مجله کنترل
ISSN (print) 2008-8345
ISSN (online) 2538-3752
جلد ۱۴، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۳۲-۲۵

پیش‌بینی ناپایداری گذرا و جزیره شدگی ناخواسته سیستم قدرت با استفاده از اطلاعات PMU

صادق کمالی[۱]، تورج امرایی[۲]

[۱] فارغ‌التحصیل دکتری برق ، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، s.kamali@ee.kntu.ac.ir

[۲] دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی برق، گروه قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، amraee@eetd.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۰

ویرایش اول: ۱۳۹۶/۰۵/۲۱ ویرایش دوم: ۱۳۹۶/۰۷/۱۰ ویرایش سوم: ۱۳۹۶/۰۹/۰۳ ویرایش چهارم: ۱۳۹۷/۰۷/۰۸

پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۷

چکیده: در این مقاله یک الگوریتم برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته ارائه‌شده است. در این الگوریتم برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته رفتارسیگنال زمانی اندازه‌گیری شده سرعت و زاویه روتور ژنراتورهای سنکرون توسط یک تابع هدف مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار این تابع هدف به نحوی تعیین شده است درلحظه تغییرات توپولوژی شبکه دارای تغییرات زانویی می‌باشد. در راستای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته، زمان وقوع خطا و رفع خطا بر اساس تغییرات این تابع هدف تخمین زده می‌شوند. با توجه به اینکه بهترین زمان برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته بعد از رفع خطا می‌باشد لذا این دو زمان تخمین زده‌شده جهت تعیین بهترین پنجره محاسباتی جهت پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته استفاده می‌شود. همچنین برای پیش‌بینی جزیره شدگی جهت کاهش محاسبات تابع هدف روش پیشنهادی اصلاح می‌گردد. برای نشان دادن کارایی روش ارائه‌شده الگوریتم ارائه‌شده بر روی شبکه‌ی۳۹ باسه ۱۰ماشینه استاندارد IEEE شبیه‌سازی گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که می‌توان به وسیله تابع هدف پیشنهادی زمان رفع خطا تخمین زده شده و جزیره شدگی کنترل شده با دقت مناسب پیش‌بینی گردد.

کلمات کلیدی: جزیره شدگی،پیش‌بینی،ناپایداری گذرا، بهینه‌سازی

Prediction of transient instability and unplanned islanding using phasor measurements data

Sadegh Kamali, Turaj Amraee

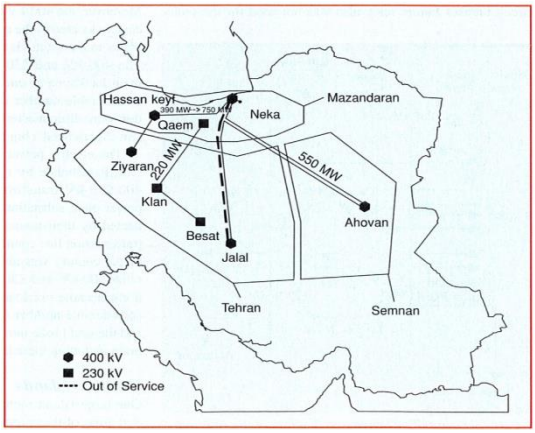
Abstract: in this paper a new algorithm has been proposed to predict unplanned islanding. To predict unplanned islanding, rotor angle and speed time series have been used. Times of fault occurrence and clearance are estimated using monitoring system response based on the variation of phasor measure data. The estimated times of fault occurrence and clearance are used to determine suitable calculation window for uncontrolled islanding prediction. The proposed algorithm is applied to IEEE 39 bus test system. The result shows that the objective function can be used to estimate fault occurring and clearance time to predict unplanned islanding.

Keywords: Islanding, Prediction, Transient instability, Optimization.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

۱- مقدمه

سیستم‌های قدرت در برخی نقاط جهان در چند دهه اخیر خاموشی‌های گوناگونی را به‌صورت محلی یا سراسری تجربه کرده است. به عنوان مثال خاموشی سراسری که در آگوست سال ۲۰۰۳ در شمال غربی آمریکا رخ داد منجر به قطع ۵۰گیگاوات برق از شبکه شد. این خاموشی باعث شد ۵۰ میلیون مشترک دچار بی‌برقی شوند. همچنین در جولای و اگست سال ۱۹۹۶ یک اغتشاش بزرگ باعث بی‌برق شدن چندین میلیون مشترک گردید. به‌طور معمول چنین اتفاقاتی زمانی رخ می‌دهد که سیستم به‌صورت سنگین بارگذاری شده و دو یا چند خروج المان در سیستم با فاصله‌ی زمانی کوچکی رخ بدهد. این شرایط باعث می‌گردد ماشین‌های الکتریکی نسبت به هم نوسان توان داشته باشند و افت شدید ولتاژ و ناپایداری زاویه رتور رخ بدهد[۱]. می‌توان از این نوع اتفاقات در کشور ایران را نیز نام برد. مهم‌ترین آن‌ها در ۱۳۸۰/۲/۳۰ساعت ۱۲ ظهر است که با استناد به منبع [۲]، [۳] این خاموشی با وقوع یک خطا روی یکی از خطوط ۴۰۰ KV نیروگاه نکا به سمت تهران شروع شده است که در آن زمان خط دیگر به جهت بازدیدها و آزمایش‌های دوره‌ای از مدار خارج بوده است. قبل از وقوع خطا ۵۵۰ مگاوات توان از نکا به آهوان منتقل می‌شد که با جدا شدن این خط توسط فرمان رله‌های حفاظتی، این انتقال توان به خطوط دیگر واگذار شد. طی این رخداد، توان انتقالی خط حسن کیف از ۳۹۰ به ۷۵۰ مگاوات افزایش یافته و با افزایش حد بارگذاری خط قائم به کلان، درنهایت ناحیه‌ی شمالی از منطقه‌ی تهران جدا شده و دو جزیره با عدم برابری تولید و مصرف ایجاد گردید. که در جزیره شمالی کم باری و در جزیره‌ی پایینی پرباری به وجود آمد بود [۲]. در ادامه چندین کلید هم به‌درستی عمل نکرده و شبکه دچار خاموشی شده است (نحوه‌ی اتصال جزیره‌ها درشکل ۱ نشان داده‌شده است) [۳].



شکل ۱: مرز بین جزیره‌های غیر کنترل‌شده در سیستم قدرت کشور ایران [۳]

با توجه به اتفاقاتی که ذکر شد، تشخیص و پیش‌بینی جزیره شدگی در سیستم قدرت اهمیت فراوانی دارد. در صورت تشخیص زودتر می‌توان در چنین مواقعی خسارت‌های ناشی از بروز خطا یا عدم کفایت حفاظت معمولی را به حداقل رساند. با توجه به اینکه در چنین مواقعی علت وقوع جزیره شدگی غیر کنترل‌شده بیشتر ناشی از ناپایداری گذرا و تشخیص اشتباه آن توسط رله خروج از همگامی یا دیگر رله‌های امپدانسی می‌باشد[۱] لذا در این مقاله ابتدا سعی شده که جزیره شدگی خود به خودی (کنترل نشده) با پیش‌بینی ناپایداری گذرای ژنراتورها آشکارسازی شود. فرایند جزیره سازی ابعاد گسترده‌تری دارد و نیازمند اقدامات کنترلی و حفاظتی زیادی می‌باشد. در این مقاله فقط پیش‌بینی این رخداد با یک مدل بهینه مدنظر می‌باشد جزئیات کنترل جزیره سازی و ابعاد آن مورد بحث قرار نمی‌گیرد. هر طرح کنترل جزیره سازی دارای دو بخش "تعیین مکان جزیره سازی" و" تعیین زمان جزیره سازی" است که در این پژوهش با پیش‌بینی زمان جزیره سازی یکی از ابعاد فرایند جزیره سازی تعیین می‌شود. در این راستا از یک مدل بهینه‌سازی برای تعیین زمان جزیره سازی استفاده‌شده است.

جزیره سازی کنترل‌شده آخرین ابزار کنترلی برای کنترل جزیره شدگی ناخواسته بکار گرفته می‌شود. منظور از جزیره سازی کنترل‌شده جدا کردن شبکه‌ی قدرت از نقاط مشخص برای دستیابی به نواحی الکتریکی جدا از هم پایدار است [۴] و [۵].

جهت تعیین مکان جزیره سازی در یک شبکه قدرت بزرگ روش‌های گوناگونی را می‌توان به کار گرفت به‌عنوان مثال جزیره سازی بر اساس همپایی کند۱ یکی از پرکاربردترین روش‌های جزیره سازی کنترل‌شده است. در این روش ژنراتورهای همپا در یک گروه قرارگرفته و بارهای الکتریکی به یکی از این گروه‌های همپا اختصاص می‌یابد به‌گونه‌ای که کمترین تفاوت بین بار و تولید در هر یک از جزیره‌ها ایجاد گردد. مجزا کردن گروه‌های غیر همپا از هم و قرار دادن گروه‌های همپا در یک جزیره می‌تواند همگامی را به‌طور غیرمستقیم پس از جزیره سازی تضمین کند.[۵]و[۶]. تحقیقاتی زیادی در تعیین مرزهای جزیره شدگی انجام‌شده است به‌عنوان نمونه مراجع[۷]،[۸]. بر اساس کمینه کردن تفاوت تولید و مصرف در هر یک از جزیره‌ها، مرزهای هر یک از ناحیه‌ها را به دست آورده‌اند.

باوجود اینکه مطالعات کمی برای تشخص زمان جزیره سازی انجام گردیده است، بیشتر روش‌ها، اخیراً برای شناسایی یا پیش‌بینی جزیره شدگی بکار گرفته‌شده است که بر مبنای روش‌های داده‌کاوی و هوش مصنوعی به کمک اطلاعات غیر برخط استوار بوده است[۴]. به‌عنوان مثال در مرجع [۹] با استفاده از یک جدول که در آن ترتیب خروج خطوط در حالت جزیره شدگی کنترل نشده بدست آمده به‌صورت برخط سیستم را پایش می‌کند و جزیره شدگی از طریق تطبیق با این جدول تشخیص داده می‌شود در این روش تنها تشخیص بهنگام صورت می‌گیرد و پیش‌بینی

[1] Slow Coherency

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

صورت نمی‌گیرد. مقالات کنفرانسی متعددی در این زمینه موجود است که همه‌ی آن‌ها به نحوی روش مرجع [۴] را بیان کردند.

مرجع [۱۰] با پیش‌بینی زاویه‌ی روتور هر یک از ماشین‌ها در یک محدوده‌ی مشخص زمان جزیره سازی را پیش‌بینی می‌کند. در این مقاله در هرلحظه با استفاده از اطلاعات گذشته یک بازه زمانی کوچک زاویه‌ی روتور را پیش‌بینی کرده و ریسک جداشدگی زاویه‌ی رتور را پیش‌بینی می‌کند.

در [۱۱] به پیش‌بینی جزیره شدگی بر اساس زاویه روتور ماشین‌ها پرداخته است. در این مقاله با پیش‌بینی به روش پرونی، در صورتی که بعد رفع خطا ، اکثر زاویه رتور ماشین‌ها به سمت ناپایداری گذرا برود در آن صورت سیستم به جزیره شدگی ناخواسته حرکت می‌کند. در این مقاله مکان جزیره شدگی هم به روش هم پایی تشخیص داده می‌شود.

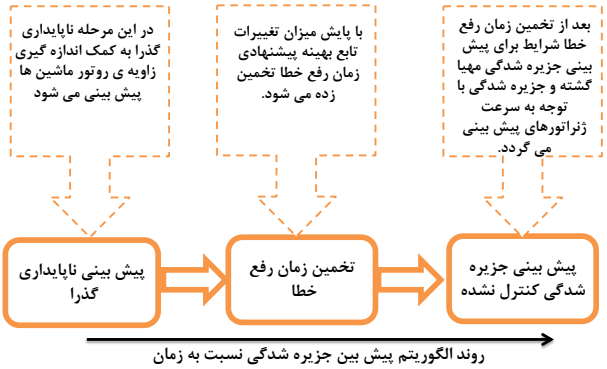
در[۱۲] یک شاخص بر مبنای انرژی ارائه‌شده و بر اساس این شاخص پدیده‌ی جزیره شدگی ناخواسته در مدت زمان کوتاهی بعد از وقوع خطا پیش‌بینی می‌شود. به علت اینکه این شاخص از جنس انرژی است روش پیشنهادی توانسته است در نقطه کارهای مختلف پیش‌بینی جزیره شدگی را با دقت قابل قبول انجام دهد. همچنین تغییر ساختار شبکه و خروج از همگامی ژنراتورها تأثیری بر روی دقت پیش‌بینی توسط شاخص پیشنهادی نداشته است.

در [۱۳] با توجه به اطلاعات غیر برخطی که بر اساس شبیه‌سازی در حوزه‌ی گذرا ایجاد می‌کند به پیش‌بینی پایداری گذرای شبکه می‌پردازد، و از این طریق جزیره شدگی سیستم را پیش‌بینی می‌کند. در این مقاله از روش ANFIS جهت پیش‌بینی پایداری شبکه استفاده کرده است. همچنین روش ارائه‌شده در شبکه ایران نیز پیاده‌سازی شده است.

هدف اصلی این مقاله پیش‌بینی زمان جزیره سازی می‌باشد. برای رسیدن به این هدف از تابع هدف پیشنهادی جهت پیدا کردن زمان مناسب برای پیش‌بینی زمان جزیره شدگی استفاده‌شده است. بهینه‌سازی های انجام‌شده در این مقاله با الگوریتم SBB در نرم‌افزار GAMS انجام‌شده است.

۲- الگوریتم ارائه‌شده برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته

در سیستم قدرت ناپایداری گذرا و خروج از هم گامی ژنراتورها می‌تواند باعث وقوع رخدادهای بزرگتری همچون خاموشی سراسری یا جزیره شدگی خود به خودی سیستم شود[۱۴]. لذا یکی از مهم‌ترین موضوعی که برای پیش‌بینی جزیره شدگی باید در نظر گرفته شود ناپایداری گذرا است. همچنین باید در نظر داشت که جزیره شدگی کنترل نشده بعد از وقوع چندین ناپایداری گذرا در سیستم خود را نشان می‌دهد.که خسارات زیادی به سیستم قدرت وارد می‌کند. عامل وقوع جزیره شدگی خطاهای شدید و در پی آن عملکرد اشتباه رله‌های حفاظتی می‌باشد[۱۵]. در مدل ارائه‌شده در این مقاله ابتدا ناپایداری گذرا در مرحله‌ی اول پیش‌بینی می‌گردد تا در صورت نیاز از عملکرد ناخواسته رله‌های خروج از همگامی جلوگیری شود و در مرحله‌ی دوم با استفاده از تشخیص رفع خطا از تغییرات تابع هدف ارائه‌شده، جزیره شدگی کنترل نشده پیش‌بینی می‌گردد تا اقدامات تکمیلی جهت کنترل این رخداد صورت گیرد. روند پیش‌بینی درشکل ۲ به‌طور خلاصه نشان داده‌شده است. که در ادامه هر سه بخش مدل پیشنهادی تشریح می‌گردد.



شکل ۲: روند کنترل جزیره شدی ناخواسته در مدل پیشنهادی

۳-پیش بینی ناپایداری گذرا

با توجه به اینکه در هر سیستم قدرت تحت اغتشاش تغییرات زاویه‌ی روتور و سرعت برحسب زمان غیرخطی است. لذا مدل‌های خطی مرتبه پایین برای این منظور دارای دقت قابل قبولی نیستند. با توجه به اینکه پاسخ زاویه رتور ماشین‌های سنکرون به ازای یک اغتشاش به‌صورت تابع نوسانی نمایی است، ازاین‌رو برای پیش‌بینی این سیگنال از یک تابع هدف نمایی سینوسی استفاده شده است. به همین دلیل تابع هدف به‌صورت حداقل کردن میزان خطا از پاسخ نمایی سینوسی با فرکانس و میرایی مجهول انتخاب می‌گردد . هرگاه اغتشاشی در یک سیستم رخ می‌دهد تنها تعدادی از مدهای سیستم تحریک می‌شود و سیستم موردنظر دارای یک دسته مد غالب خواهد بود. لذا مدل موردنظر بر اساس رفتار سیستم در حالت گذرا به‌صورت زیر پیشنهاد داده می‌شود:

$$O_F = \sum_{N=1}^{N_t} |[A + \sum_{n=1}^{k} B_n e^{\alpha_n t} \times \sin(\omega_n t + \varphi_n)] - y_N| \quad (۱)$$

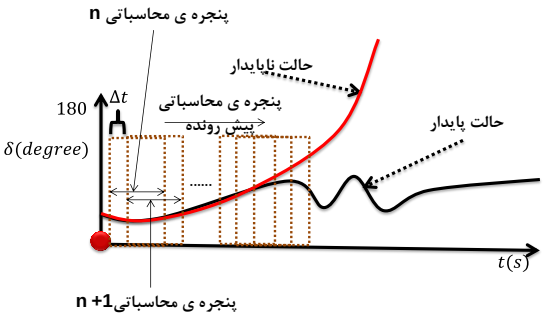
که در معادله‌ی بالا $[\alpha_n \ \omega_n \ \varphi_n \ B_n \ K_n \ A]$ متغیرهای حالت یا پارامترهایی هستند که باید با بهینه‌سازی بدست آیند. Kتعداد مدهای غالبی است که در پاسخ موردنظر تحریک شده‌اند.N_t تعداد نمونه پنجره محاسباتی است و از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

$$N_t = CW_t / \Delta t \quad (۲)$$

که در این رابطه CW_t طول هر پنجره‌ی محاسباتی است و Δt تفاوت زمانی

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

بین دو اندازه‌گیری متوالی می‌باشد که با توجه به اطلاعات[1] PMU, و اطلاعات مربوط به نحوه ارسال داده آن تعیین می‌گردد. منظور از پنجره‌های محاسباتی پنجره‌ای است که با توجه به شکل ۳ در هرلحظه از زمان یک بازه‌ی زمانی را در برمی‌گیرد. برای پیش‌بینی زاویه‌ی روتور و سرعت آن مدل بهینه‌سازی موردنظر به ازای هر پنجره‌ی محاسباتی تکرار می‌شود. بعد از بدست آوردن پارامترهای مدل(۱)پاسخ سیستم به‌صورت زیر تعیین می‌گردد.



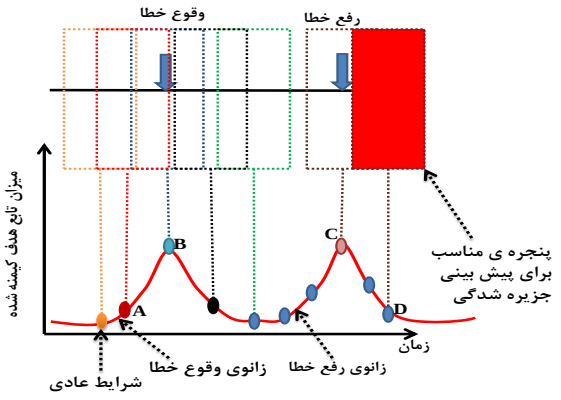
شکل ۳: نحوه‌ی حرکت کردن پنجره‌ی محاسباتی برای پیش‌بینی نمودار زاویه‌ی روتور

$$Rotor_angale \quad or \quad Rotor_speed = A + \sum_{n=1}^{k} B_n e^{\alpha_n t} \times \sin(\omega_n t + \varphi_n)] \qquad (۳)$$

باید توجه داشت که انتخاب مقادیر بزرگ برای پنجره‌ی محاسباتی باعث می‌شود که پیش‌بینی زیاد معتبر نباشد، زیرا با انتخاب Cw_t بیشتر احتمال دارد که در هر پنجره محاسباتی چندین تغییر وضعیت در سیستم رخ بدهد. درنتیجه تغییر مدهای نوسانی ایجاد شده و خطای پیش‌بینی زیاد گردد(در داخل پنجره محاسباتی دو پاسخ جدا از هم وجود داشته باشد). لذا بهترین Cw_t، کوچک‌تر از زمان بین متوسط ناپایداری گذرا در یک سیستم و رفع خطای معمول می‌باشد که با ایجاد خطاهای مکرر و مطالعات گسترده پایداری گذرا بدست می‌آید. این مقدار به ازای هر سیستم مطالعاتی متفاوت بوده و بیشتر به حد آستانه‌ی تحمل سیستم برای پایدار ماندن تحت اغتشاش بستگی دارد. علت استفاده از این مقدار، قرار گرفتن پنجره‌ی محاسباتی در بین زمان ناپایداری و رفع خطاست. تا یک پاسخ زمانی در پنجره محاسباتی قرار گیرد و دقت پیش‌بینی افزایش یابد (هرگاه در سیستم خطا رخ می‌دهد یک دسته مد در پاسخ زمانی تحریک می‌شود که به محض ناپایدار شدن یک ژنراتور مدهای تحریک شده تغییر پیدا می‌کنند). این موضوع در قسمت بعدی بیشتر توضیح داده می‌شود. بعد از هر بار بهینه‌سازی پارامترهای مدل پیش‌بین تعیین می‌گردد. بعد از تعیین این مقادیر، با توجه به معادله‌ی (۳) سرعت یا زاویه‌ی روتور را می‌توان برای زمان‌های بعدی پیش‌بینی کرد پیش‌بینی برای حداکثر ۰/۲ ثانیه برای انجام اقدامات لازم کافی است.

٤-شناسایی وقوع خطا، رفع خطا

با توجه به مدل ارائه‌شده در بخش۳ می‌توان زمان وقوع خطا و رفع خطا را با دقت مناسبی با توجه به رفتار تابع هدف تعیین نمود. همان‌طوری که در شکل ۴ دیده می‌شود در نقطه‌ی A میزان تابع هدف(رابطه (۱)) شروع به افزایش می‌کند و این نشان‌گر وقوع خطا در سیستم و تغییر پاسخ سیستم و مدهای تحریک شده می‌باشد. هرگاه زمان اعمال ورودی به سیستم داخل پنجره‌ی محاسباتی باشد ، میزان تابع هدف بهینه‌شده شروع به افزایش می‌کند. این افزایش تا رسیدن زمان یک تغییر در سیستم(مثل رفع خطا یا وقوع خطا)، به وسط پنجره محاسباتی ادامه دارد. علت این موضوع داشتن دو پاسخ متفاوت در داخل پنجره‌ی محاسباتی می‌باشد چرا که قبل از وقوع خطا و بعد از وقوع خطا مدهای تحریک شده با هم متفاوت است (قبل از خطا هیچ مدی تحریک نشده و تابع ثابت خواهد بود و بعد از خطا مدهای تحریک شده تغییر پیدا می‌کند) و بیشترین خطا برای زمانی است که دقیقاً زمان وقوع خطا یا رفع خطا در وسط پنجره محاسباتی قرار گیرد. با توجه به توضیحات گفته شده رفع خطای سیستم به راحتی می‌تواند از تغییرات تابع هزینه تخمین زده شود و بعد از گذشتن پنجره محاسباتی از زمان رفع خطا شرایط برای پیش‌بینی جزیره شدگی غیرعمدی مهیا شود.باید توجه کرد که بهترین زمان برای پیش‌بینی جزیره شدگی دقیقاً بعد از رفع خطا و بر اساس پاسخ نهایی سیستم بعد از اعمال همه ورودی‌ها (وقوع خطا و رفع خطا) می‌باشد. لذا بعد از گذشتن از دومین اکسترمم پنجره مربوط به پیش‌بینی جزیره سازی بدست می‌آید.



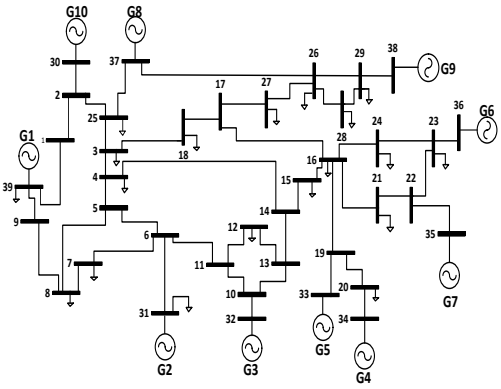
شکل ۴:نحوه‌ی تغییر تابع هدف در روند پیش‌بینی

۵- بررسی کارایی مدل بهینه ارائه‌شده و نتایج شبیه‌سازی

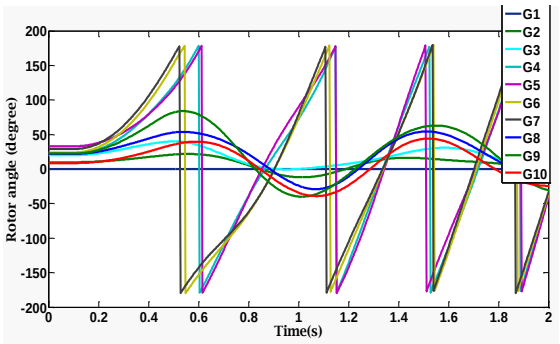
[1] Phasor Measurement Unit

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

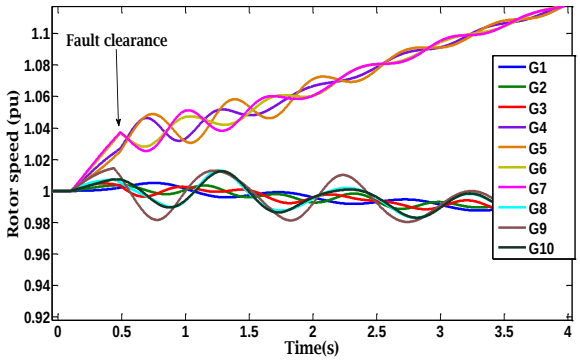
در این قسمت برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی این روش را با روش‌های مرسوم و پرکاربرد دیگر که اکثراً در پیش‌بینی مورد استفاده قرار می‌گیرند مقایسه می‌شود. با توجه به اینکه این روش در مراجع [۱۶]و[۱۷] ارائه‌شده است تئوری آن‌ها در این مقاله مورد بحث قرار نمی‌گیرد و تنها نتایج حاصل از این روش جهت مقایسه با پیش‌بینی توسط مدل بهینه‌سازی پیشنهادی ارائه می‌گردد. بدین جهت یکی از پاسخ‌های شبکه‌ی۳۹ باسه ۱۰ ماشینه استاندارد IEEE که در شکل ۵ نشان داده‌شده به خطای سه فاز متقارن مورد بررسی قرار می‌گیرد. (اطلاعات دقیق شبکه ۳۹ باسه در مرجع[۱۸] موجود می‌باشد) درشکل ۶ نحوه‌ی تغییرات زاویه‌ی روتور سیستم بعد از اعمال خطای سه فاز متقارن در باس ۱۶با رفع خطای ۳۵۰میلی‌ثانیه نشان داده‌شده است (ورودی اول در t=۰/۱sec و ورودی دوم در t=۰/۴۵۰ sec). سرعت ژنراتورها نیز در شکل ۷ نشان داده‌شده است. برای پیش‌بینی زاویه‌ی روتور و سرعت هر یک از ژنراتورها بایستی تابع بهینه معادله ۱ برای هر ۱۰ ژنراتور به‌طور جداگانه بهینه گردد تا اینکه مقادیر متغیرهای حالت مورد نیاز جهت پیش‌بینی بدست آید. نتایج پیش‌بینی توسط تابع بهینه برای هر ۱۰ ماشین قبل از رفع خطا در جدول۱ آمده است. همان‌طوری که در جدول۱ دیده می‌شود هر ژنراتوری دارای پاسخ منحصربه‌فردی است ولی برخی ژنراتورها مشابه هم می‌باشند. از آنجایی که مدهای تحریک شده بعد از رفع خطا با قبل از رفع خطا متفاوت باشد مدهای بعد از رفع خطای ماشین ۱ تا ۱۰ نیز در جدول۲ آمده است.



شکل ۵:شبکه ۳۹ باسه ۱۰ ماشینه استانداردIEEE



شکل ۶: نحوه‌ی تغییرات زاویه روتور ماشین ۱ در اثر خطای سه فاز متقارن اعمال‌شده به باس ۱۶ با رفع خطای ۳۵۰میلی‌ثانیه با خروج خط



شکل ۷: نمودار سرعت ژنراتورهای شبکه ۳۹ باسه بعد از اعمال خطای ۳فاز متقارن به باس ۱۶ با رفع خطای ۳۵۰میلی‌ثانیه با خروج خط

جدول ۱: مدهای تحریک شده در هر یک از پاسخ‌ها، به ازای خطای ۳فاز روی باس ۱۶در لحظه ۰/۱ثانیه و با رفع خطای ۳۵۰میلی‌ثانیه برای پیش‌بینی زاویه روتور

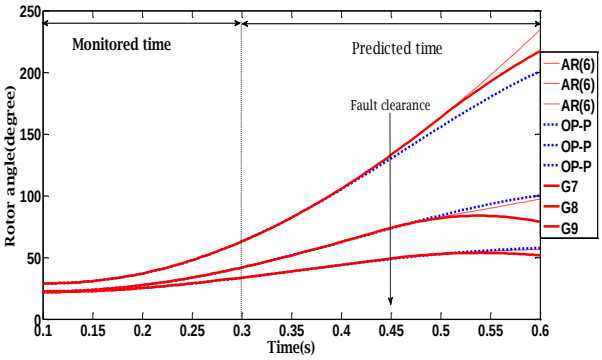
شماره ماشین	متغیرهای حالت و تابع هزینه	شماره ماشین	متغیرهای حالت و تابع هزینه
۱	⊗	۶	$O_F=0.234$ $A=46.441$ $k=3$ $B=[8.5360\ \ 8.5470\ \ 8.5740]$ $\alpha=[3.0030\ \ 3.0620\ \ 3.2450]$ $\omega=[4.1450\ \ 4.1870\ \ 5.2030]$ $\varphi=[-1.0710\ \ -1.0520\ \ -1.4850]$
۲	$O_F=1.0025$ $A=17.315$ $k=1$ $B=[7.454]$ $\alpha=[-0.123]$ $\omega=[6.420]$ $\varphi=[-2.220]$	۷	$O_F=0.257$ $A=57.666$ $k=3$ $B=[10.8440\ \ 10.6100\ \ 6.9890]$ $\alpha=[2.6150\ \ 3.1580\ \ 2.8920]$ $\omega=[5.2910\ \ 4.5620\ \ 4.7560]$ $\varphi=[-1.5780\ \ -1.2580\ \ -1.3160]$
۳	$O_F=1.008$ $A=29.571$ $k=1$ $B=[9.206]$ $\alpha=[0.324]$ $\omega=[6.850]$ $\varphi=[-2.240]$	۸	$O_F=0.110$ $A=37.38$ $k=3$ $B=[5.4200\ \ 5.2740\ \ 4.4760]$ $\alpha=[0.5380\ \ 0.7510\ \ 0.1840]$ $\omega=[6.0000\ \ 6.0000\ \ 5.5260]$ $\varphi=[-1.9210\ \ -1.9580\ \ -2.0810]$
۴	$O_F=0.234$ $A=52.1014$ $k=3$ $B=[9.2920\ \ 9.2460\ \ 9.2920]$ $\alpha=[2.3600\ \ 2.1790\ \ 2.3600]$ $\omega=[5.0240\ \ 4.4410\ \ 5.0260]$ $\varphi=[-1.5710\ \ -1.4390\ \ -1.5000]$	۹	$O_F=0.102$ $A=45.2280$ $k=3$ $B=[6.9610\ \ 6.9610\ \ 6.9190]$ $\alpha=[1.5750\ \ 1.5750\ \ 1.4610]$ $\omega=[6.0000\ \ 6.0000\ \ 5.0520]$ $\varphi=[-1.8890\ \ -1.8890\ \ -1.6440]$
۵	$O_F=0.234$ $A=46.441$ $k=3$ $B=[8.5360\ \ 8.5470\ \ 8.5740]$ $\alpha=[3.0030\ \ 3.0620\ \ 3.2450]$ $\omega=[4.1450\ \ 4.1870\ \ 5.2030]$ $\varphi=[-1.0710\ \ -1.0520\ \ -1.4850]$	۱۰	$O_F=0.060$ $A=20.6850$ $k=3$ $B=[-5.3540\ \ -4.4950\ \ -3.5300]$ $\alpha=[2.6350\ \ -3.9140\ \ 1.2600]$ $\omega=[6.2350\ \ 5.1790\ \ 7.8730]$ $\varphi=[0.5478\ \ 1.4348\ \ 1.5758]$

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

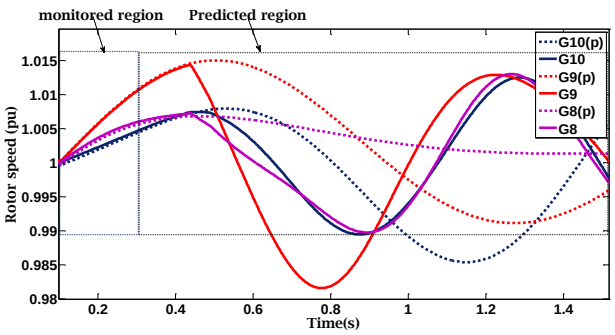
جدول ۲: مدهای تحریک شده بعد از رفع خطا در لحظه ۶۵۰ میلی‌ثانیه برای زاویه‌ی روتور(ژنراتور یک مرجع می‌باشد)

شماره ماشین	متغیرهای حالت و تابع هزینه	شماره ماشین	متغیرهای حالت و تابع هزینه
۱	⊗	۶	$O_F=0.187$ $A=6.713$ $k=1$ $B=[2.805]$ $\alpha=[0.712]$ $\omega=[3.750]$ $\varphi=[1.0178]$
۲	$O_F=0.081$ $A=6.681$ $k=1$ $B=[2.186]$ $\alpha=[0.968]$ $\omega=[4.230]$ $\varphi=[0.647]$	۷	$O_F=0.226$ $A=5.384$ $k=1$ $B=[3.196]$ $\alpha=[0.308]$ $\omega=[0.741]$ $\varphi=[3.970]$
۳	$O_F=0.077$ $A=6.70$ $k=1$ $B=[2.857]$ $\alpha=[0.692]$ $\omega=[3.733]$ $\varphi=[1.048]$	۸	$O_F=0.072$ $A=7.2$ $k=1$ $B=[2.512]$ $\alpha=[0.905]$ $\omega=[4.035]$ $\varphi=[0.761]$
۴	$O_F=0.161$ $A=9.345$ $k=1$ $B=[5.788]$ $\alpha=[0.399]$ $\omega=[4.487]$ $\varphi=[0.486]$	۹	$O_F=0.09$ $A=9.442$ $k=1$ $B=[4.5960]$ $\alpha=[0.612]$ $\omega=[4.298]$ $\varphi=[0.297]$
۵	$O_F=0.147$ $A=9.344$ $k=1$ $B=[5.80]$ $\alpha=[0.401]$ $\omega=[4.495]$ $\varphi=[0.494]$	۱۰	$O_F=0.190$ $A=6.117$ $k=1$ $B=[2.609]$ $\alpha=[0.671]$ $\omega=[3.613]$ $\varphi=[1.085]$

برای نشان دادن اعتبار الگوریتم مذکور نتایج این روش با روش AR مقایسه می‌شود. در روش پیشنهادی لازم نیست که بعد از خطا برای زمان‌های زیاد پیش پینی کند چرا که در هرلحظه با در نظر گرفتن اطلاعات پنجره محاسباتی نتایج پیش‌بینی مدام به‌روزرسانی می‌شود و پیش‌بینی ۲۰۰ میلی‌ثانیه بعد از انتهای پنجره محاسباتی جهت پیشگیری و انجام اقدامات کنترلی کافی است. در شکل ۸ و شکل **۹** نتایج حاصل از پیش‌بینی زاویه روتور و سرعت **۳** ژنراتور به عنوان نمونه نشان داده‌شده است. با توجه به شکل‌ها دیده می‌شود، که پیش‌بینی بر اساس روش ارائه‌شده دقت مناسبی را از خود نشان می‌دهد به‌طوری که قبل از رفع خطا تقریباً اختلاف نمودار پیش‌بینی شده با نمودار اصلی برابر صفر است. اما بعد از رفع خطا به علت عوض شدن مدهای تحریک شده پاسخ سیستم، مقدار پیش‌بینی شده از مقدار اصلی جدا می‌شود. مدل AR که از معتبرترین روش‌های پیش‌بینی سری زمانی است دارای دقت مناسبی بوده که درمجموع پیش‌بینی با مدل ارائه‌شده و مدل AR تقریباً دقت یکسانی را از خود نشان دادند. در تمامی پیش‌بینی‌ها طول پنجره‌ی محاسباتی ۰/۲ثانیه در نظر گرفته‌شده است. برای استفاده از روش‌های گفته شده برای پیش‌بینی ناپایداری گذرا کافی است برای همه ژنراتورها تابع هدف گفته شده در معادله۱ را بهینه نموده و زاویه روتور را پیش‌بینی نمود. اما با توجه به شکل ۱۰ به راحتی دیده می‌شود که با رسیدن پنجره محاسباتی به زمان رفع خطا، تابع هدف شروع به زیادشدن می‌کند و این روند تا رسیدن رفع خطا به نقطه میانی پنجره محاسباتی ادامه دارد. لذا هرگاه پیش‌بینی با روش گفته شده، وقوع ناپایداری را در فاصله دورتر پیش‌بینی کرد بهتر است که اقدامی صورت نگیرد. تا نقطه رفع خطا از داخل پنجره محاسباتی خارج شود، چرا که ممکن است رفتار پاسخ عوض شود (مدهای تحریک شده به علت رفع خطا عوض شود) و از طرفی هم خطای پیش‌بینی در حالتی که زمان رفع خطا در داخل پنجره محاسباتی است زیاد است و استناد به آن چندان معتبر نمی‌باشد. درشکل ۱۰ مقدار ماکزیمم مربوط به زمانی است که رفع خطا دقیقاً در وسط پنجره محاسباتی قرار دارد. این شکل میزان تابع هدف را با فاصله زمانی یک سیکل (۰/۰۲S) نشان می‌دهد. زمان لازم به ازای هر بار اجرای الگوریتم در هر فاصله زمانی ۰/۰۱ ثانیه است. با توجه به رشد تابع هدف به راحتی زمان رفع خطا شناسایی می‌شود. لذا اگر چنان چه از این روش برای پیش‌بینی جزیره سازی استفاده شود در آن صورت بایستی بعد از گذر کردن زمان رفع خطا از پنجره‌ی محاسباتی با بهینه کردن تابع هدف اصلاح‌شده معادله (۴) به پیش‌بینی جزیره شدگی پرداخت.

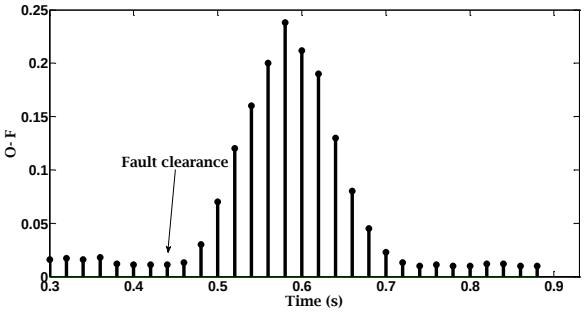


شکل ۸: پیش‌بینی زاویه‌ی روتور ژنراتورهای ۷، ۸ و ۹ با مدل بهینه ارائه‌شده و **AR** درجه‌ی۶



شکل ۹: پیش‌بینی سرعت ژنراتورهای ۷، ۸ و ۹ با مدل بهینه ارائه‌شده و **AR** درجه‌ی۶

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]



شکل ۱۰: نحوه‌ی تغییرات تابع هدف برای یک ماشین با رفع خطا در زمان ۴۵۰ میلی‌ثانیه

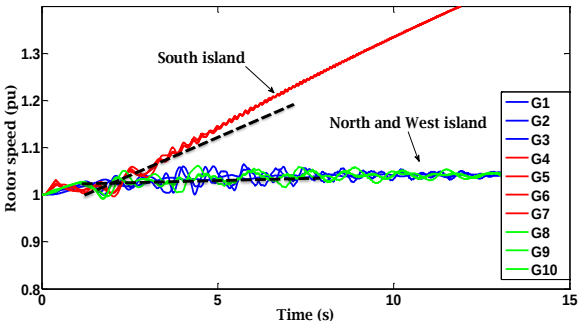
$$O_F = \sum_{N=1}^{N_t} |[A + \sum_{n=1}^{k} B_n e^{\alpha_n t} \times \sin(\omega_n t + \varphi_n) + \sum_{m=1}^{k_2} D_m t^m] - y_N| \quad (۴)$$

$k_2 = 1 \; or \; 2$

که در آن $\sum_{m=1}^{k2} D_m t^m$ تابع درجه‌ی m می‌باشد که با اضافه شدن به تابع هزینه، الگوریتم را در پیش‌بینی سرعت ژنراتور کمک می‌کند. در شرایط جزیره شدگی تفریق سرعت ژنراتورها از $A + \sum_{m=1}^{k2} D_m t^m$ یک تابع نمایی سینوسی است. با توجه به طبقه‌بندی‌هایی که در مراجع [۴] و [۵] صورت گرفته وقتی پدیده جزیره شدگی در سیستم قدرت رخ می‌دهد ژنراتورهای هم‌گروه دارای سرعت تقریباً برابر هستند ولی با ژنراتورهای دیگر گروه‌ها در حال جدا شدن الکتریکی است. در رفتار جزیره شدگی معیار فاصله، سرعت سنکرون جزیره‌ها می‌باشد (یا زاویه‌ی روتور) که در مرجع [۴]نیز آمده است. اما از این‌که این فاصله چه قدر باشد تا به عنوان جزیره شدگی در نظر گرفته شود تاکنون روش کارآمدی ارائه نشده است(نسبت به زمان چقدر در نظر گرفته شود). با این وجود مقدار آستانه این فاصله تأثیری در کارایی روش پیشنهادی در این مقاله ندارد، چون می‌توان با افزایش افق پیش‌بینی، جزیره شدگی بر مبنای فاصله گفته شده را با اطمینان بیشتری شناسایی کرد (در پیش‌بینی ناپایداری گذرا مجاز به پیش‌بینی طولانی مدت نیستیم ولی در جزیره شدگی می‌توان پیش‌بینی طولانی مدت انجام داد چرا که بعد از رفع خطا انجام می‌پذیرد. به همین علت زمان رفع خطا برای مدل پیش‌بینی جزیره شدگی لازم می‌باشد تا افق پیش‌بینی در این لحظه زیاد شود). با این توضیحات نیازی به تخمین قسمت نوسانی تابع هدف معادله (۴) نبوده و تنها $A + \sum_{m=1}^{k2} D_m t^m$ به عنوان تابع هدف مدنظر قرار می‌گیرد. به عنوان مثال به ازای یکی از خطاها با رفع خطای ۳۰۰ میلی‌ثانیه تغییرات سرعت ژنراتورها درشکل ۱۱ نشان داده‌شده است. با توجه به این شکل سرعت هر دو گروه از ژنراتورها به با دقت مناسبی به کمک $A + \sum_{m=1}^{k2} D_m t^m$ پیش‌بینی شده‌اند که با خطوط مقطع نشان داده‌شده است. نتایج هر دو بهینه‌سازی به کمک روش SBB نرم‌افزار GAMS در جدول۳ آمده است که نشان‌گر دو خط ساده می‌باشند. با توجه به این خطوط که قبل از شروع جزیره شدگی تخمین زده شده‌اند. براحتی رفتار سرعت ژنراتورها برای ثانیه‌های بعد مورد بررسی قرا می‌گیرد و می‌توان در مرحله‌ی کنترل جزیره سازی از آن استفاده نمود. از آنجایی که دو جزیره دارای تغییرات یکسانی هستند و تنها یک جزیره دارای شیب متفاوتی است لذا بایستی یک ناحیه به‌صورت جزیره از شبکه جدا شود. نحوه جدا کردن جزیره‌ها در این مقاله مدنظر نبوده و در این قسمت تنها این رخداد پیش‌بینی شده است.

جدول ۳: نتایج پیش‌بینی برای حالت جزیره شدگی با تابع هدف اصلاح‌شده

جزیره‌ی جنوبی	جزیره شمالی و غربی
$O_F = 0.9800$	$O_F = 0.24474$
$k2 = 2 \quad A = 0.98443$	$k2 = 2 \quad A = 1.0064$
$D_m = [0.030581 \;\; 0.00033643]$	$D_m = [0.0072202 \;\; -0.00034845]$



شکل ۱۱: نحوه‌ی تغییرات سرعت ژنراتورها بعد از اعمال خطای ۳فاز در باس ۱۶ و با رفع خطای ۳۰۰میلی‌ثانیه

تداخل این روش با نوسان توان و ادوات جبران گر.. وجود نخواهد داشت. هم چنین توسط این روش به راحتی زمان رفع خطا از طریق تشخیص افزایش تابع هدف قابل تخمین است. و بعد از تخمین رفع خطا به راحتی می‌توان با مدل اصلاح‌شده، جزیره شدگی را پیش‌بینی نمود و شرایط را برای اقدامات کنترل جزیره شدگی مهیا ساخت.

٦- نتیجه‌گیری

جزیره شدگی ناخواسته فرایندی است که باید با توجه به توپولوژی نهایی سیستم قدرت و بعد از رفع خطا (نه در حین خطا) پیش‌بینی گردد. از آنجایی که در روش‌های پیش‌بینی که تاکنون در این راستا ارائه شده است قابلیت تخمین زمان رفع خطا وجود ندارد لذا در پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته نمی‌توان از این روش‌ها بهره گرفت. تابع هدف پیشنهادی با توجه به مدهای تحریک‌شده در حین اغتشاش و بعد از اغتشاش مدل گردید تا با تغییر توپولوژی در هرلحظه‌ای تابع هدف دارای تغییرات زانویی باشد (به علت تغییر مدهای تحریک‌شده). این تغییرات جهت تخمین زمان رفع خطا و وقوع خطا مورد استفاده قرار می‌گیرد تا لحظه مناسب برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته تعیین گردد. همچنین به علت اینکه این روش بر مبنای داده های اندازه گیری واحدهای فازوری می‌باشد لذا برخلاف روش های سنتی پیش بین که در سیستم قدرت برمبنای تغییرات امپدانس دیده شده انجام می‌گردد(رله‌های امپدانسی) دچار هم پوشانی با رخداد های دیگر (مثل نوسان توان) نخواهد بود.

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]

در این مقاله برای پیش‌بینی سیگنال زمانی سرعت و زاویه روتور ژنراتورها از تابع هدف پیشنهادی استفاده شد و دقت پیش‌بینی سیگنال زمانی به‌وسیله این تابع هدف، از طریق مقایسه با روش AR مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین دیده شد که جهت پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته به کمک تابع هدف ارائه‌شده باید زمان مناسب برای پیش‌بینی مشخص گردد. پنجره محاسباتی مناسب (زمان مناسب) برای پیش‌بینی جزیره شدگی ناخواسته اولین پنجره بعد از رفع خطا می‌باشد. در این راستا زمان رفع خطا و وقوع خطا نیاز به شناسایی است که از طریق تغییرات زانویی تابع هدف پیشنهادی قابل شناسایی است. با توجه به اینکه جزیره شدگی ناخواسته به فاصله الکتریکی زاویه و سرعت روتور ژنراتورها بستگی داشت به همین دلیل نیازی به قسمت نوسانی سرعت و زاویه روتور ژنراتورها بعد از رفع خطا نبود در نتیجه تابع هدف اصلاح شده به کمک اطلاعات دستگاه‌های اندازه‌گیری در داخل پنجره محاسباتی برای جزیره شدگی استفاده شد.

نتایج شبیه سازی در شبکه استاندارد ۳۹ باسه IEEE به ازای سناریوی خطایی که منجر به جزیره سازی ناخواسته می‌گردید نشانگر آن است که روش مورد نظر در تخمین زمان وقوع خطا و رفع خطا از دقت مورد قبولی برخوردار است. که در ادامه این زمان ها برای تشخیص پنجره مناسب پیش بینی جزیره شدگی مورد استفاده قرار گرفت و جزیره شدگی ناخواسته با تابع هدف اصلاح یافته پیش‌بینی گردید.

مراجع

[1] Power swing and out-of-step consideration on transmission lines IEEE PSRC WG D6

[۲] فرزین پرنیان "تحلیل فروپاشی شبکه‌ی کشور در تاریخ ۸۰/۲/۳۰" ،گروه بهره‌برداری شبکه،پژوهشکده‌ی برق،پژوهشگاه نیرو تهران ،ایران

[3] M.Sanaye-pasand," scrutiny of the Iranian national grid", IEEE power & energy magazine, 2007.

[4] Senroy, Nilanjan, Gerald T. Heydt, and Vijay Vittal. "Decision tree assisted controlled islanding." Power Systems, IEEE Transactions on 21, no. 4 (2006): 1790-1797

[5] Xu, Guangyue, Vijay Vittal, Anatoliy Meklin, and Jon Eric Thalman. "Controlled islanding demonstrations on the WECC system." Power Systems, IEEE Transactions on 26, no. 1 (2011): 334-343.

[6] Ahmed, S. Shahnawaz, Narayan Chandra Sarker, Azhar B. Khairuddin, Mohd Ruddin B. Abd Ghani, and Hussein Ahmad. "A scheme for controlled islanding to prevent subsequent blackout." Power Systems, IEEE Transactions on 18, no. 1 (2003): 136-143.

[7] Liu, Li, Wenxin Liu, David A. Cartes, and Il-Yop Chung. "Slow coherency and Angle Modulated Particle Swarm Optimization based islanding of large-scale power systems." Advanced Engineering Informatics 23, no. 1 (2009): 45-56.

[8] You, Haibo, Vijay Vittal, and Xiaoming Wang. "Slow coherency-based islanding." Power Systems, IEEE Transactions on 19, no. 1 (2004): 483-491.

[9] Sun, Kai, Tarlochan S. Sidhu, and Ming Jin. "Online pre-analysis and real-time matching for controlled splitting of large-scale power networks." In Future Power Systems, 2005 International Conference on, pp. 6-pp. IEEE, 2005.

[10] Sun, Kai, Kyeon Hur, and Pei Zhang. "A new unified scheme for controlled power system separation using synchronized phasor measurements." IEEE Transactions on Power Systems 26, no. 3 (2011): 1544-1554.

[11] Senroy, Nilanjan, and Gerald T. Heydt. "Timing of a controlled islanding strategy." In 2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, pp. 1460-1466. IEEE, 2006.

[12] Kamali, Sadegh, Turaj Amraee, and Seyed Mohammad Taghi Bathaee. "Prediction of unplanned islanding using an energy based strategy." IET Generation, Transmission & Distribution 10, no. 1 (2016): 183-191.

[13] Isazadeh, Ghader, Amin Khodabakhshian, and Eskandar Gholipour. "New intelligent controlled islanding scheme in large interconnected power systems." IET Generation, Transmission & Distribution 9, no. 16 (2015): 2686-2696.

[14] Adibi, M. M., R. J. Kafka, Sandeep Maram, and Lamine M. Mili. "On power system controlled separation." Power Systems, IEEE Transactions on 21, no. 4 (2006): 1894-1902.

[15] Yang, Bo, Vijay Vittal, and Gerald T. Heydt. "Slow-Coherency-Based Controlled Islanding&# 8212; A Demonstration of the Approach on the August 14, 2003 Blackout Scenario." Power Systems, IEEE Transactions on 21, no. 4 (2006): 1840-1847.

[16] Marple Jr, S. Lawrence. "Digital spectral analysis with applications." Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, Inc., 1987, 512 p. 1 (1987).

[17] Ljung, Lennart. System identification. Birkhäuser Boston, 1998.

[18] http://psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks

[Downloaded from joc-isice.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1399.14.1.3.1]
[DOI: 10.29252/joc.14.1.25]