسبت ولتاژ فرکانس اصلی به توان راکتیو	۱
f	فرکانس	۱
P	توان اکتیو	۰/۵
Q	توان راکتیو	۰/۵
f/P	نسبت فرکانس به توان اکتیو	۱
f/Q	نسبت فرکانس به توان راکتیو	۱
P/Q	نسبت توان اکتیو به توان راکتیو	۰/۵

همچنین براساس بررسی انجام‌شده در بخش ۴، مشخص شد که تغییرات پارامترها در اثر بروز رخدادها، به شرایط ریزشبه قبل از وقوع رخدادها نیز بستگی دارد. بنابراین شرایط بهره‌برداری مختلفی مانند شعاعی یا حلقوی بودن ساختار شبکه، حضور یا عدم حضور منابع تولید پراکنده، درصد نامتعادلی بین تولید و مصرف توان، زمان وقوع رخداد و ... نیز باید در فرآیند تفکیک رخدادها بررسی شوند.

در این مقاله رخدادهای متفاوت و شرایط بهره‌برداری متفاوت برای ریزشبه که به ترتیب مطابق جدول ۳ و جدول ۴ شبیه‌سازی شده است. با

به علت بزرگ‌تر بودن تغییرات ولتاژ توالی مثبت در شرایط وقوع رخداد جزیره‌ای در هر دو وضعیت تعادل و نامتعادلی نسبت به سایر رخدادها، این پارامتر می‌تواند معیار مناسبی جهت تشخیص وقوع جزیره‌ای باشد. همچنین، با توجه به بیش‌ترین دامنه تغییرات امپدانس توالی مثبت در صورت اتصال مجدد ریزشبه به شبکه سراسری، این پارامتر می‌تواند معیار مناسبی برای تشخیص اتصال مجدد باشد.

جدول ۱: مقایسه تأثیر رخدادها مختلف بر تغییر اندازه پارامترهای

شبکه

	فرکانس	ولتاژ	توان اکتیو	توان راکتیو	توالی مثبت	امپدانس توالی مثبت
خروج بارهای ۱ تا ۳	۰/۱۳	۰/۱۵	۰/۳۵	۰/۰۷	۰/۰۱۲	۳/۹۱۸
خروج DG2	۰/۱۴	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۰۳۵	۰/۰۰۱	۱/۳
وقوع جزیره در شرایط نامتعادلی ۱۵ درصد	۰/۳۱	۰/۰۲۵	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۲۵	۳/۴۸۱
وقوع جزیره در شرایط تعادل کامل	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۰/۰۲	۰/۵۵۴
اتصال مجدد در شرایط تعادل کامل	۰/۲	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۲۷	۰/۰۱۳	۴/۲۸۷

بنابراین تشخیص وقوع حالت جزیره‌ای و اتصال مجدد ریزشبه به شبکه سراسری به کمک تغییرات تنها یک پارامتر همچون فرکانس، ولتاژ یا سایر پارامترها امکان‌پذیر نیست. حتی در شرایط تعادل توان، ترکیبی از چهار پارامتر اشاره‌شده نیز معیار مناسبی برای تشخیص وقوع جزیره‌ای نیست.

۵- معیارهای تشخیص حالت جزیره‌ای

با توجه به بررسی‌های بخش قبل و مرور پیشینه تحقیقات انجام‌شده در زمینه تشخیص حالت جزیره‌ای و اتصال مجدد به شبکه سراسری، لیست کاملی از پارامترهایی که در مقالات قبلی برای تشخیص استفاده شده، در جدول ۲ آورده شده است. ضریب h، نشان‌دهنده مدت‌زمان لازم برای انجام محاسبات پارامتر موردنظر برحسب سیکل در رله پیشنهادی است که در بخش بعدی به‌طور کامل معرفی می‌شود.

برای هر یک از پارامترهای جدول بالا، چهار ویژگی شامل حداکثر و متوسط دامنه، حداکثر و متوسط نرخ تغییرات استفاده می‌شود. در کل ۳۹ پارامتر تعریف‌شده که در مجموع ۱۵۶ معیار برای تعیین وضعیت اتصال ریزشبه پیشنهاد شده است. با توجه به تعداد زیاد پارامترها، استفاده از یک روش کلاسه‌بندی برای تفکیک حالت جزیره‌ای و اتصال مجدد به شبکه از سایر رخدادها، ضروری است.

معیارهای انتخاب‌شده برای تعیین وضعیت اتصال ریزشبه باید توانایی تفکیک رخدادهای جزیره‌ای و رخدادهای اتصال مجدد را از سایر رخدادها همچون تغییرات بار، وقوع خطا، ورود یا خروج منابع تولید پراکنده و ... را داشته‌باشند.

ریسک خطا توسط این نوع کلاسه‌بندی امکان‌پذیر است. در روش SVM با حاشیه نرم^{۱۷}، تابع هدف و قیود مسئله کلاسه‌بندی به صورت (۱) توصیف می‌شود. هر نقطه در فضای کلاسه‌بندی به صورت (\vec{x}_i, y_i) قابل‌بیان است که y_i علامت کلاس موردنظر (مثلاً ۱- و ۱) و \vec{x}_i مجموعه داده‌ها و اطلاعات موجود برای دسته‌بندی n نقطه است.

$$\max \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i y_i (\varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)) \alpha_j y_j$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$$

$$0 \leq \alpha_i \leq C, \quad \forall i \quad (1)$$

α_i بردارهای پشتیبان و C پارامتر کنترل حداکثر جریمه اعمالی به بردارهای پشتیبان نقض‌شده می‌باشند. φ تابع کرنل است که قابلیت ایجاد سطوح خطی و غیرخطی را به‌عنوان مرزهای کلاسه‌بندی، دارد. در این مقاله از روش ماشین بردار پشتیبان با تابع شعاع گوسی (۲) یا RBF^{۱۸} استفاده شده است. میزان دقت کلاسه‌بندی و کارایی این روش به مقدار دو پارامتر C و σ وابسته است.

$$\varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j) = \exp\left(-\frac{1}{2\sigma} \|x_1 - x_2\|^2\right) \quad (2)$$

اگر مقدار C خیلی بزرگ باشد، نرخ دقت دسته‌بندی در مرحله آموزش افزایش می‌یابد؛ اما دقت در مرحله ارزیابی و تشخیص، به‌شدت کاهش خواهد یافت. در صورت کوچک‌بودن مقدار ضریب جریمه، دقت در آموزش SVM نیز کاهش می‌یابد که مطلوب نیست. تأثیرگذاری مقدار σ نیز مشابه ضریب جریمه است؛ اما به‌دلیل تأثیرگذاری مستقیم بر فضای ویژگی، شدت تأثیر آن بیش‌تر است. بنابراین، انتخاب مقدار بهینه برای این دو پارامتر نیز اهمیت ویژه‌ای دارد.

در عمل برای یک رله دیجیتال علاوه بر دقت تشخیص، هزینه رله که به تعداد ورودی‌های آن وابسته است، اهمیت دارد؛ به‌عبارت‌دیگر اگر یک رله، دقت بالا اما تعداد پارامترهای ورودی زیادی داشته‌باشد، پیاده‌سازی و ساخت این رله پرهزینه بوده و اقتصادی نیست؛ بنابراین در نظر گرفتن تمامی این ۱۵۶ پارامتر به‌عنوان ورودی کلاسه‌بندی برای تعیین وضعیت اتصال ریزش‌بکه، زمان زیادی لازم داشته و عملکرد رله بسیار کند می‌گردد. به‌این‌منظور، در این مقاله دو هدف افزایش دقت و کاهش تعداد ورودی‌ها پیشنهاد شده است. الگوریتم این روش در ادامه تشریح می‌شود.

۷- الگوریتم پیشنهادی

مهم‌ترین ملاک ارزیابی روش تشخیص وضعیت اتصال ریزش‌بکه، دقت در تشخیص است. به‌این‌معنا که NDZ حداقل شود. معیار مهم دیگر، سرعت تشخیص جزیره‌ای است که باعث عملکرد سریع‌تر رله می‌گردد. برای ارزیابی دقت روش‌های کلاسه‌بندی، معیارهای متفاوتی همچون دقت دسته‌بندی [۳۶، ۴۱]، خطای دسته‌بندی، خطای تشخیص رخداد و دقت تشخیص رخداد [۴۱، ۴۲] پیشنهاد شده است.

ترکیب تمامی رخدادها و حالات بهره‌برداری، در مجموع ۱۰۹۵۹ حالت مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۲۴۰ حالت مربوط به رخدادهای جزیره‌ای، ۱۴۵ حالت مربوط به اتصال مجدد ریزش‌بکه به شبکه سراسری و ۱۰۵۷۴ حالت مربوط به سایر رخدادها است. برای هرکدام از حالات مذکور، تمامی ۳۹ پارامتر مطرح‌شده در جدول ۲ محاسبه شده و برای هرکدام از این پارامترها، حداکثر و متوسط دامنه، حداکثر و متوسط نرخ تغییرات محاسبه و ذخیره شده است.

جدول ۳: لیست رخدادهای بررسی‌شده

شماره	نوع رخداد	شماره	نوع رخداد
۱	وقوع جزیره	۱۳	۱
۲	اتصال مجدد به شبکه	۱۴	۲
۳	جلوی رله	۱۵	۳
۴	دور از رله	۱۶	۴
۵	جلوی رله	۱۷	۵
۶	دور از رله	۱۸	۶
۷	جلوی رله	۱۹	۷
۸	دور از رله	۲۰	۸
۹	۱	۲۱	۹
۱۰	۳ تا ۱	۲۲	۱۰
۱۱	۵ تا ۱	۲۳	۱۱
۱۲	شین ۵	کلیدزنی خازنی	۲۴
	راه‌اندازی موتور	شین ۵	۲۴

جدول ۴: شرایط مختلف بهره‌برداری قبل از وقوع رخدادها

شماره	شرایط	نام حالت	شماره	شرایط	نام حالت
۱	$T + \frac{1}{4f_n}$	زمان وقوع	۱۰	متعادل	درصد نامتعادلی تولید و مصرف
۲	$T - \frac{1}{4f_n}$	رخدادها (ثابته)	۱۱	+۰/۵	
۳	T		۱۲	+۰/۱۰	
۴	۰/۹۵	ضریب قدرت	۱۳	-۰/۵	
۵	۰/۸۵	بارها	۱۴	---	
۶	۰/۰۵	مقاومت خطا	۱۵	DG1	عدم‌حضور منابع تولید پراکنده
۷	۵	(اهم)	۱۶	DG2	
۸	کلید حلقه ۱: باز کلید حلقه ۲: باز	ساختار شعاعی	۱۷	DG3	
۹	کلید حلقه ۱: بسته کلید حلقه ۲: بسته	حلقوی	۱۸	DG4	

۶- روش کلاسه‌بندی SVM

روش‌های کلاسه‌بندی متنوعی برای دسته‌بندی داده‌ها با هدف تعیین وضعیت اتصال ریزش‌بکه وجود دارد. درخت تصمیم‌گیری^{۱۵} [۳۶، ۳۵]، ماشین بردارهای پشتیبان [۳۸، ۳۷]، جنگل تصادفی^{۱۶} [۳۹]، شبکه‌های عصبی [۴۰] از جمله این روش‌ها می‌باشند.

یکی از پرکاربردترین روش‌ها، ماشین بردارهای پشتیبان یا SVM است. در روش ماشین بردار پشتیبان، دسته‌بندی داده‌ها به‌نحوی انجام می‌شود که مرزهای ایجادشده بین کلاسه‌ها، حداکثر فاصله ممکن تا داده‌های هر کلاسه را داشته‌باشد. در نتیجه، بهترین تخمین‌ها با کم‌ترین

NI تعداد کل پارامترها است. مقادیر یک یا صفر K_i به ترتیب بیان گر استفاده یا عدم استفاده از شاخص نام در ورودی روش کلاسه بندی است. برای انتخاب بهترین پارامترهای جدول ۲ به منظور استفاده در الگوریتم وضعیت اتصال ریزش شبکه، در ادامه یک مسئله بهینه سازی تعریف می شود. اهداف این مسئله، حداقل شدن زمان عملکرد الگوریتم و حداقل شدن خطای الگوریتم تشخیص می باشند. به این منظور، تابع هدف روش پیشنهادی در (۵) به صورت مجموع وزنی دو ضریب مذکور تعریف شده است.

$$OF = \alpha \times ER + \beta \times PTL \quad (5)$$

α و β به ترتیب ضرایب وزنی مربوط به خطا و زمان محاسبات الگوریتم تشخیص می باشند. مقدار ضرایب مذکور عددی بین ۰ تا ۱ است که مجموع آن ها برابر ۱ است.

بدیهی است با افزایش α همگرایی حل مسئله به نحوی پیش می رود که تعداد ورودی ها افزایش یافته و خطا حداقل گردد. در مقابل، با افزایش β ، روند هم گرایی مسئله هم سو با کاهش تعداد پارامترها است. همچنین، پارامترهایی انتخاب می گردند که نیاز به زمان محاسبه و پردازش کم تر داشته باشند.

در نتیجه، برای ضرایب وزنی متفاوت، پاسخ های متفاوتی به دست آمده که طراح رله با توجه به اهمیتی که برای دقت و هزینه قائل است، می تواند بهترین طرح را انتخاب کند. بنابراین، انتخاب اندازه α و β به طراح سیستم حفاظتی بستگی دارد.

مسئله بهینه سازی ایجاد شده را با روش های مختلفی می توان حل نمود؛ اما در این مقاله با اعمال ضرایب وزنی مسئله به یک مسئله تک هدفه تبدیل شده و سپس با تغییر ضرایب وزنی، جبهه پارتو به دست آمده است.

به منظور حفظ حد مشخصی از سرعت و دقت در روش تشخیص جزیره ای، به ترتیب قیود (۶) به مسئله اضافه شده است. ε حداکثر خطای قابل قبول، T_0 حداکثر زمان مجاز برای تشخیص می باشند.

$$ER \leq \varepsilon \quad (6)$$

$$PTL \leq T_0 \quad (7)$$

قید (۸) یک قید کنترلی برای محدود سازی تعداد پارامترهای ورودی رله با هدف کاهش حجم پردازنده و کاهش هزینه ساخت و پیاده سازی رله لحاظ شده است. b_0 حداکثر تعداد پارامترهای ورودی SVM و عددی بین ۱ تا NI است. در صورتی که b_0 برابر NI باشد، قید (۸) از مسئله بهینه سازی حذف می شود.

$$\sum_{i=1}^{NI} K_i \leq b_0 \quad (8)$$

متغیرهای این مسئله بهینه سازی شامل تعداد و نوع پارامترهای ورودی کلاسه بندی و همچنین ضرایب C و σ در روش کلاسه بندی SVM است. برای حل این مسئله بهینه سازی غیرخطی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده که ساختار کروموزوم های پیشنهادی آن در شکل ۳ نشان داده شده است.

در این مقاله از معیار خطای تشخیص مطابق (۳)، برای ارزیابی دقت تشخیص استفاده شده است. در تعیین وضعیت اتصال ریزش شبکه به شبکه سراسری، سه فضای حالت شامل (۱) رخدادهای جزیره ای (۲) رخدادهای اتصال مجدد به شبکه و (۳) سایر رخدادها در نظر گرفته می شود. سایر رخدادها شامل رخدادهایی همانند وقوع انواع خطاها، ورود و خروج بارها، ورود و خروج منابع، راه اندازی موتورها و ... است. خطا تشخیص هر یک از این سه فضا به صورت مجزا در ضریب ER آورده شده است.

$$ER = \frac{F_{Istand}}{A_{Istand}} + \frac{F_{Connected}}{A_{Connected}} + \frac{F_{Others}}{A_{Others}} \quad (3)$$

که در این رابطه:

F_{Istand} : تعداد رخدادهای جزیره ای که وقوع جزیره ای تشخیص داده نشده اند.

$F_{Connected}$: تعداد رخدادهای اتصال مجدد ریزش شبکه به شبکه سراسری که به درستی تشخیص داده نشده اند.

F_{Others} : تعداد سایر رخدادهایی که به اشتباه، رخداد جزیره ای یا اتصال مجدد به شبکه تشخیص داده شده اند.

A_{Istand} ، $A_{Connected}$ و A_{Others} به ترتیب تعداد کل رخدادهای جزیره ای، رخداد اتصال مجدد به شبکه و سایر رخدادها می باشند.

در محل رله معمولاً جریان و ولتاژ توسط CT و PT اندازه گیری می شود. این داده ها به صورت خام بوده و برای اعمال به روش کلاسه بندی باید پردازش های محاسباتی روی این داده ها صورت گیرد. برخی از این پردازش ها برای همه داده ها وجود دارد (مانند آماده سازی سیگنال، تبدیل آنالوگ به دیجیتال و ...)؛ اما برای محاسبه برخی از پارامترهای کلاسه بندی جدول ۲ باید محاسبات دیگری داخل الگوریتم رله انجام پذیرد که منجر به کاهش سرعت الگوریتم می گردد. به عنوان مثال، برای استخراج دامنه ولتاژ یا جریان، با استفاده از روش مختلف عددی به کمتر از نیم سیکل زمان نیاز است. در صورتی که برای محاسبه مؤلفه اصلی جریان باید تبدیل فوریه انجام شود، به یک سیکل زمان نیاز است. این زمان با پارامتر h نشان داده شده که در جدول ۲ برای هر یک از پارامترها بر حسب تعداد سیکل آورده شده است.

برای افزایش سرعت تشخیص الگوریتم رله پیشنهادی، باید تعداد ورودی های عملی به کلاسه بندی کاهش یابد. همچنین، آن دسته از پارامترهایی انتخاب شوند که نیاز به فرآیندهای محاسباتی و پردازشی کمتری داشته باشند. کاهش تعداد ورودی های الگوریتم تشخیص، علاوه بر افزایش سرعت، منجر به کاهش هزینه پیاده سازی و ساخت رله می گردد. برای این منظور، در روش پیشنهادی ضریب PTL^{۱۹} به صورت (۴) به عنوان معیاری برای تعیین تعداد و حجم محاسبات لازم برای محاسبه ورودی های روش کلاسه بندی، تعریف شده است.

$$PTL = \frac{\sum_{i=1}^{NI} K_i \times h_i}{\sum_{i=1}^{NI} h_i} \quad (4)$$

در این رابطه، h_i ضریب متناسب با زمان پردازش مورد نیاز برای استخراج پارامتر نام بر حسب سیکل (جدول ۲) است. K_i ضریب تصمیم گیری برای استفاده یا عدم استفاده از پارامتر نام در کلاسه بندی و

در ادامه، بهترین کروموزومها انتخاب شده و با اعمال عملگرهای جهش و تزیوج، نسل بعدی تولید می‌شود. عملگر ژنتیک تزیوج و جهش در هر یک از سه بخش به صورت جداگانه انجام می‌شود تا اعداد ناهمگون باینری و اعشاری با یکدیگر ترکیب نگردد. شرط توقف الگوریتم تغییر نکردن جواب نهایی به‌ازای تعداد تکرارهای مشخص است. همچنین، مسئله چندین بار حل گردیده تا اطمینان حاصل گردد که جواب بدست‌آمده یک جواب بهینه محلی نیست. در نهایت، پارامترهای بهینه ورودی کلاسه‌بندی تعیین شده که در صورت انتخاب این پارامترها برای ورودی کلاسه‌بندی، بیش‌ترین دقت و کم‌ترین زمان تشخیص حاصل خواهد شد.

۸- ساختار کلی رله تعیین وضعیت اتصال ریزشبه

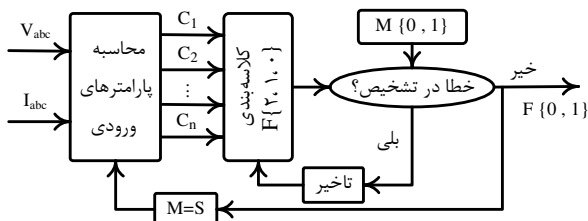
در شکل ۵، ساختار کلی رله پیشنهادی برای تعیین وضعیت اتصال ریزشبه که به شبکه سراسری نمایش داده شده است. مطابق این شکل، با استفاده از ولتاژ و جریان اندازه‌گیری‌شده در محل رله، مقادیر پارامترهای بهینه (که در بخش قبل تعیین شدند) محاسبه می‌شود.

سپس مقادیر پارامترهای بهینه محاسبه‌شده، به ورودی SVM اعمال می‌شوند. SVM نیز براساس این ورودی‌ها و آموزشی که از قبل داده شده، مشخص می‌کند که حالت جزیره‌ای رخ داده ($s=1$) یا حالت اتصال مجدد به شبکه ایجاد شده ($s=2$) یا رخداد دیگری ($s=0$) در شبکه واقع شده است.

از طرفی، وضعیت قبلی ریزشبه (جزیره‌ای یا متصل به شبکه) در حافظه رله (متغیر M) ذخیره شده است. بنابراین، رله با مقایسه خروجی SVM (متغیر S) و متغیر M ، مطابق جدول ۵ تصمیم نهایی در مورد وضعیت اتصال ریزشبه را اتخاذ می‌نماید.

جدول ۵: خروجی‌های مختلف رله تعیین وضعیت اتصال ریزشبه

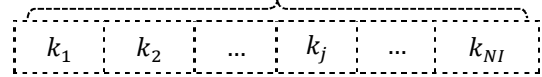
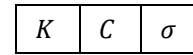
حالت	S	M	F
۱	۰	۱	۱
۲	۰	۲	۲
۳	۱	۱	خطا در تشخیص
۴	۱	۲	۱
۵	۲	۱	۲
۶	۲	۲	خطا در تشخیص



شکل ۵: ساختار کلی الگوریتم رله تعیین وضعیت اتصال ریزشبه

به‌عنوان مثال، اگر SVM تشخیص دهد که در لحظه کنونی جزیره‌ای رخ داده ($s=1$) و ریزشبه قبلاً در وضعیت متصل به شبکه بوده ($M=2$)، در این صورت ریزشبه به صورت جزیره‌ای است و مقدار F در متغیر M ذخیره می‌گردد.

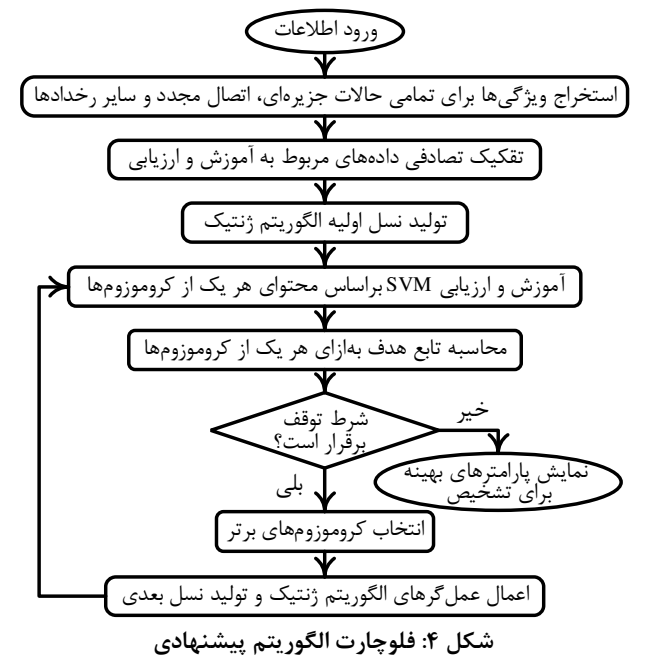
هر کروموزوم از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت اول (K_i) به صورت یک رشته باینری به اندازه تعداد کل پارامترهای ورودی کلاسه‌بندی است. صفر یا یک بودن هر بیت نشان‌دهنده عدم استفاده یا استفاده از آن پارامتر در ورودی روش کلاسه‌بندی است. قسمت دوم و سوم هر کروموزوم، حاوی اعداد اعشاری است که به ترتیب، تعیین‌کننده ضرایب کنترلی C و σ در روش SVM هستند.



شکل ۳: ساختار کروموزومها در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

الگوریتم کلی برای حل این مسئله بهینه‌سازی در شکل ۴ آورده شده است. در اولین گام، تمامی حالات ممکن (۱۰۴۷۹ حالت) در ریزشبه نمونه شبیه‌سازی شده و تمامی ۱۵۶ ویژگی پارامترهای موردنظر برای هر حالت، استخراج و ذخیره می‌شوند. سپس ۷۰ درصد از کل حالات جزیره‌ای، اتصال مجدد ریزشبه و سایر رخدادها به صورت تصادفی برای آموزش SVM انتخاب شده و مابقی برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده می‌شوند.

در ادامه، جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک به صورت تصادفی و با در نظر گرفتن قیود مسئله انتخاب می‌شوند. هر کروموزوم، یک ترکیب از پارامترهای ورودی SVM و تنظیمات SVM را تعیین می‌کند. پس با معلوم شدن کروموزومها، پارامترهای ورودی SVM نیز تعیین شده و فرآیند آموزش انجام می‌شود. سپس داده‌های تست به SVM اعمال گردیده و دقت روش پیشنهادی، مطابق (۳) تعیین می‌شود. همچنین، با مشخص بودن تعداد پارامترهای ورودی SVM زمان پردازش موردنیاز مطابق (۴) محاسبه می‌شود. در نهایت، برانزنگی هر کروموزوم جمعیت اولیه براساس تابع هدف (۵) مشخص می‌شود.



شکل ۴: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

$b. = 6$ ادامه دارد و بعدازآن، با افزایش $b.$ مقدار تابع هدف کاهش نمی‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که بهترین ترکیب بهینه از پارامترها با ضرایب α و β برابر $0/5$ ، ترکیب ۶ تایی است.

در نهایت برای حداکثرسازی سرعت و دقت تشخیص، قید تساوی تعداد پارامترهای ورودی ($b.$) حذف شده و تمامی ۱۵۶ پارامتر به‌عنوان ورودی الگوریتم پیشنهادی انتخاب می‌گردد ($b. \leq 156$).

در جدول ۷، تعداد کل رخدادهای تست و تعداد رخدادهایی که درست تشخیص داده‌نشده، به تفکیک هر سه فضای رخدادهای جزیره‌ای، رخدادهای اتصال مجدد و سایر رخدادهای آورده شده است. این ارزیابی، برای مجموعه داده‌های تست و به‌ازای ترکیب‌های پیشنهادی مختلف، پارامترهای ورودی SVM در جدول ۶ انجام شده است.

جدول ۷: آمار تفکیک‌شده تعداد خطاهای تشخیص SVM در داده‌های تست به‌ازای ترکیب‌ها متفاوت از پارامترهای ورودی با $\alpha = \beta = 0/5$

		سایر رخدادهای	رخدادهای اتصال مجدد	رخدادهای جزیره‌ای
تعداد کل رخدادهای		۳۱۷۲	۴۳	۷۲
تعداد تشخیص‌های نادرست	$b. = 2$	۳۰	۰	۲
	$b. = 3$	۳۴	۰	۲
	$b. = 4$	۴۳	۰	۱
	$b. = 5$	۴۲	۰	۰
	$b. = 6$	۴۶	۰	۰

طبق این نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پارامترهای ورودی SVM، تعداد خطاها در تشخیص رخدادهای جزیره‌ای و رخدادهای اتصال شبکه کاهش یافته است. اما تعداد خطاها در تشخیص سایر رخدادهای افزایش می‌یابد. در جدول ۸ نتایج بهینه حاصل از حل مسئله بهینه‌سازی به‌ازای ضرایب مختلف α و β آورده شده است. همچنین، روند تغییرات سرعت و خطای تشخیص نسبت به تغییرات ضرایب α و β ، در شکل ۶ ترسیم گردیده‌است.

جدول ۸: نوع و تعداد بهینه پارامترهای تعیین وضعیت اتصال

ریزشبکه براساس مقادیر مختلف α

α	β	اندیس پارامترها	ER	PTL	OFV
۰	۱	$R(P/Q)$	۰/۰۵۴۶	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۵
۰/۲۵	۰/۷۵	$\bar{R}(Q), R(Q), R(P), R(V)$	۰/۰۲۳۷	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۷۵
۰/۵	۰/۵	$A(P/Q), \bar{R}(Q), A(I), R(V), A(Q), R(P)$	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۸۹
۰/۷۵	۰/۲۵	$R(I^3), \bar{R}(THDI), \bar{A}(P), R(Q)$ $R(f), A(P/Q), R(V^1)$	۰/۰۱۴۱	۰/۰۲۲۶	۰/۰۱۶۲
۱	۰	$\bar{A}(Z_+), A(Z_+^1), R(V^3), \bar{R}(Q), R(P)$ $R(f), R(V^1), A(V_+), A(P/Q)$	۰/۰۰۸۸	۰/۰۴۸۴	۰/۰۰۸۸

در صورتی که فقط سرعت تشخیص در مسئله بهینه‌سازی مدنظر باشد ($\alpha = 0$)، الگوریتم بهینه‌سازی طوری عمل خواهد کرد که حداقل تعداد پارامترها (یعنی فقط یک پارامتر) به ورودی SVM اعمال شود. همچنین، پارامتر منتخب باید کم‌ترین حجم پردازش و زمان را نیاز

اگر M و S هر دو دارای یک مقدار باشند (وضعیت قبلی با تغییر وضعیت کنونی یکسان باشد)، قطعاً خطایی در تشخیص رله رخ داده و وضعیت ریزشبکه قابل تشخیص نیست. در این موارد، سه سیکل تأخیر ایجاد شده و مجدداً کلاسه‌بندی تکرار می‌شود. تأخیر مذکور با هدف افزایش طول پنجره نمونه‌برداری و افزایش دقت است.

همچنین، مطابق جدول ۵ اگر در ریزشبکه رخدادی غیر از وقوع جزیره و اتصال مجدد به شبکه رخ دهد ($s=0$)، در این شرایط، وضعیت ریزشبکه هیچ تغییری نخواهد کرد و F برابر M لحاظ می‌شود.

۹- شبیه‌سازی الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت، الگوریتم پیشنهادی شکل ۴، به ریزشبکه مورد مطالعه در شکل ۱ اعمال شده است. هسته RBF از میان هسته‌های خطی و غیرخطی (چندجمله‌ای و گوسی)، انتخاب شده است. این انتخاب براساس ارزیابی عددی انجام شده و بر داده‌های آموزش استفاده‌شده در روش SVM، تحلیل خطای تشخیص صورت گرفته‌است.

ضرایب C و σ مربوط به هسته RBF، توسط الگوریتم ژنتیک به‌طور بهینه تعیین شده‌اند. تعداد تکرار الگوریتم ژنتیک ۶۰ نسل، اعضای جمعیت ۳۰۰ کروموزوم، درصد نخبه‌گرایی ۱۰ درصد و میزان جهش ۲ درصد و توزیع ۷۰ درصد در نظر گرفته شده است.

در ادامه، تمامی ۱۵۶ پارامتر معرفی‌شده در جدول ۲ به‌عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند که امکان انتخاب و اعمال شدن هر کدام از آن‌ها به ورودی SVM وجود دارد. با توجه به اینکه انتخاب تمامی این ۱۵۶ پارامتر ورودی SVM به‌صورت عملی امکان‌پذیر نیست، با در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای بازه قید (λ) مقدار b_0 و یکسان بودن ضرایب α و β برابر $0/5$ ، مسئله بهینه‌سازی حل شده و نتایج در جدول ۶ آورده شده است. این جدول برای مقادیر $b. = 2$ تا $b. = 7$ آورده شده است.

جدول ۶: پارامترهای بهینه تعیین وضعیت اتصال ریزشبکه با $\alpha = \beta = 0.5$

b_0	اندیس پارامترها	ER	PTL	OFV
۲	$R(P), R(V^1)$	۰/۰۳۷۲	۰/۰۰۵۸	۰/۰۲۱۵
۳	$R(P), R(V^1), R(V)$	۰/۰۳۸۶	۰/۰۰۱۶	۰/۰۲۰۱
۴	$R(I^3), \bar{R}(Q), A(P), R(V^1)$	۰/۰۲۷۴	۰/۰۱۱۶	۰/۰۱۹۵
۵	$A(I), R(V^1), R(V), A(Q), R(P)$	۰/۰۱۳۱	۰/۰۰۷۴	۰/۰۱۰۳
۶	$A(P/Q), \bar{R}(Q), A(I), R(V), A(Q), R(P)$	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۸۹
۷	$A(P/Q), \bar{R}(Q), A(I), R(V), A(Q), R(P)$	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۳۲	۰/۰۰۸۹

با افزایش تعداد پارامترهای ورودی SVM، میزان خطای تشخیص (ER) کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار ER مربوط به $b. = 2$ با مقدار ۳/۷۲ درصد بوده و کم‌ترین مقدار ER برابر ۱/۳۱ درصد مربوط به $b. = 5$ است.

زمان تشخیص، بسته به نوع پارامترهای انتخابی، متفاوت است؛ اما مقدار تابع هدف، با افزایش $b.$ کاهش می‌یابد. البته روند کاهشی تا

جدول ۹: مقایسه نتایج بهینه روش پیشنهادی با سایر مراجع

مرجع	اندیس پارامترها	ER	PTL	OFV
روش پیشنهادی	R-1	$R(P), A(Q), R(V),$	۰/۰۱۴۶	۰/۰۰۸۹
	R-7	$A(I), \bar{R}(Q), A(\frac{P}{Q})$	۰/۰۱۸۳	۰/۰۱۰۸
[۳۵]	R-1	$A(f), A(V), R(f), R(V), R(P)$ $A(THDI), A(THDV), \frac{R(f)}{R(P)}$	۰/۰۶۱۷	۰/۰۵۲۷
	R-7	$A(PF), A(\angle V^1), R(\angle V^1)$	۰/۰۷۳۴	۰/۰۵۸۶
[۳۶]	R-1	$A(f), A(V), R(f), R(V), R(P)$ $A(PF), R(PF), R(Q)$	۰/۰۴۸۲	۰/۰۴۶۲
	R-7	$\frac{R(f)}{R(P)}, \frac{R(V)}{R(Q)}, \frac{R(f)}{R(Q)}, \frac{R(V)}{R(P)}$	۰/۰۵۱۱	۰/۰۴۷۶
[۳۹]	R-1	$A(f), A(V), R(f), R(V), \bar{R}(f)$ $\bar{R}(V), R(P), A(THDI)$ $A(THDV), A(V_+), R(V_+)$	۰/۰۴۸۷	۰/۰۸۵۷
	R-7	$A(V_-), R(V_-), A(V_0), R(V_0)$ $A(\angle V^1), R(\frac{V_+}{V_-}), A(PF^1), A(\frac{V_+}{V_-})$	۰/۰۵۳۱	۰/۰۸۷۸
[۴۱]	R-1	$A(f), A(V), R(f), R(V), A(P)$ $R(P), A(Q), R(Q), A(\angle V^1)$ $R(\angle V^1), A(PF), R(PF)$	۰/۰۴۳۹	۰/۰۷۶۱
	R-7	$A(THDI), A(THDV), R(THDI)$ $R(THDV), A(V_-), R(V_-),$ $A(I_-)$ $R(I_-), \frac{R(f)}{R(P)}, \frac{R(V)}{R(Q)}$	۰/۰۵۲۷	۰/۰۸۰۵
[۴۳]	R-1	$A(f), A(V), R(f), R(V)$	۰/۱۲۷۲	۰/۰۶۹۴
	R-7		۰/۱۳۰۷	۰/۰۷۱۲
[۴۴]	R-1	$\frac{R(f)}{R(Q)}$	۰/۰۵۷۳	۰/۰۳۱۳
	R-7		۰/۰۶۸۸	۰/۰۳۷۱
[۴۵]	R-1	$A(P), A(Q), \frac{R(f)}{R(Q)}$	۰/۰۵۶۶	۰/۰۳۱۴
	R-7		۰/۰۶۰۱	۰/۰۳۳۲
[۴۶]	R-1	$R(f), R(V), R(P), \frac{R(f)}{R(Q)}, \frac{R(V)}{R(P)}$	۰/۰۴۹۱	۰/۰۳۳۰
	R-7		۰/۰۵۴۵	۰/۰۳۵۷

دقت و سرعت تشخیص رخدادها و وقوع جزیره‌ای از سایر رخدادها غیرجزیره‌ای، بسیار بیشتر از سرعت و دقت تفکیک رخدادها جزیره‌ای و رخدادها اتصال مجدد به شبکه از سایر رخدادها است.

لذا اگرچه هدف سایر مراجع، فقط تشخیص جزیره‌ای بوده است؛ اما باهم نتایج بهینه حاصل شده از روش پیشنهادی دارای سرعت و دقت بیش‌تری نسبت به سایر مراجع است. به‌این‌منظور، ابتدا تشخیص جزیره‌ای با پارامترهای پیشنهادی در هرکدام از مراجع مذکور صورت گرفته‌است. سپس، مقادیر تابع هدف و شاخص‌های سرعت و دقت با نتایج بهینه حاصل شده از روش پیشنهادی این مقاله مقایسه شده است. این بررسی‌ها از دیدگاه دو رله R-1 و R-7 با ضرایب α و β برابر ۰/۵ ارزیابی گردیده‌است.

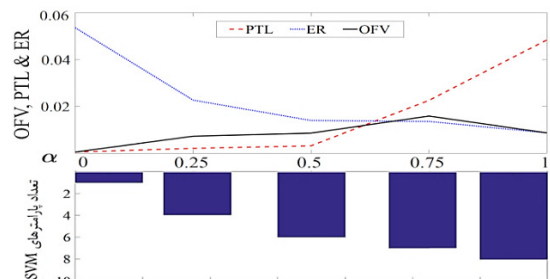
داشته‌باشد. در این شرایط، میانگین نسبت دامنه توان اکتیو به توان راکتیو، به‌عنوان ورودی SVM انتخاب شده است. ضریب زمان تشخیص (PTL) دارای کم‌ترین مقدار ممکن و برابر ۰/۰۰۰۵ است؛ اما خطای تشخیص ۵/۴۶ درصد خواهد بود.

مطابق شکل ۶، با افزایش تأثیر ضریب دقت (α) در فرآیند تشخیص، تعداد پارامترهای ورودی افزایش می‌یابند. نوع پارامترها نیز به‌نحوی که علاوه بر سرعت، دقت نیز افزایش یابد، انتخاب می‌گردند.

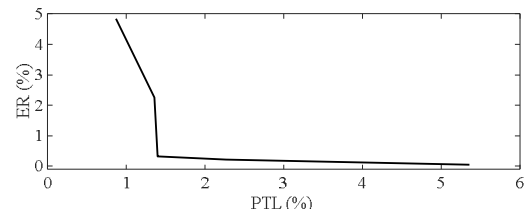
حالت حدی بعدی، بهینه‌سازی مسئله فقط با هدف حداقل‌سازی خطای تشخیص ($\alpha = 1$) است. در این شرایط، الگوریتم از پارامترهایی استفاده می‌کند که ترکیب آن‌ها، خطای تشخیص را حداقل سازد.

برای جلوگیری از انتخاب غیرمعمول تمامی ۱۵۶ پارامتر، قید (γ) با $\gamma = 0/5$ در نظر گرفته شده است؛ زیرا در فرآیند انتخاب پارامترها، با $\alpha = 1$ هیچ محدودیتی برای تعداد پارامترها وجود ندارد. در این شرایط، ۹ پارامتر به‌عنوان ورودی SVM انتخاب شده و خطای تشخیص به ۰/۸۸ درصد رسیده‌است، اما ضریب زمان تشخیص (PTL) به مقدار ۰/۴۸۴ افزایش یافته‌است.

باتوجه به نظر طراح، ممکن است سطوح متفاوتی از دقت و سرعت (هزینه)، ملاک عمل در طراحی قرار گیرد. از این‌جهت، در شکل ۷ منحنی تغییرات خطای کلاسه‌بندی نسبت به تغییرات حجم محاسبات به‌ازای ضرایب وزنی مختلف از تابع هدف (جبهه پارتو) آورده شده است. هر نقطه از این منحنی، کم‌ترین مقدار خطای کلاسه‌بندی و کم‌ترین حجم محاسبات بدست‌آمده به‌ازای ضرایب وزنی مختلف تابع هدف را نشان می‌دهد.



شکل ۶: آنالیز حساسیت مقدار تابع هدف، ضرایب سرعت، خطای تشخیص و تعداد پارامترهای منتخب نسبت به تغییرات α



شکل ۷: منحنی پارتو براساس تغییرات ضریب α

۹-۱- مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها

در این قسمت، نتایج بهینه حاصل شده برای تعیین وضعیت اتصال ریزشک، با نتایج سایر مراجع مرتبط در این زمینه [۴۱، ۳۹، ۳۶، ۳۵، ۴۳-۴۶] در جدول ۹ مقایسه شده است.

- Limiter," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 405-414, 2017.
- [۹] H. Zeineldin and J. L. Kirtley, "A simple technique for islanding detection with negligible nondetection zone," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 779-786, 2009.
- [۱۰] G. Marchesan, M. R. Muraro, G. Cardoso Junior, L. Mariotto, and A. P. de Morais, "Passive Method for Distributed Generation Island Detection Based on Oscillation Frequency," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.
- [۱۱] H. Zeineldin, T. Abdel-Galil, E. El-Saadany, and M. Salama, "Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 2, pp. 155-162, 2007.
- [۱۲] M. Bakhshi, R. Noroozian, and G. Gharehpetian, "Anti-islanding scheme for synchronous DG units based on Tufts-Kumaresan signal estimation method," *Power Delivery*, *IEEE Transactions on*, vol. 28, no. 4, pp. 2185-2193, 2013.
- [۱۳] B. Guha, R. J. Haddad, and Y. Kalaani, "A passive islanding detection approach for inverter-based distributed generation using rate of change of frequency analysis," in *SoutheastCon*, pp. 1-6, 2015.
- [۱۴] H. Samet, F. Hashemi, and T. Ghanbari, "Islanding detection method for inverter-based distributed generation with negligible non-detection zone using energy of rate of change of voltage phase angle," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 15, pp. 2337-2350, 2015.
- [۱۵] H. Muda and P. Jena, "Phase angle-based PC technique for islanding detection of distributed generations," *IET Renewable Power Generation*, vol. 12, no. 6, pp. 735-746, 2018.
- [۱۶] J. Merino, P. Mendoza-Araya, G. Venkataramanan, and M. Baysal, "Islanding detection in microgrids using harmonic signatures," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 5, pp. 2102-2109, 2015.
- [۱۷] H. Muda and P. Jena, "Rate of change of superimposed negative sequence impedance based islanding detection technique for distributed generations," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 13, pp. 3170-3182, 2016.
- [۱۸] A. R. Di Fazio, G. Fusco, and M. Russo, "Islanding detection method based on a Thevenin-like model," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no. 13, pp. 1747-1754, 2015.
- [۱۹] A. Ghanem, M. Rashed, M. Sumner, M. A. Elsayes, and I. I. Mansy, "Grid impedance estimation for islanding detection and adaptive control of converters," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 11, pp. 1279-1288, 2017.
- [۲۰] K. Sareen, B. R. Bhalja, and R. P. Maheshwari, "Universal islanding detection technique based on rate of change of sequence components of currents for distributed generations," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 2, pp. 228-237, 2016.
- [۲۱] مهرداد حیدری ارجلو، سید قدرت‌اله سیف‌السادات و مرتضی رزاز، «یک روش هوشمند تشخیص جزیره در شبکه توزیع دارای تولیدات پراکنده مبتنی بر تبدیل موجک و نزدیک‌ترین K-همسایگی (KNN)»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۳، شماره ۱، صفحه ۲۶-۱۵، بهار ۱۳۹۲.
- [۲۲] X. Kong, X. Xu, Z. Yan, S. Chen, H. Yang, and D. Han, "Deep learning hybrid method for islanding detection in distributed generation," *Applied Energy*, vol. 210, pp. 776-785, 2018.
- [۲۳] R. Teodorescu and M. Liserre, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [۲۴] H. Geng, D. Xu, B. Wu, and G. Yang, "Active islanding detection for inverter-based distributed generation systems with power control interface," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1063-1072, 2011.

براساس نتایج جدول ۹، مشاهده می‌شود کم‌ترین خطای تشخیص رله‌های R-1 و R-7 مربوط به روش پیشنهادی به ترتیب با مقادیر ۱/۴۶ و ۱/۸۳ درصد است. رتبه بعدی مربوط به [۴۱] با افزایش دو برابری در خطای تشخیص نسبت به روش پیشنهادی است. سریع‌ترین روش نیز، مربوط به روش پیشنهادی است. رتبه بعدی، روش [۴۴] با کاهش ۶۶ درصدی در سرعت تشخیص است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مسئله تعیین وضعیت اتصال ریزشکبه به صورت یک مسئله بهینه‌سازی تعریف شده و از روش SVM برای تشخیص، استفاده شده است. در این روش، پارامترهای ورودی SVM به طور بهینه و با هدف حداقل‌سازی زمان و خطای تشخیص انتخاب می‌شوند. مسئله مذکور به کمک الگوریتم هوشمند ژنتیک به طور بهینه حل شده است. با حل مسئله بهینه‌سازی، بهترین ترکیب از پارامترهای ورودی SVM برای شبکه نمونه این مقاله، نرخ تغییرات ولتاژ، نرخ تغییرات توان اکتیو، دامنه جریان، دامنه توان راکتیو، نسبت توان اکتیو به توان راکتیو و متوسط نرخ تغییرات توان راکتیو می‌باشند. تصمیم نهایی در مورد وضعیت اتصال ریزشکبه، براساس مقایسه تشخیص لحظه‌ای انجام شده و آخرین وضعیت ریزشکبه، اتخاذ می‌گردد. طبق نتایج حاصل شده از حل بهینه مسئله، اگر فقط سرعت در تابع هدف لحاظ شود، خطای تشخیص ۵/۴۶ درصد است؛ اما وقتی فقط دقت، ملاک بهینه‌سازی در نظر گرفته شده، خطا به ۰/۸۸ درصد کاهش یافته است. در انتها، نتایج روش پیشنهادی با نتایج برخی مراجع مرتبط مقایسه شده و مزیت روش پیشنهادی مشخص شده است.

مراجع

- [۱] N. Hatzigiorgiou, *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2013.
- [۲] S. Chowdhury and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*. The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [۳] J. Ho, K. Chua, and S. Chou, "Performance study of a microturbine system for cogeneration application," *Renewable energy*, vol. 29, no. 7, pp. 1121-1133, 2004.
- [۴] J. M. Guerrero et al., "Distributed generation: Toward a new energy paradigm," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 52-64, 2010.
- [۵] A. Gholami, F. Aminifar, and M. Shahidehpour, "Front lines against the darkness: enhancing the resilience of the electricity grid through microgrid facilities," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 18-24, 2016.
- [۶] A. Mehrizi-Sani and R. Iravani, "Potential-function based control of a microgrid in islanded and grid-connected modes," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 1883-1891, 2010.
- [۷] L. Che, M. E. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Adaptive Protection System for Microgrids: Protection practices of a functional microgrid system," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 66-80, 2014.
- [۸] M. Abdel-Salam, A. Abdallah, R. Kamel, and M. Hashem, "Improvement of Protection Coordination for a Distribution System Connected to a Microgrid using Unidirectional Fault Current

- [۳۶] Q. Cui, K. El-Arroudi, and G. Joos, "Islanding Detection of Hybrid Distributed Generation under Reduced Non-detection Zone," IEEE Transactions on Smart Grid, 2017.
- [۳۷] M. R. Alam, K. M. Muttaqi, and A. Bouzardoum, "A multifeature-based approach for islanding detection of DG in the subcritical region of vector surge relays," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no. 5, pp. 2349-2358, 2014.
- [۳۸] M. R. Alam, K. M. Muttaqi, and A. Bouzardoum, "Evaluating the effectiveness of a machine learning approach based on response time and reliability for islanding detection of distributed generation," IET Renewable Power Generation, vol. 11, no. 11, pp. 1392-1400, 2017.
- [۳۹] O. N. Faqhruldin, E. F. El-Saadany, and H. H. Zeineldin, "A universal islanding detection technique for distributed generation using pattern recognition," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 4, pp. 1985-1992, 2014.
- [۴۰] S. D. Kermany, M. Joorabian, S. Deilami, and M. A. Masoum, "Hybrid islanding detection in microgrid with multiple connection points to smart grids using fuzzy-neural network," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 4, pp. 2640-2651, 2017.
- [۴۱] S. Kar and S. R. Samantaray, "Data-mining-based intelligent anti-islanding protection relay for distributed generations," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 4, pp. 629-639, 2013.
- [۴۲] M. R. Alam, K. M. Muttaqi, and A. Bouzardoum, "An approach for assessing the effectiveness of multiple-feature-based SVM method for islanding detection of distributed generation," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 4, pp. 2844-2852, 2014.
- [۴۳] K. El-Arroudi and G. Joos, "Data mining approach to threshold settings of islanding relays in distributed generation," IEEE Transactions on power systems, vol. 22, no. 3, pp. 1112-1119, 2007.
- [۴۴] S. Raza, H. Mokhlis, H. Arof, J. Laghari, and H. Mohamad, "A sensitivity analysis of different power system parameters on islanding detection," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 461-470, 2016.
- [۴۵] S. Raza, H. Mokhlis, H. Arof, K. Naidu, J. A. Laghari, and A. S. M. Khairuddin, "Minimum-features-based ANN-PSO approach for islanding detection in distribution system," IET Renewable power generation, vol. 10, no. 9, pp. 1255-1263, 2016.
- [۴۶] K. Narayanan, S. A. Siddiqui, and M. Fozdar, "Hybrid islanding detection method and priority-based load shedding for distribution networks in the presence of DG units," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 3, pp. 586-595, 2017.
- [۲۵] H. Ding et al., "A novel islanding detection based on adaptive active current disturbance," in Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), pp. 1-5, 2014.
- [۲۶] مجید معظمی، رحمت‌الله هوشمند، امین خدابخشیان و عبدالرضا بهو ندی، «یک روش جدید تشخیص جزیره‌ای شدن اکتیو در سیستم‌های ریز شبکه با استفاده از تزریق جریان توالی منفی» مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۶، شماره ۲، صفحه ۲۷۹-۲۹۳، تابستان ۱۳۹۵.
- [۲۷] H. Zeineldin, E. El-Saadany, and M. Salama, "Islanding detection of inverter-based distributed generation," IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, no. 6, pp. 644-652, 2006.
- [۲۸] X. Chen and Y. Li, "An islanding detection algorithm for inverter-based distributed generation based on reactive power control," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 9, pp. 4672-4683, 2014.
- [۲۹] M. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, pp. 810-816, 1999.
- [۳۰] R. Azim, F. Li, Y. Xue, M. Starke, and H. Wang, "An islanding detection methodology combining decision trees and Sandia frequency shift for inverter-based distributed generations," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 16, pp. 4104-4113, 2017.
- [۳۱] Y. Jung, J.-Y. Choi, B. Yu, G. Yu, and J.-h. So, "A novel active frequency drift method of islanding prevention for the grid-connected photovoltaic inverter," in Power Electronics Specialists 36th Conference, pp. 1915-1921, 2005.
- [۳۲] A. Yafaoui, B. Wu, and S. Kouro, "Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems," IEEE transactions on power electronics, vol. 27, no. 5, pp. 2367-2375, 2012.
- [۳۳] G. Wang et al., "State variable technique islanding detection using time-frequency energy analysis for DFIG wind turbine in microgrid system," ISA Transactions, 2018.
- [۳۴] S. Kar and S. R. Samantaray, "Time-frequency transform-based differential scheme for microgrid protection," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 8, no. 2, pp. 310-320, 2014.
- [۳۵] K. El-Arroudi, G. Joos, I. Kamwa, and D. T. McGillis, "Intelligent-based approach to islanding detection in distributed generation," IEEE transactions on power delivery, vol. 22, no. 2, pp. 828-835, 2007.

زیرنویس‌ها

- ¹¹ Rate of Change of Positive Sequence component of current
- ¹² Rate of Change of Negative Sequence component of current
- ¹³ Active Frequency Drift
- ¹⁴ Active Frequency Drift with Positive Feedback
- ¹⁵ Decision Tree
- ¹⁶ Random Forest
- ¹⁷ Soft Margin
- ¹⁸ Radial Basis Function
- ¹⁹ Processing Time Length

- ¹ Grid Connected
- ² Islanding
- ³ Local
- ⁴ Remote
- ⁵ Support Vector Machine
- ⁶ Active
- ⁷ Passive
- ⁸ Rate of Change of Frequency
- ⁹ Rate Of Change Of Voltage Phase Angle
- ¹⁰ Full-Cycle Least Error Square