

شناسایی ماشین‌های همپا به روش همپایی کند

سیدحمیدرضا عادل و عبدالرضا ربیعی

نوین تحلیل مدال [۱۴]، روش‌های سلسله‌مراتبی [۱۵] و [۱۶] و یا روش‌های مبتنی بر گراف مد نظر قرار گرفته‌اند که بعضی از آنها وابسته به محل خطا می‌باشند.

از روش‌های به کار رفته در [۱۰] و [۱۴] تا [۱۶] در پایداری سیستم قدرت نیز استفاده شده و می‌توان از آنها در سیستم‌های شناسایی ژنراتورهای همپای وابسته به محل خطا و مستقل از محل خطا استفاده نمود. در این مقاله، الگوریتم شناسایی ناحیه‌های همپایی توسط روش همپایی کند مورد بررسی قرار گرفته است. تئوری مدهای کند بر این اساس قرار گرفته که ماشین‌های نزدیک به محل خطا در زمان بعد از خطا، با پاسخ به مدهای تند و ماشین‌های دور از خطا، در نزدیک مدهای کند بین ناحیه‌ای نوسان می‌کنند. مفهوم فوق، اساس روش شناسایی به روش مدهای کند است. هدف اصلی مقاله، به دست آوردن ماشین‌هایی که با یک مد کند مشترک نوسان می‌کنند و قراردادن آنها در یک گروه می‌باشد. به صورت کلی با در نظر گرفتن r مد کند سیستم، دو ماشین i و j همپای کند خوانده می‌شوند در صورتی که تفاضل زاویه روتور آنها شامل هیچ یک از مدهای کند نباشد.

در این مقاله ابتدا روش اغتشاش منفرد به عنوان اساس روش همپایی کند مورد بررسی قرار گرفته و سپس الگوریتم همپایی کند مورد توجه قرار می‌گیرد. در پایان الگوریتم فوق روی شبکه ۱۶ ماشینه IEEE اعمال شده و صحت آن توسط شبیه‌سازی زمانی بررسی می‌شود. نوآوری‌های این مقاله نسبت به سایر مقالات ارائه‌شده در این زمینه، استفاده از ماتریس مشارکت در جداسازی ماشین‌های مرجع و دسته‌بندی سایر ماشین‌ها با استفاده از مدهای کند می‌باشد. روش ارائه‌شده در عین سادگی با تقریب قابل قبولی، ماشین‌های همپا را شناسایی می‌نماید. این موضوع در بخش ۷ با استفاده از شبیه‌سازی زمانی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در بخش ۲ این مقاله مدل‌سازی دینامیکی شبکه شرح داده شده و در بخش ۳ تئوری اغتشاش منفرد مورد بحث قرار گرفته است. در بخش ۴ و ۵، روش پیشنهادی ارائه‌شده مبتنی بر مدهای کند مورد بررسی قرار می‌گیرند. در بخش ۶ الگوریتم شناسایی ژنراتورهای همپا به روش مدهای کند شرح داده شده و در نهایت نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۸ آورده شده است.

۲- مدل الکترومکانیکی

مدل مکانیکی سیستم قدرت برای n ماشین را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۹] و [۱۳]

$$2H_i \omega_i^* = -D_i(\omega_i - 1) + P_{mi} - P_{ei} \quad (1)$$

$$\delta_i = \Omega(\omega_i - 1) \quad (2)$$

که ω_i ، P_{mi} ، P_{ei} ، H_i ، D_i و δ_i به ترتیب زاویه روتور، سرعت زاویه‌ای روتور، توان مکانیکی ورودی، توان الکتریکی خروجی، ثابت اینرسی، ثابت میرایی ماشین و Ω فرکانس پایه می‌باشد. در این مدل فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است:

(۱) توان مکانیکی ورودی P_{mi} ثابت در نظر گرفته شده است.

چکیده: بررسی پایداری، کنترل و طراحی سیستم‌های قدرت امروزی به دلیل وسعت زیاد و پیچیدگی بیش از حد این سیستم‌ها، کار مشکلی بوده و برای انجام چنین مطالعاتی، معادل‌سازی دینامیکی این سیستم‌ها بسیار مفید و گاه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. در این مقاله از روش همپایی به عنوان روش معادل‌سازی و از روش همپایی کند به عنوان روش شناسایی ماشین‌های همپا استفاده شده است. این روش با وجود سادگی، روش مؤثری در شناسایی ژنراتورهای همپا ارائه می‌دهد. همچنین در این مقاله، روش جدیدی برای خوشه‌بندی ماشین‌های سنکرون ارائه شده که دارای سرعت قابل قبولی می‌باشد. در پایان صحت عملکرد روش شناسایی پیشنهادی توسط شبیه‌سازی زمانی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با روش‌های دیگر مقایسه می‌گردد. نتایج حاکی از آن است که با استفاده از روش مذکور، گروه‌های ژنراتوری با سرعت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها تعیین می‌شود و لذا روش پیشنهادی می‌تواند با دقت خوبی در مطالعات معادل‌سازی دینامیکی استفاده گردد.

کلیدواژه: معادل‌سازی دینامیکی، همپایی، مدهای کند، شناسایی همپایی.

۱- مقدمه

در گذشته مطالعه دینامیک بسیاری از سیستم‌های قدرت با استفاده از مدل تک‌ماشین باس بی‌نهایت انجام می‌گرفت. چنین مدلی هنوز هم برای مطالعه اولیه کاربرد دارد اما بررسی دقیق‌تر و شبیه‌سازی بسیاری از پدیده‌های دینامیک این سیستم، به مدل چندماشینه و کامل نیازمند است [۱]. برای نمونه در بعضی از سیستم‌های قدرت، بیش از ۳۰۰ ماشین الکتریکی (ژنراتور سنکرون) فقط به عنوان ماشین اصلی در نظر گرفته می‌شوند [۲] و در بسیاری از موارد، ناحیه اصلی مورد مطالعه به صورت دقیق مدل شده و معادل‌سازی برای بقیه شبکه که شبکه خارجی نامیده می‌شود صورت می‌گیرد [۳].

به طور کلی روش‌های شناسایی ماشین‌های همپا به دو دسته شناسایی مبتنی بر شبیه‌سازی و شناسایی تحلیلی بدون شبیه‌سازی زمانی تقسیم می‌شوند که دسته اول به محل خطا وابسته بوده [۴] تا [۶] و در نتیجه کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند اما از روش‌های تحلیلی به صورت‌های گوناگون استفاده شده است. مهم‌ترین این روش‌ها عبارتند از شناسایی همپایی با استفاده از روش تفکیک ϵ [۷]، شناسایی همپایی بر اساس مفهوم تزویج ضعیف [۸]، شناسایی همپایی با استفاده از تکنیک دو مقیاس زمانی و همپایی کند [۹] و شناسایی همپایی با استفاده از تابع انرژی [۱۰].

در سال‌های اخیر، شناسایی توسط الگوریتم‌های عصبی [۱۱]، محاسبات موجک [۱۲]، دسته‌بندی بر اساس بردار سمت راست [۱۳]، روش‌های

این مقاله در تاریخ ۵ اسفند ماه ۱۳۹۵ دریافت و در تاریخ ۱۷ آبان ماه ۱۳۹۶ بازنگری شد.

سیدحمیدرضا عادل، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، (email: adeli@stu.sku.ac.ir).

عبدالرضا ربیعی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، (email: rabiee@eng.sku.ac.ir).

در ادامه این بخش به بررسی روش تزویج ضعیف پرداخته خواهد شد. این روش بر مبنای یک اغتشاش غیر منفرد در طرف راست معادلات دیفرانسیل به صورت زیر بنا نهاده شده است

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & \varepsilon A_{1r} \\ \varepsilon A_{r1} & A_{rr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & \cdot \\ \cdot & B_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_r(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

که در اینجا ε یک پارامتر مثبت کوچک می‌باشد و واضح است که اگر $\varepsilon = 0$ باشد سیستم به دو زیرسیستم کاملاً مستقل تجزیه خواهد شد. در $[\lambda]$ این مسئله کاملاً ثابت شده که ناحیه‌های دارای همپایی کند، با یکدیگر دارای تزویج ضعیف نیز می‌باشند. شبکه بزرگ مورد استفاده در (۱۱) با استفاده از یک مقدار کوچک ε به دو زیرسیستم با بردارهای حالت x_1 و x_r تقسیم می‌شود. برای سیستم قدرت، گروهی از ماشین‌ها که در عبارت A_{11} و همچنین A_{rr} قرار می‌گیرد با همدیگر دارای تزویج قوی بوده و همپا در نظر گرفته می‌شوند. با فرض ثابت ماندن مدهای کند و همچنین به حالت ماندگار رسیدن مدهای تند، در زمان‌های گذرا داریم

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, t), \quad x(t) = x, \quad x \in R^r \quad (12)$$

$$\frac{dy}{dt} = G(x, y, t), \quad y(t) = y, \quad y \in R^{n-r} \quad (13)$$

که در اینجا سیستم شامل r مد کند و $n-r$ مد تند می‌باشد. با فرض این که t مقیاس زمانی متغیرهای کند و τ مقیاس زمانی متغیرهای تند باشد و نسبت این دو ε باشد، تابع G می‌تواند به صورت زیر مجدداً مقیاس‌بندی گردد

$$g = \varepsilon G \quad (14)$$

در این صورت دینامیک متغیرهای تند y ، $1/\varepsilon$ برابر سریع‌تر از x می‌باشد. بنابراین (۱۲) و (۱۳) را می‌توان به صورت زیر تغییر داد

$$\frac{dx_s}{dt} = f(x_s, y_s, t), \quad x(t_s) = x, \quad (15)$$

$$\varepsilon \frac{dy}{dt} = g(x_s, y_s, t) \quad (16)$$

در [۹] ثابت شده که شرط $\varepsilon \rightarrow 0$ همان شرایط حالت ماندگار می‌باشد و بنابراین

$$\frac{dx_s}{dt} = f(x_s, y_s, t), \quad x(t_s) = x, \quad (17)$$

$$\cdot = g(x_s, y_s, t) \quad (18)$$

واقعیت این است که در عمل ε برابر صفر نیست و قراردادن $\varepsilon = 0$ یک خطای ذاتی در مدل سیستم ایجاد می‌کند که در واقع اصطلاح اغتشاش منفرد به همین دلیل به کار می‌رود. به این ترتیب معادلات برداری را می‌توان به معادلات جبری کاهش داد.

۴- همپایی کند

در حالت ایده‌آل تعداد نواحی همپای کند [۹] و [۱۳] برابر تعداد مدهای کند سیستم است. شبکه‌ای که با مدهای کند قابل تفکیک باشد سیستم قابل تجزیه r (Decomposable-) نامیده می‌شوند که در اینجا به اختصار به آنها سیستم‌های r - گفته می‌شود.

(۲) توان الکتریکی خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n V_i V_j (B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)) + V_i^T G_{ii} \quad (3)$$

که در اینجا V_i ولتاژ قبل از راکتانس حالت گذرا می‌باشد. در این مدل بارها به صورت امیدانسان ثابت با مقدار حقیقی و موهومی B و G مدل شده‌اند و خطی‌سازی حول نقطه تعادل $\omega_i = 1, \delta_i^*$ صورت گرفته است. در نتیجه

$$\forall H_i \Delta \omega_i = -D_i \Delta \omega_i + \sum_{j=1}^n k_{ij} \Delta \delta_j \quad (4)$$

$$\delta_i = \Omega \Delta \omega_i \quad (5)$$

در جایی که

$$\Delta \delta_i = \delta_i - \delta_i^* \quad (6)$$

$$\Delta \omega = \omega_i - 1$$

$$k_{ij} = -V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

$$k_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n -k_{ij} \quad (8)$$

در اینجا از جملات مربوط به G_{ij} صرف نظر شده است. همچنین در این مقاله از مدل کردن سیستم تحریک و گاورنر صرف نظر شده است زیرا در عمل این مدل‌ها تأثیر چندانی در فرکانس نوسانی روتور ندارند [۱] و می‌توان از مقدار میرایی D_i (۴) صرف نظر نمود. در نتیجه مدل به کار رفته در این مقاله را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$\ddot{x} = -\frac{1}{\tau} \Omega H^{-1} k x \cong A x \quad (9)$$

که در آن $x_i = \Delta \delta_i$ و $H = \text{diag}(H_1, H_2, \dots, H_n)$ و k ماتریس k_{ij} می‌باشد. حال یک ماتریس $n \times n$ وجود دارد که درجه ماتریس از $2n$ به n کاهش پیدا کرده است. همان طور که از (۷) و (۸) برمی‌آید، یک ماتریس متقارن می‌باشد. حال اگر Y نیز یک ماتریس متقارن باشد (اثر شیفت فاز در نظر گرفته نشود) آن گاه A یک ماتریس قطری‌پذیر خواهد بود و (۹) را می‌توان به صورت (۱۰) بازنویسی نمود

$$\ddot{x} = -\frac{1}{\tau} \Omega H^{-1} k H^{-1} x \cong A x \quad (10)$$

همه مقادیر ویژه λ_i ماتریس A مقدار حقیقی و منفی می‌باشند که جذر این مقادیر ویژه روی محور موهومی و نزدیک مقادیر ویژه (۴) قرار می‌گیرند. بنابراین مدهای کند (۴) همان مدهای A سیستم مورد نظر این مقاله می‌باشند.

۳- روش اغتشاش منفرد

اصولاً به کارگیری روش‌های اغتشاش منفرد [۱۷] و [۱۸] در مواقعی مفید خواهند بود که بتوان یک سیستم را به وسیله سیستم دیگری با ساختمان ساده‌تری تقریب زد. اختلاف پاسخ بین سیستم اصلی و سیستم تقریب زده شده به صورت اغتشاش مدل می‌شود. معمولاً روش‌های اغتشاش به دو بخش تقسیم می‌شوند که عبارتند از:

(۱) روش تزویج ضعیف

(۲) روش تزویج قوی

$$L_d = L_g = V_1 V_1^{-1} \quad (26)$$

اگر دو ماشین از یک گروه مشابه در x^1 قرار بگیرند، در این صورت دو سطر ماتریس V_1 برابر شده و این ماتریس منفرد خواهد شد. با تبدیل (۲۱) به (۲۲)، زیرفضای تند از زیرفضای کند جدا می‌شود اما زیرفضای کند توسط ماتریس A_{rr} به زیرفضای تند وابسته می‌باشد. با اعمال تبدیل پیرو، می‌توان زیرفضای کند را از زیرفضای تند جدا نمود

$$\begin{bmatrix} z^1 \\ z^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & M \\ \cdot & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ x^r \end{bmatrix} \quad (27)$$

با توجه (۲۲) و با مساوی صفر قرار دادن $R(L) = 0$ داریم

$$\begin{bmatrix} \ddot{z}^1 \\ \ddot{z}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & P(M) \\ \cdot & B_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z^1 \\ z^r \end{bmatrix} \quad (28)$$

حال مقدار M را باید پیدا کرد که در (۲۹) صدق کند

$$P(M) = MB_r - B_1 M + A_{rr} = 0 \quad (29)$$

در [۴] نشان داده شده که حل معادله $R(L_g) = 0$ و $P(M) = 0$ ، توسط رابطه زیر به هم مربوط می‌شوند

$$M = (H^1 + L_g^T H^r L_g)^{-1} L_g^T H^r \quad (30)$$

در اینجا H^1 و H^r ماتریس‌های $r \times r$ و $n-r \times n-r$ از ثابت اینرسی ماشین‌ها می‌باشند. بنابراین تبدیل نهایی x به z با استفاده از (۱۰) و (۱۵) به صورت زیر خواهد بود

$$H_a = H^1 + L_g^T H^r L_g \quad (31)$$

عناصر L_g تنها از مقادیر صفر و یک بوده و H^r یک ماتریس قطری از اینرسی ماشین‌ها می‌باشد. در این صورت عناصر $L_g^T H^r L_g$ مجموع اینرسی‌های ماشین‌ها در ناحیه بدون ژنراتور مرجع می‌باشد. بنابراین H_a یک ماتریس قطری از اینرسی‌های ماشین‌ها در یک ناحیه خواهد بود یعنی i امین عنصر قطری H_{ai} از H_a مجموع همه اینرسی‌ها در ناحیه i ام می‌باشد. این متغیرهای ناحیه‌ای مجموع زاویه‌های روتور را در هر ناحیه وزن‌دهی می‌نمایند که آنها را می‌توان به عنوان مرجع زاویه‌ها در هر ناحیه دانست.

۵- الگوریتم دسته‌بندی

تعیین گروه‌های همپا برای یک سیستم ایده‌آل قابل تجزیه $r -$ ، همان طور که گفته شد به پیدا کردن یک بردار x^1 از ماشین‌های مرجع که معادله $R(L_g) = 0$ را برآورده نماید تبدیل می‌شود. حال مشکل این است که مدل‌های واقعی در عمل به طور دقیق قابل تجزیه به r گروه نمی‌باشند و برای چنین وضعیت‌هایی از الگوریتم پیرو استفاده می‌گردد. حالت‌هایی را در نظر بگیرید که معادله $R(L_g) = 0$ به طور تقریبی برآورده شود. ماشین‌های i و j را همپای نزدیک گویند اگر سهم مدهای کند در z_{ij} ، (۲۰) بسیار کوچک باشد. پس می‌توان گفت نواحی همپای نزدیک از ترکیب ماشین‌های همپای نزدیک به وجود می‌آیند. برای یافتن نواحی همپا در این حالت باید ابتدا ماشین‌های مرجع هر ناحیه را شناسایی نموده و پس از آن L_d با L_g تقریب زده شود. ابتدا r بردار ستونی از فضای ویژه سمت راست مربوط به کندترین مدها در نظر گرفته خواهد شد. در این حالت مقادیر مؤلفه‌های سطری مربوط به مدهای کند در ماشین‌های همپا با هم برابر نیست. در نتیجه r سطر که دارای بیشترین استقلال خطی هستند به عنوان ماشین‌های مرجع در نظر گرفته

۴-۱ مجموعه ماشین‌های مرجع

در هر ناحیه یک ماشین به عنوان ماشین مرجع در نظر گرفته شده و زوایای این ماشین‌ها در یک بردار r تایی به نام x^1 و بقیه زوایای ماشین‌ها در بردار $n-r$ تایی دیگری به نام x^r قرار داده می‌شود.

۴-۲ ماتریس دسته‌بندی L_g

برای استفاده از (۱)، از یک ماتریس به نام L_g که ماتریس دسته‌بندی نامیده می‌شود استفاده می‌گردد. تعداد سطرهای این ماتریس برابر تعداد ماشین‌های موجود در x^r و تعداد ستون‌های آن برابر تعداد ماشین‌های موجود در x^1 می‌باشد. عنصر (i, j) از ماتریس L_g برابر ۱ است اگر ماشین x_i^1 و x_j^r در یک گروه باشند و در غیر این صورت صفر خواهد بود. همچنین صفر بودن یک ستون از L_g به این مفهوم است که ماشین متناظر با این ستون x^1 به تنهایی در یک گروه قرار دارد. با استفاده از L_g می‌توان (۱) را به صورت زیر بازنویسی نمود

$$x^r(t) - L_g x^1(t) = z^r(t) \quad (19)$$

که در اینجا $z^r(t)$ همان $z_{ij}(t)$ می‌باشد که

$$x_i^1(t) - x_j^r(t) = z_{ij}(t) \quad (20)$$

معادله (۱۹) را در حالت کلی می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\begin{bmatrix} x^1 \\ x^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & \cdot \\ L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ x^r \end{bmatrix} \quad (21)$$

با استفاده از این معادله برای معادله الکترومکانیکی مرتبه دوم خطی شده سیستم یعنی $\ddot{x} = Ax$ داریم

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}^1 \\ \ddot{x}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 & A_{rr} \\ R(L) & B_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^1 \\ x^r \end{bmatrix} \quad (22)$$

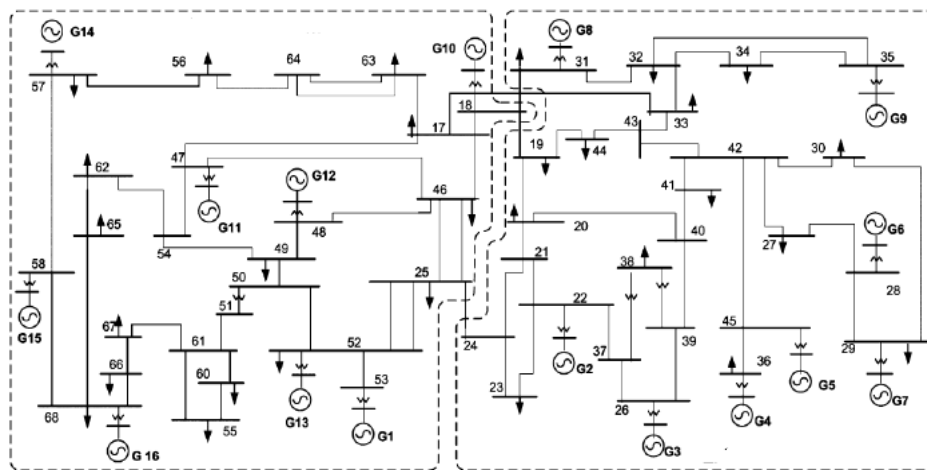
$$\begin{aligned} B_1 &= A_{11} + A_{rr} L \\ B_r &= A_{rr} - L A_{rr} \end{aligned} \quad (23)$$

$$R(L) = A_{rr} L - L A_{11} - L A_{rr} L + A_{rr} \quad (24)$$

که A_{11} ، A_{rr} ، A_{1r} و A_{r1} زیرماتریس A می‌باشند. در [۹] ثابت شده که برای قرار گرفتن مدهای کند سیستم در B_1 ماتریس L باید شرط $R(L) = 0$ را برآورده کند. همچنین نشان داده شده که برای یک سیستم $r -$ ، این ماتریس، همان ماتریس L_g خواهد بود و هر انتخابی از r ماشین که هر کدام به یک گروه متعلق باشند، معادله $R(L_g) = 0$ را برآورده خواهد کرد. این روش دسته‌بندی می‌تواند به صورت یک نمایش خطی از عبارت‌های زیرفضای ویژه مدهای کند ماتریس A برای آرایش ویژه‌ای از زوایای ماشین‌ها در بردار x به کار برده شود. اگر فرض شود که میناهای انتخاب شده به صورت ستون‌های یک ماتریس $n \times r$ مانند V (معمولاً بردار ویژه سمت راست) باشند در این صورت اگر ماشین‌های i و j همپای کند باشند، سطرهای i ام و j ام از ماتریس V مشابه خواهند بود. اگر بردار x^1 شامل فقط ماشین‌هایی باشد که به یک گروه تعلق دارند، در این صورت ماتریس $V_1 (r \times r)$ از ماتریس V غیر منفرد خواهد شد و داریم

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

در [۴] نشان داده شده که یک حل معادله $R(L) = 0$ با تعریف بالا به صورت زیر خواهد بود



شکل ۱: دیاگرام تک خط شبکه ۱۶ ماشین IEEE.

جدول ۱: دسته‌بندی ژنراتورهای همپا بر اساس روش پیشنهادی.

| ماشین‌های تکی | گروه ۱ | گروه ۲ | گروه ۳ |
|---------------|--------|--------|--------|
| ۱۴ | ۱ | ۴ | ۲ |
| ۱۵ | ۶ | ۵ | ۱۰ |
| ۱۶ | ۷ | | ۱۱ |
| | ۸ | | ۱۲ |
| | ۹ | | ۱۳ |

جدول ۲: مدهای شبکه ۱۶ ماشین به روش پیشنهادی.

| شماره مد | مقدار مد | شماره مد | مقدار مد |
|----------|----------|----------|----------|
| ۱ | ۰٫۰۰۱۵ | ۹ | ۰٫۱۶۶۸ |
| ۲ | ۰٫۰۴۱۵ | ۱۰ | ۰٫۱۷۷۵ |
| ۳ | ۰٫۰۵۳۳ | ۱۱ | ۰٫۱۹۷۱ |
| ۴ | ۰٫۰۸۱۰ | ۱۲ | ۰٫۲۱۱۱ |
| ۵ | ۰٫۱۲۰۳ | ۱۳ | ۰٫۲۵۶۱ |
| ۶ | ۰٫۱۳۷۷ | ۱۴ | ۰٫۲۷۷۵ |
| ۷ | ۰٫۱۳۸۷ | ۱۵ | ۰٫۳۸۰ |
| ۸ | ۰٫۱۴۱۲ | ۱۶ | ۰٫۴۵۲۸ |

- ۳) محاسبه ماتریس خطی شده A به روش ذکر شده در بخش ۲.
- ۴) محاسبه مقادیر ویژه و بردارهای مقادیر ویژه سمت راست مربوط به آنها.
- ۵) قراردادن ماتریس مقادیر سمت راست به ترتیب اندازه مقدار ویژه.
- ۶) وارون نمودن ماتریس به دست آمده در مرحله ۵ الگوریتم و محاسبه ضرایب مشارکت و ارتباط هر مود به اصلی ترین متغیر آن.
- ۷) استفاده از حذف گوس برای به دست آوردن r ماشین مینا.
- ۸) محاسبه L_d با توجه به (۳۲) و تقریب زدن آن برای محاسبه L_g .
- ۹) به دست آوردن ماشین‌های همپا با استفاده از L_d و ماشین‌های مرجع.

۷- مطالعه موردی

برای بررسی روش همپایی پیشنهادی، شبکه ۱۶ ماشین IEEE را در نظر گرفته که دیاگرام تک خطی آن در شکل ۱ آورده شده است. اطلاعات مربوط به شین‌ها، خطوط انتقال، ماشین‌های سنکرون و ادوات کنترلی این سیستم در [۱۹] آورده شده است. این شبکه شامل ۵ ناحیه جغرافیایی می‌باشد که ژنراتورهای ۱ تا ۹ مربوط به شبکه نیوانگلند، ژنراتورهای ۱۰ تا ۱۳ نمایش‌دهنده شبکه نیویورک و ژنراتورهای ۱۴ تا ۱۶ به ترتیب مربوط به نواحی سوم تا پنجم می‌باشند. در این بخش کلیه شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار Matlab صورت گرفته است. بعد از اجرای برنامه ژنراتورهای همپا به صورت جدول ۱ محاسبه گردیدند:

مدهای بین ناحیه‌ای محاسبه شده به ترتیب کند به تند مربوط به شبکه ۱۶ ماشین در جدول ۲ آمده‌اند. این دسته‌بندی ناشی از مرجع قرار گرفتن ژنراتورهای ۵، ۹، ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ و غیر مرجع قرار گرفتن ژنراتورهای

خواهند شد. برای پیدا کردن مجموعه‌هایی از r سطر که دارای بیشترین استقلال خطی نسبت به هم باشند از روش حذف گوس استفاده می‌شود به این صورت که سطر و ستون ماتریس φ (ماتریس سمت راست مقادیر ویژه کند) به گونه‌ای تغییر داده می‌شود که عنصر (۱ و ۱) از ماتریس φ حاصل از نظر اندازه بزرگ‌ترین باشد. حال این عنصر را به عنوان محور برای انجام اولین گام حذف گوس انتخاب می‌کنیم. سپس بزرگ‌ترین عنصر زیرماتریس $(r-1) \times (n-1)$ باقیمانده را به عنوان محور برای انجام دومین گام حذف گوس مورد استفاده قرار می‌دهیم. این عمل r بار انجام شده و ماشین‌های مطابق با r سطر اول ماتریس φ کاهش یافته نهایی به عنوان ماشین‌های مرجع استفاده می‌شوند. برای مجموعه ماشین‌های مرجع انتخاب شده L_d به صورت زیر محاسبه می‌گردد

$$\varphi_i^T L_d^T = \varphi_i^T \quad (32)$$

همان گونه که گفته شد برای دسته‌بندی ماشین‌ها از ماتریس L_g استفاده می‌شود که این ماتریس را می‌توان با تقریب L_d به دست آورد. برای این کار سطرهای L_d بررسی می‌گردد. چنانچه ستون مربوط به این عنصر را j بنامیم، بزرگ‌ترین عنصر مثبت سطر i را پیدا می‌کنیم. عنصر $(i$ و $j)$ از ماتریس L_g را ۱ و بقیه عناصر این سطر را صفر قرار می‌دهیم. به این ترتیب عناصر ماتریس L_g که شامل صفر و یک‌های ذکر شده هستند تشکیل می‌گردند و با استفاده از آنها می‌توان به سادگی گروه‌های همپایی را که دارای تزویج قوی می‌باشند استخراج نمود.

۶- الگوریتم به دست آوردن گروه‌های همپا توسط روش همپایی کند

جهت به دست آوردن گروه‌های همپا با استفاده از مدهای کند در این مقاله از روند ذیل استفاده شده است:

- ۱) انتخاب r به عنوان تعداد ناحیه همپایی.
- ۲) وارد کردن اطلاعات خط و باس (داده‌های اولیه) و پخش بار.

جدول ۳: دسته‌بندی ژنراتورهای همپا بر اساس L_g .

| مرجع | گروه ۱ | گروه ۲ | گروه ۳ | گروه ۴ | گروه ۵ | گروه ۶ |
|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| غیر مرجع | ژنراتور ۹ | ژنراتور ۵ | ژنراتور ۱۳ | ژنراتور ۱۴ | ژنراتور ۱۵ | ژنراتور ۱۶ |
| ژنراتور ۱ | ۱ | . | . | . | . | . |
| ژنراتور ۲ | . | . | ۱ | . | . | . |
| ژنراتور ۴ | . | ۱ | . | . | . | . |
| ژنراتور ۶ | ۱ | . | . | . | . | . |
| ژنراتور ۷ | ۱ | . | . | . | . | . |
| ژنراتور ۸ | ۱ | . | . | . | . | . |
| ژنراتور ۱۰ | . | . | ۱ | . | . | . |
| ژنراتور ۱۱ | . | . | ۱ | . | . | . |
| ژنراتور ۱۲ | . | . | ۱ | . | . | . |

جدول ۴: دسته‌بندی ژنراتورهای همپا بر اساس L_d .

| مرجع | گروه ۱ | گروه ۲ | گروه ۳ | گروه ۴ | گروه ۵ | گروه ۶ |
|------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| غیر مرجع | ژنراتور ۹ | ژنراتور ۵ | ژنراتور ۱۳ | ژنراتور ۱۴ | ژنراتور ۱۵ | ژنراتور ۱۶ |
| ژنراتور ۱ | -۰/۰۱۸۲ | -۰/۰۰۴ | ۰/۰۰۱۶ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۵ | ۰/۰۰۰۷ |
| ژنراتور ۲ | -۰/۰۱۲۳ | ۰/۰۰۴۹ | ۰/۰۰۰۷ | -۰/۰۰۰۱ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۱۹ |
| ژنراتور ۴ | ۰/۱۱۴۳ | ۰/۱۴۳ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۶ |
| ژنراتور ۶ | ۰/۱۲۴ | ۰/۰۰۰۸ | ۰/۰۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ |
| ژنراتور ۷ | ۰/۱۱ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۴۵ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۶ |
| ژنراتور ۸ | ۰/۱۵۷ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲۳ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۴ | ۰/۰۰۰۵ |
| ژنراتور ۱۰ | ۰/۰۲۲ | ۰/۰۰۰۳ | ۰/۰۰۳۱۲ | -۰/۰۰۰۵ | -۰/۰۰۰۷ | -۰/۰۰۰۴ |
| ژنراتور ۱۱ | ۰/۰۲۵ | ۰/۰۰۲۶ | ۰/۰۰۳۱۶ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۳۱ | ۰/۰۰۳۱ |
| ژنراتور ۱۲ | ۰/۰۰۲۸ | ۰/۰۰۰۶ | ۰/۰۰۴۶۱ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۰۰۲ |

جدول ۵: دسته‌بندی ژنراتورهای همپا.

| گروه ۱ | گروه ۲ | گروه ۳ | ماشین‌های تکی |
|--------|--------|--------|---------------|
| ۱ | ۴ | ۲ | ۱۴ |
| ۸ | ۵ | ۳ | ۱۵ |
| ۹ | ۶ | ۱۰ | ۱۶ |
| | ۷ | ۱۱ | |
| | | ۱۲ | |
| | | ۱۳ | |

در شکل ۵ نمایش داده شده که رفتار این ژنراتورها نیز پس از اتصال کوتاه در باس ۲۸ به صورت کاملاً هم‌نوا می‌باشند. در این گروه، ژنراتور ۵ عضو گروه اصلی و ژنراتور ۴ عضو گروه پیرو می‌باشد. نوسان ژنراتورهای ۲، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ (گروه ۳) در شکل ۶ نمایش داده شده که رفتار این ژنراتورها نیز پس از اتصال کوتاه به صورت کاملاً هم‌نوا می‌باشند. در این گروه، ژنراتور ۱۳ عضو گروه اصلی و بقیه ژنراتور گروه پیرو می‌باشند. شکل ۷ نمایش رفتار یک ژنراتور تکی پس از اتصال کوتاه در باس ۲۸ است. در این گروه، ژنراتور ۱۶ عضو اصلی است و هیچ ژنراتوری به آن متصل نمی‌باشد.

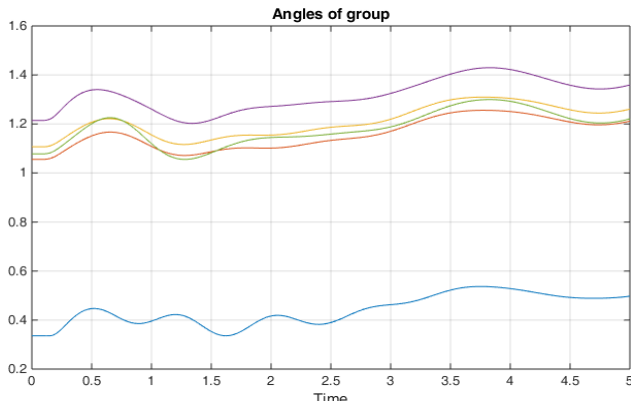
برای بررسی ارتباط همپایی با محل خطا، اثر اتصال کوتاه در شین‌های دیگر نیز شبیه‌سازی و مطالعه شده است. در شکل ۸ اغتشاش وارد بر روی باس ۴۶ مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که اگر خطا در خارج یک ناحیه همپا روی دهد ماشین‌های آن گروه همواره مستقل از محل خطا با هم نوسان خواهند کرد. در [۲۰] ماشین‌های ۸ و ۹ همپا شناخته نشده‌اند در صورتی اگر در شبیه‌سازی اتصال کوتاه در باس ۴۶ (باس دور)، این دو ماشین همپا می‌باشند. نتایج شبیه‌سازی با نتایج [۱۹] و [۲۰] (جدول ۵) مشابهت دارد.

روش پیشنهادی ارائه‌شده برای شناسایی همپایی در شبکه ۱۶ ماشین، با روش اغتشاش منفرد [۱۹] و همچنین روش تابع انرژی [۲۰] مقایسه گردیده که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان اجرای روش پیشنهادی، نسبت به دو روش دیگر، کمتر و با توجه به جدول ۶ سرعت بالای روش پیشنهادی مشهود می‌باشد. لذا به دلیل سادگی و در عین حال سرعت بالا، می‌توان از روش پیشنهادی در شبکه‌های بزرگ استفاده نمود.

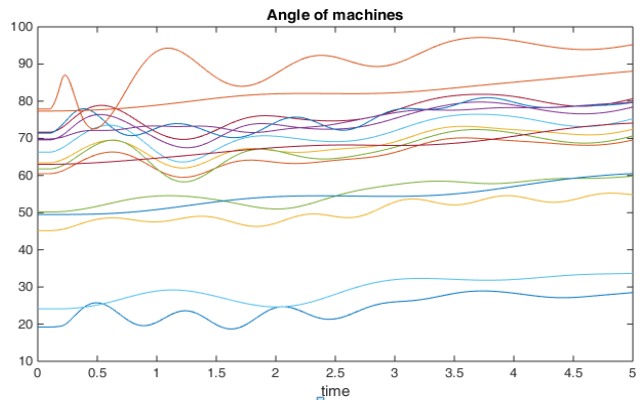
۱، ۲، ۴، ۶، ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ بوده که ماتریس L_g (جدول ۳)، همان ماتریس L_d (جدول ۴) می‌باشد که مقادیر ماکسیمم سطری آن برابر یک قرار گرفته است.

جهت بررسی درستی نتایج به دست آمده با ایجاد اتصال کوتاه در شین ۲۸ و سپس رفع آنها، منحنی نوسان ماشین‌ها برای مدت ۵ ثانیه پس از خطا در شکل‌های ۲ تا ۸ آورده شده که همپایی ماشین‌های گروه‌های اول، دوم و سوم به وضوح دیده می‌شوند. در گروه ۱ ژنراتور ۹ دارای کمترین مد می‌باشد و ژنراتورهای ۱، ۶، ۷ و ۸ از طریق ماتریس L_d به گروه مربوط می‌گردند. اندازه مد ژنراتور نهم برابر ۰/۱۲۰۳ محاسبه شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ آمده ژنراتورها کاملاً با هم نوسان می‌نمایند. در ژنراتور نهم (منحنی آبی‌رنگ شکل ۳) عدم همپایی در ۲ ثانیه اول دیده می‌شود که ناشی از نزدیکی به محل خطا می‌باشد. مقادیر L_g در جدول ۳ آمده است.

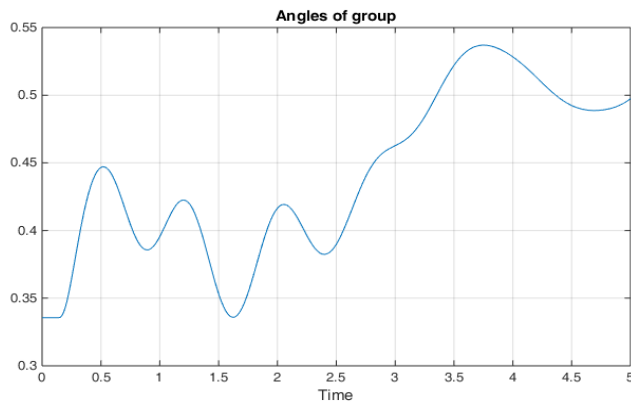
جهت بررسی صحت موضوع، محل اتصال کوتاه را تغییر داده و مجدداً شبیه‌سازی صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی برای خطا در باس ۴۶ در شکل ۴ آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود همه ژنراتورهای گروه یک کاملاً هم‌نوسان می‌باشند. نوسان ژنراتورهای ۴ و ۵ (گروه ۲)



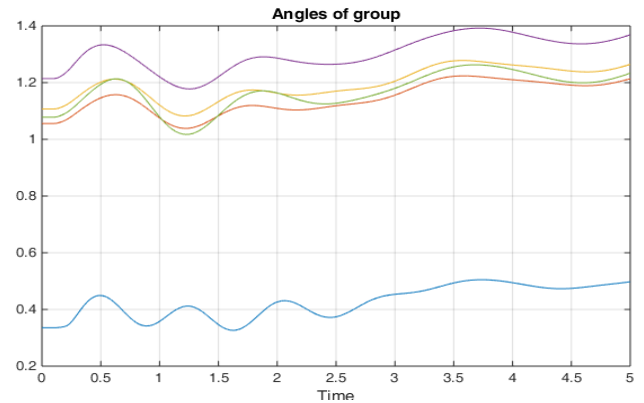
شکل ۶: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین‌های گروه ۳، (اتصال کوتاه در باس ۲۸).



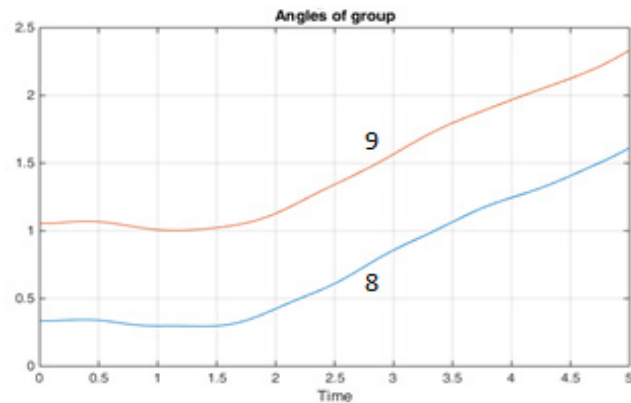
شکل ۷: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای شبکه ۱۶ ماشین IEEE، (اتصال کوتاه در باس ۲۸).



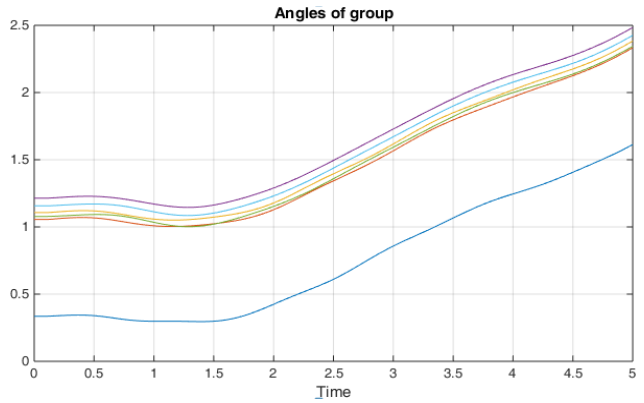
شکل ۸: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین تکی شماره ۱۶، (اتصال کوتاه در باس ۲۸).



شکل ۹: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین‌های گروه ۱، (اتصال کوتاه در باس ۲۸).



شکل ۱۰: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین‌های گروه ۲، (اتصال کوتاه در باس ۴۶).



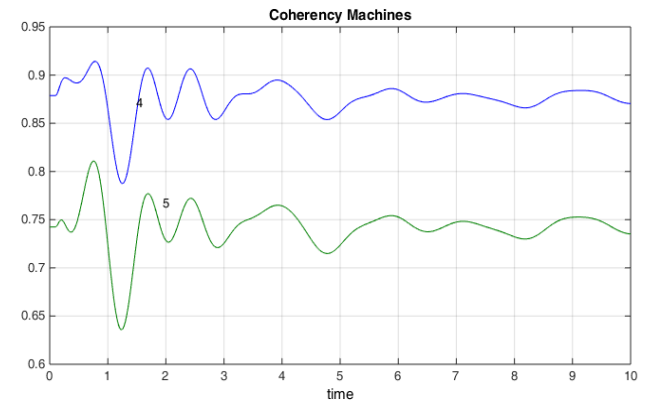
شکل ۱۱: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین‌های گروه ۱، (اتصال کوتاه در باس ۴۶).

جدول ۶: مقایسه زمانی روش‌های شناسایی.

| روش | همپایی کند | روش تابع انرژی | روش اغتشاش منفرد |
|--------------|------------|----------------|------------------|
| زمان (ثانیه) | ۰٫۱۳۲ | ۰٫۳۵۲ | ۰٫۲۰۵ |

۸- نتیجه‌گیری

در میان روش‌های موجود برای معادلسازی دینامیکی سیستم قدرت، روش‌های همپایی به دلیل این که ساختار فیزیکی سیستم معادل شده را حفظ می‌کنند و نیز از دقت بالاتری نسبت به روش‌های دیگر برخوردار هستند، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای انجام هر یک از مراحل سه‌گانه همپایی، شناسایی، یکپارچه‌سازی و کاهش شبکه، راه‌های گوناگونی وجود دارد که در این مقاله فقط شناسایی ماشین‌های همپا مورد



شکل ۱۲: شبیه‌سازی زمانی زاویه روتورهای ماشین‌های گروه ۲، (اتصال کوتاه در باس ۲۸).

IEEE Trans. on Power Systems, vol. 29, no. 1, pp. 271-278, Jan. 2014.

- [12] R. Agrawal and D. Thukaram, "Identification of coherent synchronous generators in a multi-machine power system using support vector clustering," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Power and Energy Systems, ICPS'11*, 6 pp., Chennai, India, 22-24 Dec. 2011.
- [13] H. Verdejo, G. Montes, and G. Olguin, "Identification of coherent machines using modal analysis for the reduction of multimachine systems," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 12, no. 3, pp. 416-422, May 2014.
- [14] N. Senroy, "Generator coherency using the Hilbert-Huang transformer," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 23, no. 4, pp. 1701-1708, Nov. 2008.
- [15] T. Guo and J. V. Milanovic, "Identification of power system dynamic signature using hierarchical clustering," in *Proc. IEEE PES General Meeting | Conf. & Exposition*, 5 pp., National Harbor, MD, USA, 27-31 Jul. 2014.
- [16] F. Wu and Y. K. Tsai, "Identification of groups of epsilon-coherent generators," *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, vol. 30, no. 4, pp. 234-241, Apr. 1983.
- [17] P. V. Koktovic, J. J. Allemon, J. R. Winkelman, and J. H. Chow, "Singular perturbation and iterative separation of time scale," *Automatica*, vol. 16, no. 1, pp. 23-33, Jan. 1980.
- [18] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State Press, Ames, Iwa, 1977.

[۱۹] م. پرنیانی و ا. صفدری، "شناسایی و معادل‌سازی ماشین‌های همپا در مدل دینامیک سیستم قدرت"، *مقالات پژوهشی دانشکده شریف*، جلد ۱، شماره ۱۶، صص. ۲۹-۱۹، ۱۳۷۸.

[۲۰] م. پرنیانی و س. ح. ر. عادل، "شناسایی ماشین‌های همپا به روش تابع انرژی"، *کنفرانس بین‌المللی برق*، ۶ صص.، مشهد، ۲۴-۲۲ اردیبهشت ۱۳۸۳.

سیدحمیدرضا عادل در سال ۱۳۷۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه مازندران و در سال ۱۳۸۲ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت خود را از دانشگاه صنعتی شریف دریافت نمود. از سال ۱۳۹۳ نام‌برده به عنوان دانشجوی دکتری برق قدرت در دانشگاه شهرکرد مشغول به تحصیل می‌باشد. از سال ۱۳۸۳ در دانشکده آزاد اسلامی و دانشگاه غیر انتفاعی مشغول به فعالیت گردید زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند طراحی تاسیسات الکتریکی و سیستم‌های توزیع، دینامیک سیستم‌های قدرت و طراحی سیستم‌های ارت صاعقه‌گیر است.

عبدالرضا ربیعی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۸۰ از دانشگاه شهید چمران اهواز و مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۳ و ۱۳۸۸ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی فنی مهندسی، گروه برق قدرت و کنترل دانشگاه شهرکرد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، بازار برق، سیستم‌های هوشمند انرژی الکتریکی، دینامیک و حفاظت سیستم‌های قدرت.

بحث قرار گرفت که قسمت اصلی معادل‌سازی می‌باشد. اغلب روش‌های شناسایی ماشین‌های همپا یا به محل بروز خطا وابسته‌اند و یا پیاده‌سازی آنها مشکل و وقت‌گیر است. در این میان روش همپایی کند که در این مقاله استفاده شده است اولاً به محل بروز خطا وابسته نیست، ثانیاً به دلیل استفاده از مدل کلاسیک و استفاده مفهوم مدهای کند، از پیچیدگی زیادی برخوردار نیست و ثالثاً مستقل از دامنه اغتشاش می‌باشد. در نتیجه این مقاله روشی کارآمد و سریع با حداقل خطا برای شناسایی ژنراتورهای همپا ارائه می‌نماید که می‌تواند در مطالعه دینامیک سیستم‌های بزرگ قدرت مورد استفاده قرار گیرد.

مراجع

- [1] R. Podmore and A. Germond, Development of Dynamic Transient Stability Study, EPRI-156, 1977.
- [2] A. Chang and M. Adibi, "Power system dynamic equivalents," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 89, no. 8, pp. 1737-1743, Nov. 1970.
- [3] R. Podmore, "Identification of coherent generators for dynamic," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 97, no. 4, pp. 754-763, Feb. 1981.
- [4] S. T. Y. Lee and F. C. Schweppe, "Distance measure and coherent recognition for transient stability equivalents," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 92, no. 5, pp. 1550-1557, Sept. 1985.
- [5] M. Y. Hussain and V. G. Rau, "Coherency identification in power system control, operation and management," in *Proc. Int. Conf. on Advances in Power System Control Operation and Management, APSCOM'93*, vol. 2, pp. 887-892, Hong Kong, 7-10 Dec. 1993.
- [6] N. Gacic, A. I. Zecevic, and D. D. Siljak, "Coherency recognition using epsilon decomposition," *IEEE Trans. on Power System*, vol. 13, no. 2, pp. 314-319, May 1998.
- [7] R. Nath, S. S. Lamba, and K. S. Parkasa Rao, "Coherency base system decomposition into study and external area using weak coupling," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 104, no. 6, pp. 52-53, Jun. 1985.
- [8] B. Avramovic, P. V. Koktovic, J. H. Chow, and J. R. Winkelman, "An analysis of interarea dynamics of multi-machine systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 2, pp. 754-763, Feb. 1981.
- [9] M. H. Haque and A. H. M. A. Rahim, "Identification of coherent generator using energy function," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 137, no. 4, pp. 255-260, Jul. 1990.
- [10] A. S. Mcfarlane and R. T. H. Alden, "Coherent grouping of power systems for use in training artificial neural networks," in *Proc. 36th Midwest Symp. on Circuits and Systems*, vol. 7, pp. 1559-1564, Detroit, MI, USA, 16-18 Aug. 1993.
- [11] S. Avdakovic, E. Becirovic, A. Nuhanovic, and M. Kusljagic, "Generator coherency using the wavelet phase difference approach,"