

## ارزیابی قابلیت ضریب مشارکت ژنراتورها به منظور تعیین نوع نوسانات سیگنال کوچک سیستم قدرت با استفاده از روش‌های تحلیلی و پیش‌بینی همزمان آن‌ها با استفاده از شبکه عصبی

محمد حسین ولایتی<sup>۱\*</sup>، نیما امجدی<sup>۲</sup> و سید احمد حسینی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> تحلیل مدال، مقدار ویژه بحرانی، ضریب مشارکت ژنراتور، پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک رتور، روش انتخاب مؤلفه، شبکه عصبی.</p>	<p>پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک رتور که از آن به عنوان پایداری سیگنال کوچک نیز یاد می‌شود، یکی از مهمترین مطالعات در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت است. این نوع از پایداری، در چهار حالت نوسانی شامل نوسانات درون ناحیه‌ای، بین‌ناحیه‌ای، کنترلی و پیچشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شناسایی و تفکیک رفتار چنین نوسان‌هایی می‌تواند در اعمال رفتارهای کنترلی مانند تنظیم پارامترهای سیستم تحریک و پایدارساز سیستم قدرت به منظور کنترل و میرایی نوسان‌ها، مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از ابزارهای مرسوم در بررسی اینگونه نوسانات، فرکانس مدهای بحرانی سیستم و ضرایب مشارکت ژنراتورها در این مدها است که با استفاده از روش‌های تحلیلی مانند تحلیل مدال تعیین می‌گردند. در این مقاله، با توجه به زمانبر بودن روش‌های مرسوم، روشی مبتنی بر شبکه عصبی به عنوان جایگزین روش‌های مرسوم مطالعات پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک، معرفی خواهد شد. در روش پیشنهادی، ضریب مشارکت ژنراتورها بصورت یک فرآیند دسته‌بندی بیان شده و سپس با استفاده از ترکیب روش انتخاب مؤلفه و شبکه عصبی PNN، این ضرایب و نوع نوسان سیستم قدرت در مد بحرانی، پیش‌بینی می‌شود. مزیت روش پیشنهادی، دقت و سرعت بالای محاسبات و همچنین تعیین همزمان نوع نوسانات و میزان مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی است.</p>

### ۱- مقدمه

پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک رتور که در این مقاله مورد مطالعه قرار خواهد گرفت، به عنوان یکی از مسائل مهم در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، به قابلیت سیستم قدرت در حفظ همزمانی ژنراتورها به ازای

بروز یک اغتشاش کوچک مانند تغییرات تدریجی و آرام بار، اشاره دارد [۱-۳].

در سیستم‌های قدرت، مسائل مرتبط با پایداری سیگنال کوچک رتور که معمولاً زمان مطالعه آن در حدود ۱۰ تا ۲۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود، بطور مرسوم به دو شکل نوسانی رخ می‌دهند. این نوسانات شامل نوسانات درون ناحیه‌ای (محلی)<sup>۱</sup> با فرکانس ۰/۷-۲ هرتز و بین ناحیه‌ای<sup>۲</sup>

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mvelayaty@gmail.com

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

۲. استاد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان.

<sup>۱</sup>. Inter-Regional or Local

<sup>۲</sup>. Inter-Area

پایدارساز سیستم قدرت (PSS) به عنوان یک ابزار اساسی جهت میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای، ارائه شده است. در [۱۰]، با استفاده از PSO<sup>۳</sup>، روشی بهینه برای تعیین مد کنترلی UPFC<sup>۴</sup> به منظور بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین سیستم قدرت، ارائه شده است. در [۱۱، ۱۲] با استفاده از قابلیت ضریب مشارکت ژنراتورها در شناسایی نوع نوسانات درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای سیستم قدرت، بهترین مکان برای قرار دادن پایدارساز سیستم قدرت تعیین شده است.

علیرغم موارد بیان شده، تمامی مطالعات صورت گرفته تاکنون، مبتنی بر یکی از مدهای نوسانی و عمدتاً مد نوسانی بین ناحیه‌ای بوده است. بنابراین، راه‌کارهای ارائه شده به منظور مواجهه با مدهای درون ناحیه‌ای کارایی چندانی نخواهند داشت. این موضوع سبب می‌شود که قبل از ارائه راه‌کارهای کنترلی به منظور بهبود پایداری زاویه‌ای سیگنال کوچک، در ابتدا یک ابزار به منظور تفکیک مدهای درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای از یکدیگر ارائه گردد تا با استفاده از نتایج حاصل از آن، راه‌کارهای کنترلی بهتر و موثرتری ارائه شود.

همچنین، مطالعات نشان می‌دهد که ضریب مشارکت ژنراتورها به عنوان ابزاری برای تعیین محل پایدارساز سیستم قدرت و نیز نوع نوسانات درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد [۹، ۱۱، ۱۲]. با این حال، تعیین ضرایب مشارکت ژنراتورهای سیستم با استفاده از ابزارهای مرسوم مانند تحلیل مدال، سخت و زمانبر بوده و نیازمند وجود اطلاعات دینامیکی کاملی از سیستم قدرت در هر شرایط بهره‌برداری می‌باشد. بنابراین، با توجه به قابلیت ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم در تعیین نوع مدهای نوسانی سیستم قدرت، در این مقاله، بر اساس مفهوم مقدار ویژه بحرانی و ضریب مشارکت غالب ژنراتورها در مد بحرانی، نوع نوسانات سیستم قدرت به ازای شرایط بهره‌برداری مختلف، تعیین خواهد شد.

(غیر محلی) با فرکانس کمتر از  $0.7$  هرگز می‌باشند [۱]، ۳-۵].

یکی از ابزارهای کارآمد در تحلیل رفتار نوسانات سیگنال کوچک درون ناحیه‌ای و بین ناحیه‌ای، استفاده از تحلیل مدال ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت است [۵]، [۷]. با استفاده از این تحلیل، مقادیر ویژه ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت و در نتیجه مقدار ویژه بحرانی سیستم که تأثیر بسزایی در پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت دارند، تعیین می‌گردند.

در خلال بارگذاری‌ها و یا شرایط بهره‌برداری مختلف سیستم قدرت، ممکن است مقدار ویژه بحرانی سیستم دچار تغییر شده و در نتیجه نوع مد نوسانی سیستم تغییر کند. به عنوان نمونه، افزایش امپدانس خط انتقال، سبب می‌شود که مد نوسانی درون ناحیه‌ای به مد نوسانی بین ناحیه‌ای تغییر وضعیت دهد [۳، ۵]. همچنین، وجود بارهای استاتیکی مانند توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت و بارهای دینامیکی مانند موتور الکتریکی، به ترتیب سبب افزایش و یا کاهش فرکانس مد بحرانی سیستم می‌شوند [۵]. در چنین شرایطی رفتارهای کنترلی که توسط بهره‌بردار شبکه برای حفظ پایداری سیستم قدرت باید اعمال شود تا نوسانات سیستم میرا گردد، ممکن است متفاوت بوده و تغییر کند.

در مطالعات گوناگون، راه‌کارهای متفاوتی به منظور تعیین بهترین رفتارهای کنترلی در جهت بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت، ارائه شده است. در [۷]، از PMU<sup>۱</sup> به عنوان یک ابزار جهت تعیین پارامترهای ثابت اینرسی و راکتانس مستقیم ژنراتور به نحوی که پایداری سیگنال کوچک سیستم حفظ شود، استفاده شده است. همچنین، تأثیر روش‌های مختلف کنترل SSSC<sup>۲</sup> بر پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا (سیگنال بزرگ) در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است. در [۹]، با استفاده از شبکه عصبی، الگوریتمی به منظور تعیین بهینه پارامترهای

<sup>۳</sup>. Particle Swarm Optimization

<sup>۴</sup>. Unified Power Flow Controller

<sup>۱</sup>. Phasor Measurement Units

<sup>۲</sup>. Static Synchronous Series Compensator

در رابطه فوق،  $T_s$  ضریب گشتاور سنکرون کننده و  $T_D$  ضریب گشتاور میراکننده می باشد. همچنین،  $\Delta\delta$  و  $\Delta\omega$  به ترتیب تغییرات جزئی در زاویه و سرعت رتور می باشند. در سیستم های قدرت، ناپایداری سیگنال کوچک ناشی از کمبود گشتاور میراکننده و در نتیجه میرایی غیرکافی نوسانات سیستم است. با این حال بطور معمول، ناپایداری سیگنال کوچک به دو صورت شامل افزایش ماندگار و غیر نوسانی زاویه رتور که ناشی از افزایش ناشی از فقدان و یا کمبود گشتاور سنکرون کننده است و نوسان رتور با دامنه افزایشی که ناشی از افزایش ناشی از کمبود و یا فقدان گشتاور میراکننده است، شکل می گیرد [۳]. در شکل (۱)، نوسان پایدار زاویه رتور (Case1)، نوسان غیر متناوب و نامیرا، متناظر با کمبود گشتاور سنکرون کننده (Case2) و نوسان نامیرای متناوب، متناظر با کمبود گشتاور میراکننده (Case3) نشان داده شده است.

در سیستم های قدرت، تحلیل رفتار نوسانی، تعیین مقادیر ویژه و میزان میرایی این مقادیر، بطور مرسوم با استفاده از تحلیل مدال ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت صورت می گیرد. در شکل (۲) ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش نیافته ( $J$ ) نشان داده شده است [۱۳]. همچنین در رابطه (۲)، ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش یافته سیستم قدرت ( $J_r$ ) بیان شده است [۱۳].

$$\Delta \dot{x} = [J_{11} - J_{12}J_{22}^{-1}J_{21}] \Delta x = J_r \Delta x \quad (2)$$

بدین منظور، در این مقاله روشی به منظور افزایش سرعت و دقت در تعیین ضریب مشارکت غالب ژنراتورها در مد بحرانی و نوع نوسانات سیستم قدرت از دیدگاه درون ناحیه ای و یا بین ناحیه ای با استفاده از شبکه عصبی و روش انتخاب مؤلفه، ارائه خواهد شد. بنابراین، ادامه مقاله به صورت ذیل است:

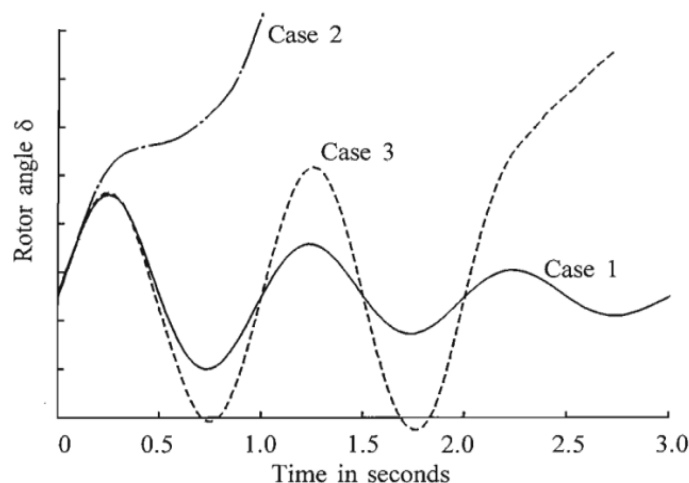
در بخش دوم، مفاهیم متناظر با پایداری سیگنال کوچک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش سوم، الگوریتم پیشنهادی به منظور پیش بینی نوع نوسانات سیستم از دید سیگنال کوچک بیان خواهد شد. در بخش چهارم، نتایج تحلیلی ناشی از بررسی ارتباط میان ضرایب مشارکت ژنراتورها و نوسانات بین ناحیه ای و درون ناحیه ای و نیز قابلیت شبکه عصبی در پیش بینی همزمان این موارد، بیان خواهد شد.

## ۲- پایداری زاویه ای سیگنال کوچک رتور و

### ابزارهای تشخیص آن

پایداری زاویه ای رتور به تعادل میان گشتاور الکترومغناطیسی خروجی ژنراتور ( $\Delta T_e$ ) و گشتاور الکترومکانیکی ورودی به ژنراتور ( $\Delta T_m$ ) بستگی دارد [۳]. این ارتباط در رابطه (۱)، نشان داده شده است.

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (1)$$



شکل ۱- رفتار نوسانات رتور ژنراتور نسبت به وقوع یک اغتشاش در سیستم قدرت

Differential equation for $\Delta \delta$		$J_{11}$					$J_{12}$			$\Delta \delta$	Differential equations
Differential equation for $\Delta \omega, \Delta k$										$\Delta \omega, \Delta k$	
Algebraic stator equations										$\Delta i_d$	Algebraic variables
										$\Delta i_q$	
Algebraic network equations										$\Delta V_{gen}$	
Equations for $Q_{gen}$ and $P_{sb}$		$J_{21}$					$J_{22}$			$\Delta \theta_{sb}$	
Load flow equations								$J_{lf}$		$\Delta \theta$	
										$\Delta V_{load}$	

شکل ۲- ژاکوبین جبری دینامیکی کاهش نیافته سیستم قدرت

تعیین ضرایب مشارکت سیستم قدرت با استفاده از روش‌های مرسوم مانند تحلیل مدال علاوه بر پیچیده بودن، زمان‌بر نیز می‌باشد. این موضوع بویژه در سیستم‌های قدرت بزرگ قابل توجه خواهد بود. در شکل (۳)، روش مرسوم به منظور تعیین ضرایب مشارکت غالب ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی و نوع نوسانات سیستم قدرت، نشان داده شده است.

از آنجاکه ارتباط میان ضرایب مشارکت ژنراتورها (اندازه و زاویه مشارکت)، می‌تواند به عنوان یک ابزار به منظور تعیین نوع نوسان مد بحرانی سیستم یعنی مد بین ناحیه‌ای و درون ناحیه‌ای مورد استفاده قرار بگیرد. در این مقاله یک راهکار مبتنی بر شبکه عصبی به منظور تعیین ضرایب مشارکت ژنراتورهای سیستم بدون تشکیل ژاکوبین جبری دینامیکی سیستم قدرت، ارائه خواهد شد. در بخش بعد، الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله مذکور ارائه خواهد شد.

### ۳- روش پیشنهادی به منظور دسته‌بندی و

#### پیش‌بینی نوسانات سیگنال کوچک رتور

به منظور تشریح الگوریتم پیشنهادی، سیستم نوعی نشان داده شده در شکل (۴) را در نظر بگیرید. در این سیستم

با استفاده از  $J_r$  مقادیر ویژه سیستم ( $\lambda$ )، بردارهای ویژه راست ( $\chi$ ) و چپ ( $\psi$ ) و ضرایب مشارکت ( $P$ ) ژنراتورهای سیستم و نیز دیگر تجهیزات سیستم مانند موتورهای القایی قابل دسترسی خواهد بود. با فرض  $\lambda_i$  به عنوان  $k$ امین مقدار ویژه ژاکوبین  $J_r$  ضریب مشارکت  $k$ امین متغیر حالت در  $k$ امین مقدار ویژه ( $P_{ki}$ ) به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

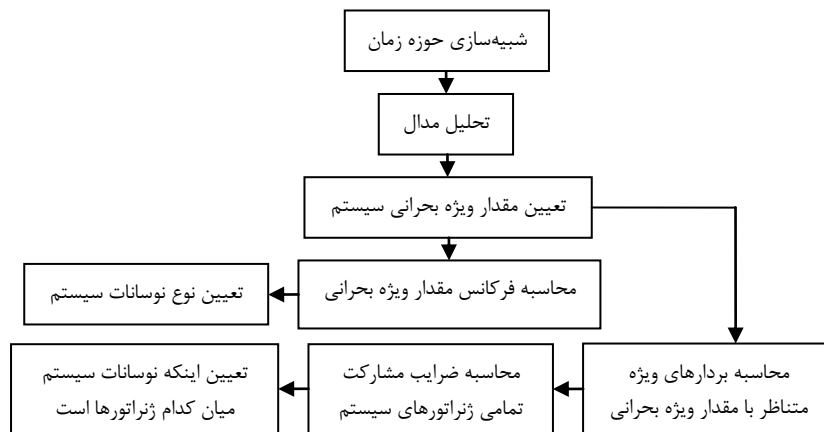
$$P_{ki} = \chi_{ki} \psi_{ik} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \quad (3)$$

در رابطه (۳):

$\chi_{ki}$ : عنصر  $k$ امین سطر و  $i$ امین ستون بردار ویژه راست؛

$\psi_{ik}$ : عنصر  $i$ امین سطر و  $k$ امین ستون بردار ویژه چپ؛

$a_{kk}$ :  $k$ امین عنصر قرار گرفته در قطر ماتریس ژاکوبین  $J_r$ ؛  
فرکانس مقدار ویژه بحرانی ژاکوبین سیستم و ضریب مشارکت ژنراتورها در این مقدار ویژه، به عنوان ابزاری مناسب جهت تعیین نوع نوسانات سیستم قدرت و نیز محل مناسب تجهیزات کنترلی مانند پایدارساز سیستم قدرت شناخته می‌شوند [۱۱، ۱۲، ۱۴]. به عنوان مثال، ضریب مشارکت متغیر حالت سرعت ژنراتور، می‌تواند برای تعیین بهترین مکان جهت قرار گرفتن PSS مورد استفاده قرار بگیرد [۱۱، ۱۴].



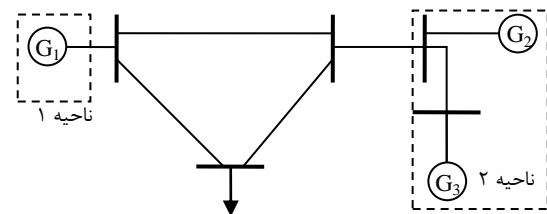
شکل ۳- روش مرسوم به منظور تعیین ضرایب مشارکت غالب ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی و نیز نوع نوسانات سیستم قدرت

- اگر مقدار ویژه غالب درون ناحیه‌ای باشد، در اینصورت ژنراتور  $G_1$  مشارکتی در این مقدار ویژه نداشته و بنابراین این مقدار ویژه به میزان قابل توجهی تحت تأثیر رفتار ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  است. در نتیجه، رفتار ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  در این مد، مطابق با شکل (۵-الف) خواهد بود.

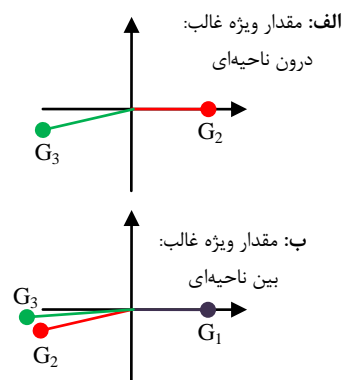
- اگر مقدار ویژه غالب بین ناحیه‌ای باشد، در اینصورت ژنراتورهای  $G_1$ ،  $G_2$  و  $G_3$  در این مد مشارکت داشته و در نتیجه، رفتار ضریب مشارکت متغیر حالت غالب این ژنراتورها در این مد، مطابق با شکل (۵-ب) خواهد بود. به عبارتی دیگر در این حالت، ژنراتورهای ناحیه ۲ در خلاف جهت ژنراتور ناحیه ۱، نوسان خواهند کرد.

با توجه به موارد بیان شده، ملاحظه می‌شود که اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها با توجه به نوع مد بحرانی سیستم، تغییر می‌کند. آگاهی از این تغییرات برای شناسایی اینکه کدام یک از ژنراتورهای سیستم بیشترین تأثیر را در مد غالب دارند، اهمیت بالایی دارد. در حقیقت، بهره‌بردار شبکه با آگاهی از این موضوع، فرآیندهای کنترلی را به صورت بهینه‌تر و صرفاً بر روی ژنراتورهای موثرتر صورت خواهد داد. به عنوان مثال، در شرایطی که مد غالب درون ناحیه‌ای است، تغییر پارامترهای سیستم تحریک و یا پایدارساز ژنراتور  $G_1$  تأثیر قابل توجهی در افزایش میرایی و در نتیجه بهبود پایداری سیستم قدرت، نخواهد داشت و بنابراین، فرآیندهای

دو ناحیه‌ای، دو مد نوسانی شامل یک مد بین ناحیه‌ای میان ناحیه ۱ (ژنراتور  $G_1$ ) و ناحیه ۲ (ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$ ) و یک مد درون ناحیه‌ای در ناحیه ۲ بین ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  وجود دارد. با فرض اینکه مقدار ویژه بحرانی سیستم یکی از دو نوع مد بیان شده است، در اینصورت با توجه به آنچه که در شکل (۵) نشان داده شده است، ضریب مشارکت غالب ژنراتورهای مذکور در این مد، یکی از حالات ذیل را خواهد داشت:



شکل ۴- سیستم دو ناحیه‌ای



شکل ۵- نحوه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم دو ناحیه‌ای در مد غالب

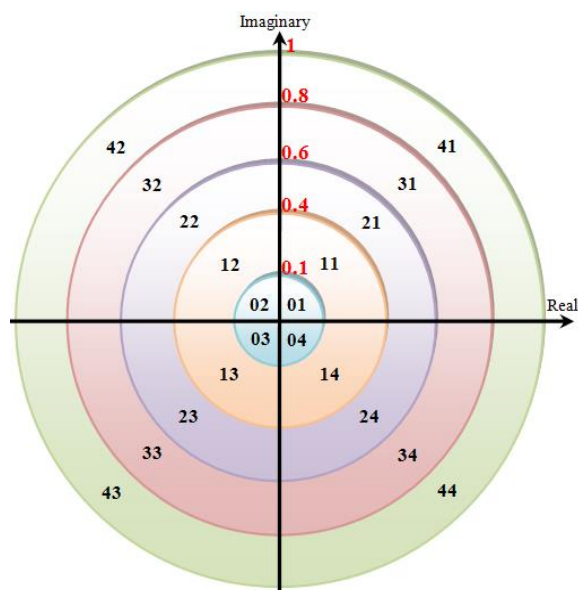
برای تمامی ژنراتورهای موجود در سیستم قدرت، علاوه بر مشخص شدن اندازه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی، زاویه مشارکت نیز که در تعیین نوع نوسان مد بحرانی موثر است، مشخص خواهد شد. رابطه میان هر نقطه کار سیستم ( $X_i$ ) و "شاخص  $P\Theta$ " بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$X_i \rightarrow \{(P\Theta)_{G1}, (P\Theta)_{G2}, \dots, (P\Theta)_{Gg}\}_i \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $(P\Theta)_{Gji}$  شاخص ضریب مشارکت لامین ژنراتور در لامین نقطه کار سیستم می‌باشد ( $1 \leq j \leq g$ ). با توجه به رابطه (۴)، در هر نقطه کار به ازای مد بحرانی و متغیر حالت غالب ژنراتورها، برای هر ژنراتور یک "شاخص  $P\Theta$ " تعریف می‌گردد. با این حال، دسته‌بندی بیان شده در رابطه (۴)، مبتنی بر تحلیل مدال بوده که تشکیل این رابطه برای هر نقطه کار سیستم زمان‌بر است.

جدول ۱- دسته‌بندی پیشنهادی برای اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور در مد بحرانی

اندازه مشارکت	کلاس	زاویه مشارکت	کلاس
$0 \leq p \leq 0.1$	۰	$0 < \Theta \leq 90$	۱
$0.1 < P \leq 0.4$	۱	$90 < \Theta \leq 180$	۲
$0.4 < P \leq 0.6$	۲	$180 < \Theta \leq 270$	۳
$0.6 < P \leq 0.8$	۳	$270 < \Theta \leq 360$	۴
$0.8 < P \leq 1$	۴		

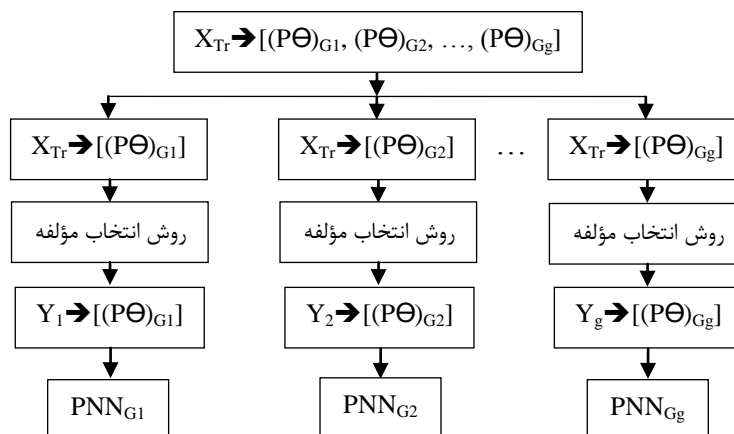


شکل ۶- نمایش دسته‌بندی پیشنهادی برای ضریب مشارکت ژنراتورها بر روی صفحه مختلط

اصلاحی و کنترلی باید بر روی ژنراتورهای  $G_2$  و  $G_3$  رخ دهد. بر خلاف فرکانس مد بحرانی سیستم که صرفاً تعیین‌کننده نوع نوسان درون ناحیه‌ای، بین ناحیه‌ای است، آگاهی از اندازه و زاویه مشارکت ژنراتورهای سیستم قدرت در این مد، می‌تواند در تعیین نوع نوسان مشارکت قدرت و نیز ژنراتورهایی که در این نوسان مشارکت دارند مورد استفاده قرار بگیرد. روش مرسوم به منظور تعیین نوع مد نوسانی سیستم‌های قدرت، فرکانس نوسان و ضرایب مشارکت ژنراتورها در آن مد، استفاده از تحلیل مدال و تعیین مد بحرانی سیستم قدرت است. با این حال، انجام چنین فرآیندی به ویژه در سیستم‌های قدرت بزرگ، زمان‌بر است. در نتیجه در این بخش، الگوریتمی به منظور افزایش دقت و سرعت محاسبات و نیز تعیین همزمان نوع مد نوسانی و ضریب مشارکت تمامی ژنراتورهای سیستم در مد نوسانی، ارائه خواهد شد.

با توجه به رابطه (۳)، از آنجاکه مقادیر ویژه ژاکوبین  $J_r$  می‌توانند مختلط و یا حقیقی باشند، بنابراین ضریب مشارکت ژنراتورها نیز می‌تواند حقیقی و یا مختلط باشد. بر این اساس، اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها، به ترتیب در بازه (۰ تا ۱) پیرونی و (۰ تا  $360^\circ$ ) درجه تغییر می‌کند. در جدول (۱)، دسته‌بندی پیشنهادی برای اندازه مشارکت ( $P$ ) و زاویه مشارکت ( $\Theta$ ) متغیر حالت غالب ژنراتور در مد بحرانی ارائه شده است.

با توجه به جدول (۱)، اندازه مشارکت و زاویه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور در مد بحرانی ژنراتورها به ترتیب در ۵ و ۴ کلاس دسته‌بندی شده‌اند. بنابراین، با معرفی ترکیب اندازه و زاویه مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتور به عنوان "شاخص  $P\Theta$ "، در مجموع ۲۰ کلاس برای دسته‌بندی پیشنهادی تعریف می‌گردد که در شکل (۶)، نشان داده شده‌اند. به عنوان مثال، با توجه به این دسته‌بندی، اگر در یک نقطه کار سیستم، اندازه و زاویه مشارکت لامین ژنراتور سیستم به ترتیب در کلاس‌های ۲ و ۳ قرار بگیرد، مقدار این شاخص برای این ژنراتور، ۲۳ خواهد بود. در نتیجه، با آگاهی از مقادیر "شاخص  $P\Theta$ "



شکل ۷- روند اجرای روش انتخاب مؤلفه بر اساس ارتباط میان مؤلفه‌های کاندید اولیه و ضریب مشارکت هر ژنراتور، آموزش و تست شبکه عصبی

در رابطه فوق،  $V$  و  $\square_V$  به ترتیب دامنه و زاویه ولتاژ تمام باس‌های سیستم،  $P_L$  و  $Q_L$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو بارهای سیستم است. همچنین،  $P_G$  و  $Q_G$  به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها می‌باشند. همچنین،  $n$  تعداد مؤلفه‌های اولیه است.

استفاده از تمامی مؤلفه‌ها، سبب افزایش مدت زمان آموزش شبکه عصبی شده و همچنین در سیستم‌های بزرگ، سبب افزایش خطای پیش‌بینی شبکه عصبی می‌شود.

بنابراین، به منظور انتخاب بهترین مؤلفه‌ها، کاهش زمان آموزش شبکه عصبی و افزایش دقت آن، در گام بعد از روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای تحت عنوان  $MIMI^Y$  استفاده خواهد شد. در این روش، طی دو مرحله، مؤلفه‌های غیر مفید از میان تمامی مؤلفه‌های کاندید اولیه حذف شده و در نهایت مؤلفه‌هایی که بیشترین وزن را دارند انتخاب می‌گردند. بر این اساس؛

در مرحله اول این روش، همبستگی میان تمامی مؤلفه‌ها و مقدار هدف (Target) که با توجه به نوع مطالعات می‌تواند هر تعریفی داشته باشد (مثلاً در این مقاله مقدار هدف، کلاس تعریف شده برای ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم است)، تعیین می‌شود. پس از انجام این مرحله، مؤلفه‌هایی که بیشترین همبستگی را نسبت

بنابراین، لزوم جایگزین کردن یک ابزار دقیق با سرعت بالا مانند شبکه عصبی به جای ابزارهای تحلیلی مانند تحلیل مدال، اجتناب‌ناپذیر است. در نتیجه در این مقاله، از شبکه عصبی PNN [۱۵] به منظور پیش‌بینی مقدار "شاخص  $P\Theta$ " برای هر ژنراتور و هر نقطه کار سیستم استفاده خواهد شد.

با توجه به رابطه (۴)، شبکه عصبی باید قادر باشد تا به ازای هر نقطه کار سیستم، مقادیر  $(P\Theta)$  تمامی ژنراتورها را پیش‌بینی کند. بدین‌منظور، الگوریتم پیشنهادی در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به الگوریتم پیشنهادی، به تعداد ژنراتورهای موجود در سیستم، شبکه عصبی PNN تعریف می‌گردد. هر شبکه عصبی با استفاده از ضریب مشارکت متناظر با هر یک از ژنراتورها و داده‌های آموزش، آموزش می‌بیند. همچنین از آنجاکه تعداد زیاد مؤلفه‌های سیستم سبب کاهش دقت و سرعت شبکه عصبی می‌گردد، بنابراین، قبل از آموزش شبکه عصبی باید با استفاده از روش‌های انتخاب مؤلفه، مؤلفه‌های موثرتر را تعیین و انتخاب نمود. بنابراین، الگوریتم پیشنهادی از سه بخش شامل روش انتخاب مؤلفه، آموزش و تست شبکه عصبی تشکیل شده است.

- روش انتخاب مؤلفه: مؤلفه‌های اولیه  $(x_i)$  در نظر گرفته شده در این مقاله بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n] = [V, \square_V, P_L, Q_L, P_G, Q_G] \quad (5)$$

7. Mutual Information-Mutual Information

- آموزش شبکه عصبی: فرآیند آموزش شبکه عصبی به صورت غیر بهنگام<sup>۸</sup> صورت می‌گیرد. بدین منظور پس از تعیین نوع اغتشاش رخ داده در سیستم و شبیه‌سازی حوزه زمان، به ازای نقطه کار جدید بدست آمده، تحلیل مدال انجام شده و اندازه و زاویه مشارکت متغیرهای حالت غالب تمامی ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی تعیین خواهد شد. بنابراین، ماتریس آموزش شبکه عصبی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$X_{Tr} \rightarrow \Psi \quad (7)$$

در رابطه فوق،  $X_{Tr}$  ماتریس آموزش با اندازه  $t_r \times n$  است.  $t_r$  تعداد نمونه‌های ایجاد شده برای آموزش شبکه عصبی و  $n$  تعداد مؤلفه‌های اولیه سیستم قدرت مورد مطالعه می‌باشند. همچنین،  $\Psi$  ماتریس شاخص  $P\Theta$  با ابعاد  $t_r \times g$  است که  $g$  تعداد ژنراتورهای سیستم می‌باشد.

با توجه به اینکه برای هر نقطه کار سیستم، به تعداد ژنراتورهای موجود در آن مقدار هدف<sup>۹</sup> وجود دارد (مطابق با رابطه (۴))، بنابراین، به ازای هر ژنراتور یک شبکه عصبی اختصاص داده خواهد شد. از سویی دیگر، به ازای رابطه میان ماتریس  $X_{Tr}$  و هر  $(P\Theta)_{Gj}$ ، روش انتخاب مؤلفه بصورت مجزا اجرا می‌گردد. در نتیجه، ممکن است هر PNN مؤلفه‌های ورودی متفاوتی از PNNهای دیگر داشته باشد.

در پایان اجرای روش انتخاب مؤلفه، شبکه‌های عصبی تعریف شده برای هر ژنراتور آموزش داده شده و قبل از انجام تست اصلی بر روی آن‌ها با استفاده از روش اعتبارسنجی<sup>۱۰</sup>، خطای اعتبارسنجی شبکه عصبی تعیین می‌گردد. در ایده‌آل‌ترین حالت اگر این خطا صفر باشد، در اینصورت شبکه عصبی به خوبی آموزش دیده است و برای تست با استفاده از نمونه‌های تست آماده می‌باشد.

- تست شبکه عصبی: پس از آموزش شبکه عصبی با استفاده از مؤلفه‌های بیان شده در رابطه (۶)، عملکرد

به مقدار هدف داشته باشند، انتخاب شده و به مرحله دوم منتقل می‌شوند. معیار تشخیص اینکه کدام مولفه بیشترین همبستگی را با مقدار هدف دارند، یک مقدار آستانه است که توسط کاربر تعیین می‌شود ( $TH_1$ ). این مقدار بین صفر تا یک متغیر است.

در گام دوم، همبستگی میان مولفه‌های انتخاب شده در گام اول مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عبارتی بهتر، همبستگی میان هر دو مولفه بررسی شده و سپس مقدار همبستگی با یک مقدار آستانه ( $TH_2$ ) مقایسه می‌شود. اگر میزان همبستگی هر دو مولفه کمتر از مقدار آستانه باشد، در اینصورت هر دو مولفه به عنوان مولفه‌های مناسب جهت اعمال به شبکه عصبی انتخاب می‌شوند. در غیر اینصورت، از میان آن دو مولفه، مولفه‌ای که در گام اول بیشترین همبستگی را با مقدار هدف داشته است، انتخاب شده و به شبکه عصبی اعمال می‌گردد. در این گام نیز مقدار آستانه بین صفر تا یک می‌تواند متغیر باشد و توسط کاربر تعیین می‌گردد. جزئیات این روش در [۱۶] بیان شده است.

لازم به ذکر است، نمونه‌های ایجاد شده به دو گروه شامل نمونه‌های آموزش ( $X_{Tr}$ ) و نمونه‌های تست ( $X_{Test}$ ) تقسیم‌بندی شده و روش انتخاب مؤلفه بر روی نمونه‌های آموزش، صورت خواهد گرفت. بنابراین، مؤلفه‌های بهینه و مناسب مطابق با رابطه (۶) انتخاب می‌گردند.

$$\{y_1, \dots, y_m\} \subset \{x_1, \dots, x_n\} \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $m$  تعداد مؤلفه‌های انتخاب شده از روش انتخاب مؤلفه است ( $m < n$ ). همچنین، ممکن است مقدار  $m$  برای هر شبکه عصبی متفاوت از شبکه عصبی دیگر باشد.

پس از تعیین مؤلفه‌های بهینه، فرآیند آموزش شبکه عصبی با استفاده از نمونه‌های آموزش صورت خواهد گرفت.

<sup>8</sup>. Off-Line

<sup>9</sup>. Target

<sup>10</sup>. Validation

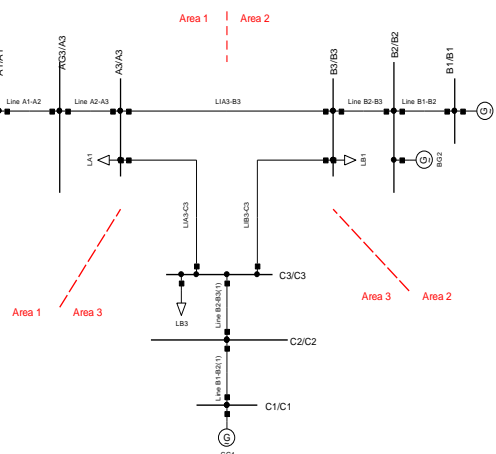


(۹) مورد بررسی قرار گرفته است. سیستم تست ۹ باسه، یک سیستم سه ناحیه‌ای بوده که ژنراتورهای  $AG_1$  با تولید  $100\text{MW}$  در ناحیه ۱، ژنراتورهای  $BG_1$  و  $BG_2$  با تولید به ترتیب  $100\text{MW}$  و  $80\text{MW}$  در ناحیه ۲ و ژنراتور  $CG_1$  با تولید  $100\text{MW}$  در ناحیه ۳، قرار دارند. همچنین، سیستم تست ۶۸ باسه IEEE، به ۵ ناحیه تقسیم‌بندی شده و دارای ۱۶ ژنراتور می‌باشد. دارای ژنراتورها دارای مدل مرتبه ۶ GENROU بوده و دارای سیستم تحریک مدل مرتبه ۵ IEEEEX1 می‌باشند [۱۷]، [۱۸]. داده‌های مورد نیاز به منظور آموزش شبکه عصبی با استفاده از نرم‌افزار DIGSILENT [۱۹] ایجاد شده است. نتایج عددی، در دو بخش بررسی خواهد شد.

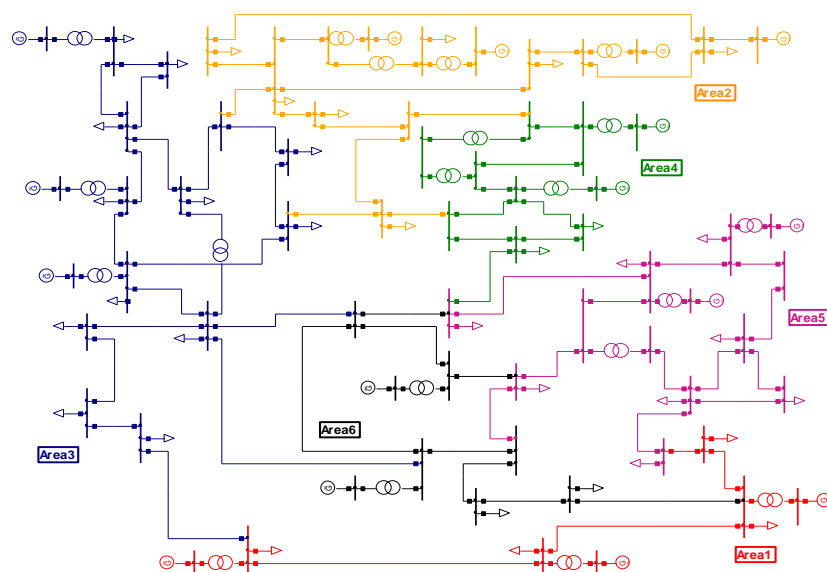
شبکه عصبی با استفاده از نمونه‌های تست مورد آزمایش قرار خواهد گرفت. بدین‌منظور، نتایج بدست آمده از روش‌های انتخاب مؤلفه اجرا شده در مرحله قبل، بر روی نمونه‌های تست اجرا می‌شود. با توجه به اینکه مؤلفه‌های انتخاب شده برای هر شبکه عصبی متفاوت از دیگری است، در نتیجه نمونه‌های تست هر شبکه عصبی دارای مؤلفه‌هایی متفاوتی از دیگری خواهند بود.

#### ۴- نتایج عددی

روش ارائه شده به منظور پیش‌بینی ضرایب مشارکت ژنراتورها در مد بحرانی، بر روی سیستم‌های تست ۹ باسه و ۶۸ باسه IEEE، نشان داده شده در شکل‌های (۸) و



شکل ۸- سیستم تست ۹ باسه مورد مطالعه



شکل ۹- دیاگرام تک خطی سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

در بخش اول با استفاده از روش مرسوم بیان شده در شکل (۳)، ارتباط میان نوسانات سیگنال کوچک درون ناحیه‌ای و بین‌ناحیه‌ای و ضرایب مشارکت غالب ژنراتورها در مد بحرانی تحلیل خواهد شد. این نتایج برای سیستم تست ۹ باسه بیان خواهد شد. در بخش دوم، با استفاده از شبکه عصبی PNN و روش انتخاب مؤلفه MIMI، نوع نوسانات و نیز مقدار ضریب مشارکت ژنراتورها در سیستم‌های تست ۹ باسه و ۶۸ باسه IEEE، به طور همزمان مورد پیش‌بینی قرار خواهد گرفت.

### آزمایش اول-تحلیل ارتباط میان ضریب مشارکت ژنراتورها و نوسانات سیستم قدرت

در جدول (۲)، برای یک نقطه کار نمونه، مدهای نوسانی سیستم تست مورد مطالعه بیان شده‌اند. با توجه به این جدول، ۷ زوج مد نوسانی در این سیستم وجود دارد و مد بحرانی سیستم، زوج مد (۲۲-۲۳) است. همچنین، تمامی مقادیر ویژه سیستم در سمت چپ محور موهومی صفحه اعداد مختلط قرار دارند و در نتیجه نسبت میرایی تمامی مدهای سیستم مثبت بوده که بیانگر نوسانات میرا شونده و پایدار سیستم می‌باشند.

با توجه به رفتار فرکانسی این مدها، ملاحظه می‌شود که زوج مد (۲۱-۲۰) و (۲۳-۲۲) دارای فرکانس کمتر از ۰/۷ هرتز می‌باشند که بیانگر مدهای نوسانی بین‌ناحیه‌ای می‌باشند. با این حال با توجه به اطلاعات بیان شده در این جدول، اینکه این نوسانات میان کدام ژنراتورها رخ می‌دهد مشخص نیست. علاوه بر این، بقیه مدهای نشان داده شده در جدول (۲)، دارای فرکانس بالاتر از ۰/۷ هرتز می‌باشند که بیانگر مد نوسانی محلی می‌باشند. مدهای نوسانی محلی در سیستم قدرت، می‌توانند ناشی از ژنراتورهای سیستم و یا سیستم‌های کنترلی ژنراتورهای سیستم باشند. بنابراین، اطلاعات بیان شده در این جدول، مشخص نمی‌کند که این مدهای محلی ناشی از ژنراتورهای سیستم می‌باشند و یا سیستم کنترلی آن‌ها هستند.

برای تعیین اینکه کدام یک از ژنراتورها و یا سیستم‌های کنترلی در مدهای نوسانی بیان شده در جدول (۲) مشارکت دارند، ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم در این مدها، در جدول (۳) بیان شده است. در این جدول، ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم در زوج مدهای (۱۵-۱۶)، (۲۰-۲۱) و (۲۲-۲۳)، بیان شده است. همچنین، نمایش این ضرایب مشارکت در صفحه اعداد مختلط در شکل (۱۰)، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در بقیه مدهای نشان داده شده در جدول (۲)، ژنراتورها مشارکتی ندارند. در نتیجه این مدها، مدهای ناشی از سیستم کنترلی ژنراتورها می‌باشند. همچنین، از آنجاکه مقادیر ویژه بیان شده در جدول (۲)، مختلط می‌باشند، بنابراین ضرایب مشارکت ژنراتورهای سیستم دارای اندازه و زاویه می‌باشند.

- **زوج مد (۱۵-۱۶):** این مد دارای فرکانس ۱/۶۸۴ هرتز بوده و در نتیجه یک مد محلی است. با توجه به نتایج جدول (۳)، دامنه ضریب مشارکت ژنراتورهای BG1، BG2، AG1 و CG1 به ترتیب ۱، ۰/۹۶۹، ۰/۰۱۷ و ۰/۰۱۷ است. بنابراین، تنها ژنراتورهای BG1 و BG2 در زوج مد (۱۵-۱۶)، مشارکت موثری دارند و ژنراتورهای دیگر در این مد مشارکت قابل توجهی ندارند. از سویی دیگر، زاویه مشارکت ژنراتورهای BG1 و BG2 در این مد، ۰ و ۱۷۹/۳۶- درجه بوده که در نقطه مقابل یکدیگر می‌باشند. در نتیجه این مد یک مد محلی است و نوسانات میان ژنراتورهای BG1 و BG2 رخ می‌دهد. این موضوع بخوبی در شکل (۹-الف) قابل مشاهده است.

- **زوج مد (۲۱-۲۰):** با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۳) و شکل (۱۰-ب)، ملاحظه می‌شود که در این مد ژنراتورهای ناحیه ۲ (BG1 و BG2) در مقابل ژنراتورهای ناحیه ۱ (AG1) و ۳ (CG1) در نوسان بوده و در نتیجه این مد یک مد نوسانی بین ناحیه‌ای است.

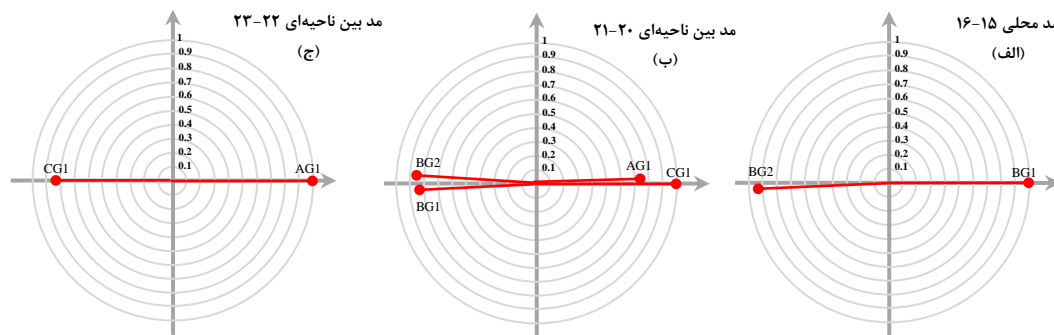
- **زوج مد (۲۳-۲۲):** این مد، مد بحرانی سیستم است و با توجه به نتایج بیان شده در جدول (۳)، تنها ژنراتورهای

جدول ۲- مقادیر ویژه مختلط سیستم تست ۹ باسه و ویژگی‌های آن‌ها در یک بارگذاری نمونه

شماره مد	بخش حقیقی	بخش موهومی	ضریب میرایی	فرکانس
15-16	-2.258	$\pm 10.577$	0.209	1.684
20-21	-0.054	$\pm 3.723$	0.015	0.593
22-23	-0.043	$\pm 3.326$	0.013	0.530
24-25	-10.556	$\pm 5.506$	0.887	0.877
26-27	-10.523	$\pm 5.443$	0.888	0.867
35-36	-10.535	$\pm 5.468$	0.888	0.871
37-38	-10.535	$\pm 5.468$	0.888	0.871

جدول ۳- ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورهای سیستم تست ۹ باسه در مدهای نوسانی

شماره مد	CG1	BG2	BG1	AG1
15-16	$0.017 < 158.22^\circ$	$0.969 < -179.36^\circ$	$1 < 0^\circ$	$0.017 < 158.46^\circ$
20-21	$1 < 0^\circ$	$0.868 < 179.76^\circ$	$0.816 < -179.76^\circ$	$0.684 < 0.31^\circ$
22-23	$0.830 < -180^\circ$	$0.087 < -178.78^\circ$	$0.083 < 179.10^\circ$	$1 < 0^\circ$



شکل ۱۰- نمایش ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مدهای نوسانی در صفحه اعداد مختلط - سیستم تست ۹ باسه

با توجه به حجم زیاد محاسبات در روش‌های مرسوم به منظور تعیین مد نوسانی سیستم، ضرایب مشارکت ژنراتورها و در نتیجه نوع نوسانات؛ در آزمایش دوم و با توجه به الگوریتم پیشنهادی، اندازه و زاویه ضریب مشارکت تمامی ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی با استفاده از شبکه عصبی مورد پیش‌بینی قرار خواهد گرفت. سپس، نوع نوسانات درون ناحیه‌ای (محلی) و یا بین ناحیه‌ای در این مد تعیین خواهد شد.

آزمایش دوم- بررسی قابلیت شبکه عصبی در پیش‌بینی ضریب مشارکت ژنراتورها و نوسانات سیستم تست ۹ باسه

با توجه به رابطه (۵)، تعداد کل مؤلفه‌های اولیه در نظر گرفته شده برای سیستم تست مورد مطالعه، شامل  $n=9(V+\square_V)+4(P_G+Q_G)+3(P_L+Q_L)=42$  است.

AG1 و CG1 در این مد مشارکت موثر داشته و ژنراتورهای BG1 و BG2 مشارکت چندانی در آن ندارند. در نتیجه، با توجه به اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورهای AG1 و CG1 در این مد، زوج مد (۲۲-۲۳) بیانگر یک نوسان بین‌ناحیه‌ای میان این ژنراتورها است که به ترتیب در ناحیه ۱ و ۳ واقع شده‌اند. این موضوع بخوبی در شکل (۱۰-الف) قابل مشاهده است.

بنابراین، نتایج بیان شده بخوبی قابلیت ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم را در تعیین نوع مد نوسانی مشخص می‌کنند. این قابلیت به صورت ذیل جمع‌بندی می‌شود:

- اندازه ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم بیانگر ژنراتور موثر در هر مد است.

- نوع نوسان بین ناحیه‌ای و محلی، با استفاده از زاویه مشارکت ژنراتورها در آن مد تعیین می‌شود.

با توجه به دسته‌بندی پیشنهادی در جدول (۱)، بدرستی پیش‌بینی کرده‌اند و تنها شبکه عصبی ژنراتور BG2 از ده نمونه تست، یکی را به اشتباه پیش‌بینی کرده است.

در جدول (۵)، مقادیر پیش‌بینی شده شاخص  $P\Theta$  ژنراتورهای سیستم تست در مد بحرانی و برای تمامی نمونه‌های تست بیان شده است. با توجه به این نتایج، تنها نمونه تست ۹ توسط شبکه عصبی ژنراتور BG2، به اشتباه پیش‌بینی شده و بجای مقدار  $P\Theta = 33$  مقدار ۲۲ را پیش‌بینی کرده است. در حقیقت، با توجه به جدول (۱) و شکل (۶)، مقدار  $P\Theta = 33$  متناظر با حالتی است که اندازه و زاویه مشارکت ژنراتور BG2 در مد بحرانی به ترتیب در بازه  $0.16 < P \leq 0.27$  و  $180 < \Theta \leq 270$  درجه است. اما شبکه عصبی ژنراتور BG2 این مقدار را در بازه  $0.16 < P \leq 0.4$  و  $90 < \Theta \leq 180$  درجه پیش‌بینی کرده است.

در شکل (۱۱)، ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی برای نمونه‌های تست ۱، ۶ و ۹ (بیان شده در جدول (۵)) نشان داده شده است. در این شکل، رنگ سبز پیش‌بینی درست شاخص  $P\Theta$  و رنگ قرمز پیش‌بینی اشتباه شاخص  $P\Theta$  توسط شبکه عصبی را نشان می‌دهند.

همچنین تعداد نمونه‌های آموزش و تست به ترتیب ۱۲۵، ۱۰ در نظر گرفته شده است. شبکه عصبی [۲۰] با استفاده از نمونه‌های آموزش، آموزش دیده و نمونه‌های تست به هیچ عنوان در فرآیند آموزش شبکه عصبی دخیل نمی‌باشند. همچنین، به منظور اعتبارسنجی اولیه شبکه عصبی، از میان ۱۲۰ نمونه آموزش، ۵ نمونه بطور تصادفی برای تست اولیه (اعتبارسنجی عملکرد) شبکه عصبی در نظر گرفته می‌شوند. با توجه به الگوریتم نشان داده شده در شکل (۷)، برای هر ژنراتور یک شبکه عصبی مجزا تعریف شده و علاوه بر آن روش انتخاب مؤلفه برای هر شبکه عصبی بصورت مجزا از شبکه عصبی دیگر در نظر گرفته می‌شود.

در جدول (۴)، خطای اعتبارسنجی و تست شبکه‌های عصبی، تعداد مؤلفه‌های انتخاب شده ناشی از روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای و نیز پارامترهای تنظیم شبکه عصبی و روش انتخاب مؤلفه دو مرحله‌ای برای پیش‌بینی اندازه و زاویه ضریب مشارکت هر ژنراتور در مد بحرانی سیستم، بیان شده است. با توجه به نتایج بیان شده در این جدول، ملاحظه می‌شود که شبکه‌های عصبی ژنراتورهای AG1، BG1 و CG1 تمامی داده‌های تست را

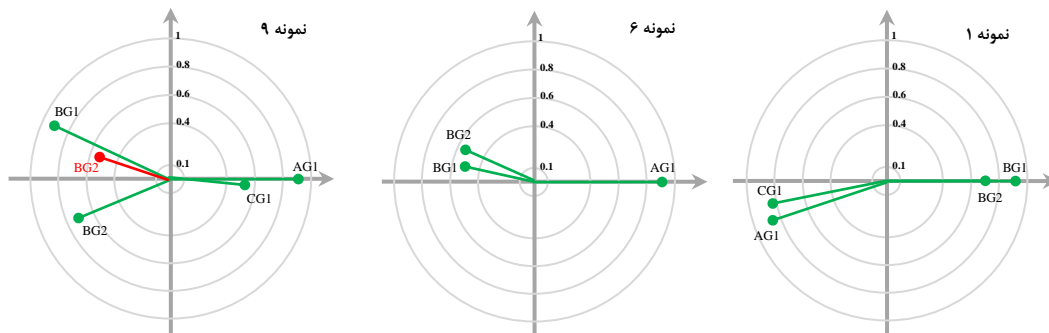
جدول ۴- خطای اعتبارسنجی و تست شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی -

سیستم تست ۹ باسه

خطای تست	خطای اعتبار سنجی	مؤلفه‌های انتخاب شده		پارامترهای روش انتخاب مؤلفه		پارامتر PNN	PNN
		گام اول	گام دوم	Th1	Th2		
0 of 10	0 of 5	5	13	0.54	0.6	0.02	AG1
0 of 10	0 of 5	7	15	0.54	0.6	0.002	BG1
1 of 10	0 of 5	5	11	0.7	0.6	0.002	BG2
0 of 10	0 of 5	5	11	0.7	0.6	0.03	CG1

جدول ۵- مقادیر پیش‌بینی شده شاخص  $P\Theta$  ژنراتورهای سیستم تست در مد بحرانی در هر نمونه تست ۹ باسه

نمونه ۱۰	نمونه ۹	نمونه ۸	نمونه ۷	نمونه ۶	نمونه ۵	نمونه ۴	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	PNN
43	44	44	44	44	43	44	43	33	43	AG1
44	42	12	22	22	44	32	44	44	44	BG1
34	<b>22(33)*</b>	12	22	22	34	22	34	34	34	BG2
33	24	12	01	01	43	14	33	43	43	CG1



شکل ۱۱- نمایش ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی برای ۳ نمونه تست بیان شده در جدول (۵)

۳ شبکه عصبی شامل A1-G67، A2-G58 و A5-G64 به ترتیب دارای ۲، ۴ و ۲ درصد خطای تست می‌باشند. این نتیجه، به خوبی قابلیت روش ارائه شده در پیش‌بینی مقادیر شاخص  $P\theta$  و در نتیجه نوع نوسانات سیستم قدرت را نشان می‌دهد. در نهایت، با مقایسه نتایج سیستم تست ۹ باسه و ۶۸ باسه می‌توان قابلیت‌های روش پیشنهادی را به شرح ذیل بیان نمود:

- در روش ارائه شده در این مقاله، برای هر ژنراتور یک شبکه عصبی مجزا در نظر گرفته شده به نحوی که عملکرد هر شبکه عصبی مجزا و بی تأثیر از عملکرد شبکه‌های عصبی دیگر است. بنابراین، این موضوع یکی از مزیت‌های روش پیشنهادی می‌باشد.

- با توجه به روش انتخاب مولفه پیشنهادی، هر شبکه عصبی مولفه‌های متناظر با خود را دارد.

- بزرگ شدن شبکه، سبب افزایش تعداد مولفه‌ها و حجم اطلاعات می‌شود. اما با توجه به استفاده از روش انتخاب مولفه دو مرحله‌ای، با انتخاب مولفه‌های بهینه، این موضوع تأثیر منفی بر عملکرد شبکه عصبی نخواهد داشت.

- با توجه به تجربیات نویسندگان مقاله، حجم اطلاعات (که می‌تواند ناشی از بزرگ بودن شبکه باشد) تأثیری در عملکرد شبکه عصبی در فرآیندهای دسته‌بندی داده‌ها (روش پیشنهادی در این مقاله) ندارد. اما در مطالعاتی که شبکه عصبی باید در آن‌ها یک حد (مثلاً حد دینامیکی پایداری ولتاژ) را پیش‌بینی کند، شبکه عصبی دچار اختلال در عملکرد می‌شود.

با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که نمونه‌های تست ۱، ۶ و ۹، از نوع نوسانات بین ناحیه‌ای می‌باشند. به عنوان مثال، نمونه ۶، یک نوسان بین ناحیه‌ای بین ژنراتورهای ناحیه ۱ (AG1) و ناحیه ۲ (BG1 و BG2) است.

#### آزمایش سوم- بررسی قابلیت شبکه عصبی در پیش‌بینی ضریب مشارکت ژنراتورها و نوسانات سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

به منظور تبیین قابلیت روش پیشنهادی، در این بخش قابلیت شبکه عصبی در پیش‌بینی ضریب مشارکت ژنراتورها و نوسانات سیستم تست ۶۸ باسه IEEE بررسی خواهد شد. بدین منظور، برای آموزش شبکه عصبی ۳۵۰ نمونه تولید شده که از این میان ۲۰ نمونه برای فرآیند اعتبارسنجی انتخاب شده است. همچنین ۵۰ نمونه تست نیز برای بررسی قابلیت شبکه‌های عصبی مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، بر اساس مولفه‌های پیشنهادی در رابطه (۵)، تعداد کل مولفه‌ها ۲۳۸ مولفه می‌باشد. با توجه به اینکه در این سیستم تست ۱۶ ژنراتور وجود دارد، بنابراین ۱۶ شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی شاخص  $P\theta$  ژنراتورها و در نتیجه نوع نوسانات سیستم قدرت، در نظر گرفته شده است. در جدول (۶)، مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترهای شبکه عصبی، روش انتخاب مولفه دو مرحله‌ای بیان شده است و همچنین، تعداد مولفه‌های انتخاب شده در هر مرحله، خطای اعتبارسنجی و خطای تست نیز بیان شده است. با توجه به نتایج این جدول، از میان ۱۶ شبکه عصبی در نظر گرفته شده، تنها

جدول ۶- خطای اعتبارسنجی و تست شبکه‌های عصبی در پیش‌بینی اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی-

سیستم تست ۶۸ باسه IEEE

خطای تست	خطای اعتبار سنجی	مؤلفه‌های انتخاب شده		پارامترهای روش انتخاب مؤلفه		پارامتر PNN	PNN
		گام اول	گام دوم	Th1	Th2		
0 of 50	0 of 20	32	93	0.74	0.55	0.02	A1-G66
1 of 50	0 of 20	43	104	0.70	0.56	0.02	A1-G67
0 of 50	0 of 20	30	85	0.70	0.56	0.03	A1-G68
0 of 50	0 of 20	38	66	0.58	0.63	0.03	A2-G56
0 of 50	0 of 20	45	95	0.70	0.60	0.01	A2-G57
2 of 50	1 of 20	58	113	0.63	0.60	0.026	A2-G58
0 of 50	0 of 20	29	68	0.70	0.40	0.015	A2-G59
0 of 50	0 of 20	31	64	0.56	0.65	0.02	A3-G53
0 of 50	0 of 20	28	83	0.65	0.58	0.02	A3-G60
0 of 50	0 of 20	37	70	0.65	0.48	0.03	A3-G61
0 of 50	0 of 20	29	52	0.70	0.56	0.018	A4-G54
0 of 50	0 of 20	49	115	0.60	0.63	0.02	A4-G55
0 of 50	0 of 20	32	69	0.58	0.63	0.03	A5-G62
0 of 50	0 of 20	24	73	0.70	0.58	0.03	A5-G63
1 of 50	0 of 20	38	74	0.63	0.58	0.02	A5-G64
0 of 50	0 of 20	40	89	0.50	0.65	0.032	A5-G65

## ۵- نتیجه‌گیری

ژنراتورها در مد بحرانی و تعیین نوع نوسانات سیستم قدرت در این مد، ارائه گردید. بدین منظور، شاخصی تحت عنوان شاخص  $PO$  تعریف گردید که بر اساس آن، ضرایب مشارکت ژنراتورها بصورت یک مسئله دسته‌بندی مدلسازی گردید و با استفاده از شبکه عصبی مورد پیش‌بینی قرار گرفت. نتایج بدست آمده، نشان داده است که با استفاده از الگوریتم پیشنهادی علاوه بر سرعت بالا در تعیین اندازه و زاویه ضریب مشارکت ژنراتورها در مد بحرانی، نوع نوسانات سیستم قدرت نیز با دقت و سرعت بالایی قابل تشخیص است. این قابلیت به ویژه در محیط‌هایی مانند مراکز دیسپاچینگ که نیاز به پیش‌بینی و تعیین بهنگام رفتارهای دینامیکی پیچیده سیستم قدرت دارند، اهمیت پیدا می‌کند.

در این مقاله، نوسانات سیگنال کوچک زاویه‌ای رتور شامل نوسانات درون ناحیه‌ای (محلی) و بین ناحیه‌ای، رفتار ضرایب مشارکت ژنراتورهای سیستم در مد بحرانی و ارتباط میان این ضرایب و نوسانات مذکور بیان گردید. بر این اساس، در ابتدا با استفاده از روش‌های مرسوم شامل تحلیل مدال و شبیه‌سازی حوزه زمان، قابلیت اندازه و زاویه ضریب مشارکت متغیر حالت غالب ژنراتورها در مد بحرانی سیستم برای تعیین نوع نوسانات سیستم مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، بر اساس نتایج بدست آمده و با توجه به حجم بالای تحلیل نوسانات سیستم قدرت با استفاده از روش‌های مرسوم، الگوریتمی مبتنی بر شبکه عصبی PNN به منظور پیش‌بینی ضرایب مشارکت

## ۶- مراجع

- [1] Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Anderson, G., Bose, A., Canizares, C. (2004). "Definition and Classification of Power System Stability". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 19(3), pp. 1387-1401.

- [2] Kundur, P., Wang, Lei. (2002). "Small Signal Stability Analysis: Experiences, Achievements, and Challenges". IEEE., pp. 6-12.
- [3] Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, the EPRI Power System Engineering Series.
- [4] Qing, W., Shiyong, M. (2010). "Study on Relationship between Inter-area Oscillation Damping and Operating Conditions in Power Systems". International Conference on Power System Technology., pp.1-6.
- [5] SO, P. L., Macdonald, D. C. (1996). "Analysis and Control of Inter-Area Oscillations for System Security Enhancement". Power System Control and Management, 16-18April 1996, Conference Publication No. 421.
- [6] Ke, D. P., Chung, C. Y., Xue, Y. (2011). "An Eigenstructure-Based Performance Index and Its Application to Control Design for Damping Inter-Area Oscillations in Power Systems". IEEE Trans. Power Syst., Vol. 26(4), pp. 2371-2380.
- [7] Mohammadi-Ivatloo, B., Shiroei, M., Parniani, M. (2011). "Online Small Signal Stability Analysis of Multi-Machine Systems Based on Synchronized Phasor Measurements". Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 81(1), pp. 1887-1896.
- [8] Castro, M. S., Ayres, H. M., daCosta, V. F., daSilva, L. C. P. (2007). "Impacts of the SSSC Control Modes on Small-Signal and Transient Stability of a Power System". Electric Power Systems Research (EPSR), Vol. 77(1), pp. 1-9.
- [9] Pugliese, P., Sbrizzai, R., Trovato, M., La Scala, M. (1996). "Intelligent Control of Inter-Area Oscillations in Power Systems". IEEE., pp. 737-741.
- [10] Shayeghi, H., Shayanfar, H.A., Jalilzadeh, S., Safari, A. (2009). "A PSO based unified power flow controller for damping of power system oscillations". Energy Conversion and Management., Vol. 50 (1), pp. 2583-2592.
- [11] Mithulanathan N, Canizares C. A, Reeve J, Rogers G. J. (2003). "Comparison of PSS, SVC and STATCOM controllers for damping power system oscillations". IEEE Trans. Power System., Vol. 18(2), pp. 786-792.
- [12] Ishimaru M, Yokoyama R, Netob O. M, Lee K. Y. (2004). "Allocation and design of power system stabilizers for mitigating low-frequency oscillations in the eastern interconnected power system in Japan". Electrical Power and Energy Systems., Vol. 26(8), pp. 607-618.
- [13] Amjady, N., Velayati, M. H. (2010). "Evaluation of Hopf Bifurcation Considering the Effect of Load Models and Excitation System Parameters". International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 6(5), pp. 2419-2427.
- [14] BIKASH P, BALARCO C. Robust Control in Power System; Springer, 2005.
- [15] Amjady, N., Velayati, M. H. (2010). "Dynamic Voltage Stability Prediction of Power Systems by a New Feature Selection Technique and Probabilistic Neural Network". European Transactions on Electrical Power (ETEP), Vol. 21(1), pp. 312-328.
- [16] Amjady, N., Keynia, F., Zareipour, H. (2011). "Wind power prediction by a new forecast engine composed of modified hybrid neural networks and enhanced particle swarm optimization". IEEE Trans. Sustainable Energy., Vol. 2(3), pp. 265-276.
- [17] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.
- [18] Amjady, N., Ansari, M. R. (2008). "Small Disturbance Voltage Stability Assessment of Power Systems by Modal Analysis and Dynamic Simulation". Int. J. of Energy Conversion and Management (ECM), Vol. 49(10), pp. 2629-2641.
- [19] DIGSILENT User Manual Toolbox, Available: <http://www.digsilent.de/>.
- [20] MATLAB Neural Network Toolbox, The Mathworks, Available: <http://www.mathworks.com/>.