

طراحی پایدار ساز سیستم قدرت مبتنی بر شبکه موجک فازی به منظور میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین سیستم قدرت

مریم شهریاری کاهکشی^۱، احسان بی جامی^۲، فرید شیخ الاسلام^{۳*}، مریم ذکری^۴، ملیحه مغفوری فرسنگی^۵

۱- دانشجوی دکتری کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان - اصفهان- ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه صنعتی اصفهان- اصفهان- ایران

۵- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی برق- دانشگاه شهید باهنر کرمان - کرمان- ایران

چکیده

در این مقاله، یک روش جدید مبتنی بر شبکه‌های موجک فازی (FWN)، برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) به منظور میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین سیستم قدرت ارائه شده است. شبکه موجک فازی که از تئوری موجک و مفاهیم فازی الهام گرفته شده است، برای طراحی همزمان دو پایدارساز سیستم قدرت به کار رفته است، که در آن، خطای بین خروجی مطلوب سیستم و خروجی واقعی به منظور آموزش پارامترهای شبکه موجک فازی استفاده می‌شود. الگوریتم حداقل مربعات متعامد (OLS) برای تعیین ابعاد شبکه، غربال کردن موجک‌ها به منظور انتخاب موجک‌های مؤثر، تعیین تعداد زیرشبکه‌های عصبی موجک و قوانین فازی استفاده شده است. همچنین در این مقاله، از الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته (SFL) به منظور آموزش پارامترهای شبکه موجک فازی و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای پایدار ساز استفاده شده است. به منظور نشان دادن قابلیت و توانایی روش پیشنهادی، مطالعات عددی بر روی یک سیستم تست ۲-ناحیه-۴ ماشین ارائه شده است. همچنین به منظور نشان دادن مقاوم بودن پایدارسازهای طراحی شده دو نوع خطای سه فاز و تک فاز به سیستم اعمال شده است. و نیز به منظور انجام یک مقایسه دو پایدار ساز کلاسیک با ساختار پیشفاز-پس‌فاز طراحی شده اند که پارامترهای آنها با استفاده از الگوریتم SFL تنظیم شده است. نتایج شبیه سازی قابلیت و برتری پایدار سازهای طراحی شده مبتنی بر شبکه موجک را نشان می دهند.

واژه‌های کلیدی: شبکه موجک فازی، الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته، پایدار ساز سیستم قدرت، نوسان‌های فرکانس پایین.

مقدمه

تعیین می‌شوند. این دسته از کنترل‌کننده‌ها معمولاً در یک شرایط کاری تنظیم می‌شوند و همواره دارای عملکرد ضعیفی به دلیل طبیعت غیرخطی عناصر سیستم قدرت، نامعینی در پارامترها، محدوده وسیع شرایط کاری و اغتشاش‌های پیش‌بینی نشده در سیستم قدرت هستند.

در سه دهه اخیر استراتژی‌های کنترلی بسیاری مبتنی بر تئوری کنترل بهینه، روش‌های کنترل مقاوم و کنترل تطبیقی توسط محققان مختلف در سرتاسر جهان به منظور برطرف کردن عیوب PSS‌های کلاسیک، پیشنهاد و توسعه داده شده‌اند. کارهای انجام شده در [۹]-[۲] نمونه‌ای از این روش‌ها هستند. این روش‌ها به کنترل‌کننده‌هایی با مرتبه بالا که در عمل قابل پیاده‌سازی نیستند، منجر می‌شوند. در [۴]-[۲]، روش‌های مبتنی بر تئوری کنترل بهینه به منظور طراحی پایدار سازهای سیستم قدرت به‌کار گرفته شده‌اند. این کنترل‌کننده‌ها مبتنی بر روش‌های فضای حالت هستند که به اطلاعات کاملی در مورد حالت‌های سیستم نیاز دارند که اندازه‌گیری یا تخمین آنها مشکل و یا غیر ممکن است.

برخی از نویسندگان از روش‌های مقاوم برای حل مسأله استفاده کرده‌اند [۵]-[۲]. هرچند که روش‌های استفاده شده دارای پاسخ دینامیکی مناسب هستند، اما مقاوم بودن در مقابل نامعینی‌های بزرگ مدل سازی، مورد توجه قرار نگرفته، پایداری کل سیستم تضمین نمی‌شود. همچنین، روش‌های کنترل تطبیقی برای بهبود پایداری سیستم قدرت در مقالات گوناگون استفاده شده‌اند [۹]-[۸]. این روش‌ها نیز براساس شناسایی پارامترهای مدل سیستم در زمان

امروزه با گسترش شبکه‌های قدرت، مسأله پایداری سیستم قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری، تا حد زیادی بر میرا کردن نوسان‌های الکترومکانیکی به وسیله کنترلرهای موجود روی سیستم قدرت استوار است. نوسان‌های الکترومکانیکی پدیده‌ای ذاتی در سیستم‌های قدرت به‌هم پیوسته است که با گسترش سیستم‌های قدرت و بخصوص با اتصال این سیستم‌ها با خطوط فشار ضعیف، پایداری حالت مانگار را محدود کرده، امنیت و عملکرد اقتصادی سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱]. یک راه حل برای میرا کردن نوسان‌های الکترومکانیکی، مجهز کردن ژنراتور به کنترل‌کننده‌ای است که یک سیگنال تکمیلی در ورودی ولتاژ مرجع در تنظیم‌کننده اتوماتیک ولتاژ وارد کند. این وسیله پایدارساز سیستم قدرت (PSS¹) نام دارد. در سه دهه اخیر، تحقیقات زیادی بر روی میرا کردن نوسان‌های الکترومکانیکی به منظور بهبود پایداری سیگنال کوچک با استفاده از کنترل‌کننده‌های میراکننده کمکی^۲ انجام شده است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای طراحی PSS پیشنهاد شده است [۲۲]-[۲]. در این میان PSS‌های کلاسیک که دارای جبران‌کننده‌های پیش‌فاز-پس‌فاز با پارامترهای ثابت هستند، به دلیل ساختار ساده و پیاده‌سازی آسان، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. پارامترهای این دسته PSS‌ها به‌طور معمول با استفاده از روش‌های کنترل کلاسیک و در حوزه فرکانس

1 Power System Stabilizer

2 supplementary damping controllers

ناحیه ای سیستم قدرت معرفی نموده‌اند. که در آن یک کنترل کننده عصبی برای تولید سیگنال مکمل به سیستم اکسایتر^۳ و یک شناساگر عصبی، به منظور شناسایی دینامیک‌های سیستم قدرت و تطبیق پارامترهای کنترل کننده عصبی به کار رفته است. همچنین شبکه‌های عصبی بازگشتی^۴ در [۱۵] برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت استفاده شده اند. بعلاوه در [۱۶] از یک شبکه عصبی به همراه کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی برای طراحی پایدار ساز سیستم قدرت استفاده شده است. شبکه عصبی به منظور تخمین بهنگام بهره‌های کنترل کننده لغزشی هنگام تغییر شرایط کاری سیستم استفاده شده است. در [۱۹]-[۱۷] نسخه‌های متفاوتی از الگوریتم شبکه ایمنی مصنوعی شامل نسخه‌های باینری و حقیقی الگوریتم به منظور طراحی پایدارساز سیستم قدرت و جبرانگر استاتیکی توان راکتیو^۵ به کار رفته است. نویسندگان مقاله در [۲۰] از الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته^۶ (SFL) به منظور تنظیم پارامترهای پایدارساز سیستم قدرت استفاده کرده اند. همچنین الگوریتم بهینه سازی چند هدفه آشوب برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت در [۲۱] استفاده شده است. همچنین، در [۲۲] نویسندگان مقاله یک الگوریتم بهبود یافته چند هدفه شبکه ایمنی مصنوعی را برای طراحی همزمان پایدارسازهای سیستم قدرت معرفی کرده اند.

واقعی هستند که زمان بر بوده، از نظر محاسباتی پیچیده‌اند.

در سالهای اخیر طراحی پایدار سازهای سیستم قدرت با استفاده از روش‌های هوشمند مانند کنترل فازی [۱۳]-[۱۰]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۱۶]-[۱۴] و روش‌های الهام گرفته از پدیده‌های زیستی [۲۲]-[۱۷] بسیار مورد توجه قرار گرفته اند.

یک PSS تطبیقی که از یک سیستم فازی خود تنظیم بهنگام^۱ استفاده می کند، در [۱۰] پیشنهاد شده است. این پایدار ساز شامل یک بلوک شناساگر^۲ بهنگام برای به دست آوردن دینامیک معادل مدل ماشین سنکرون و یک کنترل کننده فازی خود تنظیم است. همچنین یک پایدارساز نروفازی بهنگام سیستم قدرت در [۱۱] پیشنهاد شده است. سیستم نروفازی به دو زیرسیستم تقسیم شده است: یک شناساگر مبتنی بر روش حداقل مربعات بازگشتی و یک کنترل کننده فازی تطبیقی. نویسندگان مقاله در [۱۲]، یک پایدارساز فازی مبتنی بر الگوریتم تکاملی تطبیقی را معرفی کرده اند. الگوریتم تکاملی تطبیقی به منظور بهینه کردن توابع تعلق و فاکتورهای مقیاس کنترل کننده فازی به کار رفته است. همچنین در [۱۳] یک کنترل کننده فازی غیر مستقیم برای میرا کردن مدهای نوسانی بین ناحیه ای سیستم قدرت ارائه شده است. کنترل کننده مذکور شامل یک شناساگر ساختار متغیر برای شناسایی بهنگام مدل نامی سیستم و یک قانون خطی سازی با فیدبک است.

در [۱۴]، نویسندگان مقاله یک پایدارساز مبتنی بر شبکه عصبی را به منظور میرا کردن نوسان‌های بین

3 Exciter

4 Recurrent Neural Network

5 Static Var Compensator

6 Shuffled Frog Leaping Algorithm

1 On line

2 Identifier

موجک، پارامترهای شیفیت موجک‌های انتخاب شده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت فازی استفاده شده است.

به منظور ارزیابی توانایی و قابلیت روش پیشنهادی، نتایج عددی برای یک سیستم قدرت دو ناحیه-چهار ماشینه با طراحی دو PSS برای آن ارائه شده است. همچنین به منظور انجام یک مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از پایدارساز کلاسیک پیشفاز-پسفاز که پارامترهای آن توسط الگوریتم SFL تنظیم شده اند، مقایسه شده‌اند. ویژگی‌های بارز روش پیشنهادی عبارتند از: پیاده‌سازی آسان با استفاده از میکرو کامپیوتر و مقاوم بودن در برابر انواع خطاهای موجود در سیستم قدرت.

ادامه مقاله به صورت زیر سازمان یافته است: برای فراهم نمودن یک زمینه مناسب، بخش دوم به اختصار به توضیح ساختار شبکه‌های موجک فازی و پس از آن، بخش سوم به معرفی الگوریتم جهش قورباغه‌های به هم آمیخته پرداخته است؛ بخش چهارم به معرفی روش طراحی پایدارساز پیشنهادی اختصاص یافته است؛ در بخش پنجم روش طراحی پایدار ساز کلاسیک پیشفاز-پسفاز توضیح داده شده است؛ بخش ششم به معرفی سیستم قدرت مورد مطالعه می‌پردازد و در بخش هفتم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها و مطالعات عددی بر روی این سیستم نمونه آورده شده است؛ سرانجام، بخش هشتم به نتیجه‌گیری نهایی مقاله اختصاص یافته است.

دنیل^۱ و همکارانش، با ادغام تئوری آنالیز با دقت چندگانه تئوری موجک^۲ (MRA)، قابلیت یادگیری شبکه‌های عصبی و توانایی مدل فازی تاکاگی-سوگنو در کاهش پیچیدگی و نامعینی سیستم، شبکه‌های موجک فازی^۳ (FWN) را برای تقریب توابع غیرخطی دلخواه ارائه نمودند [۲۳]. شبکه‌های موجک فازی دارای ساختار ساده، صحت تقریب زنی توابع با دقت بالا و خاصیت آنالیز با دقت چندگانه هستند [۲۴]. تاکنون از شبکه‌های موجک فازی در زمینه‌های گوناگونی مانند شناسایی سیستم، پیش بینی سریهای زمانی، مسائل کنترل و تقریب توابع استفاده شده است [۲۷]-[۲۳].

در این مقاله از شبکه‌های موجک فازی به منظور طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای میرا کردن نوسان‌های فرکانس پایین سیستم قدرت استفاده شده است. در پایدارساز مبتنی بر شبکه موجک فازی (FWN-PSS) پیشنهادی، از اختلاف بین خروجی مطلوب و خروجی واقعی سیستم به منظور آموزش پارامترهای شبکه موجک فازی استفاده شده است. از الگوریتم حداقل مربعات متعامد^۴ (OLS) در تعیین ابعاد شبکه، غربال کردن موجک‌ها به منظور انتخاب موجک‌های مؤثر، تعیین تعداد زیر-شبکه‌های عصبی موجک و تعداد قوانین فازی استفاده شده است. همچنین در این مقاله از یک مکانیزم خود تنظیم مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی SFL به منظور آموزش شبکه موجک فازی و یافتن مقادیر بهینه پارامترهای کنترل کننده شامل وزنه‌های زیر-شبکه‌های عصبی

1 Daniel

2 Multi Resolution Analysis

3 Fuzzy Wavelet Neural Network

4 Orthogonal Least Square

قانون i ام است که برابر مجموع خطی یک مجموعه محدود از موجک‌های $\psi_{M_i, t^k}^{(k)}(\underline{x})$ با پارامتر مقیاس یکسان $M_i \in \mathbb{Z}$ است. در نهایت A_j^i نمایانگر مجموعه فازی است که توسط تابع عضویت گوسی (۲) توصیف می‌شود. $A_j^i(x_j)$ درجه عضویت x_j در A_j^i است.

$$A_j^i(x_j) = e^{-\left(\frac{x_j - p_{j1}^i}{p_{j2}^i}\right)^2} \quad (1)$$

به طوری که p_{j1}^i و p_{j2}^i به ترتیب مرکز و عرض تابع عضویت را نشان می‌دهند.

هر شبکه موجک فازی شامل c زیرشبکه عصبی موجک است. هر زیرشبکه عصبی موجک یک ساختار رگرسیون غیرخطی است که نگاشت ورودی- خروجی را توسط نسخه‌های بسط و شیفته داده شده توابع موجک نمایش می‌دهد [۲۳]. خروجی شبکه عصبی موجک طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^{T_i} w_{M_i, t^k} \psi_{M_i, t^k}^{(k)}(\underline{x}) \quad (3)$$

که در رابطه آن $\psi_{M_i, t^k}^{(k)}(\underline{x})$ تابع فعالیت موجک مربوط به زیرشبکه عصبی موجک i ام است که توسط ضرب تنسور توابع موجک یک بعدی بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \psi_{M_i, t^k}^k &= 2^{M_i/2} \psi^{(k)}(2^{M_i} \underline{x} - t^k) \\ &= \prod_{j=1}^n 2^{M_i/2} \psi^{(k)}(2^{M_i} x_j - t_j^k) \end{aligned} \quad (4)$$

بطوریکه $t_j^k \in \mathbb{R}$ و $M_i \in \mathbb{Z}$ به ترتیب پارامترهای مقیاس و شیفته برای کنترل پهنا و مرکز توابع موجک هستند. همچنین بردار ورودی و w_{M_i, t^k} پارامتر وزن بین لایه مخفی و خروجی زیرشبکه عصبی موجک i ام است.

ساختار شبکه‌های موجک فازی

هر شبکه موجک فازی، برای تقریب یک تابع دلخواه را می‌توان توسط مجموعه‌ای از قوانین فازی به صورت رابطه (۱) توصیف کرد:

$$\begin{aligned} R^i: & \text{ If } x_1 \text{ is } A_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^i \text{ and } \dots \text{ and } x_q \text{ is } A_q^i, \\ \text{Then } \hat{y}_i &= \sum_{k=1}^{T_i} w_{M_i, t^k} \Psi_{M_i, t^k}^{(k)}(\underline{x}) \\ \text{and } w_{M_i, t^k} &\in \mathbb{R}, M_i \in \mathbb{Z}, t^k \in \mathbb{R}^q, x \in \mathbb{R}^q \end{aligned}$$

که R^i قانون فازی i ام ($1 \leq i \leq c$) و c تعداد قوانین فازی است. x_j متغیر ورودی j ام ($1 \leq j \leq q$) و q ابعاد ورودی است. همچنین، $t^k = [t_1^k, t_2^k, \dots, t_q^k]$ که t_j^k مقدار شیفته برای موجک k ام است و $k=1, 2, \dots, S$ که S برابر تعداد کل موجک‌های انتخاب شده است. همچنین T_i تعداد کل موجک‌ها برای قانون فازی i ام و \hat{y}_i خروجی محلی برای قانون i ام است که برابر مجموع خطی یک مجموعه محدود از موجک‌های $\psi_{M_i, t^k}^{(k)}(\underline{x})$ با پارامتر مقیاس یکسان $M_i \in \mathbb{Z}$ است. در نهایت A_j^i نمایانگر مجموعه فازی است که توسط تابع عضویت گوسی (۲) توصیف می‌شود. $A_j^i(x_j)$ درجه عضویت x_j در A_j^i است.

که R^i قانون فازی i ام ($1 \leq i \leq c$) و c تعداد قوانین فازی است. x_j متغیر ورودی j ام ($1 \leq j \leq q$) و q ابعاد ورودی است. همچنین، $t^k = [t_1^k, t_2^k, \dots, t_q^k]$ که t_j^k مقدار شیفته برای موجک k ام است و $k=1, 2, \dots, S$ که S برابر تعداد کل موجک‌های انتخاب شده است. همچنین T_i تعداد کل موجک‌ها برای قانون فازی i ام و \hat{y}_i خروجی محلی برای

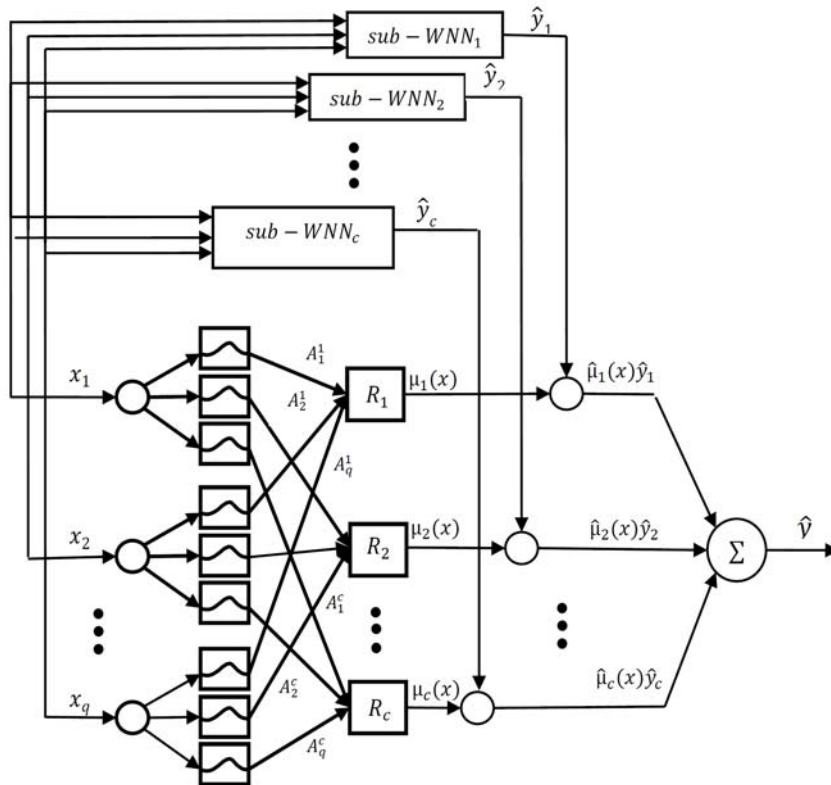
که

$$\hat{\mu}_i(x) = \mu_i(x) / \sum_{i=1}^c \mu_i(x), \quad \mu_i(x) = \prod_{j=1}^q A_j^i(x) \quad (6)$$

بطوریکه $0 \leq \hat{\mu}_i \leq 1$ و $\sum_{i=1}^c \hat{\mu}_i = 1$ است. $\hat{\mu}_i$ درجه شراکت هر شبکه عصبی موجک با سطح دقت M_i را در خروجی کل شبکه تعیین می‌کند. شکل (۱)، ساختار شبکه‌های موجک فازی را نمایش می‌دهد.

مطابق رابطه (۴) در هر قانون فازی یا زیرشبکه عصبی موجک، موجک‌ها تک مقیاسی هستند و دارای پارامتر مقیاس یکسان در تمام ابعاد ورودی هستند. به این ترتیب، با استفاده از مکانیزم استخراج فازی TSK خروجی شبکه موجک فازی (\hat{y}) توسط رابطه (۵) بیان می‌شود.

$$\hat{y}(x) = \frac{\sum_{i=1}^c \mu_i(x) \hat{y}_i}{\sum_{i=1}^c \mu_i(x)} = \sum_{i=1}^c \hat{\mu}_i(x) \hat{y}_i \quad (5)$$



شکل (۱): ساختار شبکه‌های موجک فازی

غذایی در دسترس می‌گردند، الهام گرفته شده است [۲۸].

الگوریتم SFL نخستین بار توسط یوسف و لنزی در سال ۲۰۰۳ برای تعیین اندازه بهینه لوله‌های جدید در توسعه شبکه لوله‌کشی استفاده شد [۲۹]. با توجه به ویژگی‌های این الگوریتم همچون دقت و سرعت همگرایی بالا، از آن پس SFL به‌عنوان یک روش

الگوریتم جهش قورباغه‌ها

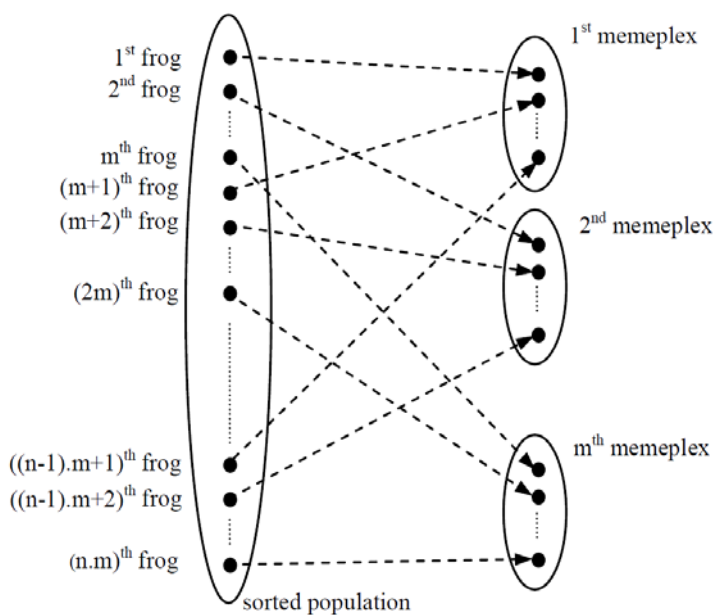
الگوریتم جستجوی جهش قورباغه‌های به هم آمیخته (SFL) یا به طور خلاصه الگوریتم جهش قورباغه‌ها، یک الگوریتم جستجوی فرا ابتکاری جدید مبتنی بر جمعیت اولیه از خانواده الگوریتم‌های ممیتیک است که از تکامل طبیعی گروهی از قورباغه‌ها زمانی که به دنبال محل با بیشترین ذخیره

در مرحله بعدی، با استفاده از تابع برازندگی تعریف شده، هر یک از جواب‌های مسأله ارزیابی می‌گردند. تابع برازندگی با توجه به مسأله تعریف می‌گردد. در ادامه راه‌حل‌ها، با توجه به مقادیر شایستگی‌شان، به صورت نزولی مرتب می‌گردند. سپس کل جمعیت به m بخش مساوی تقسیم می‌شود که به هر کدام از این زیربخش‌ها یک ممپلکس گفته می‌شود. در هر ممپلکس n راه‌حل مسأله قرار می‌گیرد ($n = N/m$) به گونه‌ای که اولین راه‌حل (راه‌حل با بالاترین مقدار شایستگی) در ممپلکس اول قرار می‌گیرد؛ دومین راه‌حل در ممپلکس دوم، m امین امین راه‌حل در ممپلکس m ام و $(m+1)$ امین راه‌حل مجدداً در ممپلکس اول قرار می‌گیرد و این روند تا توزیع تمامی راه‌حل‌ها ادامه می‌یابد. در شکل (۲) روند توزیع قورباغه‌ها یا راه‌حل‌ها در ممپلکس‌ها نشان داده شده است.

بهینه‌سازی کارآمد مورد توجه محققان در زمینه‌های مختلف قرار گرفت.

روند کار الگوریتم SFL

فرآیند این الگوریتم با تولید جمعیت اولیه شروع می‌شود. ابتدا جمعیت اولیه ای شامل N قورباغه SFL $P = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ (قورباغه‌ها در الگوریتم SFL) معادل کروموزوم‌ها در الگوریتم ژنتیک (GA) هستند و نمایانگر یک راه حل شدنی در مسأله بهینه سازی هستند) به صورت تصادفی و در فضای ممکن Ω تولید می‌شود. در یک مسأله S بعدی (S تعداد متغیرها)، موقعیت قورباغه (پاسخ) i ام در فضای جستجو به عنوان یک راه حل قابل قبول در مسأله بهینه سازی در نظر گرفته می‌شود و آن را به صورت بردار $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iS}]^T$ نشان می‌دهند ($i = 1, \dots, N$). موقعیت قورباغه i ام است و $(i = 1, \dots, N)$.



شکل (۲): روند شکل گیری ممپلکس‌ها [28]

تعداد گام‌های تکاملی ممپیک (تعداد تکرارهای جستجوی محلی)، که از قبل مشخص شده است، در هر ممپیکس تکرار می‌شود [۲۸].

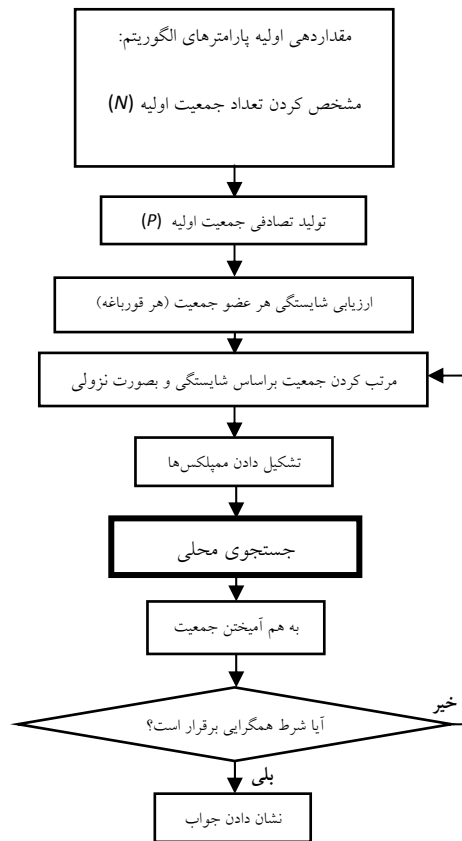
پس از اتمام فرآیند جستجوی محلی در ممپیکس‌ها، تمامی اعضای جمعیت به هم آمیخته و بر اساس ارزش شایستگی آنها مجدداً به صورت نزولی مرتب می‌شوند. سپس دوباره به چند زیر مجموعه تقسیم و روند گفته شده تکرار می‌شود. تکامل جمعیت در ممپیکس‌ها (فرآیند جستجوی محلی) و ترکیب دوباره کل جمعیت تا جایی ادامه پیدا می‌کند که شرط توقف الگوریتم (اتمام تعداد تکرارها یا رسیدن به یک درصد خطای از پیش تعیین شده) برآورده گردد. در این صورت، الگوریتم SFL خاتمه یافته، جواب با بهترین مقدار شایستگی به عنوان بهترین جواب پیدا شده گزارش می‌شود. به منظور درک بهتر، فلوچارت الگوریتم SFL در شکل (۳) نشان داده شده است.

در ادامه، در طی فرآیند تکامل ممپیکس‌ها، در هر ممپیکس یا زیرگروه، موقعیت بدترین راه حل به سمت موقعیت بهترین راه حل (X_b) بروز رسانی می‌شود. موقعیت جدید راه حل بدتر با استفاده از قانون پرش قورباغه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\text{Position change (D)} = r \times (X_b - X_w) \quad (7)$$

$$X_w(\text{new}) = X_w + D, (\|D\| < D_{\max}) \quad (8)$$

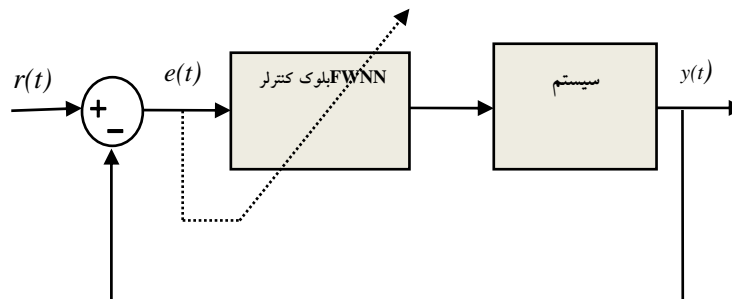
در روابطه فوق، r یک عدد تصادفی یکنواخت بین صفر و یک است و D_{\max} حداکثر مقدار تغییرات مجاز در موقعیت قورباغه در یک پرش می‌باشد. چنانچه این تغییر موقعیت، جوابی با شایستگی بهتر تولید کرد، این جواب جایگزین X_w می‌گردد. در غیر این صورت، محاسبات انجام شده با استفاده از روابط (۷) و (۸) و با جایگزینی بهینه فرامحلی X_g به جای بهینه محلی X_b تکرار می‌شوند. در صورتی که باز هم بهبودی در جواب حاصل نگردد، X_w حذف شده و راه حل جدیدی به صورت تصادفی جایگزین آن می‌گردد. این سیر تکاملی برای



شکل (۳): فلوچارت الگوریتم [28].

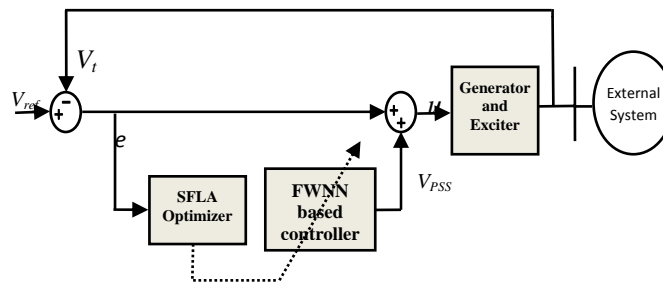
ساختار سیستم کنترلی به صورت شکل (۴) است. همان طور که از این شکل مشخص است، شبکه موجک فازی به عنوان یک کنترل کننده که دارای یک ورودی و یک خروجی است، استفاده شده است.

طراحی پایدار ساز مبتنی بر شبکه موجک فازی در این قسمت، ابتدا به بیان استراتژی کنترلی استفاده شده و سپس به روش طراحی و آموزش FWN-PSS پرداخته می شود.



شکل (۴): ساختار سیستم کنترل.

برای تولید سیگنال کنترلی مطلوب (u) آموزش داده می‌شود. با توجه به استراتژی کنترلی بیان شده، بلوک دیاگرام پایدار ساز شبکه موجک فازی پیشنهادی به صورت شکل (۵) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۵): ساختار کنترلی FWN-PSS پیشنهادی

فرض کنید $e(t)$ به صورت رابطه (۹) تعریف شود:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (9)$$

که در آن $r(t)$ خروجی مطلوب و $y(t)$ خروجی واقعی سیستم است. در سیستم کنترلی پیشنهاد شده، شبکه موجک فازی با استفاده از سیگنال خطای $e(t)$

$$E = \sum_{l=1}^L (V_{ref} - V_t)^2 \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، V_t و V_{ref} به ترتیب خروجی مطلوب ژنراتور و خروجی واقعی و L تعداد داده‌های آموزشی هستند.

از طرفی پارامترهای شبکه موجک که باید تحت آموزش قرار گیرند، عبارتند از: p_{j1}^i, t^k و p_{j2}^i و w_{M_i, t^k} در نتیجه، بردار راه حل یا قورباغه N ام به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$frog_N = [p_{j1}^{iN}, p_{j2}^{iN}, t^{kN}, w_{M_i, t^k}^N]^T \quad (11)$$

در رابطه (۱۱)، T نشان دهنده عملگر ترانزپوز است. بنابراین پارامترهای آزاد پایدار ساز شبکه موجک فازی که لازم است توسط الگوریتم SFL و با استفاده از تابع هدف (۱۰) بروز رسانی شوند به صورت زیر هستند:

با توجه به شکل (۵) خروجی بلوک FWN که همان V_{pss} است، به گونه ای تعیین می‌شود که خطای بین خروجی مرجع (V_{ref}) و خروجی واقعی ژنراتور (V_t) حداقل شود. لذا برای به دست آمدن V_{pss} مطلوب، لازم است پارامترهای شبکه موجک فازی که شامل پارامترهای وزن زیر- شبکه‌های عصبی موجک، شیفت توابع موجک و پارامترهای توابع عضویت فازی هستند به گونه ای تنظیم شوند که خطای $e(t)$ حداقل شود.

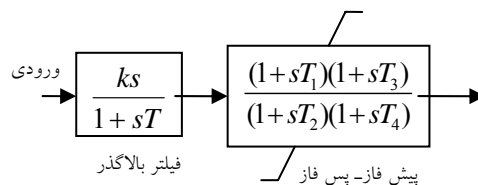
در این مقاله برای تعیین پارامترهای شبکه موجک فازی یا به عبارت دیگر حداقل کردن $e(t) = V_{ref} - V_t$ از الگوریتم بهینه سازی SFL استفاده شده است. در حقیقت، یافتن پارامترهای شبکه موجک فازی تبدیل به یک مسأله بهینه سازی می‌شود که تابع هدف آن به صورت مربعات خطای $e(t)$ بیان و به صورت زیر تعریف می‌شود:

طراحی PSS پیشفاز-پس‌فاز کلاسیک

به منظور انجام یک مقایسه، در این قسمت با استفاده از الگوریتم SFL به طراحی دو پایدار ساز کلاسیک پس‌فاز-پیش‌فاز، برای سیستم قدرت ۲ ناحیه-۴ ماشین شکل (۶) پرداخته می‌شود. دو PSS طراحی شده به ماشین‌های ۲ و ۳ اضافه می‌شوند. مدل PSS استفاده شده مطابق شکل (۶) است.

$$\begin{cases} \underline{p}_{j1}^{iN} = [p_{11}^{1N} \dots p_{11}^{cN} \dots p_{q1}^{1N} \dots p_{q1}^{cN}] \\ \underline{p}_{j2}^{iN} = [p_{12}^{1N} \dots p_{12}^{cN} \dots p_{q2}^{1N} \dots p_{q2}^{cN}] \\ \underline{t}^{kN} = [t_1^{1N} \dots t_1^{SN} \dots t_q^{1N} \dots t_q^{SN}] \\ \underline{w}_{M_i}^N = [w_{M_1}^N \dots w_{M_c}^N] \end{cases} \quad (12)$$

در هر بار تکرار الگوریتم، هر بردار راه حل مطابق با رابطه (۱۱) و با استفاده از تابع هدف (۱۰) ارزیابی شده و بروز رسانی می‌شود.



شکل (۶): مدل پایدار ساز سیستم قدرت

تغییرات زاویه ماشین شماره ۳ است. جدول (۱) نسبت میرایی و مدهای فرکانس پایین سیستم قدرت مورد مطالعه را بدون حضور PSS نشان می‌دهد. همان طور که از جدول (۱) مشخص است، سیستم ناپایدار است.

همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده، ساختار در نظر گرفته شده برای PSSها به صورت (۱۳) می‌باشد.

$$\frac{Ks}{1 + sT} * \frac{(1 + sT_1)(1 + sT_3)}{(1 + sT_2)(1 + sT_4)} \quad (13)$$

سیگنال ورودی در نظر گرفته شده برای PSS1، تغییرات زاویه ژنراتور شماره ۲ و برای PSS2،

جدول (۱): فرکانس، نسبت میرایی و مدهای فرکانس پایین، سیستم مورد مطالعه بدون حضور PSS

مدهای فرکانس پایین	فرکانس	نسبت میرایی
$-0.4958 \pm 7.1190i$	۱/۳۳۰	۰/۰۶۴۹۴۷
$-0.5506 \pm 6.8714i$	۱/۰۹۳۶	۰/۰۷۹۸۷۳
$0.1055 \pm 3.6544i$	۰/۵۸۱۶	-۰/۰۲۸۸۵۷
$-0.3357 \pm 0.6398i$	۰/۱۰۱۸	۰/۴۶۴۶۲۲

حد امکان به سمت چپ محور موهومی منتقل شوند. لذا هر یک از قورباغه‌ها در الگوریتم SFL به صورت یک بردار $K, T, T_1, T_2, T_3, T_4; K, T, T_1, T_2, T_3, T_4$ در نظر

در طراحی دو PSS، هدف به دست آوردن مقدار بهینه پارامترهای K, T, T_1, T_2, T_3, T_4 برای هر PSS است، بگونه‌ای که مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته تا

$$f_1 = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} (\xi_i) \quad (15)$$

$$f_2 = \min_{i \in \{1, \dots, n\}} (-\sigma_i) \quad (16)$$

در پایان، تابع هدف مسأله بهینه سازی به صورت زیر تعریف می شود:

$$Fitness = \frac{1}{w_1 f_1 + w_2 f_2 + C} \quad (17)$$

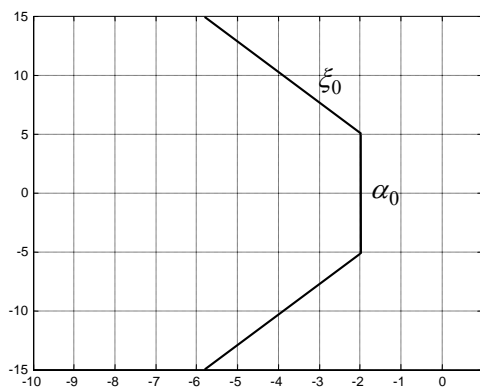
که در آن C یک ثابت دلخواه و به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته می شود. همچنین w_1 و w_2 ضرایب وزنی هستند که در این مقاله بترتیب برابر 0.7 و 0.3 در نظر گرفته شده اند.

توابع معیار (۱۵) و (۱۶) علاوه بر اینکه باعث افزایش نسبت میرایی مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته می شوند، آنها را به سمت چپ محور موهومی نیز انتقال می دهند. به عبارت دیگر، بدترین مقدار ویژه را در داخل یک ناحیه D شکل با محدوده $\sigma_i < \sigma_0$ و $\xi_i > \xi_0$ قرار می دهند (شکل (۷)).

گرفته می شوند. در این مقاله، محدوده هر یک از پارامترها برای طراحی به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$\begin{cases} 1 \leq K \leq 50 \\ 0 \leq T \leq 10 \\ 0 \leq T_i \leq 2, \quad i=1,2,3,4 \end{cases} \quad (14)$$

برای به دست آوردن تابع هدف و در نتیجه میزان شایستگی هر راه حل (هر یک از اعضای جمعیت) به این صورت عمل می کنیم: پس از جایگذاری PSSهای پیشنهادی هر راه حل، مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته محاسبه می شود. سپس، نسبت میرایی تمام مقدار ویژه های سیستم حلقه بسته در بردار $\underline{\xi} = \{\xi_1, \dots, \xi_N\}$ همچنین، مقدار حقیقی مقادیر ویژه ای که نسبت میرایی آنها کمتر از 0.36 است، در بردار $\underline{\sigma} = \{\sigma_1, \dots, \sigma_N\}$ ذخیره می شود. برای هر راه حل دو مقدار معیار تعریف می شود. هر مقدار معیار توسط یک تابع معیار مستقل به دست می آید. این دو تابع معیار به صورت زیر بیان می شوند [22]:



شکل (۷): ناحیه D شکل

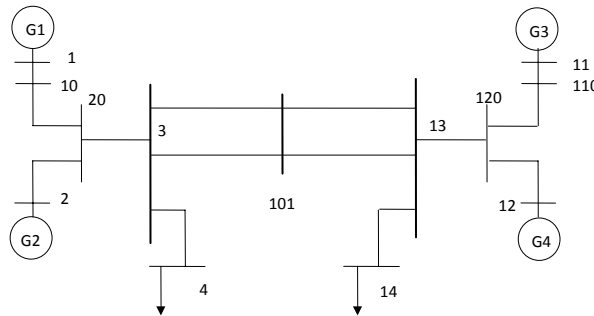
شبه به هم که توسط دو خط انتقال بلند به هم متصل شده اند، تشکیل شده است. در هر ناحیه دو ژنراتور وجود دارد که در ناحیه ۱، به باس های ۱ و ۲ و در

سیستم قدرت مورد مطالعه

شمای کلی سیستم قدرت مورد مطالعه در شکل (۸) نشان داده شده است. این سیستم از دو ناحیه

این مقاله از مدل زیرگذرا، برای ماشین‌ها استفاده شده است. اطلاعات کامل مربوط به مدل سیگنال کوچک سیستم فوق در مرجع [30] آمده است.

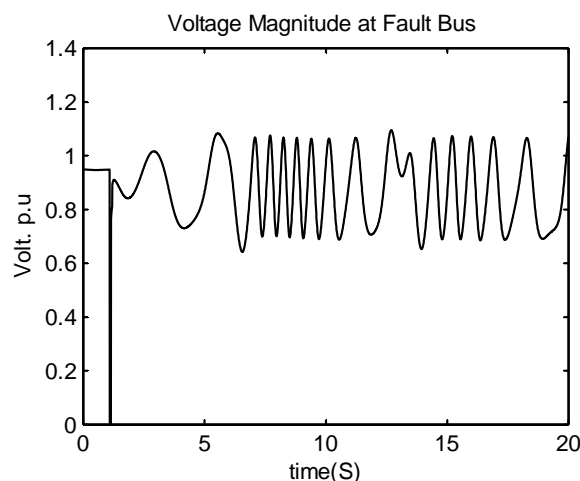
ناحیه ۲، به باس‌های ۱۱ و ۱۲ متصل هستند. سیستم در مجموع دارای ۱۳ باس و ۱۴ خط می باشد. باس ۱ به عنوان باس مرجع در نظر گرفته شده است. در



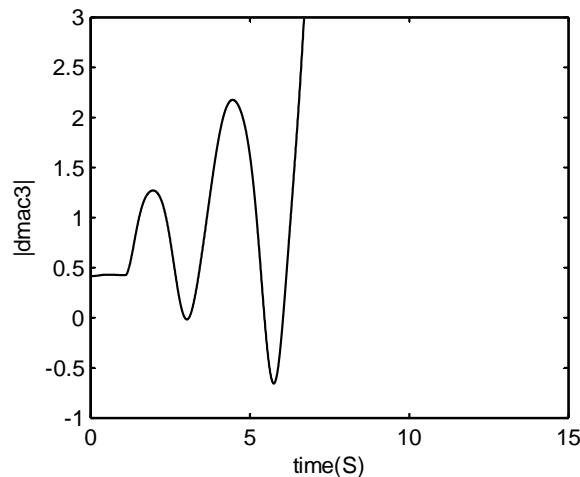
شکل (۸): سیستم قدرت ۲ ناحیه ای-۴ ماشین [30].

که ماشین مرجع است، به ترتیب در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. همان طور که از نتایج شبیه سازی شده در شکل‌های (۹) تا (۱۱) مشاهده می شود، پس از وقوع خطا سیستم دچار نوسان‌های شدید شده و کاملاً ناپایدار است. برای بهبود پایداری در این سیستم، دو PSS به ماشین ۲ و ۳ اضافه می شود.

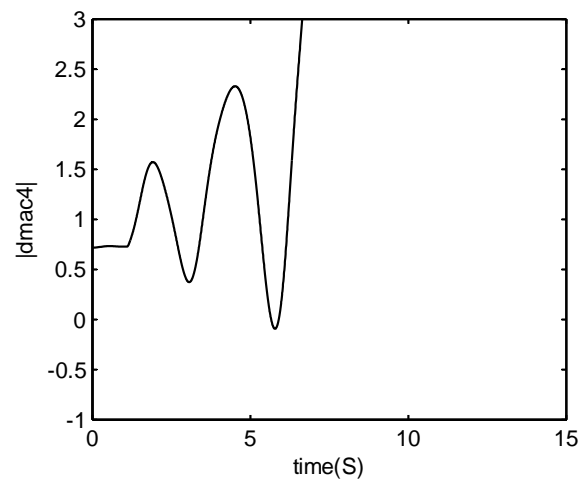
برای بررسی پایداری سیستم مورد مطالعه، یک خطای اتصال سه فاز با زمین در باس ۳ و خط ۳-۱۰۱ در زمان ۰.۱ ثانیه به این سیستم اعمال می شود و در زمان ۰.۱۵ ثانیه خطا از باس ۳ جدا می شود. برای مدت زمان ۲۰ ثانیه، سیستم شبیه سازی می شود که نتایج شبیه سازی شده ولتاژ باس ۳ آن در شکل (۹) و زاویه نسبی ماشین‌ها نسبت به ماشین ۱



شکل (۹): دامنه ولتاژ در باس ۳ برای سیستم بدون PSS



شکل (۱۰): زاویه ژنراتور ۳ پس از اعمال خطا برای سیستم بدون PSS



شکل (۱۱): زاویه ژنراتور ۴ پس از اعمال خطا برای سیستم بدون PSS

نتایج شبیه سازی

در این قسمت طراحی PSSها با استفاده از روش پیشنهادی مقاله و نیز با استفاده از روش توضیح داده شده در بخش (۵) مقاله انجام شده و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه شده است. PSSهای طراحی شده به ماشین‌های ۲ و ۳ اضافه شده اند.

طراحی PSS با استفاده از شبکه موجک فازی

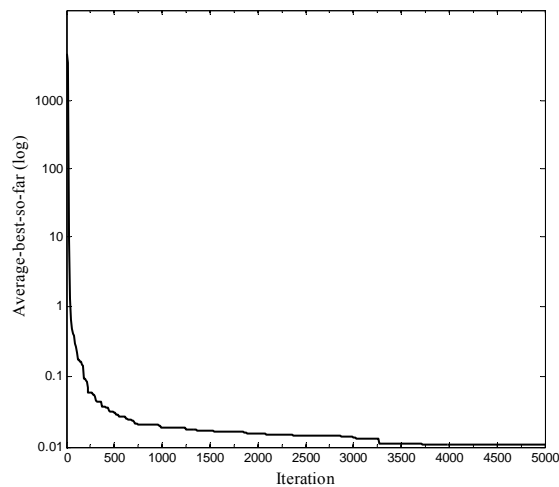
در ابتدا لازم است براساس زوج داده آموزشی و با استفاده از الگوریتم OLS، ابعاد شبکه موجک

فازی، تعداد زیر شبکه‌های عصبی موجک، تعداد قوانین فازی و مقادیر اولیه پارامترهای شبکه تعیین شوند که در اینجا تعداد قوانین به دست آمده برای پایدارساز موجک فازی ۳ قانون است. همچنین از ۱۰۰۰ زوج داده آموزشی که در شرایط مختلف کاری سیستم اندازه گیری شده اند، برای ساخت شبکه استفاده شده است.

از آنجایی که انتخاب پارامترهای الگوریتم‌های SFL تأثیر قابل توجهی بر کیفیت جواب به دست آمده دارد، قبل از حل مسأله آزمایش‌های متعددی

پس از اعمال الگوریتم SFL با ۵۰۰۰ تکرار، بهترین جواب به دست آمده با کمترین هزینه در هر تکرار ثبت شده و نمودار همگرایی الگوریتم برای میانگین ۱۰ مرتبه اجرای مستقل در شکل (۱۲) ترسیم شده است.

انجام گرفته و با توجه به نتایج به دست آمده، مقادیر مناسب برای تعداد ممبرکس‌ها، تعداد تکرارهای محلی و مقدار Dmax به ترتیب برابر با ۲۰، ۱۰۰ و ۲۰ inf. در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد اعضای جمعیت ۳۰۰۰ عضو و نیز تعداد تکرارها که شرط توقف الگوریتم است ۵۰۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۲): مشخصه همگرایی الگوریتم SFL در یافتن پارامترهای بهینه پایدار ساز شبکه موجک فازی

همچنین جدول (۲) نتایج به دست آمده برای پارامترهای پایدار ساز شبکه موجک فازی را نشان می‌دهد.

جدول (۲): پارامترهای پایدار ساز شبکه موجک فازی طراحی شده

پارامتر مقیاس موجک‌های انتخاب شده	۱	۲	
تعداد موجک‌های انتخاب شده	۴	۵	
پارامتر شیف‌ت موجک‌های انتخاب شده	-۰/۸۳۷۸, ۳/۲۳۲ -۴/۸۳۷۳, ۱۲/۶۳۵	۲۱/۱۴۴, -۱/۶۳۳ , -۲/۶۳۳, ۷/۵۴۳	۱۵/۳۴۳, ۱/۵۴۲ ۷/۴۵۳ -۸/۱۶۳, ۴/۳۴۵
وزنهای زیر شبکه‌های عصبی موجک	۴/۱۳۳, ۱۲/۳۲, ۱۸/۸۵۴, -۲/۶۳۵	-۶/۲۴۳, ۳/۶۷۲ -۹/۴۲۵, ۵/۳۵۳	۱۵/۶۵۷, -۲/۵۳۲ ۶/۶۴۳ -۰/۶۵۷, ۱/۳۴۵
پارامتر p_1 برای تعیین مرکز تابع عضویت	-۰/۸۴۲۲	۰/۷۶۸۴	۰/۰۴۵۵
پارامتر p_2 برای تعیین عرض تابع عضویت	۰/۴۳۴۲	۰/۹۴۵۷	۰/۸۲۴۵

طراحی PSS پیش فاز-پس فاز کلاسیک

برای اجرای الگوریتم SFL، جمعیت اولیه و تعداد تکرارها به ترتیب برابر ۱۰۰ و ۵۰ در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد زیر مجموعه‌ها یا مپلکس‌ها (m) برابر ۱۰ و مقدار ماکزیمم جهش هر قورباغه (D_{max}) بی نهایت در نظر گرفته شده است.

جدول (۳) پارامترهایی را که برای PSS1 و PSS2 توسط الگوریتم‌ها SFL به دست آمده، نشان می‌دهد. همچنین وضعیت بدترین مقادیر ویژه سیستم حلقه بسته، پس از جایگذاری PSSها در سیستم قدرت در جدول (۴) ذکر گردیده است.

جدول (۳): مقادیر به دست آمده برای دو PSS

الگوریتم		K	T	T_1	T_2	T_3	T_4
SFL	PSS1	۴۸/۸	۴/۶۷	۰/۶۱۳	۰/۲۵۲	۱/۷۶۹	۰/۵۲۱
	PSS2	۴۸/۹۸	۴/۵۶۳	۱/۹۴۳	۰/۴۲۶	۱/۶۷۱	۱/۰۲۳

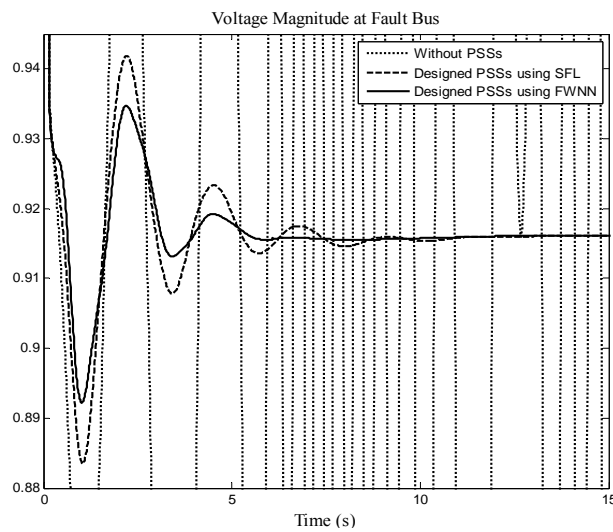
جدول (۴): بدترین مد نوسانی، فرکانس و نسبت میرایی برای سیستم بدون PSS و سیستم با PSS طراحی شده

نسبت میرایی	فرکانس	بدترین مد نوسانی	
-۰/۰۲۸۸۵۷	۰/۵۸۱۶	$۰/۱۰۵۵ \pm ۳/۶۵۴i$	سیستم بدون PSS
۰/۳۰۷	۰/۹۱۹	$-۱/۸۶۵ \pm ۵/۷۸i$	SFLA

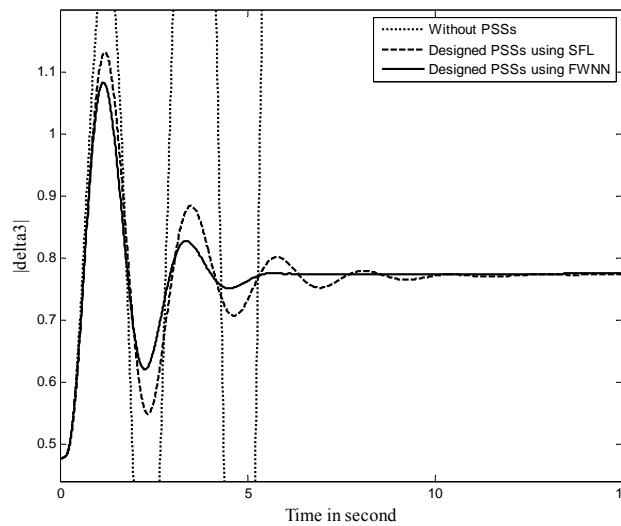
همان طور که از جدول (۴) مشاهده می‌گردد، پایدارسازهای کلاسیک طراحی شده، مدهای نوسانی ناپایدار را به سمت چپ محور موهومی انتقال داده و پایداری سیستم را بهبود داده‌اند.

به منظور ارزیابی PSSهای طراحی شده، آنها را در سیستم آزمایش قرار داده، عملکرد سیستم را با اعمال یک خطای تکفاز به زمین در ۳ آزمایش می‌کنیم. خطای تکفاز را به مدت ۷۰ میلی ثانیه به سیستم اعمال و سیستم را برای مدت ۱۵ ثانیه شبیه

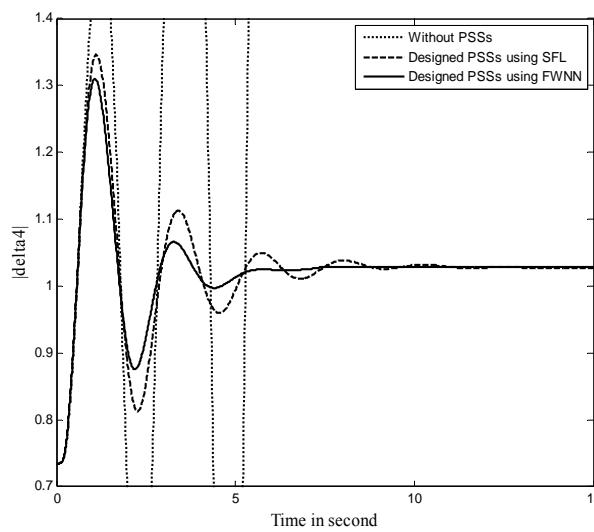
سازی می‌کنیم. نتایج حاصل از عملکرد سیستم، در مقابل خطای تک فاز با زمین در باس ۳ و خط ۳-۱۰۱، پس از جایگذاری پایدارساز طراحی شده با روش‌های مطرح شده و پس از برطرف شدن خطا در شکل‌های (۱۳) الی (۱۵) نشان داده شده است. شکل (۱۳) دامنه ولتاژ را در باس ۳ که خطا در آن رخ داده است، نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب، زاویه ژنراتورهای ۳ و ۴ را نسبت به ژنراتور مرجع (ژنراتور ۱) نشان می‌دهند.



شکل (۱۳): دامنه ولتاژ در باس ۳ پس از اعمال خطای تک فاز با زمین



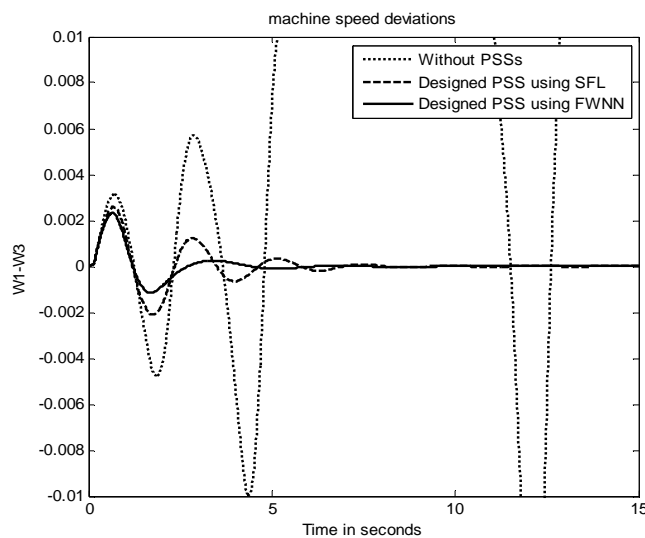
شکل (۱۴): زاویه ژنراتور ۳ پس از اعمال خطای تک فاز با زمین



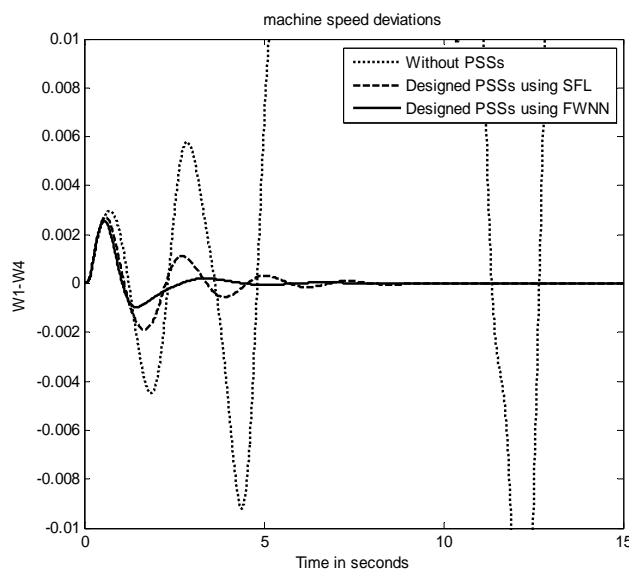
شکل (۱۵): زاویه ژنراتور ۴ پس از اعمال خطای تک فاز با زمین

(۱)، به ازای افزایش ۱۰ درصدی ولتاژ مرجع تنظیم کننده اتوماتیک ولتاژ (V_r) در مدت زمان ۵۰ میلی ثانیه شبیه سازی شده و در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) آورده شده اند. همان‌طور که از شکل‌های (۱۶) و (۱۷) مشاهده می شود، PSS‌های طراحی شده عملکرد خوبی در برابر اغتشاش وارد شده دارند. ضمن اینکه پایدار ساز موجک فازی عملکرد بهتری نسبت به پایدار ساز پیشفاز-پسفاز طراحی شده دارد.

همان‌طور که در شکل‌های فوق مشاهده می شود، پایدارساز مبتنی بر شبکه موجک عملکرد و مشخصات پاسخ گذرای بهتری نسبت به پایدارساز کلاسیک، در میرا کردن نوسان‌های درون ناحیه ای سیستم قدرت مورد مطالعه دارد. به منظور ارزیابی PSS‌های طراحی شده در برابر اغتشاشات کوچک در سیستم تست، نمودارهای تغییرات سرعت ژنراتورهای ۳ و ۴ نسبت به ژنراتور مرجع (ژنراتور



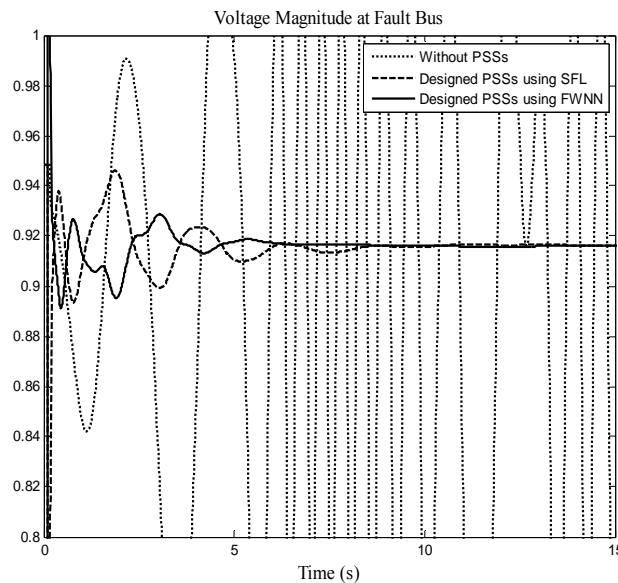
شکل (۱۶): تغییرات سرعت ژنراتور ۳ با در نظر گرفتن اغتشاش



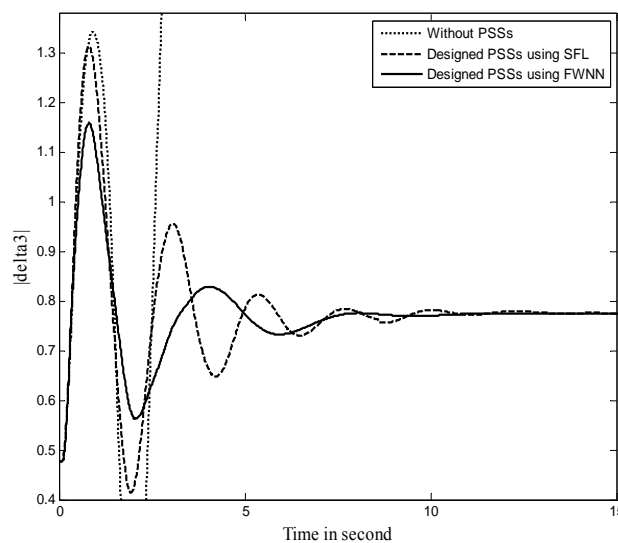
شکل (۱۷): تغییرات سرعت ژنراتور ۴ با در نظر گرفتن اغتشاش

عملکرد و مشخصات پاسخ گذرای بهتری نسبت به پایدارساز کلاسیک، در میرا کردن نوسان‌های درون ناحیه ای سیستم قدرت مورد مطالعه دارد. علاوه بر این، نتایج حاصله مؤید مقاوم بودن پایدارسازهای طراحی شده در مقابل خطاهای گوناگون شبکه هستند.

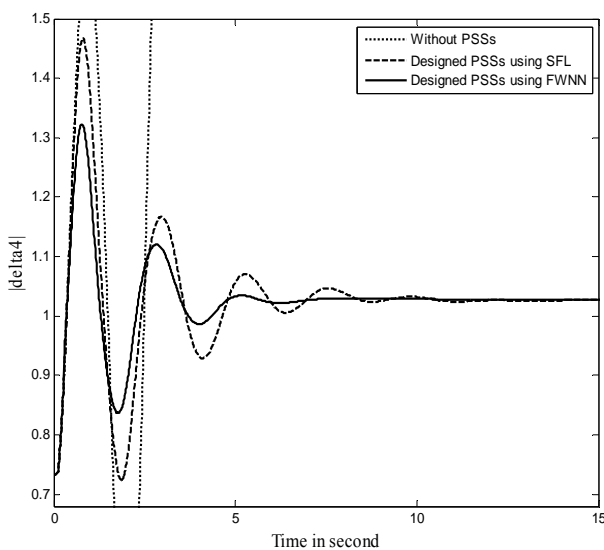
برای بررسی مقاوم بودن سیستم با PSS طراحی شده، عملکرد سیستم در مقابل یک خطای دیگر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های (۱۸) تا (۲۲) عملکرد سیستم را برای خطای سه فاز با زمین در باس ۳ بر روی خط ۳-۱۰۱ نشان می‌دهند. مجدداً همان‌طور که در شکل‌های (۱۸) الی (۲۲) مشاهده می‌شود، پایدارساز مبتنی بر شبکه موجک



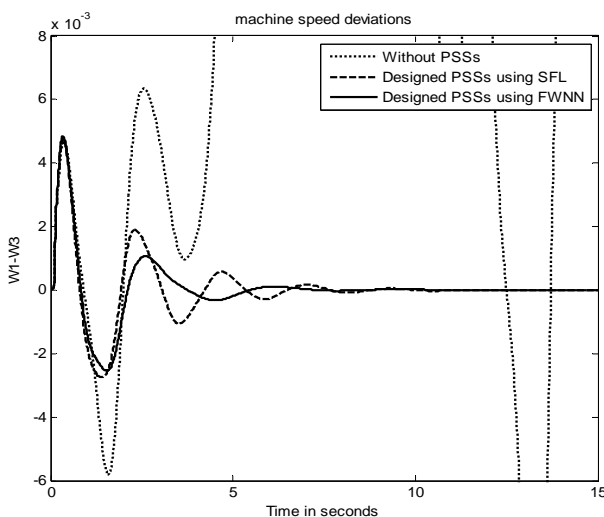
شکل (۱۸): دامنه ولتاژ در باس ۳ پس از اعمال خطای سه فاز با زمین



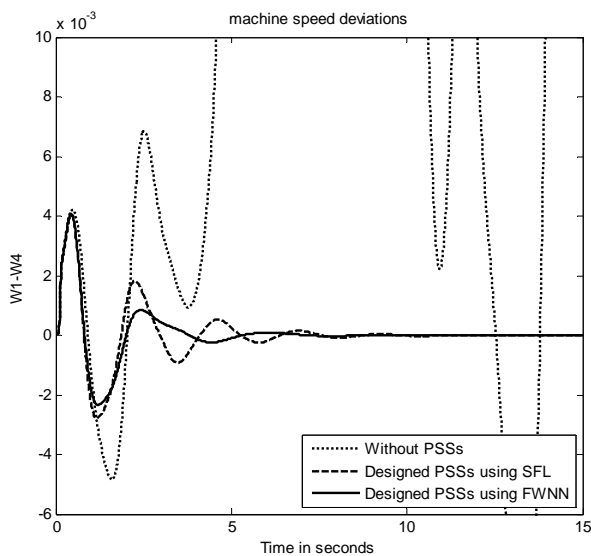
شکل (۱۹): زاویه ژنراتور ۳ پس از اعمال خطای سه فاز با زمین



شکل (۲۰): زاویه ژنراتور ۴ پس از اعمال خطای سه فاز با زمین



شکل (۲۱): تغییرات سرعت ژنراتور ۳ پس از اعمال خطای سه فاز



شکل (۲۲): تغییرات سرعت ژنراتور ۴ پس از اعمال خطای سه فاز

نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش جدیدی مبتنی بر شبکه‌های موجک فازی برای طراحی پایدارسازهای سیستم قدرت ارائه شد. در روش ارائه شده، شبکه موجک فازی به عنوان کنترل کننده استفاده شده، پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم جهش قورباغه‌ها و با در نظر گرفتن خطای بین خروجی مطلوب سیستم و خروجی واقعی به عنوان تابع هدف، تنظیم گردید. به منظور ارزیابی توانایی و قابلیت روش پیشنهادی، نتایج شبیه سازی بر روی یک سیستم آزمایش ۲- ناحیه-۴ ماشین و با اعمال دو نوع خطای سه فاز و تک فاز به سیستم بررسی شد. همچنین، به منظور انجام یک مقایسه، نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از دو پایدار ساز کلاسیک با ساختار پیشفاز-پسفاز مقایسه گردید. نتایج شبیه سازی نشان دهنده قابلیت و برتری پایدار سازهای موجک فازی، از نظر عملکرد و مشخصات پاسخ گذرای سیستم هستند.

منابع

- POD stabilizers”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, 2011.
- [5] Farsangi, M. M., Song, Y. H., Tan, M., “Multi-objective design of damping controllers of FACTS devices via mixed H_2/H_∞ with regional pole placement”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 25, 2003.
- [6] Zhu, C., Khammash, M., Vittal, V. and Qiu, W., “Robust Power System Stabilizer Design Using H_∞ Loop Shaping Approach”, *IEEE Trans. On Power Sysm*, Vol. 18, No. 2, 2003.
- [7] Soliman, M., Elshafei, A. L., Bendary, F., Mansour, W., “Robust decentralized PID-based power system stabilizer design using an ILMI approach”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, 2010.
- [8] Xia, D., Heydt, G. T., “Self-tuning controller for generator excitation control”, *IEEE Trans. PAS*, Vol. 102, , 1983.
- [9] Ramakrishna, G., Malik, O. P., “Adaptive PSS using a simple on-line identifier and linear pole-shift controller”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, 2010.
- [10] Abdelazim, T., and Malik, O.P., “An adaptive Power System Stabilizer Using On-line Self-learning Fuzzy Systems” In *Proceedings, IEEE Power Engineering Society 2003 General Meeting*, July 13-17, Toronto, Canada, 2003.
- [11] You, R., Eghbali, H. J., Nehrir, M. H., “An Online Adaptive Neuro-Fuzzy Power System Stabilizer for Multimachine Systems” *IEEE Transaction on Power System*, Vol. 18, No.1, 2003.
- [12] Hwang, G. H., Kim, D. W. J., Lee, H., An, Y. J.,” Design of fuzzy power system stabilizer using adaptive evolutionary algorithm”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 21, 2008.
- [13] Hussein, T., Saad, M. S., Elshafei, A. L. Bahgat, A.,” Damping inter-area modes of oscillation using an adaptive fuzzy power system stabilizer”, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, 2010.
- [14] Liu, W., Venayagamoorthy, G. K., Wunsch, D. C., “Adaptive Neural Network Based Power System Stabilizer Design”, *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Network*, 2003.
- [1] Kundur, P., "Power system stability and control", McGraw-Hill, USA, 1994.
- [2] Chen, G. P., Malik, O. P., Hope, G. S., Qin, Y. H., and Xu, G. Y., "An adaptive power system stabilizer based on the self-optimization pole shifting control strategy", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 4, 1993.
- [3] Yousef, A. M., Kassem, A. M., "Optimal pole shifting controller for interconnected power system", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, 2011.
- [4] Furini, M. A., Pereira, A. L. S., Araujo, P. B., “Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-

- Optimal Design of Damping Controllers Using Modified Artificial Immune Algorithm", IEEE Trans. syst man and cybernetics, 2011.
- [23] Ho, D. W. C., Zhang, P. A., Xu, J., "Fuzzy wavelet networks for function learning". IEEE Trans. Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 1, 2001.
- [24] Zekri, M., Sadri, S., Sheikholeslam, F., Adaptive Fuzzy Wavelet Network Control Design for Nonlinear Systems. Fuzzy Sets and Systems. Vol. 159, 2008.
- [25] Tang Tzeng S., Design of fuzzy wavelet neural networks using the GA approach for function approximation and system identification, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 161, , 2010.
- [26] Abiyev, R. H., Kaynak, O., Fuzzy wavelet neural networks for identification and control of dynamic plants—a novel structure and a comparative study, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, 2008.
- [27] Abiyev, R. H., Kaynak, O., Identification and control of dynamic plants using fuzzywavelet neural networks, 2008 IEEE International Symposium on Intelligent Control, Texas, USA, 2008.
- [28] Huynh, T. H., "A Modified Shuffled Frog Leaping Algorithm for Optimal Tuning of Multivariable PID Controllers", IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT, 2008.
- [29] Eusuff, M. M., Lansey, K., Pasha, F., "Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization," Engineering Optimization, Vol. 38, No. 2, 2006.
- [30] Chow, J., Power System Toolbox: A Set of Coordinated m-Files for Use with MATLAB, ON, Canada: Cherry Tree Scientific Software, 1997.
- [15] He, J., Malik, O.P, An Adaptive Power System Stabilizer Based on Recurrent Neural Networks. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 4, 1997.
- [16] Duwaish, H. N., Hamouz, Z. A., "A neural network based adaptive sliding mode controller: Application to a power system stabilizer", Energy Conversion and Management, Vol. 52, 2011.
- [17] Kyanzadeh, S., Farsangi, M.M., Nezamabadi-pour, H., Lee, K.Y., Design of Power System Stabilizer Using Immune Algorithm. 14th International Conference on Intelligence Systems Application to power Systems ~ISAP2007~, 2007.
- [18] Kyanzadeh, S., Farsangi, M.M., Nezamabadi-pour, H., Lee, K.Y., Damping of Inter-area Oscillation by Designing a Supplementary Controller for SVC Using Immune Algorithm, IFAC Symposium on Power Plants and Power System Control, 2007.
- [19] Kyanzadeh, S., Farsangi, M.M., Nezamabadi-pour, H., Lee, K.Y., Design of a Supplementary Controller for SVC Using Hybrid Real Immune Algorithm and Local Search, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2008.
- [20] Bijami, E., Askari, J. and Farsangi, M.M., Power System Stabilizers Design by Using Shuffled Frog Leaping, The 6th International Conference on Technical and Physical Problems of Power Engineering, 2010.
- [21] Shayeghi, H., Shayanfar, H.A., Jalilzadeh, S., Safari, A., "Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm", Energy Conversion and Management, Vol. 51, 2010.
- [22] Khaleghi, M., Farsangi, M. M., Nezamabadi-pour, H., Lee, K.Y., "Pareto-