

# الگوریتم هوشمند پیش‌بینی ناپایداری گذرای ناحیه گسترده زاویه روتور مبتنی بر تئوری درخت تصمیم C5.0 و سیگنال‌های سراسری

سهیل رنجبر

## ۱- مقدمه

امروزه سیستم قدرت، نقش انکارناپذیری را در زندگی بشر ایفا می‌کند. پایداری سیستم قدرت یکی از پیچیده‌ترین موضوعاتی است که همواره موضوع بحث مهندسان قدرت بوده است. پایداری گذرا یکی از مهم‌ترین انواع پایداری‌ها در سیستم قدرت بوده و به‌طور معمول در بازه زمانی دو تا سه ثانیه پس از وقوع یک پیشامد مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱]. در یک تعریف جامع، پایداری گذرا توانایی سیستم قدرت به‌منظور حفظ و نگهداری مجموعه‌ای از ژنراتورهای سنکرون در یک شبکه تحت یک خطای سنگین مانند اتصال کوتاه است. به یک سیستم قدرت، پایدار گذرا گویند اگر ژنراتورهای متصل به سیستم بتوانند تحت یک خطای بزرگ مانند اتصال کوتاه و در کسری از ثانیه به یک وضعیت پایدار بازگردند. خطاهای موجود در سیستم قدرت، محدوده وسیعی از پارامترها از قبیل زاویه روتور، معادلات پخش بار، ولتاژ باس‌ها و دیگر متغیرهای سیستم را تحت تأثیر قرار خواهد داد [۱]. یک پیشامد بزرگ موجب عدم تعادل میان توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی خروجی ژنراتور می‌شود. در این گونه موارد، پایداری ژنراتورهای سنکرون به تجهیزات حفاظتی نصب‌شده در سیستم قدرت از قبیل رله‌ها وابسته است. تحقیقات زیادی در مقالات گذشته، انجام و روش‌های گوناگونی نیز معرفی شده است. از محبوب‌ترین روش‌هایی که در سیستم قدرت استفاده گردیده، بر اساس نرخ دامنه توان اکتیو به نرخ دامنه توان راکتیو (P-Q) عمل می‌کند. نمایی از این روش در شکل ۱ برای یک وضعیت پایدار با دوره زمانی خطای ۵۰ میلی‌ثانیه و در شکل ۲ برای یک وضعیت ناپایدار با دوره زمانی ۷۰ میلی‌ثانیه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ آمده، اگر شدت یک خطا ضعیف باشد، پارامترهای سیستم در بازه محدودی نوسان کرده و به سرعت از بین خواهند رفت. در شکل ۲ فرض شده که خطا دارای قدرت بالایی بوده و یک وضعیت ناپایدار رخ داده و همان‌طور که در این شکل آمده است، در صورت وقوع یک خطای شدید، دامنه نوسانات به تدریج زیاد و توان اکتیو وارد ناحیه منفی می‌گردد و نهایتاً قطب‌های ژنراتور در ثانیه ۱/۵۸۱۸ دچار لغزش قطب می‌شوند. به این پدیده خروج از همگامی (OS) ژنراتور سنکرون اطلاق می‌گردد و در صورت وقوع، ژنراتور باید بلافاصله از شبکه قدرت جدا شود.

در [۲] از معیار سطوح معادل در حوزه توان-زاویه ( $P-\delta$ ) برای آشکارسازی وضعیت خروج از همگامی استفاده گردیده که این روش در شکل ۳ آمده است. بر مبنای شکل، سطح A۱ مربوط به انرژی دریافت‌شده ژنراتور و سطح A۲ مربوط به تحویل‌دادن انرژی در دوره زمانی پس از برطرف‌شدن خطاست.

چکیده: در این مقاله، طرح حفاظتی هوشمند به‌منظور پیش‌بینی برخط ناپایداری گذرای ناحیه گسترده در سیستم‌های قدرت بر اساس تئوری درخت تصمیم معرفی می‌شود. برای این منظور با بررسی نوسان توان شبکه و شرایط معادلات دینامیک ژنراتور سنکرون در دو حالت پایدار و شرایط خروج از همگامی، شاخص‌های برخط مبتنی بر واحدهای اندازه‌گیری فازوری معرفی و تحت شرایط متفاوت بهره‌برداری و توپولوژیکی شبکه در زمان‌های وقوع خطا و برطرف‌شدن خطا به‌منظور عملکرد سریع طرح پیشنهادی اندازه‌گیری می‌شوند. در ادامه، شاخص‌های پیشنهادی به‌صورت جفت‌داده ورودی-خروجی برای آموزش درخت تصمیم در محیط برون‌خط مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه‌های آموزشی شامل یک سری اندازه‌گیری‌ها تحت خطاهای متفاوت شامل نوع و مکان خطا هستند. توانایی حفاظتی طرح پیشنهادی بر روی یک شبکه ۳۹ باس با پتانسیل ناپایداری گذرای ناحیه گسترده ژنراتورهای سنکرون، پیاده‌سازی و عملکرد درخت تصمیم تحت سناریوهای از پیش آموزش داده‌نشده صحت‌سنجی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده توانایی طرح پیشنهادی درخت تصمیم در زمینه پیش‌بینی صحیح خروج از همگامی ناحیه گسترده سیستم قدرت تحت طیف وسیعی از شرایط دینامیک شبکه است.

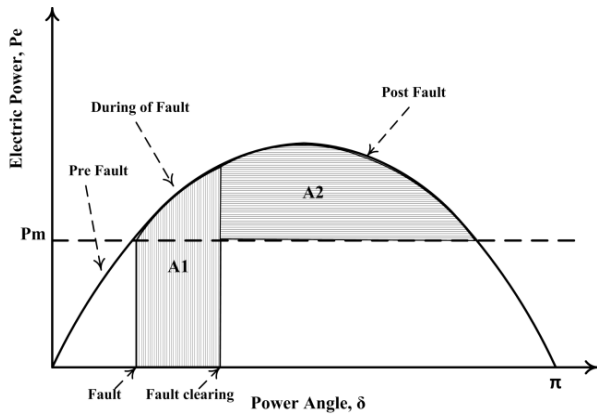
کلیدواژه: پایداری گذرا، خروج از همگامی، آشکارسازی، درخت تصمیم.

## علائم و اختصارات

OS: خروج از همگامی  
SMIB: سیستم تک‌ماشینه باس بی‌نهایت  
ARR: نرخ امیدانس ظاهری  $(R_{clr+}/R_{fl+})$   
CR: نرخ دامنه جریان  $(CR_{clr+}/CR_{fl+})$   
VDR: نرخ زاویه ولتاژ  $(V\delta_{clr+}/V\delta_{fl+})$   
RPR: نرخ توان راکتیو  $(Q_{clr+}/Q_{fl+})$   
VR: نرخ دامنه ولتاژ  $(V_{clr+}/V_{fl+})$   
APR: نرخ توان اکتیو  $(P_{clr+}/P_{fl+})$   
SR: نرخ سرعت  $(\omega_{clr+}/\omega_{fl+})$   
RAR: نرخ زاویه روتور ژنراتور  $(\delta_{clr+}/\delta_{fl+})$   
EPR: نرخ توان الکتریکی ژنراتور  $(Pe_{clr+}/Pe_{fl+})$   
REPMPC: توان الکتریکی به مکانیکی در زمان رفع خطا  
REPMPCF: توان الکتریکی به مکانیکی در لحظه وقوع خطا

این مقاله در تاریخ ۳۱ شهریور ماه ۱۴۰۱ دریافت و در تاریخ ۲ مرداد ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

سهیل رنجبر (نویسنده مسئول)، گروه آموزشی برق و کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران، (email: s.ranjbar@velayat.ac.ir).



شکل ۳: معیار سطوح معادل در حوزه  $P-\delta$ .

روش، توان الکتریکی خروجی ژنراتور (Pe) در دو زمان پیش از خطا و پس از برطرف شدن خطا، اندازه‌گیری گردیده و با محاسبه میزان سطوح انرژی در این دو زمان، وضعیت OS تشخیص داده می‌شود. در این روش باید توان الکتریکی ژنراتور در زمان‌های قبل و پس از خطا به خوبی برای رله شناخته شده باشد.

دیگر روش‌ها در زمینه شناسایی ناپایداری گذرای ژنراتور سنکرون شامل اندازه‌گیری امیدانسی [۹]، معیار سطوح معادل توانی [۱۰]، تبدیل ویولت [۱۱]، انحراف فرکانسی-ولتاژی باس‌های محلی [۱۲]، سطوح معادل حوزه زمان [۱۳]، تابع انرژی مبتنی بر روش مستقیم لیاپانوف [۱۴]، اندازه‌گیری سرعت و شتاب زاویه‌ای شار مغناطیسی ژنراتورها [۱۵]، الگوریتم تشخیص الگوی گروه‌بندی K-means [۱۶]، شبکه عصبی Back-Propagation [۱۷] و منطق فازی [۱۸] هستند.

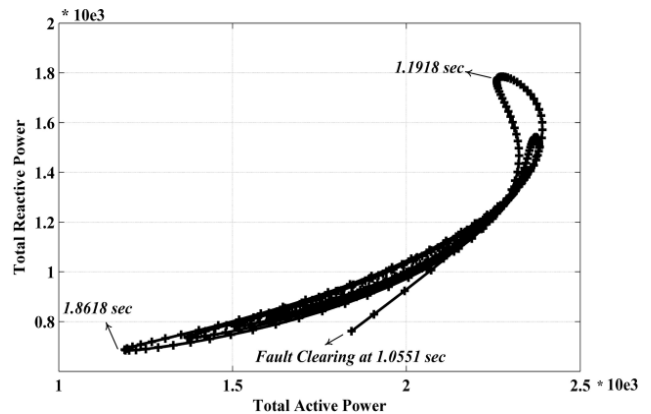
در مراجع اشاره شده در زمینه حفاظت ناپایداری گذرای ناحیه گسترده سیستم قدرت، نتایج نشان داده‌اند که روش‌های کلاسیک دارای توانایی لازم به‌منظور شناسایی و عملکرد سریع تحت شرایط بحرانی نیستند. از طرف دیگر، روش‌های اشاره شده همواره متمرکز بر سطح بار ثابتی بوده و در صورتی که توپولوژی شبکه تغییر کند و یا شبکه آزمایش دیگری مورد استفاده قرار گیرد، با توجه به آنکه روش مورد نظر وابسته به مدل شبکه است، تحت شرایط متفاوت، کارایی لازم را نخواهد داشت.

در این تحقیق مطابق با کاستی‌های اشاره شده، طرح برخط پیش‌بینی ناپایداری گذرای سیستم قدرت مبتنی بر تئوری درخت تصمیم معرفی می‌شود که برای این منظور، نوآوری‌های طرح پیشنهادی در ادامه آمده است:

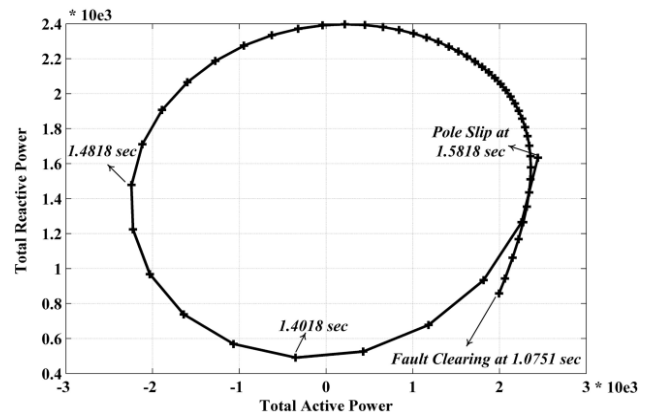
- ۱) طرح حفاظتی برخط بر اساس اطلاعات فازوری
- ۲) معرفی تئوری درخت تصمیم به‌عنوان الگوریتم شناسایی شرایط نوسان توان و خروج از همگامی ناحیه گسترده
- ۳) معرفی شاخص‌های برخط دینامیکی مبتنی بر اندازه‌گیری فازوری تحت شرایط بهره‌برداری و توپولوژیکی شبکه
- ۴) عدم وابستگی طرح پیشنهادی به ماتریس امیدانسی شبکه و متمرکز بر سیگنال‌های سراسری فازوری
- ۵) پیش‌بینی سریع ناپایداری گذرا (کسری از ثانیه) مبتنی بر اندازه‌گیری برخط در زمان‌های رخداد و برطرف شدن خطا

## ۲- خروج از همگامی مبتنی بر ماشین‌های یادگیری

در این بخش، ارتباط توانایی ماشین‌های یادگیری بر عملکرد طرح حفاظتی در طول یک نوسان توان و وضعیت OS بر روی یک شبکه دوماشین به‌مانند بررسی می‌شود.

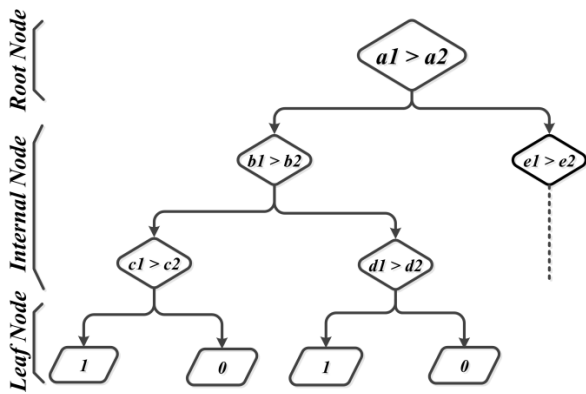


شکل ۱: نرخ توان اکتیو به راکتیو برای یک سناریوی پایدار.



شکل ۲: نرخ توان اکتیو به راکتیو برای وضعیت ناپایدار.

مطابق با آنچه در شکل ۳ مشاهده می‌شود برای یک وضعیت پایدار، سطح A2 باید بزرگ‌تر از سطح A1 باشد؛ در غیر این صورت ژنراتور نخواهد توانست انرژی گرفته شده را به شبکه بازگرداند که موجب شتاب گرفتن ژنراتور و ناپایداری آن می‌گردد. این روش در شبکه‌های کوچک همانند سیستم تک‌ماشینه باس بی‌نهایت SMIB مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ چرا که نیازمند زمان زیادی برای اتخاذ تصمیم صحیح است. در [۳] از تئوری شبکه عصبی برای آشکارسازی خروج از همگامی و از پارامترهای انحراف انرژی جنبشی (KE)، توان مکانیکی ورودی (Pm) و متوسط شتاب ژنراتور در طول دوره خطا (αav) برای آموزش به شبکه عصبی استفاده شده است. در [۴]، کاربرد تئوری درخت تصمیم بر روی استراتژی R-Rdot برای آشکارسازی وضعیت OS مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مرجع از امیدانسی اندازه‌گیری شده توسط رله و نرخ تغییرات امیدانسی برای آشکارسازی یک وضعیت ناپایدار استفاده شده است. در [۵]، کاربرد تئوری منطق فازی برای آشکارسازی وضعیت OS پیشنهاد گردیده که در این مرجع از انحراف فرکانس زاویه‌ای و زاویه امیدانسی اندازه‌گیری شده در ترمینال‌های ژنراتور به‌عنوان پارامترهای ورودی به منطق فازی استفاده شده است. مرجع [۶] از مفهوم تابع انرژی برای آشکارسازی وضعیت OS بهره گرفته که در این روش با محاسبه انرژی کاتست‌ها در هر مجموعه، وضعیت پایدار و یا ناپایدار تشخیص داده می‌شود. در [۷] از تبدیل ویولت برای آشکارسازی نوسان توان استفاده شده که در این روش، توابع انرژی ولتاژی و جریانی توسط تبدیل ویولت در سطوح مختلفی پردازش می‌گردند و با محاسبه انرژی‌های جریان و ولتاژ در سطوح مختلف، وضعیت نوسان توان و خروج از همگامی تشخیص داده می‌شود. در [۸] از کاربرد معیار سطوح معادل در حوزه زمان (P-t) برای آشکارسازی وضعیت OS بهره گرفته شده است. در این



شکل ۶: ساختار درخت تصمیم.

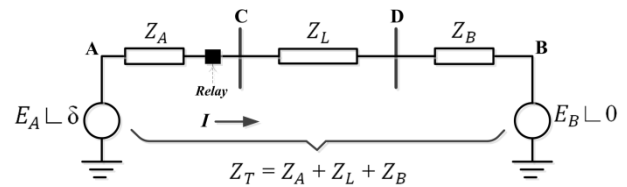
CART معرفی شده که در این مقاله برای یادگیری درخت تصمیم، روش  $C5.0$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش یادگیری درخت تصمیم برای تقریب توابع هدف با مقادیر گسسته است که نسبت به نویز داده‌ها مقاوم و قادر است که ترکیبات مختلف به‌عنوان ورودی را به‌خوبی یاد بگیرد [۱۱]. نمایی از درخت تصمیم ساده در شکل ۶ نشان داده شده است. درخت تصمیم از یک سری معادلات آماری برای دسته‌بندی نمونه‌ها استفاده می‌کند. درخت تصمیم طبق شکل ۶ نمونه‌ها را دسته‌بندی نموده؛ به نحوی که درخت از گره ریشه به سمت پایین رشد می‌کند و در نهایت به گره‌های برگ می‌رسد. هر گره داخلی، متناظر با یک متغیر و هر مسیر به گره‌های برگ، نمایانگر یک مقدار ممکن برای آن متغیر است و هر گره داخلی با یک ویژگی مشخص می‌شود.

این ویژگی سوآلی را در رابطه با مثال ورودی مطرح می‌کند. در هر گره داخلی به تعداد جواب‌های ممکن با این سؤال، شاخه وجود دارد که هر شاخه با مقادیر ممکن برای آن سؤال مشخص می‌شود.

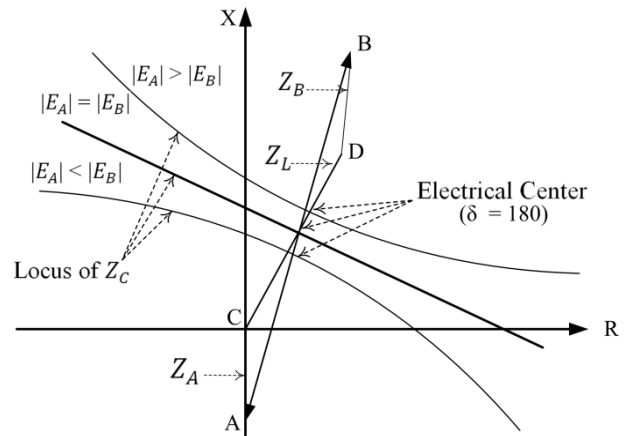
یک گره برگ با داشتن مقادیر متغیرها در مسیری از ریشه درخت تا آن گره، مقدار پیش‌بینی شده متغیر هدف را نشان می‌دهد و با یک کلاس و یا یک دسته از جواب‌ها مشخص می‌شود. یک درخت تصمیم، ساختاری را نشان می‌دهد که برگ‌ها نشان‌دهنده دسته‌بندی‌ها و شاخه‌ها مسیرهای منتج به این دسته‌بندی‌ها شود را بازنمایی می‌کنند. این فرایند در هر زیرمجموعه حاصل از تفکیک، تکرار می‌شود تا زمانی که درخت تمامی نمونه‌ها را به‌طور کامل طبقه‌بندی کند.

### ۳-۲ هرس کردن درخت تصمیم

تکنیک یادگیری درخت تصمیم بر پایه یک عملکرد جستجوی حریصانه از بالا به پایین در فضای درخت عمل می‌کند. همان طور که در بخش ۳-۱!! عنوان شد، درخت تصمیم تا آنجا رشد می‌یابد که تمامی نمونه‌ها را طبقه‌بندی کند. رشد کامل درخت می‌تواند موجب پدیده سرریزی بیش از حد نمونه‌ها در یادگیری شود که به‌منظور جلوگیری از این پدیده، درخت تصمیم باید هرس شود. تکنیک‌های یادگیری زیادی برای هرس کردن درخت تصمیم معرفی گردیده [۲۰] و [۲۱] که یک روش ساده، اجازه به رشد کامل درخت و سپس هرس کردن درخت از پایین به بالا می‌باشد که تحت عنوان هرس خطای کاهشی معرفی شده است. با این روش می‌توان برای طبقه‌بندی کردن داده‌ها به یک درخت تصمیم بهینه دست یافت. در صورت آموزش صحیح، درخت تصمیم می‌تواند نمونه‌های مختلفی را با گروه‌بندی‌های متفاوت با دقت بالایی طبقه‌بندی کند.



شکل ۴: سیستم دوماشینه مورد مطالعه.

شکل ۵: امپدانس دیده‌شده توسط رله تابعی از  $\delta$  [۱۹].

### ۲-۱ مدل‌سازی ریاضیاتی نوسان توان در سیستم قدرت

نمایی از یک شبکه دوماشینه حاوی ژنراتورهای سنکرون و خطوط انتقال مطابق با شکل ۴ نشان داده شده که  $E_A$  و  $E_B$  برابر با ولتاژ داخلی ژنراتورها و  $\delta$  برابر با زاویه ولتاژی ژنراتور  $A$  است. فرض گردیده که ژنراتور  $A$  با یک زاویه  $\delta$  از ژنراتور سمت  $B$  پیش افتاده است.  $Z_A$  و  $Z_B$  به ترتیب برابرند با امپدانس‌های گذرای ژنراتورهای  $A$  و  $B$  و  $Z_L$  برابر با امپدانس خط انتقال است. طبق شکل ۴ با فرض نصب رله مورد نظر در باس  $C$  و با فرض  $E_A$  و  $E_B$  برابر با ۱ p.u.، امپدانس دیده‌شده از سمت رله در باس  $C$  را می‌توان به‌صورت تابعی از  $\delta$  نوشت [۱]

$$Z_C = \left[ \frac{Z_T}{\gamma} - Z_A \right] - j \left[ \frac{Z_T}{\gamma} \cot \frac{\delta}{\gamma} \right] \quad (1)$$

مطابق با (۱)، امپدانس اندازه‌گیری شده در باس  $C$  تابعی از زاویه باس ژنراتوری  $\delta$  است. به‌ازای مقادیر مختلف امپدانس و دامنه ولتاژ باس ژنراتوری، تغییرات امپدانس دیده‌شده توسط رله را می‌توان به‌صورت منحنی R-X مطابق با شکل ۵ ترسیم نمود. طبق شکل در طول دوره نوسان، زاویه  $\delta$  تغییر کرده و امپدانس اندازه‌گیری شده توسط رله نیز تغییر خواهد کرد. در صورتی که دامنه ولتاژهای  $E_A$  و  $E_B$  با یکدیگر برابر نباشند، مکان  $Z_C$  دایره‌ای خواهد بود که مرکز آن بر امتداد امپدانس خط انتقال  $AB$  منطبق خواهد بود [۱۹].

### ۲-۲ ماشین یادگیری مبتنی بر درخت تصمیم

ساختار درخت تصمیم، یک مدل پیش‌بینی‌کننده است که حقایق مشاهده‌شده در مورد یک پدیده را به استنتاج‌هایی در مورد مقدار هدف آن پدیده نقش می‌کند. تکنیک یادگیری برای استنتاج یک درخت تصمیم از داده‌ها، یادگیری درخت تصمیم نامیده می‌شود که از رایج‌ترین روش‌های داده‌کاوی و جزو مشهورترین الگوریتم‌های یادگیری استقرایی است و به‌صورت موفقیت‌آمیزی در کاربردهای مختلف به‌کار گرفته شده است [۱۰]. تکنیک‌های زیادی برای یادگیری درخت تصمیم مثل  $C5.0$ ،  $ID3$  و

برطرف شدن خطا با استفاده از اطلاعات سیستم اندازه‌گیری فازوری، محاسبه می‌شوند.

**گام سوم)** طبق هر سناریوی خطا و شاخص‌های اندازه‌گیری شده، یک سری جفت داده‌های ورودی (شاخص‌ها) - خروجی (تابع هدف پایدار/ ناپایدار)، تولید و در یک پایگاه داده برای آموزش و رشد درخت تصمیم ذخیره‌سازی می‌شود.

**گام چهارم)** پس از تکمیل پایگاه داده و تولید نمونه‌های آموزشی، در ادامه درخت تصمیم در محیط برون خط مورد آموزش قرار می‌گیرد. در این گام با استفاده از معادلات ریاضیاتی درخت تصمیم برای هر یک از گره‌های ریشه و گره‌های داخلی درخت، یک شاخص مطابق با بخش ۲-۲ معرفی و انتخاب می‌شود. این مسئله تا جایی ادامه می‌یابد تا تمامی نمونه‌های آموزشی، دسته‌بندی و درخت تصمیم به‌طور کامل تشکیل شده باشد.

**گام پنجم)** پس از آنکه درخت به‌طور کامل تشکیل شد در حلقه سوم از ساختار پیشنهادی، طبق روش معرفی شده در بخش ۲-۳، درخت تصمیم هرس می‌شود تا بهترین درخت ممکن با حداقل تأثیرپذیری نویز به‌دست آید.

**گام ششم)** نهایتاً در محیط برخط، رله حفاظتی مبتنی بر درخت تصمیم روی سیستم قدرت پیاده‌سازی شده و با توجه به سناریوهای خطا، شرایط دینامیک شبکه به‌صورت دو مجموعه پایدار (نوسان توان) و ناپایدار (خروج از همگامی ناحیه گسترده) پیش‌بینی می‌شود.

#### ۴- مطالعات شبیه‌سازی

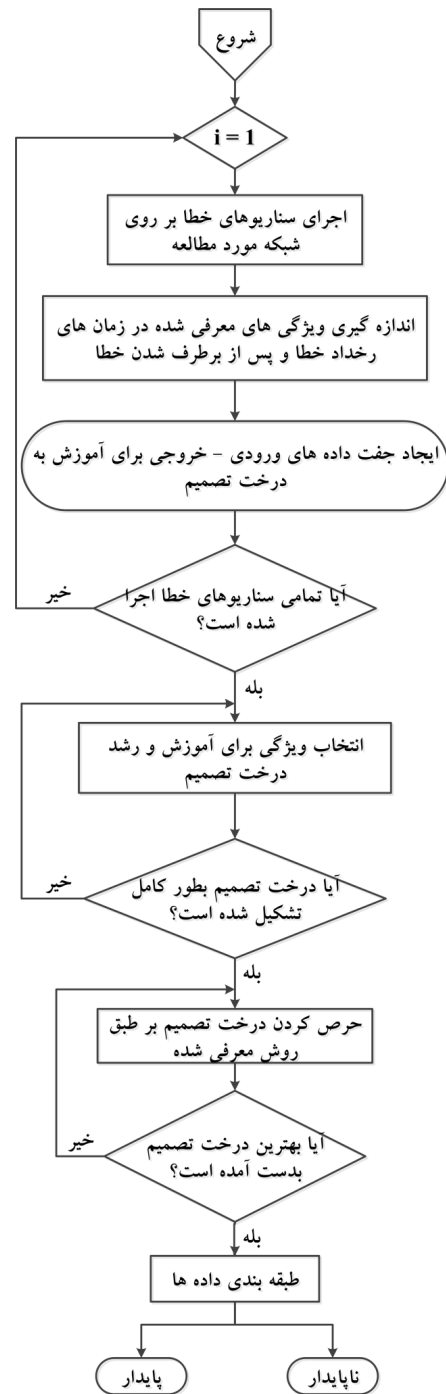
در این بخش، توانایی طرح حفاظتی پیشنهادی برای پیش‌بینی شرایط نوسان توان و خروج از همگامی ناحیه گسترده بر روی یک سیستم قدرت نمونه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

##### ۴-۱ معرفی شبکه نمونه

نمایی از دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت مورد مطالعه، حاوی ۳۹ باس و ۱۰ ژنراتور سنکرون در شکل ۸ آمده که در این شبکه، ژنراتور G8 توسط یک رله خروج از گام و بر اساس الگوریتم پیشنهادی تحت حفاظت قرار می‌گیرد. اطلاعات کامل دینامیکی شبکه شامل امپدانس خطوط، بارها و ژنراتورهای سنکرون در [۱] آورده شده است.

##### ۴-۲ تولید نمونه

به‌منظور عملکرد صحیح درخت تصمیم در شرایط زمان واقعی، لازم است که یک سری نمونه آموزشی تهیه شده و در محیط برون برای آموزش درخت تصمیم مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، خطاهای گوناگون با پتانسیل شکل‌گیری نوسان توان و شرایط خروج از همگامی در نقاط مختلفی از شبکه اجرا شده و نتایج شبیه‌سازی به‌عنوان جفت داده ورودی- خروجی برای آموزش به درخت تصمیم استفاده می‌گردد. در اجرای شبیه‌سازی‌ها، خطاها در ۳۹ باس متفاوت، ۳۴ خط مختلف و در سه سطح بار اعمال می‌شود. همچنین در زمینه اجرای خطاها در مکان‌های مختلف از خطوط انتقال شبکه، خطاها در ابتدا، میان و انتهای هر خط اعمال می‌شوند. سطوح بار در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی‌ها برابر ۱ p.u.، ۱/۲۵ p.u. و ۱/۵ p.u. هستند و برای تولید نمونه‌های پایدار و ناپایدار از چهار نوع خطا با دوره‌های زمانی متفاوت استفاده می‌گردد که عبارت از ۱۰ ms، ۵۰ ms، ۱۰۰ ms و ۱۵۰ ms هستند. در پاک شدن خطاها بر روی خطوط مختلف در نظر گرفته می‌شود که هر خطا برابر با خروج یک



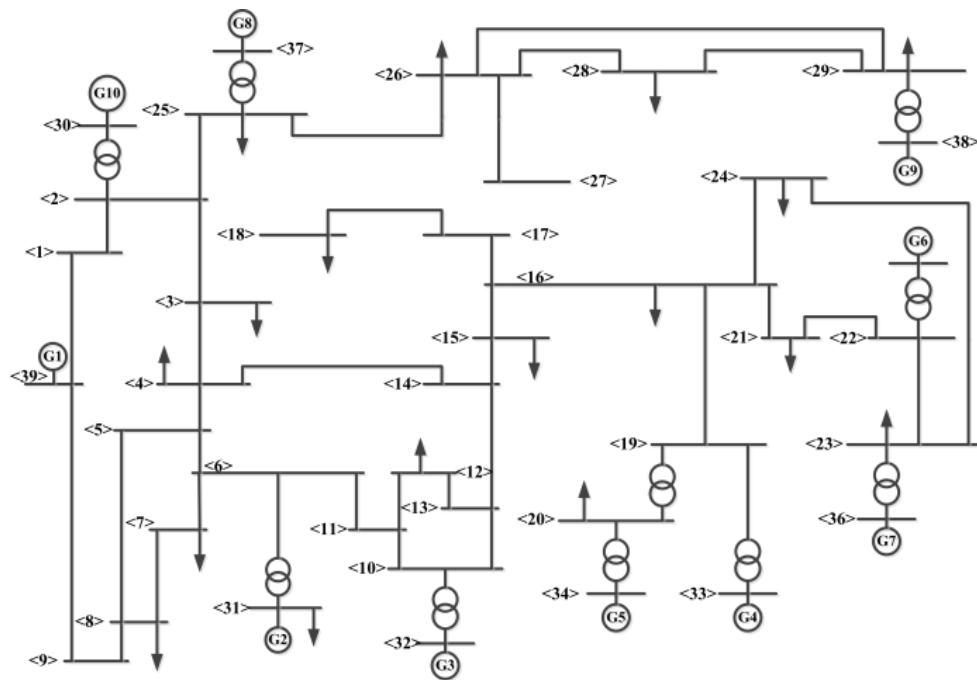
شکل ۷: ساختار طرح حفاظتی بر اساس درخت تصمیم.

#### ۳- فلوجارت طرح پیشنهادی

ساختار طرح حفاظتی OS بر اساس الگوریتم پیشنهادی درخت تصمیم در شکل ۷ آمده است. مطابق الگوریتم نشان داده شده در شکل، مراحل مختلف از طرح حفاظتی پیشنهادی درخت تصمیم به‌صورت گام‌های ذیل معرفی می‌شوند:

**گام اول)** در ابتدا با توجه به شبکه مورد مطالعه، خطاهای ممکن با پتانسیل شکل‌گیری شرایط نوسانی، بررسی و بر روی در سیستم قدرت اجرا می‌شود.

**گام دوم)** با وقوع هر سناریوی خطا، شاخص‌های مؤثر در شناسایی وضعیت نوسان توان و خروج از همگامی ناحیه گسترده سیستم قدرت بررسی گردیده است و در زمان‌های رخداد خطا و پس از



شکل ۸: دیاگرام تک خطی شبکه نمونه ۳۹ باسه.

جدول ۲: نتایج درخت تصمیم از ترکیب ویژگی‌ها.

گروه	ویژگی‌ها	دقت (%)	نمونه‌های طبقه‌بندی نشده
۱	RAR	۹۱٫۳۴	۱۰۶
۲	گروه ۱ و REPMPD	۹۶٫۴۹	۴۳
۳	گروه ۲ و شاخص VDR	۹۸٫۵۳	۱۸
۴	گروه ۳ و REPMPF	۹۹٫۱	۱۱
۵	گروه ۴ و شاخص EPR	۹۹٫۱	۱۱
۶	گروه ۵ و شاخص ARR	۹۹٫۳۵	۸
۷	گروه ۶ و شاخص CR	۹۹٫۳۵	۸
۸	گروه ۷ و شاخص SR	۹۹٫۳۵	۸
۹	گروه ۸ و شاخص RPR	۹۹٫۳۵	۸
۱۰	گروه ۹ و شاخص APR	۹۹٫۱۸	۱۰
۱۱	گروه ۱۰ و شاخص VR	۹۸٫۷۷	۱۵

جدول ۱: نتایج درخت تصمیم برای ویژگی‌های مستقل.

شاخص	دقت‌های تخمین زده شده (%)	تعداد نمونه‌های طبقه‌بندی نشده
ARR	۸۸٫۰۷	۱۴۶
CR	۸۸٫۶۴	۱۳۹
VDR	۸۴٫۷۲	۱۸۷
VR	۸۵٫۴۶	۱۷۸
RPR	۸۵٫۰۵	۱۸۳
APR	۸۶٫۲۷	۱۶۸
SR	۸۶٫۸۵	۱۶۱
RAR	۹۱٫۳۴	۱۰۶
EPR	۸۶٫۲۷	۱۶۸
REPMPD	۸۹٫۱۳	۱۳۳
REPMPF	۸۸٫۴	۱۴۲

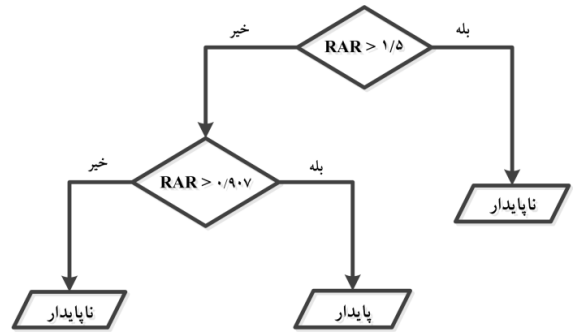
#### ۴-۴ نتایج طبقه‌بندی درخت تصمیم (پاراگراف قبل کامل حذف شد)

در ابتدا درخت تصمیم توسط هر شاخص به تنهایی، ساخته و مؤثرترین شاخص شناسایی می‌شود. جدول ۱ دقت‌های درخت تصمیم را به‌ازای شاخص‌های مختلف به‌تنهایی نشان می‌دهد. بر اساس جدول برای حالتی که تنها یک شاخص برای ساخت درخت استفاده شده، شاخص RAR دارای بیشترین میزان دقت است؛ لذا RAR به‌عنوان بهترین شاخص در حالتی که تنها یک ویژگی برای طبقه‌بندی داده استفاده شده، معرفی می‌گردد. درخت تصمیم ساخته‌شده توسط ویژگی RAR در شکل ۹ آمده است. در ادامه، RAR با دیگر شاخص‌های جدول ۱، ترکیب و بهترین ترکیب دو ویژگی برای ساخت درخت تصمیم معرفی می‌شود. این روند به همین صورت در ترکیب‌های بیشتر ادامه می‌یابد و در هر مرحله، بهترین درخت تصمیم معرفی می‌گردد. در جدول ۲، بهترین درخت‌های تصمیم در ترکیب‌های مختلف در گروه‌های جداگانه معرفی می‌شود. بر اساس جدول، بهترین درخت تصمیم با بهترین نرخ دقت به‌ازای ۶ شاخص مشخص به‌دست آمده که در این حالت، درخت تصمیم دارای نرخ دقت ۹۹٫۳۵٪ می‌باشد که نرخ دقت بسیار بالایی در طبقه‌بندی کردن داده‌هاست. در این

خط انتقال از شبکه است. پس از در نظر گرفتن تمام حالات خطا، نهایتاً تعداد ۱۲۲۴ جفت داده ورودی-خروجی از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده که در این میان، تعداد ۱۰۱۴ جفت داده (برابر با ۸۲٫۸۴٪ از کل داده‌ها) مربوط به نمونه‌های با طبقه‌بندی پایدار و ۲۱۰ جفت داده (۱۷٫۱۶٪ از کل داده‌ها) مربوط به نمونه‌های با طبقه‌بندی ناپایدار هستند. قابل توجه است که تمامی سناریوهای شبیه‌سازی و تولید نمونه‌ها بر روی شبیه‌ساز Digsilent Power Factory که نرم‌افزاری قدرتمند در زمینه تحلیل پایداری گذرای سیستم‌های قدرت است، پیاده‌سازی و اجرا می‌شوند.

#### ۳-۴ انتخاب شاخص‌های پیشنهادی

برای انتخاب ویژگی به عنوان معیاری جهت آشکارسازی وضعیت OS، پارامترهای متنوعی از شبکه را می‌توان در نظر گرفت. در این مقاله، تمام پارامترهای مؤثر در آشکارسازی وضعیت OS ارزیابی دقیق شده و آنهایی که بهترین نتیجه را ارائه می‌دهند به‌صورت یک سری شاخص‌های جدید برای آموزش به درخت تصمیم معرفی می‌شوند که در علائم و اختصارات آمده‌اند. در معرفی شاخص‌ها از نسبت هر پارامتر در دو بازه زمانی وقوع خطا ( $fl+$ ) و برطرف شدن خطا ( $clr+$ ) استفاده می‌شود.



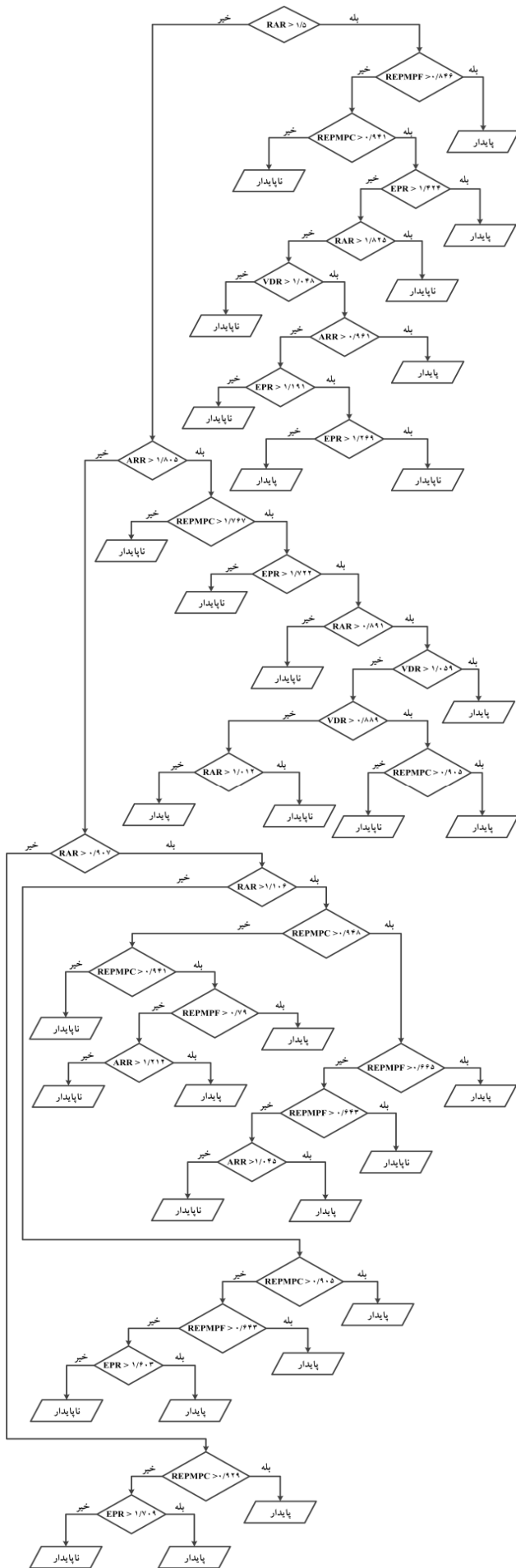
شکل ۹: درخت تصمیم ساخته‌شده توسط ویژگی RAR.

قسمت، درخت تصمیم توانایی خود را در طبقه‌بندی نمونه‌های مختلف به‌وضوح نشان داده است.

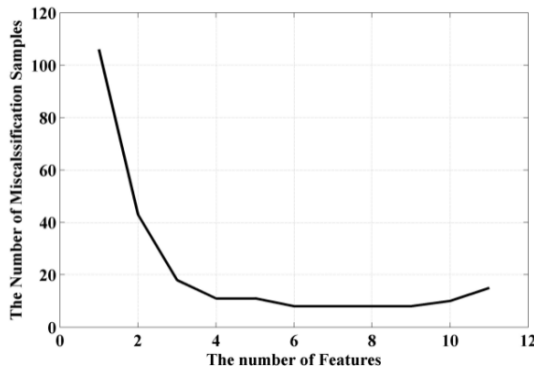
قابل توجه است با توجه به آنکه نمونه‌های آموزشی در شرایط مختلف بهره‌برداری و سطح بار شبکه شامل ۱ پریونیت، ۱/۲۵ پریونیت و ۱/۵ پریونیت شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده‌اند، لذا شرایط بهره‌برداری مختلف در آموزش درخت تصمیم لحاظ گردیده و درخت تصمیم در طیف وسیعی از نقاط کار شبکه مورد آموزش و تست قرار گرفته است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از جدول ۲ نشان می‌دهند در صورت عدم ارسال سیگنال‌های ورودی، توانایی تصمیم‌گیری درخت تصمیم کاهش چشم‌گیری ندارد؛ به‌نحوی که با تنها یک شاخص، توانایی طبقه‌بندی بیش از ۹۱٪ نمونه‌ها را داراست. این عدد برای ترکیب دو شاخص به میزان ۹۶٫۵٪ رسیده که نشان‌دهنده توانایی درخت تصمیم به‌زای محدودیت در ارسال سیگنال‌های ورودی است.

در ادامه جدول ۲ مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد شاخص‌ها، میزان دقت درخت کاهش یافته است. نرخ کاهش دقت درخت تصمیم در ترکیب‌های بالاتر به‌خاطر پدیده تعداد بیش از حد شاخص است که با افزایش ترکیب‌ها رخ می‌دهد. از جدول ۲، درخت تصمیم با شش ویژگی به‌عنوان بهترین درخت ممکن با بالاترین نرخ دقت به‌زای نمونه‌های تولیدشده معرفی می‌گردد. درخت ساخته‌شده توسط گروه ششم از جدول ۲ در شکل ۱۰ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد شاخص‌ها به‌عنوان ورودی، حجم درخت تصمیم افزایش یافته و به عمق می‌رود که این امر موجب ورود نویز به داخل درخت شده و دقت درخت را کاهش می‌دهد. این نکته را می‌توان در جدول ۲ نیز مشاهده نمود. طبق جدول با افزایش ویژگی‌های بیشتر، دقت درخت تصمیم رو به کاهش گذاشته که این مسئله ناشی از ورود نویز به داخل درخت است. برای جلوگیری از کاهش دقت درخت باید از به‌عمق رفتن درخت جلوگیری کرد؛ به‌عبارت دیگر، شاخص‌ها بهتر است به‌گونه‌ای انتخاب شوند تا نمونه‌ها با حداقل عمق درخت و به‌درستی طبقه‌بندی شوند.

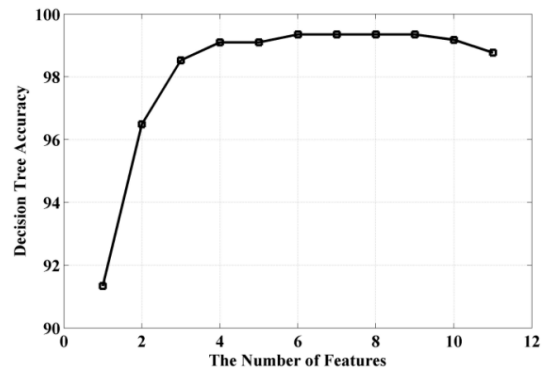
قابل توجه است که در زمینه عوامل مؤثر در تصمیم‌گیری درخت تصمیم، یک سری شاخص‌های برخط پیشنهاد داده شده و درخت تصمیم با توجه به این شاخص‌ها مورد آموزش و تست قرار گرفته است. شاخص‌های پیشنهادی شامل اطلاعات دینامیک شبکه بوده که در محیط زمان واقعی و با توجه به اطلاعات برخط به‌دست‌آمده از واحدهای اندازه‌گیری فازوری محاسبه می‌شوند. در این زمینه طبق جدول ۲، نوع شاخص، نحوه اندازه‌گیری و نرخ نمونه‌برداری شاخص می‌تواند بر عملکرد درخت تصمیم تأثیرگذار باشد. همچنین نحوه ترکیب شاخص‌های مختلف نیز از عواملی است که بر عملکرد پیش‌بینی درخت تصمیم تأثیرگذار است. تأثیر این عامل در جدول ۲ و همچنین شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: درخت تصمیم گروه ۶ از جدول ۲.



شکل ۱۰: نمونه‌های طبقه‌بندی نشده با افزایش ویژگی‌ها.



شکل ۱۱: نرخ دقت درخت تصمیم با افزایش تعداد ویژگی‌ها.

زمینه جبران‌سازی سیگنال‌های سراسری، مراجع مختلفی به این موضوع پرداخته‌اند و جزو نوآوری‌های طرح پیشنهادی نیست [۱۸]، [۲۰] و [۲۱]. در این مقاله در نظر گرفته شده که با جبران‌سازی مناسب مبتنی بر روش‌های برخط، سیگنال‌ها به‌طور همزمان برای رله پیشنهادی ارسال می‌شوند. همچنین در زمینه تأثیر نویز بر عملکرد تصمیم‌گیری درخت تصمیم، این مسئله به نحو دیگری در جدول ۲ و شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای حضور بیش از حد سیگنال‌های ورودی، دقت درخت تصمیم دچار افت جزئی شده که این مسئله، ناشی از نویز اعمالی توسط سیگنال‌های ورودی به درخت تصمیم است. لذا تعداد سیگنال‌های ورودی همواره باید مطابق با دقت مورد نیاز تطبیق داده شود؛ چرا که با افزایش و یا ترکیب بیش از حد سیگنال‌های مختلف، درخت تصمیم عملکرد بهینه خود را نخواهد داشت.

#### ۴-۵ در نظر گرفتن هزینه طبقه‌بندی نادرست

در یک سیستم قدرت، هزینه ارسال یک دستور اشتباه توسط رله بسیار بیشتر از هزینه عدم فرمان رله برای ارسال فرمان است؛ چرا که اگر رله نتواند یک خطا را تشخیص دهد و فرمانی مناسب صادر کند، رله‌های پشتیبان می‌توانند در کسری از ثانیه (چند میلی‌ثانیه) خطا را شناسایی و فرمان مناسب صادر کنند. در صورتی که در اثر ارسال یک فرمان اشتباه توسط رله، ممکن است یک ژنراتور بزرگ یا یک خط مهم و یا یک بار مهمی از شبکه جدا شده که موجب نوسانات شدیدی در سیستم قدرت گردد و به نوبه خود موجب ناپایداری شدن شبکه شود. به همین منظور در این قسمت، این نکته تحت عنوان هزینه عدم طبقه‌بندی برای آموزش در نظر گرفته می‌شود و توانایی درخت تصمیم با در نظر گرفتن این هزینه ارزیابی می‌گردد. برای بررسی صحیح و استخراج نتایج مناسب در این بخش، هزینه یک فرمان اشتباه ۵ برابر هزینه شکست در ارسال فرمان توسط رله در نظر گرفته می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده از درخت تصمیم به‌ازای اعمال هزینه طبقه‌بندی در جدول ۳ آمده و قابل توجه است که در نتایج به‌دست‌آمده در جداول ۱ و ۲، هزینه عدم طبقه‌بندی درخت برابر با یک در نظر گرفته شده بود.

همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است، به‌ازای اعمال هزینه طبقه‌بندی، درخت تصمیم تمایل به شکل‌گیری در مسیری منجر به عدم فرمان تریپ توسط رله دارد. همچنین تعداد تریپ‌های رله در دو حالت بدون در نظر گرفتن هزینه طبقه‌بندی و با در نظر گرفتن هزینه طبقه‌بندی تحت مقایسه قرار گرفته‌اند. نتایج بر اساس جدول نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن هزینه طبقه‌بندی نادرست، تعداد تریپ‌های رله کاهش پیدا کرده که نشان از موفق بودن آزمایش انجام‌شده بر روی درخت تصمیم است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن مقادیر مختلف هزینه

جدول ۳: نتایج درخت تصمیم برای هزینه عدم طبقه‌بندی ۵.

گروه	دقت درخت با هزینه ۵ (%)	تریپ‌های رله با هزینه ۱	تریپ‌های رله با هزینه ۵
۱	۸۷٫۷۵	۲	۱
۲	۹۲٫۴۸	۷	۳
۳	۹۲٫۴۸	۱۴	۳
۴	۹۲٫۱۶	۱۵	۴
۵	۹۲٫۲۴	۱۵	۴
۶	۹۲٫۲۴	۱۶	۴
۷	۹۲٫۲۴	۱۴	۴
۸	۹۲٫۲۴	۱۷	۴
۹	۹۲٫۲۴	۱۶	۴
۱۰	۹۱٫۷۵	۱۶	۳
۱۱	۹۲٫۵۷	۱۵	۳

می‌توان نتیجه گرفت که ترکیبات متفاوت ویژگی‌ها به‌عنوان ورودی منجر به دقت‌های متفاوت در ساختار درخت می‌شود. بنابراین انتخاب یک ویژگی مناسب بسیار حائز اهمیت است؛ به‌طوری که یک انتخاب اشتباه، برخی مواقع منجر به تغییرات بزرگ در ساختار درخت می‌شود. طبق شکل ۱۱، درخت تصمیم تشکیل‌شده توسط یک ویژگی توانست که به نرخ دقت بالای ۹۱٪ دست پیدا کند که این نرخ با دو ویژگی به بالای ۹۶٪ افزایش یافته است. همچنین میزان تأثیر هر ویژگی در کاهش نمونه‌های طبقه‌بندی نشده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. با افزایش ویژگی‌ها، تعداد نمونه‌های طبقه‌بندی نشده کاهش یافته؛ به‌طوری که در بهترین حالت، تنها ۸ نمونه طبقه‌بندی نشده توسط درخت وجود دارد که از این تعداد، ۵ نمونه به‌صورت نمونه‌های ناپایدار هستند و پایدار دیده شده‌اند و ۳ نمونه نیز جزو نمونه‌های پایدار هستند که به‌صورت نمونه‌های ناپایدار دیده شده‌اند.

قابل توجه است که در زمینه ارسال سیگنال ورودی با توجه به آنکه رله پیشنهادی به‌منظور حفاظت در برابر ناپایداری گذرای سیستم قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا رله باید در سیکل‌های نخست خطا (در حد دهم میلی‌ثانیه)، وضعیت دینامیک شبکه را تشخیص داده و تصمیم مناسب اتخاذ کند. در نتیجه، سرعت عملکرد در طرح حفاظت خروج از همگامی، بسیار حائز اهمیت است. در صورت تأخیر بیش از حد در ارسال سیگنال سراسری، رله‌ها فرصت کافی نداشته و دستور تریپ با تأخیر برای عنصر مورد حفاظت ارسال شده و رله، کارایی حفاظتی خود را از دست می‌دهد. در طرح پیشنهادی نیز با توجه به آنکه روش به اندازه‌گیری برخط سیگنال‌های فازوری وابسته است، لذا باید مسئله تأخیر به شکل بهینه جبران‌سازی شده و سیگنال‌ها به‌طور همزمان برای رله ارسال شوند. در



دارد؛ به نحوی که به‌ازای تغییر شرایط بهره‌برداری، عملکرد صحیح روش‌ها نیازمند به‌روزرسانی و تنظیم مجدد پارامترهاست.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی برخط جهت پیش‌بینی خروج از همگامی ناحیه گسترده در سیستم‌های قدرت بر اساس تئوری درخت تصمیم ارائه شده است. در این زمینه، یک سری شاخص‌های پیشنهادی در قالب ۱۱ شاخص مختلف معرفی گردیدند و تحت سناریوهای خطا مورد ارزیابی قرار گرفتند. مشخص شد که برای حالت یک شاخص تنها به‌عنوان ورودی به درخت تصمیم، نرخ زاویه روتور ژنراتور سنکرون RAR دارای بیشترین میزان دقت با نرخ دقت  $91/34\%$  در طبقه‌بندی نمونه‌های آموزشی بوده است. در ادامه، دقت درخت تصمیم با ترکیب‌های مختلف از شاخص‌های پیشنهادی افزایش یافته؛ به نحوی که درخت تصمیم به‌ازای شش شاخص RAR، REPMPF، VDR، REPMP، EPR و ARR به بالاترین نرخ دقت به‌ازای شاخص‌های پیشنهادی به میزان  $99/35\%$  دست یافته است. نتایج طرح پیشنهادی نشان‌دهنده توانایی مؤثر الگوریتم درخت تصمیم برای شناسایی برخط شرایط نوسان توان و خروج از همگامی ناحیه گسترده بلافاصله پس از وقوع پیشامد (۵ میلی‌ثانیه) است.

برای آموزش درخت تصمیم از یک شبکه نمونه ۳۹ باسه استفاده شده و نتایج شبیه‌سازی در زمان‌های وقوع خطا و برطرف‌شدن خطا به‌صورت جفت‌داده‌های ورودی- خروجی نمونه‌برداری و جهت آموزش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در نتایج شبیه‌سازی مشخص شد که الگوریتم پیشنهادی می‌تواند در زمینه‌های دیگری از انواع پایداری از قبیل پایداری ولتاژ، پایداری توان و ... نیز مورد استفاده قرار گیرد. همچنین به‌خاطر آنکه الگوریتم پیشنهادی دارای تکنیک جستجوی حریصانه و هوشمند در زمینه پیدا کردن تابع هدف است می‌توان از آن در بعدهای وسیع‌تر و در زمینه پایدار نگاه‌داشتن چندین ژنراتور هم‌پا در شبکه‌های بزرگ‌تر استفاده نمود.

با توجه به نتایج، طرح حفاظتی پیشنهادی مبتنی بر درخت تصمیم توانسته به‌خوبی در مورد نمونه‌های تولیدی در سیستم قدرت، تصمیم مناسب را اتخاذ نماید؛ لذا می‌توان از آن به‌عنوان یک الگوریتم مناسب در رله‌های خروج از همگامی جهت پیش‌بینی شرایط نوسان توان و خروج از همگامی ناحیه گسترده در سیستم‌های قدرت بزرگ استفاده نمود.

### مراجع

- [1] S. Ranjbar, "Online estimation of controlled islanding time intervals using dynamic state trajectories through cascading failures from WAMS data," *Electric Power Systems Research, pt A*, vol. 214, Article ID: 108890, Jan. 2023.
- [2] J. Qi, Q. Wu, Y. Zhang, G. Weng, and D. Zhou, "Unified residue method for design of compact wide-area damping controller based on power system stabilizer," *J. of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 367-376, Mar. 2020.
- [3] Q. Mou, H. Ye, and Y. Liu, "Nonsmooth optimization-based WADC tuning in large delayed cyber-physical power system by interarea mode tracking and gradient sampling," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 668-679, Jan. 2019.
- [4] M. J. Alinezhad, M. Radmehr, and S. Ranjbar, "Adaptive wide area damping controller for damping inter-area oscillations considering high penetration of wind farms," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 622-633, Mar. 2020.
- [5] S. Ranjbar, "Adaptive criteria of estimating power system separation times based on inter-area signal," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 17, no. 3, pp. 573-588, Feb. 2023.
- [6] M. Bento, "Fixed wide-area damping controller considering time delays and power system operation uncertainties," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 5, pp. 3918-3926, Sep. 2020.
- [7] A. Thakallapelli and S. Kamalasan, "Wide-area damping of inter-area oscillations based on MIMO identification," *IET Generation,*

جدول ۴: مقایسه طرح حفاظتی پیشنهادی با روش‌های پیشین.

مرجع	دقت (%)	سیکل مورد نیاز شناسایی	مبتنی بر مدل پیچیدگی	هزینه و پیچیدگی	قابل استفاده در شبکه‌های بزرگ
[۱]	۹۲٫۶۵	> ۵	بلی	زیاد	خیر
[۱۹]	۸۷٫۳۶	۴	بلی	متوسط	خیر
[۲]	۹۰٫۵۴	۵	بلی	متوسط	خیر
[۴]	۸۹٫۲۱	> ۵	بلی	متوسط	بلی
[۶]	۸۹٫۸۵	> ۵	بلی	کم	بلی
[۸]	۹۴٫۳۹	۴	بلی	متوسط	بلی
[۹]	۹۳٫۴۶	> ۵	خیر	زیاد	خیر
[۱۱]	۹۲٫۶۲	> ۵	بلی	زیاد	خیر
[۱۲]	۹۳٫۲۷	۴	بلی	متوسط	خیر
[۱۴]	۸۹٫۵۸	۵	بلی	زیاد	خیر
[۱۶]	۹۴٫۱۴	۵	بلی	متوسط	بلی
[۱۸]	۹۳٫۶۹	۳	بلی	متوسط	بلی
رله پیشنهادی	۹۹٫۳۵	۲	خیر	کم	بلی

عدم طبقه‌بندی، درخت تصمیم توانایی تشکیل و صدور فرمان مطلوب برای هدف مورد نظر- که در اینجا استفاده برای شبکه‌های قدرت است- را دارا بوده و می‌تواند به‌عنوان طرح حفاظتی مناسب در طیف گسترده‌ای از سیستم‌های قدرت بزرگ مورد استفاده قرار گیرد. همان‌طور که در جدول ۳ مشخص است در این حالت و به‌خاطر اینکه درخت تمایل به شکل‌گیری در مسیرهای پایدار دارد، طبیعتاً تعدادی از نمونه‌های ناپایدار در دسته‌های پایدار قرار می‌گیرند و به همین خاطر در این حالت، دقت درخت تصمیم در طبقه‌بندی نمونه‌ها مقداری کاهش یافته و متعاقب آن، تعداد نمونه‌های طبقه‌بندی نشده نیز افزایش یافته است.

### ۴-۶ مقایسه طرح حفاظتی پیشنهادی با روش‌های پیشین

در این بخش به‌منظور ارزیابی توانایی رله پیشنهادی درخت تصمیم، مقایسه‌ای میان طرح پیشنهادی و روش‌های پیشین انجام می‌شود. برای این منظور با در نظر گرفتن شبکه قدرت یکسان طبق شکل ۸، سناریوی خطای مشابه اجرا شده و عملکرد طرح‌های حفاظتی در شناسایی رفتار دینامیکی سیستم تحت شاخص‌های مختلف شامل دقت، سیکل مورد نیاز شناسایی، وابستگی به مدل شبکه، هزینه و پیچیدگی و قابلیت استفاده در شبکه‌های بزرگ به‌صورت جدول ۴ مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. طبق جدول، رله پیشنهادی هوشمند درخت تصمیم، دقت عملکرد بهتر و در مدت زمان کمتر برای خطای یکسان را به همراه دارد. از مزایای بارز طرح پیشنهادی، سرعت عملکرد رله در کمتر از یک دو سیکل نوسان و عدم وابستگی دوش به ماتریس امپدانس شبکه است. این امر منجر به صرف هزینه کمتری شده که به نوبه خود، پیچیدگی روش را برای پیاده‌سازی در شرایط زمان واقعی به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. همچنین در مقایسه با توجه به شاخص‌های پیشنهادی مبتنی بر اطلاعات اندازه‌گیری فازوری از رله پیشنهادی می‌توان در سیستم‌های قدرت بزرگ و در طیف وسیعی از شرایط بهره‌برداری مختلف استفاده نمود.

در سوی دیگر، بیشتر روش‌های پیشین، نیازمند دوره زمانی طولانی‌تر با وابستگی زیاد به ماتریس امپدانس سیستم هستند. در این حالت، عملکرد طرح‌های حفاظتی ارائه‌شده به ساختار توپولوژیکی شبکه بستگی



- [18] G. N. Baltas, N. B. Lai, L. Marin, A. Tarrasó, and P. Rodriguez, "Grid-forming power converters tuned through artificial intelligence to damp subsynchronous interactions in electrical grids," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 93369-93379, 2020.
- [19] S. Ranjbar, M. R. Aghamohammadi, and F. Haghjoo, "A new scheme of WADC for damping inter-area oscillation based on CART technique and thevenin impedance," *International J. of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 94, pp. 339-353, Jan. 2018.
- [20] M. Sarkar, B. Subudhi, and S. Ghosh, "Unified smith predictor-based  $H_{\infty}$  wide-area damping controller to improve the control resiliency to communication failure," *IEEE/CAA J. of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 2, pp. 584-596, Mar. 2020.
- [21] J. A. Oscullo and C. F. Gallardo, "Residue method evaluation for the location of PSS with sliding mode control and fuzzy for power electromechanical oscillation damping control," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 18, no. 1, pp. 24-31, Jan. 2020.
- [8] J. L. Rodríguez-Amenedo and S. A. Gómez, "Damping low-frequency oscillations in power systems using grid-forming converters," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158984-158997, 2021.
- [9] Y. Zhou, J. Liu, Y. Li, C. Gan, H. Li, and Y. Liu, "A gain scheduling wide-area damping controller for the efficient integration of photovoltaic plant," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 34, no. 3, pp. 1703-1715, May 2019.
- [10] I. Zenelis, X. Wang, and I. Kamwa, "Online PMU-based wide-area damping control for multiple inter-area modes," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5451-5461, Nov. 2020.
- [11] Y. Shen, W. Yao, J. Wen, and L. Jiang, "Resilient wide-area damping control using GrHDP to tolerate communication failures," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2547-2557, May 2019.
- [12] N. R. Naguru and V. Sarkar, "Practical supplementary controller design for the bi-layer WAC architecture through structurally constrained  $H_2$  norm optimisation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 7, pp. 1095-1103, Mar. 2019.
- [13] L. Simon, K. S. Swarup, and J. Ravishankar, "Wide area oscillation damping controller for DFIG using WAMS with delay compensation," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 1, pp. 128-137, Apr. 2019.
- [14] F. Wilches-Bernal, R. H. Byrne, and J. Lian, "Damping of inter-area oscillations via modulation of aggregated loads," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 2024-2036, May 2020.
- [15] X. Shi, Y. Cao, M. Shahidehpour, Y. Li, X. Wu, and Z. Li, "Data-driven wide-area model-free adaptive damping control with communication delays for wind farm," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 11, no. 6, pp. 5062-5071, Nov. 2020.
- [16] T. Surinkaew, R. Shah, M. Nadarajah, and S. M. Muyeen, "Forced oscillation damping controller for an interconnected power system," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 2, pp. 339-347, 2020.
- [17] N. Naguru and Y. Ganapavarapu, "Design of a limited state feedback wide-area power system damping controller without communication channels," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 160931-160946, 2020.

**سهیل رنجبر** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۸ و ۱۳۹۱ از دانشگاه آزاد اسلامی واحد بجنورد و واحد علوم و تحقیقات تهران دریافت نموده است. نامبرده در سال ۱۳۹۲ به دوره دکتری مهندسی برق در دانشگاه شهید بهشتی تهران وارد گردید و در سال ۱۳۹۶ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق از دانشگاه مذکور شده است. دکتر رنجبر از سال ۱۴۰۰ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه ولایت در ایرانشهر مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز عضو هیأت علمی این دانشکده است. نامبرده از سال ۱۴۰۳ به عنوان پژوهشگر دانشکده مهندسی برق دانشگاه لیدز در کشور انگلستان مشغول به فعالیت است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده طیف وسیعی از مباحث امنیت سیستم‌های قدرت شامل موضوعات کنترل و دینامیک سیستم‌های قدرت، حفاظت ناحیه گسترده سیستم‌های قدرت، طرح‌های جزیره‌سازی کنترل‌شده و کاربردهای هوش مصنوعی در پیش‌بینی پایداری گذرا سیستم‌های قدرت می‌باشد.