

حفاظت ازدست‌رفتن تحریک ژنراتور سنکرون بر مبنای درخت تصمیم در حضور کنترل‌کننده یک پارچه پخش توان

سعید محمدزاده^۱، دانشجوی دکتری؛ سید قدرت‌اله سیف‌السادات^۲، استاد؛ محمود جورابیانی^۳، استاد

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - s.mohammadzadeh84@gmail.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - seifossadat@yahoo.com

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده مهندسی - دانشگاه شهید چمران اهواز - اهواز - ایران - mjoorabian@scu.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی بر مبنای درخت تصمیم برای حفاظت ازدست‌رفتن تحریک (LOE) ژنراتور سنکرون در حضور کنترل‌کننده یک پارچه پخش توان (UPFC) ارائه شده است. حضور UPFC سبب می‌شود که رله بردی دچار تأخیر در شناسایی LOE شود. در روش پیشنهادی متغیرهای مختلف در نظر گرفته شده‌اند. در الگوهای مختلف تست و آموزش و با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، مناسب‌ترین متغیرها انتخاب شده‌اند تا دقت در زمان آشکارسازی خطای LOE را افزایش دهند. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب/سیمولینک، درستی روش پیشنهادی را در بارگذاری‌های مختلف، درصدهای مختلف ازدست‌رفتن تحریک، حالت‌های مختلف خطا و شرایط نویزی تأیید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی نسبت به روش‌های سنتی، در تفکیک خطاهای LOE و خطاهای خارجی تحت شرایط عملکرد ناشناخته، دقت دسته‌بندی بهتر و سرعت تشخیص بالاتری دارد.

واژه‌های کلیدی: حفاظت ازدست‌رفتن تحریک، درخت تصمیم، کنترل‌کننده یک پارچه پخش توان، طرح بردی.

A Decision Tree-based Method of Loss of Excitation Protection of Synchronous Generators in Presence of UPFC

S. Mohammadzadeh¹, PhD Candidate; G. Seifossadat², Professor; M. Jourabian³, Professor

1- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz of Iran, Email: s.mohammadzadeh84@gmail.com

2- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran, Email: seifossadat@yahoo.com

3- Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahwaz, Iran, Email: mjoorabian@scu.ac.ir

Abstract: In this paper, a Decision Tree-based method of Loss of Excitation (LOE) Protection of Synchronous Generators in Presence of Unified Power Flow Controller (UPFC) is presented. The presence of UPFC causes the Berdy relay to be delayed in detecting LOE. In the proposed method, different variables are considered and in the various test and training patterns and using intelligent algorithms, the most suitable variables selected to increase the accuracy in detecting the time of LOE. The simulation results in Matlab/Simulink software validate the accuracy of the proposed method in various loadings, different percentages of loss of excitation, various scenarios of fault and noisy conditions. The results reveal that the proposed method has a better classification accuracy and a higher identification speed under new and unseen operating conditions of LOE and external faults compared to traditional methods.

Keywords: Loss of excitation protection, decision tree, unified power flow controller, berdy plan.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۲/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۶/۰۶، ۱۳۹۷/۰۹/۰۹، ۱۳۹۷/۱۱/۲۴، ۱۳۹۷/۰۳/۱۲ و ۱۳۹۸/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۹

نام نویسنده مسئول: سید قدرت‌اله سیف‌السادات

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

عملکرد رله LOE، نشان داده شده که GIPFC در مواردی باعث می‌شود که رله LOE عمل نکرده و خطا را شناسایی نکند.

در زمینه حفاظت تحریک ژنراتور سنکرون مطالعات مختلفی انجام شده است. در مرجع [۱۰] مزیت‌های شبکه‌های عصبی پس‌انتشار در حفاظت تحریک مورد بررسی قرار گرفته است. این روش مقدار قابل توجهی از داده‌های آموزشی را نیاز دارد. در [۱۱] و [۱۲] روش‌هایی بر مبنای نرخ تغییر راکتانس و تئوری فازی ارائه شده است تا عملکرد رله‌های امیدانسی بهبود یابد. در [۱۳] طرحی بر مبنای درخت تصمیم پیشنهاد شده است. استراتژی پیشنهادی در [۱۴] طرح ترکیبی بر مبنای حاصل ضرب مشتق ولتاژ ترمینال و مشتق توان راکتیو خروجی ژنراتور را استفاده می‌کند. در این طرح علی‌رغم مزایای قابل قبول، تأخیر زمانی به منظور اجتناب از عملکرد اشتباه رله LOE تعیین شده است. مرجع [۱۵] نرخ تغییر مقاومت را به عنوان یک شاخص آشکار سازی LOE معرفی می‌کند. مقاومت اندازه‌گیری شده به دلیل تغییرات سرعت فرکانس لغزش ماهیت نوسانی دارد و در رخداد LOE که فرکانس لغزش بالا است، رله پیشنهادی ممکن است به درستی عمل نکند. در [۱۶] از مشتق دوم جریان آرمیچر برای شناسایی خطای از دست رفتن تحریک استفاده شده و در [۱۷] طرحی بر مبنای ولتاژ داخلی ژنراتور ارائه شده است.

به منظور بهبود عملکرد رله LOE در حضور ادوات FACTS روش‌هایی ارائه شده است. در [۱۸] روشی بر مبنای شار در حضور STATCOM ارائه شده است. در [۹] نیز نشان داده شده است که با ارسال اطلاعات ولتاژ و جریان دو انتهای خط مربوط به GIPFC، می‌توان اثر GIPFC را در حفاظت LOE کاهش داد. در [۱۹] یک روش بهینه‌سازی برای تنظیم نواحی حفاظت رله دیستانس ارائه شده و در [۲۰] روشی برای اصلاح عملکرد رله دیستانس بر اساس اطلاعات ولتاژ پیش از خطا و جریان حین اتصال کوتاه پیشنهاد شده است.

پیشنهاد‌های بیان شده برای حفاظت دیستانس و یا آشکار سازی LOE در حضور ادوات FACTS، یا به اندازه‌گیری سنکرون شده و یا به حل معادلات مختلط و پیچیده نیازمند هستند. عیب اصلی روش‌های اندازه‌گیری سنکرون نیازمند بودن به یک کانال ارتباطی است. روش‌های مبتنی بر معادلات نیز علاوه بر پیچیده بودن، به دلیل تخمین‌های زده شده ممکن است دقیق نباشند. در حالی که روش‌های مبتنی بر داده‌کاوی، به دلیل توانایی یادگیری و تطبیق، می‌توانند خود را با تغییر در پارامترهای سیستم تطبیق دهند.

در این مقاله به بررسی تأثیر UPFC در حفاظت LOE ژنراتور سنکرون پرداخته شده است. نتایج آورده شده در این مقاله نشان می‌دهد که حضور UPFC باعث ایجاد تأخیر چشم‌گیری در عملکرد رله LOE می‌شود. بر این اساس روشی بر مبنای درخت تصمیم، برای ارزیابی بردن اثر UPFC در حفاظت LOE ارائه شده است. به این منظور متغیرهای مختلفی مدنظر قرار گرفته‌اند. برای انتخاب مناسب‌ترین ویژگی‌ها، مسئله بهینه‌سازی به کمک الگوریتم‌های هوشمند حل شده است. مزیت اصلی روش پیشنهادی آن است که در آن نیازی به استفاده از PMUs و ارسال

به منظور بهینه‌سازی جنبه‌های عملیاتی تولید، انتقال و توزیع برق، شبکه‌های انتقال باید در ظرفیت فیزیکی بهره‌برداری شوند. از طرفی تغییر و احداث خط انتقال با توجه به تأثیرات زیست‌محیطی، خطرات بهداشتی در زمینه‌های مغناطیسی و برق و مسائل مالی دچار محدودیت است. با تحقیقات سریع روبه‌رشد در مورد عناصر الکترونیک قدرت، ادوات FACTS برای انتقال قدرت بیش‌تر از طریق خط انتقال استفاده می‌شوند. این ادوات پاسخ سریع و خروجی قابل تنظیم دارند و پاسخ به تغییرات فرکانس در خروجی، بدون اختلال در پایداری و محدودیت‌های حرارتی را فراهم می‌کنند [۱].

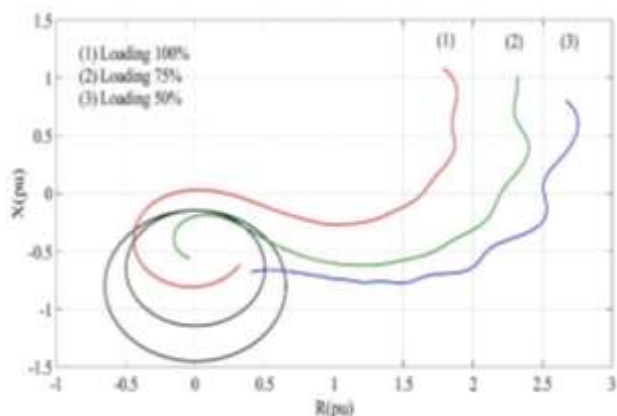
در میان ادوات UPFC، FACTS، یکی از قدرتمندترین ابزارهایی است که می‌تواند به صورت مؤثر کنترل پخش توان را فراهم کند و پایداری شبکه قدرت را بهبود ببخشد. UPFC می‌تواند به طور هم‌زمان یا انتخابی، امیدانسی خط انتقال، دامنه ولتاژ پایانه و پخش توان اکتیو و راکتیو خط را کنترل کند و بنابراین به طور گسترده‌ای برای جبران‌سازی خط انتقال در نظر گرفته می‌شود [۳].

اگرچه استفاده از UPFC توانایی انتقال توان و پایداری یک سیستم قدرت را بهبود می‌بخشد، مشکلاتی در زمینه حفاظت از سیستم‌های قدرت، به خصوص حفاظت خطوط انتقال و حفاظت تحریک ژنراتور، ظاهر می‌شود. با توجه به وجود UPFC در حلقه خطا، سیگنال‌های ولتاژ و جریان در نقطه انتقال، در حالت پایدار و هم‌چنین حالت گذرا، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. بنابراین UPFC تأثیر قابل توجهی در عملکرد طرح‌های حفاظت موجود دارد. هنگامی که SSSC یک UPFC، توان اکتیو مصرف می‌کند، مقاومت ظاهری افزایش می‌یابد و هنگامی که SSSC توان راکتیو را مصرف می‌کند، راکتانس ظاهری افزایش می‌یابد. در مقایسه با UPFC، STATCOM تأثیر بیشتری بر مقاومت ظاهری به علت تزریق توان اکتیو و مصرف توسط SSSC و STATCOM دارد [۳].

در بررسی‌های تأثیر ادوات FACTS بر حفاظت، سه دسته‌بندی کلی می‌توان انجام داد. در گروه اول، تأثیر ادوات سری مانند TCSC و SSSC روی حفاظت بررسی شده است [۴]. در دسته دوم ادوات موازی مانند SVC و STATCOM بررسی شده‌اند [۵، ۶] و دسته سوم، شامل ادوات سری-موازی مانند UPFC است [۷]. در همه این مقالات نشان داده شده که ادوات FACTS، حفاظت سنتی را دچار اختلال می‌کنند. در مقایسه این سه گروه، ادوات FACTS شامل بخش سری (گروه اول و سوم) در مقایسه با ادوات موازی تأثیر بیشتری دارند.

در تحقیقات اخیر نشان داده شده است که حضور ادوات FACTS عملکرد رله LOE ژنراتور سنکرون را نیز دچار اختلال می‌کنند. در [۸] تأثیر ادوات FACTS موازی در رله LOE بررسی شده است. در این مقاله نشان داده شده است که در زمان قطع تحریک، وجود ادوات FACTS موازی، از سرعت کاهش ولتاژ ژنراتور سنکرون می‌کاهد و باعث می‌شود عملکرد رله LOE با تأخیر باشد. در [۹] با بررسی تأثیر GIPFC

عصر داخلی با قطر ۱ pu در پایه امیدانس ژنراتور و عنصر خارجی با قطر X_d ، تنظیم می‌گردند. هر دو عنصر با افست مساوی $\frac{1}{2}X'_d$ تنظیم می‌شوند. در بارگذاری‌های مختلف، خط سیر امیدانس ظاهری متفاوت است. برای نمونه شکل ۲ این تغییرات را در سه بارگذاری مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲: خط سیر امیدانس در خطای LOE تحت سه بارگذاری مختلف

۲-۲-۲- درخت تصمیم (DT)

تکنیک داده‌کاوی در زمینه‌های مختلف دسته‌بندی و پیش‌بینی علوم مهندسی مانند پردازش سیگنال، پردازش تصویر، تحلیل گذرای سیستم قدرت، امنیت شبکه و کامپیوتر و ... استفاده شده است. در میان ابزارهای مختلف داده‌کاوی مانند ANN، SVM، ANFIS، k-NN و DT و ... در این مقاله انتخاب شده است، زیرا نسبت به تکنیک‌های دیگر زمان آموزش کمتری نیاز دارد و دارای دقت بیشتری است [۲۳].

نمایش ریاضی الگوریتم DT براساس معادلات زیر است

[۲۴، ۲۳]:

$$\bar{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_m\}^T$$

$$X_i = \{x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}\} \quad (1)$$

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m\}^T$$

که در آن m تعداد مشاهدات موجود، n تعداد متغیرهای مستقل، S بردار m بعدی متغیر پیش‌بینی شده از \bar{X} ، X_i ، i امین مؤلفه بردار n بعدی متغیرهای مستقل، $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij}, \dots, x_{in}$ متغیرهای (پیش‌بینی‌های) مستقل بردار الگوی X_i و T نماد ترانسپوز بردار است.

هدف الگوریتم DT آن است که S، براساس مشاهدات \bar{X} پیش‌بینی شود. مادامی که DT‌های بسیار با سطوح دقت مختلف می‌توانند از \bar{X} ساخته شوند، یافتن درخت بهینه به دلیل اندازه بزرگ فضای جستجو مشکل است. بر همین اساس الگوریتم‌های مختلفی توسعه یافته‌اند تا یک تعادل بین دقت و پیچیدگی برقرار کنند. این الگوریتم‌ها DT را با یک توالی از تصمیمات بهینه محلی درباره پارامترهای سیستم می‌سازند که به منظور دسته‌بندی مجموعه داده \bar{X} استفاده می‌شوند. درخت تصمیم بهینه T_{k0} ، بر طبق مسئله بهینه‌سازی زیر ساخته شده است [۲۳]:

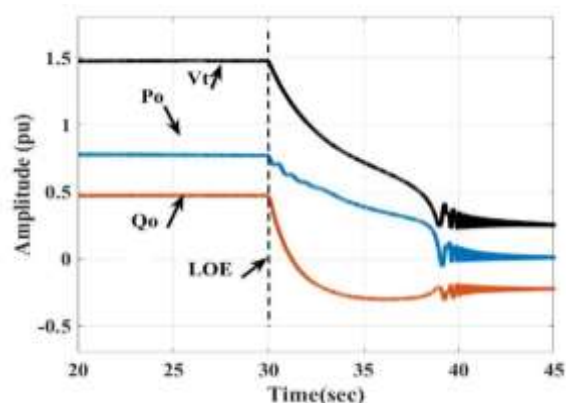
اطلاعات توسط کانال‌های مخابراتی نیست. در بررسی‌های صورت گرفته حالات مختلف کاری ژنراتور سنکرون، انواع درصد‌های LOE و عملکرد روش در شرایط نویزی در نظر گرفته شده است.

۲- مفاهیم اولیه

۲-۱- مفهوم ازدست‌رفتن تحریک و حفاظت سنتی آن

یک از دست‌رفتن تحریک زمانی رخ می‌دهد که تحریک سیم‌پیچ میدان ژنراتور متوقف گردد. جریان DC ورودی به سیم‌پیچ میدان، باعث تحریک مدار مغناطیسی روتور به منظور ایجاد شار روتور می‌شود. این شار یک ولتاژ داخلی تولید می‌کند که مخالف با ولتاژ سیستم است. زمانی که تحریک از دست می‌رود، جریان رتور و ولتاژ داخلی ژنراتور میرا خواهند شد و در نتیجه توان راکتیو خروجی کاهش می‌یابد. اگر ژنراتور در ابتدا در حال تغذیه توان راکتیو به سیستم قدرت باشد، توان راکتیو خروجی به صفر کاهش خواهد یافت و بنابراین ژنراتور از سیستم قدرت توان راکتیو جذب می‌کند تا جایگزین تحریکی نماید که قبلاً توسط مدار تحریک تأمین می‌شد. همچنین، کاهش ولتاژ داخلی باعث تضعیف اتصال مغناطیسی بین رتور و استاتور می‌شود. در نقطه‌ای طی حالت میرایی، این اتصال بیش از اندازه ضعیف خواهد شد و ژنراتور حالت سنکرون را از دست داده و به ژنراتور القایی تبدیل می‌شود [۲].

شکل ۱ رفتار سه متغیر ولتاژ ترمینال، توان اکتیو و توان راکتیو ژنراتور را بعد از یک خطای LOE نشان می‌دهد.



شکل ۱: رفتار سه متغیر V_t ، P_0 و Q_0 در رخداد ازدست‌رفتن تحریک

روش‌های سنتی حفاظت LOE در [۲۱] و [۲۲] ارائه شده است. عیب طرح حفاظتی میسون [۲۱] این است که یک تأخیر قطع به تمام پیشامدهای LOE اعمال می‌شود. این تأخیر طوری تنظیم می‌شود تا نوسانات پایداری که معمولاً یک مسیر امیدانس در نزدیکی X_d ارائه می‌کنند، برای نمونه مسیر امیدانس در حالت بار کم، پشت‌سر بگذارند. بنابراین، تأخیر حاصل به شدیدترین پیشامدهای LOE اعمال می‌شود. یک نمونه اصلاح‌شده این طرح توسط بردی [۲۲]، یک عنصر دیستانس دوم را به قصد عملکرد برای شدیدترین پیشامدهای LOE اضافه می‌کند. مشخصه طرح اصلاح‌شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در این روش

که در آن I_{Lx} و I_{Ly} به ترتیب مؤلفه های حقیقی و موهومی I_L هستند.

در یک شبکه قدرت، پخش توان راکتیو خط در مقدار کم نگه داشته می شود. بنابراین، توانایی کنترل پخش توان راکتیو UPFC در مدیریت مسائل مربوط به اضافه بار محدود است. با این حال، تنظیم توان اکتیو UPFC را در طیف گسترده ای می توان تنظیم کرد.

۲-۴- مدل سیستم تحریک

برای به دست آوردن میدانی که از سیستم تحریک تولید می شود، نیاز است جریان مستقیم ماشین سنکرون فراهم شود. ولتاژ میدان و جریان میدان نیز توسط سیستم تحریک کنترل می شود. انواع مختلف سیستم های تحریک وجود دارند. در این کار برای مدل سازی، سیستم تحریک IEEE type-1 انتخاب شده است [۱].

۳- تأثیر UPFC بر حفاظت تحریک

توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور سنکرون در رخداد LOE در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می شود که مطابق انتظار، توان اکتیو خروجی ژنراتور تغییری نداشته است، زیرا مقدار توان اکتیو ژنراتور وابسته به توان مکانیکی ورودی است که تغییری در آن صورت نگرفته است. در واقع در حضور UPFC، پخش توان در سیستم تغییر می کند. در نتیجه تلفات تکنیکی نیز تغییر خواهد کرد. این تغییر مقدار تلفات با ماشین های سنکرون و توسط کنترل های PSS به اشتراک گذاشته می شود. بنابراین اگرچه UPFC خروجی توان اکتیو ماشین ها را تحت تأثیر می گذارد، اما مقدار آن بسیار کوچک است. از طرفی UPFC باعث شده است که توان راکتیو ژنراتور افزایش یابد. این افزایش توان راکتیو باعث شده است که رله LOE دچار تأخیر در عملکرد شود. زیرا چنانچه در شکل ۵ نشان داده شد، حرکت توان راکتیو به سمت بخش منفی (یا جذب توان راکتیو توسط ژنراتور)، باعث حرکت راکتانس محاسبه شده توسط رله به بخش منفی می شود که این موضوع باعث تشخیص LOE توسط رله می گردد. حال وجود UPFC و افزایش توان راکتیو، باعث کاهش راکتانس شده است و سبب شده که رسیدن آن به بخش منفی، زمان بیشتری طول بکشد. توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در هر دو حالت برای مقایسه در شکل ۴ ترسیم شده است.

امپدانس محاسبه شده توسط رله در شکل ۵ نشان داده شده است. برای مقایسه دو حالت با UPFC و بدون UPFC در این شکل آورده شده است. امپدانس محاسبه شده توسط رله در حالت عادی و قبل از LOE، در خارج دایره های طرح بردی واقع می شود. در $t=30$ s رخ می دهد و با کاهش توان راکتیو ژنراتور راکتانس محاسبه شده توسط رله به بخش منفی حرکت می کند تا در نهایت، در $t=38/61$ s وارد ناحیه ۱ می شود. مقایسه دو حالت با و بدون UPFC، نشان می دهد که حضور UPFC سبب شده است که رله دچار تأخیر در شناسایی LOE شود.

$$\hat{R}(T_{k0}) = \min_k \{\hat{R}(T_k)\}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$\hat{R}(T_k) = \sum_{t \in T} \{r(t) \cdot p(t)\} \quad (3)$$

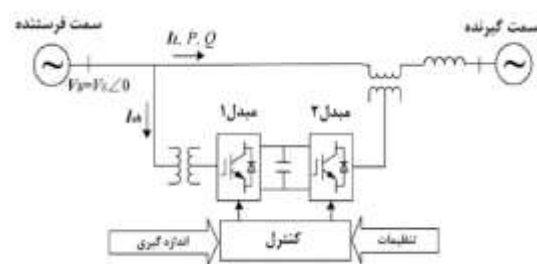
که در آن $\hat{R}(T)$ نرخ خطای دسته بندی اشتباه درخت T_k است. T_{k0} مدل DT بهینه است که خطای دسته بندی اشتباه را حداقل می کند. T درخت باینری متعلق به مجموعه $\{T_1, T_2, T_3, \dots, T_k, t_1\}$ است، K تعداد شاخص درخت است، t یک گره در درخت، t_1 گره ریشه، $r(t)$ ارزیابی از خطا در دسته بندی اشتباه در گره t و $p(t)$ احتمال آن است که هر حالت در گره t واقع شود. هر درخت تصمیم باینری، مجموعه ای از بخش های باینری تودرتو است که در اینجا به فرم بازگشتی زیر نشان داده شده است [۲۴]:

$$T = \{(n, q, m, n^L, n^R), T^L, T^R\} \quad (4)$$

که در آن n یک برجسب گره تصمیم را نشان می دهد، q محور مشخصه، m مقدار آستانه استفاده شده برای بخش، n^L و n^R برجسب های گره برای بخش چپ و راست مجموعه و T^L و T^R زیردرخت های تعریف شده در مجموعه های چپ و راست یک بخش هستند.

۲-۳- مدل UPFC

ساختار اساسی UPFC نصب شده در یک خط انتقال، در شکل ۳ نشان داده شده است. UPFC شامل دو مبدل منبع ولتاژ (VSCs) متصل به یک خازن dc است. مبدل ۱ از طریق ترانسفورماتور شنت به طور موازی، و مبدل ۲ از طریق ترانسفورماتور سری به صورت سری با خط انتقال متصل می شوند. هدف اصلی مبدل ۱ تنظیم ولتاژ DC، با تنظیم مقدار توان اکتیو تحویل شده است. پخش توان حقیقی و راکتیو در خط انتقال را می توان به سرعت با تنظیم دامنه و فاز ولتاژ تزریق توسط مبدل ۲ تنظیم کرد، یعنی پخش توان حقیقی و راکتیو در خط انتقال، P و Q ، به سرعت در تنظیمات آن ها، P^* و Q^* ، تنظیم می شوند [۳].



شکل ۳: ساختار اساسی یک UPFC

I_L و I_{sh} نشان دهنده فازور جریان پریونیت است که به ترتیب به دستگاه موازی و خط انتقال جاری می شوند. V_s نشان دهنده فازور ولتاژ پریونیت در انتهای فرستنده است. I_{sh} مانند I_L بزرگ نیست و می تواند نادیده گرفته شود. دامنه V_s در V_s نگه داشته شده و زاویه فاز V_s ، صفر درجه است. پخش توان حقیقی و راکتیو در خط انتقال می تواند به صورت زیر بیان شود:

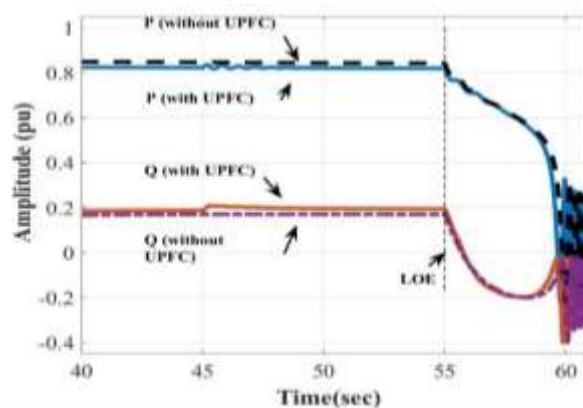
$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = V_s \begin{bmatrix} I_{Lx} \\ -I_{Ly} \end{bmatrix} \quad (5)$$

متغیرهایی باید انتخاب شوند که دارای بیشترین اطلاعات در زمینه مورد مطالعه باشند. مطالعات مختلفی که تاکنون در زمینه حفاظت تحریک انجام شده‌اند، نشان می‌دهند که کمیت‌هایی مانند توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها، ولتاژ ترمینال، مقاومت، راکتانس و زاویه رتور اطلاعات کافی در این باره دارند [۱۳]. از طرف دیگر در مراجع مختلف، معیارهای دیگری نیز تعریف شده است. در مطالعه پیشنهادی، براساس روش‌های ارائه شده در مطالعات پیشین، ۲۲ ویژگی جدول ۱ انتخاب شده‌اند تا میزان تأثیر آن‌ها در تفکیک خطای ازدست‌رفتن تحریک و خطای خارجی مورد بررسی قرار گیرد. الگوریتم پیشنهادی سیگنال‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز را برای محاسبه ویژگی‌ها استفاده می‌کند.

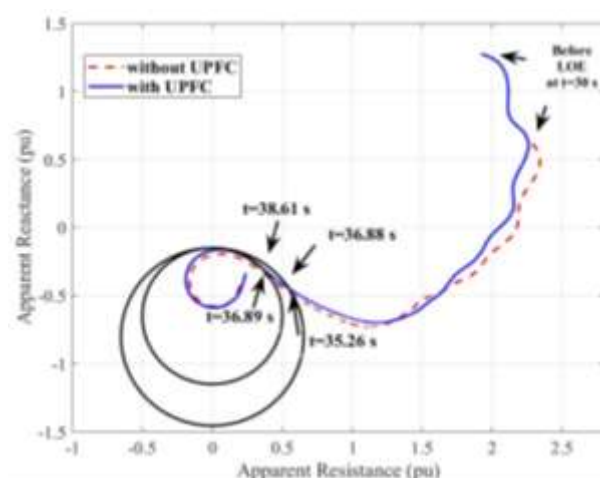
جدول ۱: متغیرهای در نظر گرفته شده در طرح پیشنهادی

متغیر	تعریف
$X1 = P_o$	توان اکتیو خروجی ژنراتور
$X2 = Q_o$	توان راکتیو خروجی ژنراتور
$X3 = \Delta$	زاویه رتور
$X4 = V_t$	ولتاژ ترمینال ژنراتور
$X5 = R$	مقاومت اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور
$X6 = X$	راکتانس اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور
$X7 = dV_t/dt \times dQ/dt$	حاصل ضرب مشتق توان راکتیو نسبت به زمان در مشتق ولتاژ ترمینال نسبت به زمان [۱۴]
$X8 = dR/dt$	مشتق مقاومت نسبت به زمان [۱۵]
$X9 = dX/dt$	مشتق راکتانس نسبت به زمان [۱۱]
$X10 = e_t$	ولتاژ داخلی ژنراتور [۱۷]
$X11 = dV_t/dt$	مشتق ولتاژ ترمینال نسبت به زمان
$X12 = d^2V_t/dt^2$	مشتق دوم ولتاژ ترمینال نسبت به زمان
$X13 = di/dt$	مشتق جریان استاتور نسبت به زمان
$X14 = d^2i/dt^2$	مشتق دوم جریان استاتور نسبت به زمان [۱۶]
$X15 = dP/dt$	مشتق توان اکتیو خروجی ژنراتور نسبت به زمان
$X16 = dQ/dt$	مشتق توان راکتیو خروجی ژنراتور نسبت به زمان
$X17 = df/dt$	مشتق فرکانس نسبت به زمان
$X18 = PF$	ضریب توان
$X19 = i_{neg}$	جریان توالی منفی
$X20 = di_{neg}/dt$	مشتق جریان توالی منفی نسبت به زمان
$X21 = df/dP$	مشتق فرکانس نسبت به توان اکتیو خروجی
$X22 = dV/dQ$	مشتق ولتاژ ترمینال نسبت به توان راکتیو خروجی

به منظور پیش‌بینی شرایط مختلف شبکه، حالت‌های مختلفی شبیه‌سازی شده است. این حالت‌ها باید بیش‌ترین شرایط ممکن در یک شبکه قدرت را پوشش دهند. بنابراین حالت‌های مختلفی مانند بارگذاری اولیه ژنراتور، مکان خطا، طول خطا، زمان‌های پاک‌شدن مختلف و تغییرات توپولوژی به‌عنوان فاکتورهای تأثیرگذار در تولید نمونه‌های آموزش و تست در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۲ حالت‌های مختلف در هر سطح بارگذاری و جدول ۳ حالت‌های بارگذاری اولیه در نظر گرفته شده برای ژنراتور را تشریح می‌کند.



شکل ۴: توان اکتیو و راکتیو خروجی ژنراتور سنکرون در حضور و عدم حضور UPFC در رخداد LOE



شکل ۵: امیدانس محاسبه شده توسط رله بعد از رخداد LOE در حضور و عدم حضور UPFC

در نتایج آورده شده در شکل ۵ فرض شده که قطع تحریک به صورت کامل رخ داده است. در بسیاری از موارد قطع تحریک به صورت جزئی رخ می‌دهد، به عبارتی ژنراتور به طور کامل تحریک خود را از دست نمی‌دهد و درصدی از تحریک قطع می‌شود. تأثیر حضور UPFC در این حالات شدیدتر خواهد بود و ممکن است رله بردی خطای LOE را نبیند [۸].

۴- دسته‌بندی با درخت تصمیم

دسته‌بندی در بسیاری از مسائل سیستم‌های قدرت همانند پایداری، کیفیت توان و امنیت مورد توجه بوده است. DT به‌عنوان یک ابزار مناسب در این زمینه استفاده شده تا برچسب کلاس یک داده جدید ناشناخته را پیش‌بینی کند و یا بین موضوعات در کلاس‌های مختلف تمایز قائل شود. DTها این ویژگی‌های مهم را براساس مفهوم بهره اطلاعات انتخاب می‌کنند [۱۳].

۴-۱- انتخاب متغیر برای درخت تصمیم

در مطالعات بر مبنای درخت تصمیم، تولید پایگاه داده آموزش، یک بخش حیاتی است، زیرا دقت نتایج به کیفیت داده‌ها بستگی دارد. در نتیجه

۴-۳- اجرای روش

برای این منظور، حالت‌های جدول‌های ۲ و ۳ اجرا شده و نتایج ذخیره سازی شده است. در نهایت ۱۴۷۲۳۳ نمونه ورودی-خروجی ایجاد شده است. (۷۱۳۸ نمونه خطای ازدست‌رفتن تحریک، ۸۱۲۴۰ نمونه بدون خطا و ۵۸۸۵۵ نمونه خطای خارجی). برای آموزش و تست الگوریتم، الگوهای مختلف تست و آموزش ۵۰-٪، ۶۰-٪، ۷۰-٪، ۸۰-٪، ۹۰-٪ و ۱۰۰٪ استفاده شده است. از بین ۲۰ نمونه یک نمونه انتخاب شده است. (یک نمونه در هر سیکل در فرکانس ۵۰ Hz). از میانگین ۸ نمونه اول به‌عنوان حد آستانه اولیه برای فعال‌شدن مدل هوشمند انتخاب شده است [۲۶]. در محاسبه مشتق مرتبه اول و دوم از روابط زیر استفاده شده است [۲۵]:

$$y'_k = \frac{y_{k+1} - y_{k-1}}{2 \Delta t} \quad (6)$$

$$y''_k = \frac{y_{k+1} - 2y_k + y_{k-1}}{(\Delta t)^2}$$

طرح‌های بردی و میسون در مقابل خطاهای خارجی آسیب‌پذیر هستند. بنابراین برای تمایز قائل‌شدن بین خطاهای LOE و نوسانات پایدار توان، نیاز است هردو رخداد ذخیره‌سازی شوند. در خطای ازدست‌رفتن تحریک، نمونه‌گیری تا زمان تشخیص طرح بردی و در خطاهای خارجی نمونه‌گیری تا زمان میراشدن نوسانات انجام شده است [۱۳]. شبیه‌سازی در فرکانس ۵۰ Hz و با فرکانس نمونه‌برداری ۱ KHz انجام شده است. در واقع در هر سیکل، ۲۰ نمونه موجود است. پنجره داده به اندازه یک سیکل در نظر گرفته می‌شود. به‌صورت آنلاین، هر نمونه ورودی با یکی از کلاس‌های هدف برچسب‌گذاری می‌شود. کلاس‌های هدف در رخداد ازدست‌رفتن تحریک با "LOE"، در حالت خطاهای خارجی با "External Fault (EF)" و در حالت عدم وجود خطا با "NO Fault (NF)" برچسب‌گذاری شده‌اند. با توجه به احتمال وجود پیش‌بینی اشتباه در تشخیص بعضی نمونه‌ها و این واقعیت که هزینه فرمان قطع نادرست برای یک نمونه، از هزینه یک فرمان عدم قطع نادرست بالاتر است، دستور خطا هنگامی صادر می‌شود که ۲۰ نمونه متوالی "LOE" تشخیص داده شوند. ریسک عملکرد نامناسب رله وقتی کاهش می‌یابد که یک طرح حفاظت پشتیبان مناسب در نظر گرفته شود. نتایج به‌دست‌آمده بیان می‌کنند که آشکارسازی LOE بر مبنای DT، تحت تأثیر پارامترهایی مانند بارگذاری‌های مختلف، نوع خطا، مکان خطا، مقاومت خطا، SCC، زمان و زاویه شروع خطا نیست.

۴-۴- انتخاب ویژگی و نتایج

بررسی نتایج به‌دست‌آمده از اجرای درخت تصمیم در جدول ۵ نشان داده شده است. به‌منظور بررسی تأثیر تمامی متغیرها، حالت‌های مختلفی بررسی شده است. در ابتدا جدایی خطی متغیرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای نمونه، این منحنی برای متغیرهای ۳ و ۱۰ تعریف شده در جدول ۱، در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۲: حالت‌های خطا در هر سطح بارگذاری

شماره	محل خطا	نوع خطا
۱	سیستم تحریک	ازدست‌رفتن تحریک
۲	در سمت LV ترانس T1	اتصال کوتاه سه‌فاز
۳	بعد از شین B1	اتصال کوتاه سه‌فاز
۴	بعد از شین B1	اتصال کوتاه سه‌فاز و خروج خط L1
۵	بعد از شین B1	اتصال کوتاه سه‌فاز و خروج خط L2
۶	بعد از شین B2	اتصال کوتاه سه‌فاز
۷	بعد از شین B2	اتصال کوتاه سه‌فاز و خروج خط L1
۸	بعد از شین B4	اتصال کوتاه سه‌فاز
۹	بعد از شین B4	اتصال کوتاه سه‌فاز و خروج خط L2
۱۰	بعد از شین B3	اتصال کوتاه سه‌فاز

جدول ۳: حالت‌های بارگذاری اولیه ژنراتور

شماره	بارگذاری اولیه (P, Cos(φ))
۱	۱ pu, ۰/۸۵ lagging
۲	۰/۷۵ pu, ۰/۸۵ lagging
۳	۰/۵ pu, ۰/۸۵ lagging
۴	۱ pu, ۰/۹۵ lagging
۵	۰/۷۵ pu, ۰/۹۵ lagging
۶	۰/۵ pu, ۰/۹۵ lagging
۷	۱ pu, ۰/۹ leading
۸	۰/۷۵ pu, ۰/۹ leading
۹	۰/۵ pu, ۰/۹ leading
۱۰	۱ pu, ۰/۹۵ leading
۱۱	۰/۷۵ pu, ۰/۹۵ leading
۱۲	۰/۵ pu, ۰/۹۵ leading

۴-۲- ساختار کلی طرح پیشنهادی

بر مبنای حالت‌های تعریف‌شده، شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شده است تا جفت‌های ورودی-خروجی ذخیره شوند. پیش‌بینی یک نمونه جدید مطابق الگوریتم پیشنهادی در شکل ۶ انجام می‌شود. مرحله آفلاین تولید نمونه بر طبق حالت‌های جدول‌های ۲ و ۳ شبیه‌سازی شده است. داده‌های مربوط به متغیرهای موردنظر ذخیره و پایگاه داده موردنظر ساخته می‌شود. در این قسمت جفت‌های ورودی و خروجی تعریف شده است. در مرحله آنلاین، درخت تصمیم، نمونه‌های ورودی را با یکی از کلاس‌های خروجی ازدست‌رفتن تحریک، خطای خارجی و بدون خطا برچسب‌گذاری می‌نماید.



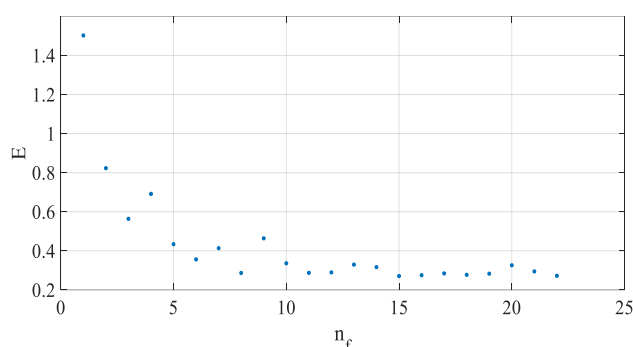
شکل ۶- الگوریتم پیشنهادی به‌منظور حفاظت ازدست‌رفتن تحریک

متفاوت هستند. در عمل با تکرار این الگوریتم‌ها به‌ازای پارامترهای مختلف و بررسی عملی آن در شبکه مورد مطالعه، مهم‌ترین ویژگی‌ها حاصل می‌شوند.

جدول ۴: چند نمونه از اجرای برنامه توسط الگوریتم‌های هوشمند

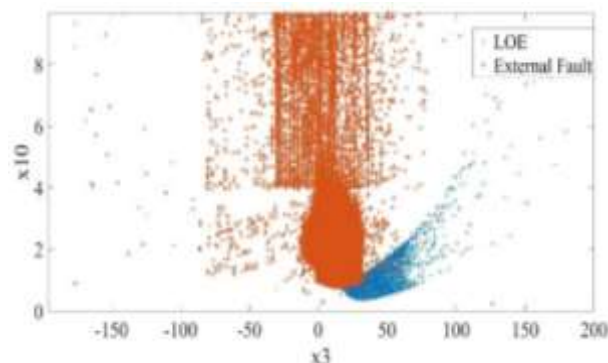
شماره	نوع الگوریتم	خروجی
۱	ویژگی مجهول الگوریتم ژنتیک (GA)	[۲۶۸۱۱۱۳]
۲		[۱۳۴۶۷۸۱۳]
۳	ویژگی معلوم با رویکرد گسسته شبیه‌سازی تبرید (SA)	[۶۳۱۳۴۱]
۴		[۱۲۱۳۳۶۹۱۰۷]
۵	بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)	[۱۱۰۶۸۱۳]
۶		[۶۲۵۱۱۱۴۱۳]
۷	ویژگی معلوم با رویکرد پیوسته بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) تکامل تفاضلی (DE)	[۶۷۱۱۱۳۴]
		[۶۱۳۱۳۱۰]

برای درک بهتر مسئله انتخاب ویژگی، می‌توان پاسخ‌ها را برحسب ویژگی نمایش داد. در واقع بهترین پاسخ را نسبت به بهترین ویژگی ترسیم نمود. این عمل یک شبیه‌سازی از بهینه‌سازی چندهدفه است. نتیجه خروجی در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که به عنوان یک رویکرد کلی، با بیش‌تر شدن ویژگی‌ها، نتایج بهتری حاصل می‌شود. اما این بیش‌تر شدن ویژگی‌ها، الزاماً در هر مرحله به بهتر شدن نتایج نمی‌انجامد. گاهی ویژگی‌ها با یکدیگر اطلاعات متضاد دارند و ممکن است به نتایج بدتر منجر شوند.



شکل ۸: تغییرات خطا برحسب افزایش تعداد ویژگی

از نتایج شکل ۸ مشاهده می‌شود که بعضی جواب‌ها مغلوب هستند، به این معنی که با اضافه شدن ویژگی، خطای برنامه بیش‌تر می‌شود. برای نمونه اضافه شدن ویژگی ۹، خطای حاصل از اجرای برنامه را بیش‌تر می‌کند. متغیرهایی که در جدول ۵ انتخاب شده‌اند، خروجی حاصل از اجرای الگوریتم‌های مختلف و بررسی عملکرد آن در شبکه مورد مطالعه است. باتوجه به محدودیت صفحه‌های نگارش مقاله، حالت‌هایی که حاوی بیش‌ترین اطلاعات هستند و دقت بالاتری دارند نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷: جدایی خطی متغیرهای ۳ و ۱۰ در دو کلاس «LOE» و «EF»

در مقایسه نمودارهای مختلف جدایی خطی برای متغیرهای مختلف، مهم‌ترین متغیرها در زمینه تفکیک دو خطای ازدست‌رفتن تحریک و خطاهای خارجی به‌دست آمده است. در مرجع [۱۳] نشان داده شده است که با بیش‌تر شدن تعداد متغیرها، دقت دسته‌بندی افزایش می‌یابد. در این مرجع، از ۶ متغیر به‌عنوان ورودی‌های درخت تصمیم استفاده شده است که باتوجه به تعداد محدود حالت‌ها، بررسی تمامی موارد و به دست آوردن نتایج به‌راحتی امکان‌پذیر است. در این کار ۲۲ ویژگی مدنظر قرار گرفته است. در عمل باتوجه به تعداد بسیار زیاد حالت‌های ممکن، امکان بررسی تمامی حالت‌ها امکان‌پذیر نیست و نیاز به استفاده از روش‌های انتخاب ویژگی، برای به‌دست آوردن مهم‌ترین ویژگی‌ها است.

باتوجه به این‌که مسئله انتخاب ویژگی در حالت کلی راه‌حل قطعی ندارد، با تبدیل آن به یک مسئله بهینه‌سازی، حل آن به الگوریتم‌های هوشمند سپرده می‌شود. برای این منظور از الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده می‌شود. در مسئله انتخاب ویژگی هدف رسیدن به خروجی مطلوب، با کم‌ترین تعداد ویژگی است. تابع هدف در حالت کلی به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z = MSE(1 + \beta n_f) \quad (7)$$

که در آن MSE مقدار خطا، n_f تعداد ویژگی‌ها و β ضریب وزنی و مستقل از MSE است. هدف حداقل کردن تابع هدف Z است. مسئله انتخاب ویژگی، به‌دو صورت کلی تعداد ویژگی‌های مجهول و تعداد ویژگی‌های معلوم قابل حل است. باتوجه به محدودیت‌های صفحه نگارش، در جدول ۴ خلاصه‌ای از روش‌های مورد استفاده به‌منظور انتخاب ویژگی‌های مناسب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در حالت ویژگی مجهول از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. با تغییر پارامترهای الگوریتم، خروجی‌های متفاوت حاصل می‌شود. برای نمونه دو حالت با ۵ خروجی و ۷ خروجی نمایش داده شده است. حالت ویژگی معلوم با رویکرد گسسته و پیوسته قابل حل است. برای حالت گسسته دو الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و بهینه‌سازی کلونی مورچگان و برای حالت پیوسته دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و تکامل تفاضلی استفاده شده است. چند نمونه از اجرای برنامه برای هر یک از الگوریتم‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خروجی‌های برنامه‌ها با یکدیگر

جدول ۵: نتایج حاصل از شبیه‌سازی در ترکیب‌های مختلف ویژگی‌های ورودی

شماره	متغیر ورودی	%۵۰ آموزش، تست %۵۰		%۶۰ آموزش، تست %۴۰		%۷۰ آموزش، تست %۳۰		%۸۰ آموزش، تست %۲۰		%۹۰ آموزش، تست %۱۰	
		تعداد	دقت	تعداد	دقت	تعداد	دقت	تعداد	دقت	تعداد	دقت
		اشتباه	(درصد)	اشتباه	(درصد)	اشتباه	(درصد)	اشتباه	(درصد)	اشتباه	(درصد)
۱	شانزده متغیر [۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۲	۴۹۷	۹۹/۳۴	۳۸۵	۹۹/۴۲	۲۵۶	۹۹/۳۹	۱۷۷	۹۹/۸۷	۱۸
۲	پانزده متغیر [۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۵	۴۷۴	۹۹/۳۵	۳۷۹	۹۹/۳۹	۲۶۹	۹۹/۴۱	۱۷۲	۹۹/۴۷	۷۸
۳	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۲۹	۵۲۲	۹۹/۳۳	۳۸۹	۹۹/۴۷	۲۳۴	۹۹/۳۷	۱۷۷	۹۹/۴۹	۷۴
۴	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۳	۴۹۳	۹۹/۳۴	۳۸۸	۹۹/۴۲	۲۵۶	۹۹/۴۰	۱۷۵	۹۹/۴۹	۷۵
۵	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۲۴	۵۵۷	۹۹/۳۲	۳۹۷	۹۹/۴۳	۲۴۹	۹۹/۳۹	۱۷۷	۹۹/۴۹	۷۵
۶	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۱	۵۰۲	۹۹/۳۳	۳۷۹	۹۹/۴۱	۲۶۰	۹۹/۴۰	۱۷۶	۹۹/۵۰	۷۳
۷	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۳	۴۹۳	۹۹/۳۷	۳۹۸	۹۹/۳۷	۲۷۴	۹۹/۳۹	۱۷۸	۹۹/۵۱	۷۲
۸	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۰	۴۶۷	۹۹/۳۶	۳۷۳	۹۹/۴۲	۲۵۳	۹۹/۴۳	۱۶۶	۹۹/۴۹	۷۴
۹	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۳۰	۵۰۹	۹۹/۳۵	۳۷۸	۹۹/۴۱	۲۶۰	۹۹/۳۸	۱۸۲	۹۹/۴۹	۷۵
۱۰	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۹ ۱۰ ۱۱ ۱۲ ۱۳ ۱۴ ۱۵ ۱۶]	۹۹/۲۹	۵۱۶	۹۹/۳۶	۳۷۳	۹۹/۴۰	۲۶۳	۹۹/۴۲	۱۷۰	۹۹/۵۱	۷۱
۱۱	نه متغیر [۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰]	۹۹/۳۸	۴۵۲	۹۹/۴۴	۳۲۵	۹۹/۴۶	۲۳۸	۹۹/۵۲	۱۳۹	۹۹/۴۹	۷۵
۱۲	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۹]	۹۹/۳۰	۵۱۴	۹۹/۳۴	۳۸۷	۹۹/۳۷	۲۷۴	۹۹/۳۷	۱۸۵	۹۹/۴۳	۸۳
۱۳	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۲۰]	۹۹/۳۳	۵۰۰	۹۹/۳۷	۳۶۶	۹۹/۴۴	۲۴۵	۹۹/۴۳	۱۶۵	۹۹/۴۹	۷۴
۱۴	هشت متغیر [۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰]	۹۹/۳۵	۴۷۴	۹۹/۴۲	۳۳۸	۹۹/۴۶	۲۳۵	۹۹/۴۶	۱۵۷	۹۹/۴۸	۷۶
۱۵	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۳۲	۴۹۷	۹۹/۳۹	۳۵۵	۹۹/۴۵	۲۴۰	۹۹/۵۳	۱۳۷	۹۹/۴۹	۷۴
۱۶	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۳۰	۵۱۳	۹۹/۳۹	۳۵۵	۹۹/۴۴	۲۴۷	۹۹/۴۹	۱۴۸	۹۹/۴۷	۷۷
۱۷	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۳۰	۵۱۲	۹۹/۳۹	۳۵۵	۹۹/۴۲	۲۵۲	۹۹/۵۰	۱۴۶	۹۹/۵۱	۷۲
۱۸	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۳۴	۴۹۳	۹۹/۴۶	۳۱۸	۹۹/۴۶	۲۳۸	۹۹/۵۰	۱۴۵	۹۹/۴۸	۷۶
۱۹	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۹]	۹۹/۲۸	۵۲۹	۹۹/۲۸	۴۲۴	۹۹/۴۰	۲۶۱	۹۹/۳۹	۱۷۹	۹۹/۴۷	۷۸
۲۰	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۲۰]	۹۹/۲۸	۵۲۳	۹۹/۳۷	۳۶۸	۹۹/۴۵	۲۳۹	۹۹/۴۵	۱۶۱	۹۹/۴۷	۷۷
۲۱	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۲۰]	۹۹/۲۷	۵۳۶	۹۹/۳۶	۳۷۶	۹۹/۴۳	۲۵۱	۹۹/۴۳	۱۶۷	۹۹/۴۸	۷۶
۲۲	هفت متغیر [۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۲۹	۵۱۸	۹۹/۳۸	۳۶۳	۹۹/۳۹	۲۶۶	۹۹/۴۷	۱۵۶	۹۹/۴۹	۷۴
۲۳	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۸]	۹۹/۳۱	۵۰۱	۹۹/۳۷	۳۶۶	۹۹/۴۵	۲۳۹	۹۹/۴۸	۱۵۱	۹۹/۴۸	۷۶
۲۴	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۱۰]	۹۹/۳۳	۴۹۲	۹۹/۴۰	۳۵۱	۹۹/۴۴	۲۴۴	۹۹/۴۶	۱۵۸	۹۹/۴۷	۷۷
۲۵	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۸]	۹۹/۳۵	۴۷۷	۹۹/۴۳	۳۳۰	۹۹/۴۳	۲۴۹	۹۹/۵۳	۱۳۸	۹۹/۵۰	۷۳
۲۶	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰]	۹۹/۳۲	۴۹۴	۹۹/۴۰	۳۵۳	۹۹/۴۹	۲۲۵	۹۹/۴۷	۱۵۵	۹۹/۵۰	۷۳
۲۷	[۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۲۰]	۹۹/۰۸	۶۱۵	۹۹/۱۱	۵۲۲	۹۹/۲۵	۳۲۹	۹۹/۳۳	۲۲۶	۹۹/۲۳	۱۱۲
۲۸	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰ ۲۰]	۹۹/۲۲	۵۷۲	۹۹/۲۸	۴۲۰	۹۹/۳۶	۲۸۰	۹۹/۳۹	۱۷۸	۹۹/۴۹	۷۵
۲۹	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۲۰]	۹۹/۲۹	۵۲۲	۹۹/۳۴	۳۸۶	۹۹/۴۵	۲۴۱	۹۹/۴۱	۱۷۲	۹۹/۴۴	۸۱
۳۰	شش متغیر [۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶]	۹۹/۲۵	۵۴۵	۹۹/۳۲	۳۹۷	۹۹/۴۰	۲۶۴	۹۹/۴۲	۱۷۰	۹۹/۴۴	۸۱
۳۱	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۰]	۹۹/۲۹	۵۲۲	۹۹/۳۹	۳۵۵	۹۹/۴۰	۲۶۵	۹۹/۴۴	۱۶۴	۹۹/۵۱	۷۲
۳۲	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۱۰]	۹۹/۳۲	۵۰۰	۹۹/۳۳	۳۹۳	۹۹/۳۷	۲۷۵	۹۹/۳۸	۱۸۱	۹۹/۴۹	۷۵
۳۳	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸]	۹۹/۳۱	۵۰۱	۹۹/۳۶	۳۷۲	۹۹/۳۶	۲۴۱	۹۹/۴۵	۱۶۰	۹۹/۵۱	۷۲
۳۴	[۱ ۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷]	۹۹/۲۸	۵۱۶	۹۹/۳۳	۳۹۰	۹۹/۳۸	۲۷۱	۹۹/۴۳	۱۶۶	۹۹/۴۹	۷۴
۳۵	[۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸ ۱۹]	۹۹/۱۴	۶۲۷	۹۹/۶	۴۸۹	۹۹/۲۵	۳۲۹	۹۹/۲۴	۲۲۲	۹۹/۲۲	۱۱۴
۳۶	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۲۰]	۹۹/۲۱	۵۷۶	۹۹/۲۶	۴۳۵	۹۹/۲۹	۳۱۲	۹۹/۳۴	۱۹۴	۹۹/۳۸	۹۱
۳۷	[۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۸ ۲۰]	۹۹/۲۲	۵۷۰	۹۹/۲۹	۴۱۵	۹۹/۳۵	۲۸۷	۹۹/۳۷	۱۸۵	۹۹/۴۶	۷۹
۳۸	پنج متغیر [۲ ۳ ۴ ۵ ۶ ۷]	۹۹/۲۵	۵۴۹	۹۹/۳۰	۴۱۲	۹۹/۳۱	۳۰۲	۹۹/۳۵	۱۹۰	۹۹/۴۵	۸۰
۳۹	[۳ ۴ ۵ ۶ ۷ ۸]	۹۹/۳۲	۴۹۵	۹۹/۳۶	۳۷۴	۹۹/۴۲	۲۵۵	۹۹/۳۷	۱۸۳	۹۹/۴۹	۷۴
۴۰	[۲ ۴ ۵ ۶ ۸ ۲۰]	۹۹/۱۴	۶۲۸	۹۹/۲۲	۴۵۷	۹۹/۲۸	۳۱۶	۹۹/۳۳	۱۹۶	۹۹/۴۲	۸۵
۴۱	چهار متغیر [۲ ۴ ۵ ۶ ۲۰]	۹۹/۰۵	۶۹۳	۹۹/۲۰	۴۶۸	۹۹/۱۸	۳۶۰	۹۹/۲۴	۲۲۱	۹۹/۳۴	۹۷

نسبت به زمان در مشتق ولتاژ ترمینال نسبت به زمان) و ۸ (مشتق مقاومت نسبت به زمان) بیش‌ترین تأثیر را در دقت دسته‌بندی مبتنی بر درخت تصمیم دارند.
* با اضافه‌شدن ویژگی‌های بیشتر، دقت دسته‌بندی افزایش می‌یابد.

* در هر سطر، با بیش‌تر شدن درصد نمونه‌های آموزش، دقت دسته‌بندی بیش‌تر می‌شود.

در کنار بالا بودن دقت دسته‌بندی، مزیت اصلی استفاده از این روش، افزایش سرعت در زمان آشکارسازی LOE است. برای مقایسه،

همان‌طور که از جدول ۵ دیده می‌شود، بیش‌ترین دقت در حالت شانزده متغیر و با داده ۹۰٪ آموزش و ۱۰٪ تست به دست آمده است و کم‌ترین میزان دقت با ۴ متغیر و با داده ۵۰٪ آموزش و ۵۰٪ تست به دست آمده است. با توجه به تعداد بالای حالت‌ها و کمبود فضای نگارش، از این به بعد، حالت اول در نشان دادن عملکرد متغیرها استفاده شده است. از مقایسه نتایج مختلف جدول ۵ نتایج زیر استنباط شده است:

* متغیرهای ۱ (توان اکتیو خروجی ژنراتور)، ۲ (توان راکتیو خروجی ژنراتور)، ۳ (زاویه رتور)، ۴ (ولتاژ ترمینال ژنراتور)، ۵ (مقاومت اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور)، ۷ (حاصل ضرب مشتق توان راکتیو

(۳) امنیت: تعداد کلی حالت‌های بدون خطای پیش‌بینی شده بر تعداد کلی حالت‌های بدون خطای واقعی.

(۴) دقت: تعداد کلی حالت‌های درست پیش‌بینی شده (از دست رفتن تحریک + خطاهای خارجی + بدون خطا) بر تعداد کل حالت‌های واقعی.

جدول ۷: زمان تشخیص خطای ازدست‌رفتن تحریک توسط

درخت تصمیم با ۱۶ ویژگی

زمان LOE	درصد LOE	مقدار snr (db)				
		بدون نویز	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰
۱۱	۰/۱۰	۱۱/۵۶	۱۱/۹۵	۱۲/۲۲	۱۲/۲۷	۱۲/۶۲
۱۲	۰/۱۵	۱۲/۶۷	۱۳/۰۹	۱۳/۴۸	۱۳/۸۷	۱۴/۱۳
۱۳	۰/۲۰	۱۳/۹۱	۱۴/۲۴	۱۴/۶۲	۱۵/۱۶	۱۶/۳۳
۱۴	۰/۲۵	۱۴/۹۸	۱۵/۴۱	۱۵/۹۳	۱۶/۱۷	۱۶/۲۸
۱۵	۰/۳۰	۱۶/۰۷	۱۷/۵۲	۱۷/۸۶	۱۸/۱۲	۱۸/۱۶
۱۶	۰/۳۵	۱۷/۱۳	۱۷/۴۴	۱۷/۷۹	۱۸/۳۱	۱۸/۲۳
۱۷	۰/۴۰	۱۷/۹۵	۱۸/۶۸	۱۸/۹۶	۱۹/۱۵	۱۹/۲۶
۱۸	۰/۴۵	۱۹/۳۳	۱۹/۵۴	۱۹/۸۷	۲۰/۳۶	۲۰/۵۱
۱۹	۰/۵۰	۲۰/۵۵	۲۱/۰۲	۲۱/۴۹	۲۱/۸۹	۲۱/۹۷

قابلیت اطمینان تعداد حالت‌های پیش‌بینی شده LOE و خطای خارجی را در مقابل تعداد واقعی این دو حالت نشان می‌دهد. در واقع بیان‌کننده تعداد آشکارسازی اشتباه است. این موضوع قابلیت اطمینان را در آشکارسازی خطا نشان می‌دهد و شاخصی مهم در ارزیابی به حساب می‌آید. امنیت تعداد حالت‌های بدون خطا را بیان می‌کند. (در واقع تعداد حالت‌هایی که واقعاً به رخداد خطا تعلق ندارند و به عنوان خطا پیش‌بینی شده‌اند). در نهایت دقت، کل حالت‌های درست پیش‌بینی شده را در مقابل تعداد حالت‌های واقعی نشان می‌دهد. در همه حالات ابتدا شبکه بدون خطا است و در لحظه‌ای که به صورت تصادفی تعیین می‌شود، یکی از این دو حالت خطای LOE و یا خطای خارجی رخ می‌دهد. مقایسه عملکرد شاخص‌های بیان‌شده، برای الگوهای مختلف تست و آموزش ۵۰-۵۰٪، ۴۰-۶۰٪، ۳۰-۷۰٪، ۲۰-۸۰٪ و ۱۰-۹۰٪ انجام شده است. این نتایج در جدول ۸ نشان داده شده است.

در این جدول، تعداد حالت‌های واقعی و تعداد حالت‌های پیش‌بینی شده برای هر سه حالت بیان شده است. نتایج شاخص‌های آماری بیان‌شده، در جدول ۹ نشان دیده می‌شود.

مهم‌ترین شاخص عملکرد قابلیت اطمینان است. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که بالاترین مقدار قابلیت اطمینان LOE برابر ۹۹/۷۱٪، قابلیت اطمینان خطای خارجی برابر ۹۹/۸۸٪، امنیت برابر ۹۹/۷۷٪ و دقت برابر ۹۹/۴۸٪ است. نتایج، قابلیت اطمینان بالای طرح پیشنهادی را نشان می‌دهد. در واقع دیده می‌شود که DT، قابلیت اطمینان بالایی در مشخص کردن خطای LOE از خطای خارجی دارد.

عملکرد روش در حضور ۶ متغیر در نظر گرفته شده در مرجع [۱۳] (حالت ۳۰ جدول ۵) و ۱۶ متغیر (حالت اول جدول ۵)، در نظر گرفته شده است. جدول ۶ نتایج حاصل از چند اجرای شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان آشکارسازی خطای LOE بهبود قابل توجهی می‌یابد. نتایج جدول ۶ در تکرار برنامه در شرایط مختلف شبکه تأیید شده است.

جدول ۶: بررسی تأثیر متغیرها در زمان عملکرد رله

زمان خطا	درصد LOE	طرح بردی	۶ مشخصه (حالت ۳۱)	۶ مشخصه در شرایط نویزی	۱۶ مشخصه صه (حالت ۱)	۱۶ مشخصه در شرایط نویزی
۱۱/۰۰	۰/۲۰	۲۱/۷۱	۱۴/۸۳	۱۵/۶۱	۱۱/۲۸	۱۱/۹۱
۱۳/۰۰	۰/۲۵	۲۵/۴۲	۱۷/۰۸	۱۸/۹۶	۱۳/۳۷	۱۴/۴۸
۱۵/۰۰	۰/۳۰	۳۰/۰۴	۱۹/۴۱	تشخیص اشتباه	۱۵/۳۴	۱۶/۰۵
۱۷/۰۰	۰/۳۵	۳۶/۳۸	۲۱/۸۷	۲۳/۳۱	۱۷/۳۱	۱۸/۱۳
۱۹/۰۰	۰/۴۰	۴۷/۶۰	۲۲/۴۴	۲۵/۴۹	۱۹/۳۰	۱۹/۸۹

۴-۵- بررسی عملکرد روش تحت شرایط نویزی

عملکرد روش در شرایط نویزی و با اضافه کردن نویز گوسی سفید مورد بررسی قرار گرفته است. نویز سفید با نرخ‌های مختلف سیگنال به نویز (SNR) به داده‌ها اضافه شده و عملکرد الگوریتم بررسی شده است. در این حالت ابتدا نویز با نسبت سیگنال به نویز ۲۰ db به ۵۰٪ داده‌ها داده اعمال شده است [۲۷]. مشخصه‌های ورودی نیز دارای نویز ۲۰ db هستند. کل پایگاه داده به عنوان مجموعه آموزش انتخاب شده است. نتایج جدول ۶ تحت دو حالت ۶ ویژگی و ۱۶ ویژگی و تحت شرایط نویزی بیان می‌کند که حضور نویز، زمان آشکارسازی خطا را افزایش و دقت روش را کاهش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش ویژگی‌ها و انتخاب ویژگی‌های مناسب، از عملکرد اشتباه در شرایط نویزی اجتناب شده است. جدول ۷ نتایج حاصل را در حضور ۱۶ ویژگی و با نسبت‌های مختلف سیگنال به نویز، نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش نویز، دقت نتایج کاهش یافته است، اما دقت الگوریتم پیشنهادی قابل قبول است. این نتایج برای خطاهای خارجی نیز، بررسی و تأیید شده است.

۴-۶- بحث

هدف اصلی در این کار شناسایی و دسته‌بندی دقیق خطا است. به منظور ارزیابی روش حفاظتی پیشنهادی، شاخص‌های آماری زیر استفاده شده اند [۲۳]:

(۱) قابلیت اطمینان LOE: تعداد کلی حالت‌های LOE پیش‌بینی شده بر تعداد کلی حالت‌های LOE واقعی.

(۲) قابلیت اطمینان خطاهای خارجی: تعداد کلی حالت‌های خطاهای خارجی پیش‌بینی شده بر تعداد کلی حالت‌های خطاهای خارجی واقعی.

جدول ۱۰: حالت‌های خطای جدید در هر سطح بارگذاری

شماره	موقعیت استفاده
۱	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۲۰٪ خط L1
۲	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۲۰٪ خط L1 و خروج خط L1
۳	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۲۰٪ خط L2
۴	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۲۰٪ خط L2 و خروج خط L2
۵	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۸۰٪ خط L1
۶	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۸۰٪ خط L1 و خروج خط L1
۷	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۸۰٪ خط L2
۸	اتصال کوتاه سه‌فاز در ۸۰٪ خط L2 و خروج خط L2

جدول ۱۱: بررسی عملکرد روش در حالت جدید خطای خارجی

روش فازی (بدون نویز)	۱۶ مشخصه در نویز ۲۰db	۱۶ مشخصه	عملکرد طرح بردی	طول خطا	زمان خطای خارجی
۱۱/۳۷	۱۱/۲۱	۱۱/۱۰	خیر	۰/۱۰	۱۱/۰۰
۱۳/۴۵	۱۳/۱۲	۱۳/۰۰	خیر	۰/۲۰	۱۳/۰۰
تشخیص اشتباه	۱۵/۰۹	۱۵/۰۰	خیر	۰/۳۰	۱۵/۰۰
۱۸/۶۰	۱۷/۰۸	۱۷/۰۰	خیر	۰/۴۰	۱۷/۰۰
تشخیص اشتباه	۱۹/۱۱	۱۹/۰۰	خیر	۰/۵۰	۱۹/۰۰

۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های مرسوم

یکی از اصلی‌ترین مراجع در زمینه حفاظت تحریک، مرجع [۱۲] است که از روش فازی استفاده کرده است. به کارگیری روش فازی در حضور UPFC برای مقایسه با درخت تصمیم انجام شده است. همانند این مرجع، ولتاژ ترمینال و امپدانس که بر مبنای پارامترهای ماشین پریونیت شده‌اند، به عنوان دو ورودی به سیستم انتخاب شده است. در جدول ۱۲ عملکرد برای خطای ازدست‌رفتن تحریک و در جدول ۱۱ نتایج برای خطاهای خارجی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که این روش، در بسیاری از حالات دچار اشتباه می‌شود و روش مناسبی برای حفاظت تحریک ژنراتور در حضور UPFC نیست.

جدول ۱۲: عملکرد روش فازی در خطای LOE در حضور UPFC

روش فازی	۱۶ مشخصه (حالت ۱)	۱۶ مشخصه (حالت ۳۱)	طرح بردی	درصد خطا	زمان خطا
۱۷/۲۲	۱۱/۲۸	۱۴/۸۳	۲۱/۷۱	۰/۲۰	۱۱/۰۰
۱۹/۸۷	۱۳/۳۷	۱۷/۰۸	۲۵/۴۲	۰/۲۵	۱۳/۰۰
تشخیص اشتباه	۱۵/۳۴	۱۹/۴۱	۳۰/۰۴	۰/۳۰	۱۵/۰۰
تشخیص اشتباه	۱۷/۳۱	۲۱/۸۷	۳۶/۳۸	۰/۳۵	۱۷/۰۰
تشخیص اشتباه	۱۹/۳۰	۲۲/۴۴	۴۷/۶۰	۰/۴۰	۱۹/۰۰

روش مرجع [۱۵] نیز برای مقایسه انتخاب شده است. طبق الگوریتم پیشنهادی، چنانچه dr/dt برای مدت زمان بیش از $1/7$ s منفی باشد، خطای LOE رخ داده است. شکل ۹ تغییرات مشتق مقاومت در حضور UPFC را نشان می‌دهد. در این شکل، خطای LOE در $t = 20$ s رخ داده است و UPFC در $t = 21/50$ s وارد شده است. مشاهده می‌شود که حضور UPFC باعث ایجاد یک پالس مثبت در شکل موج در لحظه

جدول ۸: نتایج پیش‌بینی شده در حالت‌های مختلف

شماره	محل خطا	تعداد کل	بدون خطا	از دست رفتن تحریک	خطای خارجی
۵۰٪ آموزش، ۵۰٪ تست	NF	۴۰۶۲۸	۴۰۵۱۱	۲	۱۱۵
	LOE	۳۵۷۲	۱۴	۳۵۴۷	۱۱
	EF	۲۹۴۱۵	۳۲۷	۲۸	۲۹۰۶۰
۶۰٪ آموزش، ۴۰٪ تست	NF	۳۲۵۳۰	۳۲۴۲۳	۳	۱۰۴
	LOE	۲۸۴۹	۷	۲۸۳۳	۹
	EF	۲۳۵۱۳	۲۵۲	۱۰	۲۳۲۵۱
۷۰٪ آموزش، ۳۰٪ تست	NF	۲۴۴۰۰	۲۴۳۲۴	۳	۷۳
	LOE	۲۱۳۷	۸	۲۱۲۱	۸
	EF	۱۷۶۳۲	۱۵۲	۱۲	۱۷۴۶۸
۸۰٪ آموزش، ۲۰٪ تست	NF	۱۶۲۷۴	۱۶۲۲۹	۰	۴۵
	LOE	۱۴۲۲	۴	۱۴۱۷	۱
	EF	۱۱۷۵۰	۱۲۰	۷	۱۱۶۲۴
۹۰٪ آموزش، ۱۰٪ تست	NF	۸۱۳۷	۸۱۱۹	۱	۱۷
	LOE	۷۱۲	۲	۷۱۰	۰
	EF	۵۸۷۴	۵۱	۵	۵۸۱۸

۴-۵- بررسی رفتار روش پیشنهادی در حالت‌های پیش‌بینی نشده

به منظور بررسی رفتار روش پیشنهادی، در شرایط پیش‌بینی نشده، حالت‌های جدول ۱۰ در نظر گرفته شده‌اند. جدول ۱۱ نتایج حاصل از چندین اجرای برنامه در حالت ۳ جدول ۱۰ را نشان می‌دهد. به منظور بررسی الگوریتم در شرایط نویزی، در این حالت نیز نویز ۲۰db به ۵۰٪ داده‌ها داده اعمال شده است. مشخصه‌های ورودی نیز دارای نویز ۲۰db هستند. کل پایگاه داده به عنوان مجموعه آموزش انتخاب شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌بینی روش ارائه شده بر مبنای درخت تصمیم، در تمامی این حالت‌ها درست و بسیار قابل قبول بوده است.

جدول ۹: نتایج شاخص‌های آماری

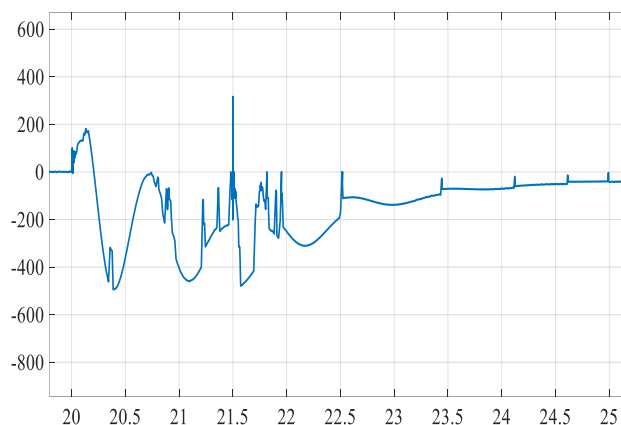
شماره	قابلیت اطمینان LOE	قابلیت اطمینان خطای خارجی	امنیت	دقت
۵۰٪ آموزش، ۵۰٪ تست	۹۹/۳۰	۹۸/۷۹	۹۹/۷۱	۹۹/۳۲
۶۰٪ آموزش، ۴۰٪ تست	۹۹/۴۳	۹۹/۸۸	۹۹/۶۷	۹۹/۳۴
۷۰٪ آموزش، ۳۰٪ تست	۹۹/۲۵	۹۹/۰۶	۹۹/۶۸	۹۹/۴۲
۸۰٪ آموزش، ۲۰٪ تست	۹۹/۶۴	۹۸/۹۲	۹۹/۷۲	۹۹/۴۰
۹۰٪ آموزش، ۱۰٪ تست	۹۹/۷۱	۹۹/۰۴	۹۹/۷۷	۹۹/۴۸

مراجع

- [1] IEEE Std. 421.5, *IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, 2005.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [3] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York, USA: Wiley, 1999.
- [4] A. Ghorbani, H. M. Lima, A. Azadru and B. Mozafari, "Impact of fixed series capacitors and SSSC on the LOE protection of synchronous generator," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 10, no. 4, pp. 1453-1459, 2015.
- [5] A. Ghorbani, B. Mozafari, S. Soleymani and AM. Ranjbar. "Operation of synchronous generator LOE protection in the presence of shunt-FACTS," *Electric Power Systems Research*, vol. 119, no. 1, pp. 178-186, 2015.
- [6] M. Elsamahy, S.O. Faried and T. Sidhu, "Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 724-732, 2014.
- [7] R. Dubey, S. Samantaray, B. Panigrahi and G. Venkoparao, "Adaptive distance relay setting for parallel transmission network connecting wind farms and UPFC," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 113-123, 2015.
- [8] S.Y. Ebrahimi and A. Ghorbani, "Performance comparison of LOE protection of synchronous generator in the presence of UPFC," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, no. 1, pp. 71-78, 2015.
- [9] A. Ghorbani, S. Soleymani and B. Mozafari. "A PMU-based LOE protection of synchronous generator in the presence of GIPFC." *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 551-558, 2016.
- [10] B. Fan, X. Li, P. Xue and J. Liu, "The research UL-P of loss-of-excitation protection for generator based on the artificial neural networks," *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, pp. 1-4, 2009.
- [11] S.R. Tambay, and YG. Paithankar, "A new adaptive loss of excitation relay augmented by rate of change of reactance," *Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE*, pp. 1831-1835, 2005.
- [12] A.P. de Morais, G. Cardoso, and L. Mariotto, "An innovative loss-of-excitation protection based on the fuzzy inference mechanism," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2197-2204, 2010.
- [13] T. Amraee, "Loss-of-field detection in synchronous generators using decision tree technique," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 9, pp. 943-954, 2013.
- [14] M. Amini, M. Davarpanah and M. Sanaye-Pasand, "A novel approach to detect the synchronous generator loss of excitation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1429-1438, 2015.
- [15] B. Mahamedi, J.G. Zhu and SM. Hashemi, "A setting-free approach to detecting loss of excitation in synchronous generators," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 5, pp. 2270-2278, 2016.
- [16] N. Noroozi, H. Yaghoobi and Y. Alinejad-Beromi, "Analytical technique for synchronous generator loss-of-excitation protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, pp. 9, pp. 2222-2231, 2017.
- [17] M. Abedini, M. Sanaye-Pasand and M. Davarpanah, "An analytical approach to detect generator loss of excitation based on internal voltage calculation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 5, pp. 2329-2338, 2017.
- [18] H. Yaghoobi, "Impact of static synchronous compensator on flux-based synchronous generator loss of excitation protection," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 9, no.9, pp. 874-883, 2015.

[۱۹] عباس صابری نوقانی و نادر هاتفی ترشیزی، «تنظیم بهینه رله دیستانس با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۱، صفحات ۴۲۱-۴۳۱، ۱۳۹۵.

ورود UPFC می‌شود. بدون UPFC خطای LOE توسط الگوریتم در $t = 2/5$ s شناسایی می‌شود، اما حضور UPFC سبب تأخیر زمانی به مقدار $1/5$ s خواهد شد. باتوجه به این‌که یکی از اصلی‌ترین ایرادات روش‌های امیددانی، تأخیر در شناسایی خطای LOE است، روش پیشنهادی نمی‌تواند برای حفاظت از دست‌رفتن تحریک در حضور UPFC مناسب باشد و احتمال عملکرد اشتباه وجود دارد.



شکل ۹: تغییرات مشتق مقاومت در حضور UPFC

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح حفاظت LOE بر مبنای درخت تصمیم در حضور UPFC ارائه شده است. دقت و حساسیت روش به انتخاب متغیرها وابسته است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که حضور UPFC به تأخیر در عملکرد روش‌های محافظت سنتی LOE منجر می‌شود و حتی ممکن است رله بردی خطا را تشخیص ندهد. توان‌های اکتیو و راکتیو، زاویه تور، مقاومت، راکتانس و ولتاژ ترمینال متغیرهای سنتی هستند که در مراجع قبلی به‌عنوان معیار حفاظت LOE در نظر گرفته شده‌اند. به‌کارگیری این متغیرها در حفاظت LOE بر مبنای درخت تصمیم در حضور UPFC، دارای دقت کافی نیست. به‌منظور افزایش دقت، متغیرهای دیگری نیز در نظر گرفته شده‌اند و با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند، مناسب‌ترین متغیرها در این زمینه انتخاب شده‌اند. دقت روش‌های مبتنی بر درخت تصمیم به پایگاه داده مربوطه وابسته است. به این دلیل، شرایطی نظیر بارگذاری اولیه ژنراتور، زمان‌های مختلف خطا، درصد‌های مختلف از دست‌رفتن تحریک و خطاهای خارجی در بخش‌های مختلف شبکه در نظر گرفته شده‌اند. روش به صورت گسترده‌ای آزموده شده و با طرح بردی به‌عنوان روش سنتی حفاظت LOE، روش فازی و روش مبتنی بر مشتق مقاومت مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی دقت دسته‌بندی بهتر و سرعت تشخیص بالاتری تحت شرایط عملکرد ناشناخته خطاهای LOE و خطاهای خارجی دارد.

- Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no.1, pp. 200-208, 2014.
- [24] O. Ozgonenel and S. Karagol, "Power transformer protection based on decision tree approach," IET Electric Power Applications, vol. 8, no. 7, pp. 251-256, 2014.
- [25] A.G. Phadke and S.T. James, *Computer Relaying for Power Systems*, John Wiley & Sons, 2009.
- [26] R. E. Cavicchi, C. Collett, S. Telikepalli, Z. Hu, M. Carrier, and D. C. Ripple, "Variable threshold method for determining the boundaries of imaged subvisible particles, " *Journal of pharmaceutical sciences*, vol.106, no. 6, pp.1499-1507, 2017.
- [27] Z. Moravej, A. A. Abdoos, M. Sanaye-Pasand, "Power transformer protection scheme based on time-frequency analysis," *International transactions on electrical energy systems*, vol. 23, no. 4, pp. 473-493, 2013.
- [۲۰] وحید فتحی، هیرش سیدی و ابراهیم بابایی، «بهبود عملکرد رله‌های دیستانس در حفاظت خطوط انتقال کوتاه»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۳، شماره ۲، صفحات ۲۹-۲۱، ۱۳۹۲
- [21] C.R. Mason, "A new loss-of-excitation relay for synchronous generators," *American Institute of Electrical Engineers,* Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 68, no. 2, pp. 1240-1245, 1949.
- [22] J. Berdy, "Loss of excitation protection for modern synchronous generators," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 5, pp. 1457-1463, 1975.
- [23] P.K. Ray, S.R. Mohanty, N. Kishor, JP Catalão and K. Prakash, "Optimal feature and decision tree-based classification of power quality disturbances in distributed generation systems," *IEEE*