

## طراحی کنترل کننده فازی-عصبی TCSC به منظور میرایی نوسان‌های فرکانس پایین در سیستم‌های قدرت

مهدی بانژاد\*<sup>۱</sup>، ناصر طالبی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی برق و رباتیک- دانشگاه صنعتی شاهرود- شاهرود- ایران

### چکیده

یکی از دلایل بروز نوسان‌های فرکانس پایین<sup>۱</sup> در سیستم‌های قدرت، کمبود گشتاور میرا کننده به منظور غلبه بر اغتشاشات موجود در سیستم‌های قدرت است. در گذشته پایدارساز سیستم قدرت<sup>۲</sup> برای میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین استفاده می‌شد. ادوات<sup>۳</sup> FACTS از قبیل جبران ساز سری کنترل شونده با تریستور<sup>۴</sup> (TCSC) توانایی کنترل توان، کاهش تشدید زیرسنکرون و افزایش پایداری گذرا را دارا هستند. TCSC را می‌توان برای میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین جایگزین پایدارساز سیستم قدرت نمود. در این مقاله برای میرا نمودن نوسان‌های فرکانس‌های پایین از کنترل کننده‌های فازی-عصبی استفاده شده است. در روش ارائه شده در این مقاله، مدل خطی درجه ۳ ماشین سنکرون (هفرون-فیلیپس) وصل شده به باس بینهایت به همراه TCSC استفاده شد و همچنین برای میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین، کنترل کننده فازی-عصبی برای TCSC طراحی و شبیه‌سازی شد. روش ارائه شده برای بارهای متفاوت و برای اغتشاشات مختلفی که به سیستم وارد می‌شوند، شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه سازی بیانگر عملکرد خوب و مناسب کنترل کننده فازی-عصبی در میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین است.

**واژه‌های کلیدی:** جبران ساز سری کنترل شونده با تریستور، سیستم تک ماشین-باس بینهایت، کنترل کننده فازی-عصبی، نوسان‌های فرکانس پایین.

## مقدمه

کنترل TCSC ارائه شده است که از این قبیل می‌توان به تکنیک جایابی قطب<sup>۹</sup> [۹]، کنترل مقاوم [۱۰-۱۱]، کنترل تطبیقی [۱۲-۱۳]، روش‌های کنترل هوشمند [۱۴-۱۶] و کنترل غیر خطی [۱۷-۱۸] اشاره نمود. در [۱۰] با استفاده از روش طراحی در حوزه زمان، کنترل کننده مقاوم برای میرایی نوسان‌های سیستم قدرت ارائه شده است و نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل کننده مقاوم با نتایج حاصل از کنترل کننده پیش فاز-پس فاز با یکدیگر مقایسه شده اند. در [۱۱] کنترل کننده‌ای مقاوم با ساختار ثابت طراحی شده است. طراحی این کنترل کننده با در نظر گرفتن تأخیر انتقال سیگنال‌های اندازه گیری شده توسط واحدهای اندازه گیری فازور (PMU) به عنوان عدم قطعیت انجام شده است. در [۱۲] به منظور بهبود پایداری گذرا، کنترل کننده‌ای غیر خطی و تطبیقی ارائه شده است که در آن پارامترهای کنترل کننده با استفاده از روش‌های تطبیقی و با توجه به شرایط سیستم تعیین می‌شوند. در [۱۳] کنترل کننده میراساز طراحی شده تطبیقی است و پارامترهای سیستم قدرت با توجه به یک مدل ساده ژنتیکی سیستم قدرت، تخمین زده می‌شوند. همچنین در [۱۴] کنترل کننده عصبی، در [۱۵] کنترل کننده خود تنظیم تناسبی-انتگرالی فازی ارائه شده است. در [۱۶] کنترل کننده تطبیقی PID فازی مبتنی بر شبکه عصبی پس انتشار طراحی شده است. در این طرح، پارامترهای کنترل کننده به صورت دینامیکی توسط خروجی شبکه عصبی تنظیم می‌شوند. در [۱۷] کنترل کننده غیر خطی مبتنی بر مدل و در [۱۸] نیز کنترل کننده غیر خطی با استفاده از تابع لیاپانف

مزایای استفاده از ادوات FACTs برای بهبود پایداری سیستم‌های قدرت به طور کامل شناخته شده است [۱-۲]. جبران ساز سری کنترل شونده با ترستور به عنوان یکی از کنترل کننده‌های FACT مورد مطالعه و استفاده بسیاری قرار می‌گیرد [۳]. کنترل کننده‌های FACT دارای قابلیت کنترل سریع شرایط شبکه هستند و می‌توان از این ویژگی FACTs برای بهبود پایداری سیستم قدرت بهره گرفت [۴-۵]. به کارگیری TCSC در خطوط انتقال طولانی به دلیل سودمند بودن آن برای سیستم‌های قدرت مدرن رو به افزایش است؛ TCSC می‌تواند نقش‌های مختلفی را در سیستم قدرت بر عهده بگیرد که از آن جمله می‌توان به میرا نمودن نوسان‌های سیستم‌های قدرت، افزایش توان انتقالی از خط، بهبودی پایداری گذرا، محدود کردن جریان‌های اتصال کوتاه و از بین بردن نوسان‌های زیر سنکرون اشاره نمود [۵-۷].

ساختار کنترل کننده پیش فاز-پس فاز سنتی<sup>۵</sup> به دلیل آسان بودن تنظیم روی خط آن برای کاربردهای موجود در سیستم قدرت ترجیح داده می‌شود [۷]. اما این کنترل کننده نیز محدودیت‌های مربوط به خود را دارد. معمول است که برای بررسی پایداری سیگنال کوچک در سیستم قدرت از مدل خطی هفرون-فیلپس بهره گرفته شود. این مدل سال‌ها استفاده شده و نتایج قابل اعتمادی را در اختیار قرار می‌دهد [۸]. در سال‌های اخیر، بررسی روش‌های کنترل TCSC توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده، به طوری که روش‌های کنترلی مختلفی برای

طراحی شده است.

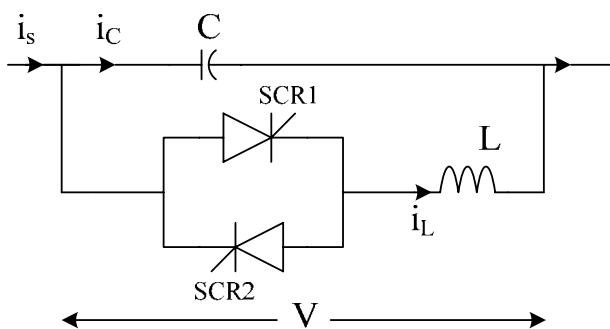
در این تحقیق از کلاسی از شبکه‌های تطبیقی که از لحاظ عملکرد مشابه سیستم استنتاج فازی<sup>۷</sup> هستند، استفاده شده است. کنترل کننده به کار گرفته شده با ساختار فوق، سیستم استنتاج فازی-عصبی<sup>۸</sup> نامیده می‌شود [۱۹]. از مزایای به کارگیری شبکه‌های عصبی می‌توان به قابلیت تطبیق به تغییرات<sup>۹</sup>، قابلیت تحمل آسیب<sup>۱۰</sup>، قابلیت ترمیم<sup>۱۱</sup>، سرعت بالای پردازش به علت پردازش موازی و قابلیت ساخت با تکنولوژی VLSI به صورت تراشه DSP اشاره نمود. برای نشان دادن کارایی کنترل کننده فازی-عصبی طراحی شده، از یک کنترل کننده سنتی پیش فاز-پس فاز که در [۷] با الگوریتم ژنتیک طراحی شده است، استفاده می‌گردد و نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم قدرت با استفاده از این دو کنترل کننده با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

ترتیب بخش های بعدی مقاله به صورت زیر است: در بخش ۲ مدل TCSC تشریح می گردد. در بخش ۳ مدل سیستم قدرت به همراه TCSC ارائه می شود. کنترل کننده فازی-عصبی طراحی شده و همچنین کنترل کننده سنتی پیش فاز-پس فاز در بخش ۴ بررسی می شوند. در نهایت، نتایج شبیه سازی نیز در بخش ۵ نشان داده می شوند.

### مدل TCSC

یکی از ادوات FACTS مشهور که برای بهبود پایداری سیستم قدرت استفاده می شود، TCSC است. مدار اصلی یک TCSC در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۱) مشخص است، TCSC دارای سه قسمت اصلی است: خازن C، القاگر بایپس L و تریستورهای دو سوپه (دو جهتی) SCR1 و SCR2. زاویه آتش تریستورها به نحوی کنترل می‌شوند که راکتانس TCSC با توجه به الگوریتم سیستم کنترل تنظیم شود و معمولاً زاویه آتش به دلیل تغییرات به وجود آمده در پارامترهای سیستم، مجدداً تنظیم می‌گردد. با توجه به شکل (۱) می‌توان مشاهده نمود که با تغییر سوئیچینگ SCR1 و SCR2، راکتانس TCSC می‌تواند متغیر و خازنی یا سلفی باشد. ارتباط بین  $X_{TCSC}$  و زاویه آتش  $\alpha$  به صورت زیر است:

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_c - \frac{X_c^2}{(X_c - X_p)} \frac{\sigma + \sin \sigma}{\pi} + \frac{4X_c^2 \cos^2(\sigma/2)(K \tan(K\sigma/2) - \tan(\sigma/2))}{(X_c - X_p)(K^2 - 1)\pi} \quad (1)$$

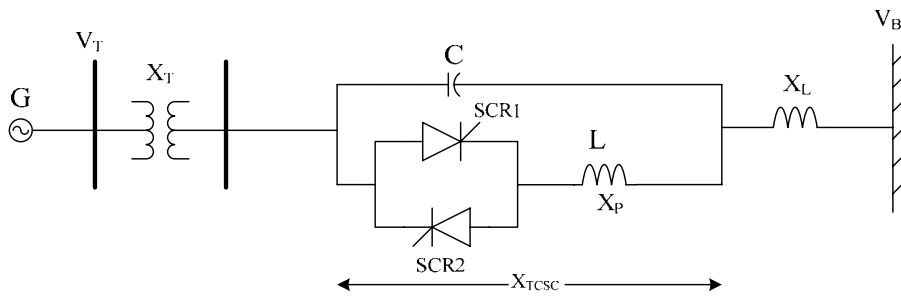


شکل (۱): آرایش TCSC

سیستم قدرت تک ماشین وصل شده به باس بینهایت به همراه TCSC در شکل (۲) نشان داده شده است. در این شکل  $X_T$  و  $X_L$  به ترتیب نشان دهنده راکتانس ترانسفورماتور و راکتانس خط انتقال هستند.

که در رابطه فوق  $X_p$  راکتانس القایی القاگر  $L$  است که موازی با  $C$  قرار دارد،  $\sigma = 2(\pi - \alpha)$  زاویه هدایت کنترل کننده TCSC و  $K = \sqrt{\frac{X_C}{X_p}}$  نسبت جبران است.

مدل سیستم قدرت به همراه TCSC



شکل (۲): سیستم قدرت تک ماشین وصل شده به باس بینهایت به همراه TCSC

$$E_q = \frac{X_{d\Sigma} E'_q}{X_{d\Sigma'}} - \frac{(X_d - X'_d)}{X_{d\Sigma'}} V_B \cos \delta \quad (7)$$

$$V_{Td} = \frac{X_q V_B}{X_{q\Sigma'}} \sin \delta \quad (8)$$

$$V_{Tq} = \frac{X_{Eff} E'_q}{X_{d\Sigma'}} + \frac{V_B X'_d}{X_{d\Sigma'}} \cos \delta \quad (9)$$

$$V_T = \sqrt{V_{Td}^2 + V_{Tq}^2} \quad (10)$$

$$X_{Eff} = X_T + X_L - X_{CF} - X_{TCSC}(\alpha) \quad (11)$$

$$X_{d\Sigma'} = X'_d + X_{Eff} \quad (12)$$

$$X_{q\Sigma'} = X_q + X_{Eff} \quad (13)$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{Eff} \quad (14)$$

معادلات دیفرانسیل غیر خطی برای سیستم تک ماشین وصل شده به باس بینهایت به همراه TCSC به صورت زیر هستند [۸-۱]:

$$\dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M} (P_m - P_e) \quad (3)$$

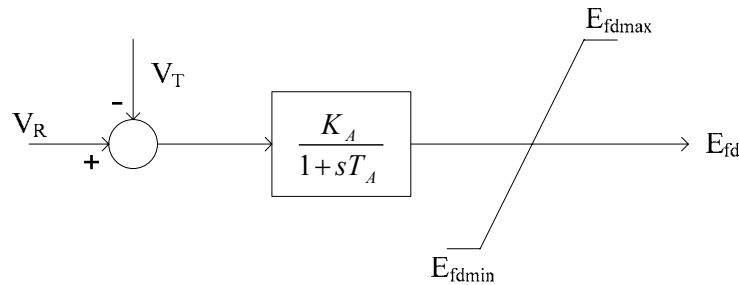
$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} (-E_q + E_{fd}) \quad (4)$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{K_A}{1 + sT_A} (V_R - V_T) \quad (5)$$

که در روابط فوق داریم:

$$P_e = \frac{E'_q V_B}{X_{d\Sigma'}} \sin \delta - \frac{V_B^2 (X_q - X'_d)}{2X_{d\Sigma'} X_{q\Sigma'}} \sin 2\delta \quad (6)$$

همچنین، در این تحقیق از سیستم تحریک IEEE Type- ST1A استفاده شد. بلوک دیاگرام این سیستم تحریک در شکل (۳) آورده شده است [۲۰].



شکل (۳): سیستم تحریک IEEE Type- ST1A [۲۰]

که در معادلات (۱۵) الی (۱۸) داریم:

(۱۹)

$$K_1 = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}, K_2 = \frac{\partial P_e}{\partial E'_q}, K_3 = \frac{\partial E_q}{\partial E'_q}$$

$$K_4 = \frac{\partial E_q}{\partial \delta}, K_5 = \frac{\partial V_T}{\partial \delta}, K_6 = \frac{\partial V_T}{\partial E'_q}$$

$$K_p = \frac{\partial P_e}{\partial \sigma}, K_q = \frac{\partial E_q}{\partial \sigma}, K_v = \frac{\partial V_T}{\partial \sigma}$$

مدل هفرون فیلیپس سیستم تک ماشین وصل شده به باس بینهایت از معادلات خطی شده (۱۵) تا (۱۸) حاصل می‌شود. بلوک دیاگرام به دست آمده از سیستم خطی را می‌توان در شکل (۴) مشاهده نمود.

در شکل (۳)،  $K_A$  و  $T_A$  نشان‌دهنده گین و ثابت

زمانی سیستم تحریک هستند.

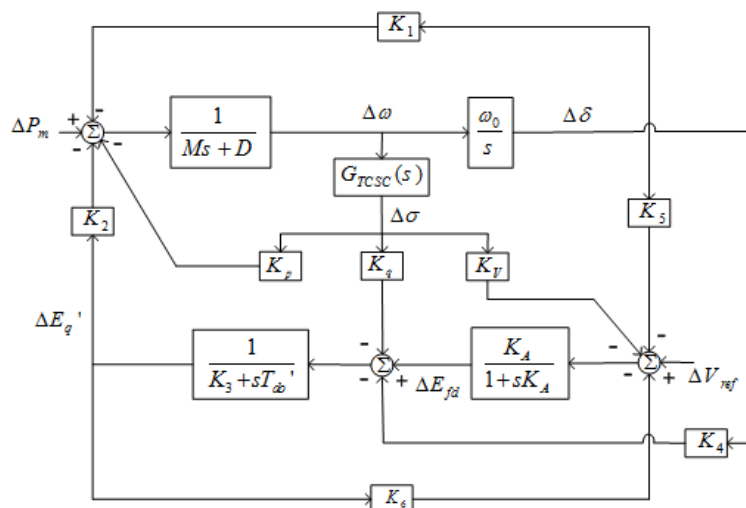
با خطی‌سازی معادلات (۲) الی (۵) حول نقطه کار سیستم قدرت، می‌توان مدل هفرون-فیلیپس سیستم قدرت به همراه ادوات FACTS را به صورت زیر به دست آورد [۲۱]:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (15)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{[-K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q - K_p \Delta \sigma - D \Delta \omega]}{M} \quad (16)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{[-K_3 \Delta E'_q - K_4 \Delta \delta - K_q \Delta \sigma + \Delta E_{fd}]}{T'_{do}} \quad (17)$$

$$\Delta \dot{E}'_{fd} = \frac{[-K_A (+K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q + K_v \Delta \sigma) - \Delta E_{fd}]}{T_A} \quad (18)$$

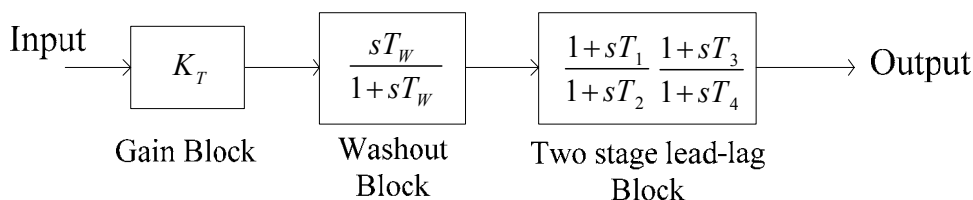


شکل (۴): مدل هفرون فیلیپس سیستم تک ماشین وصل شده به باس بینهایت به همراه TCSC

دیاگرام کنترل کننده پیش فاز-پس فاز در شکل (۵) نشان داده شده است. شکل (۵) شامل بلوک بهره، بلوک Washout و بلوک جبران ساز پیش فاز-پس فاز دو طبقه است.

### طراحی کنترل کننده فازی-عصبی

همان طور که پیش از این اشاره شد، در این تحقیق از دو کنترل کننده برای میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین استفاده شده است. اولین کنترل کننده، کنترل کننده سنتی پیش فاز-پس فاز است. بلوک



شکل (۵): ساختار جبران ساز پیش فاز-پس فاز

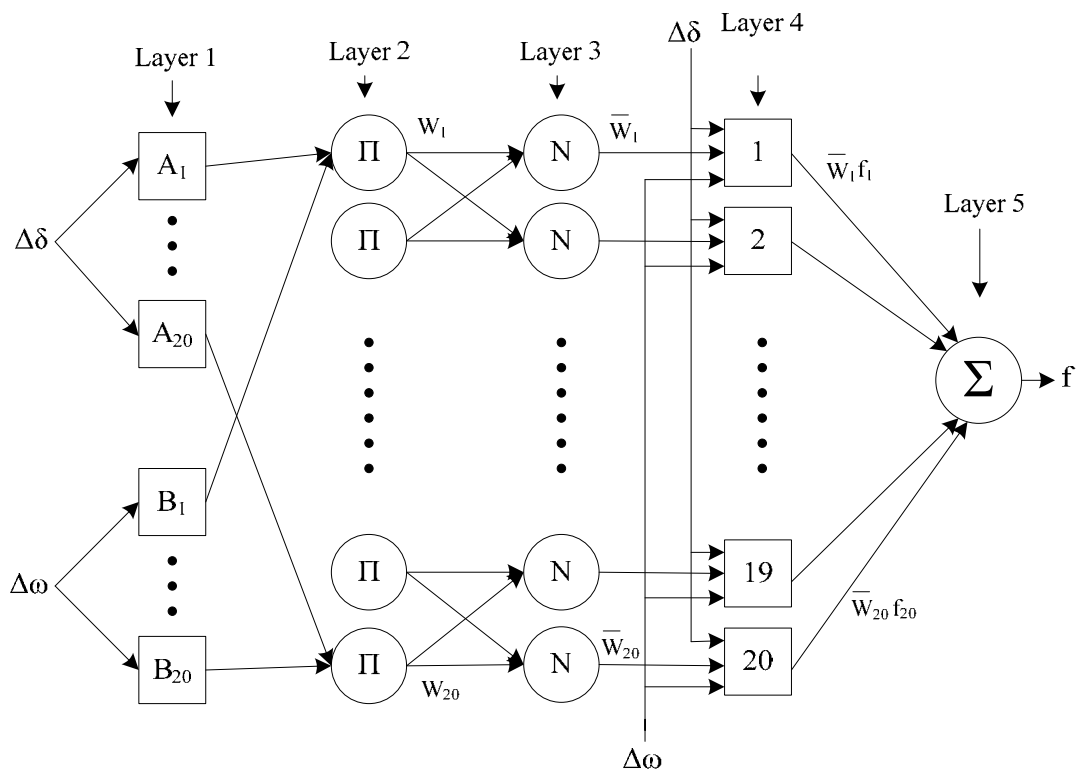
انتخاب شده اند که مقادیر آنها در ضمیمه آورده شده است.

در روش پیشنهادی، کنترل کننده دیگر، کنترل کننده فازی-عصبی است. در این بخش به روند طراحی کنترل کننده فازی-عصبی می پردازیم. در این تحقیق کنترل کننده فازی-عصبی دارای دو ورودی  $\Delta\omega$  و  $\Delta\delta$  و یک خروجی کنترلی است. برای هر یک از این ورودی‌ها ۲۰ تابع تعلق و همچنین ۲۰ قانون

بلوک Washout به صورت یک فیلتر بالاگذر، با ثابت زمانی  $T_W$ ، در نظر گرفته می شود. بدون این بلوک تغییرات حالت ماندگار در ورودی ممکن است باعث تغییر خروجی شود. انتخاب  $T_W$  چندان بحرانی نیست و ممکن است بین ۱ تا ۲۰ ثانیه در نظر گرفته می شود. در این تحقیق از پارامترهای طراحی کنترل کننده پیش فاز-پس فاز در مرجع [۷]، که با الگوریتم ژنتیک به دست آمده، مقادیر پارامترهای کنترل کننده

یک مدل فازی سوگنوی ۲ ورودی با ۲۰ قانون است [۱۹].

در پایگاه قوانین در نظر گرفته شد. شکل (۶) نشان دهنده ساختار کنترل کننده تطبیقی فازی-عصبی برای



شکل (۶): ساختار کنترل کننده تطبیقی فازی-عصبی برای یک مدل فازی سوگنوی ۲ ورودی با ۲۰ قانون

یک تابع گره به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(\Delta\delta) \quad \text{for } i = 1, \dots, 20 \text{ or} \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-20}}(\Delta\omega) \quad \text{for } i = 21, \dots, 40 \end{aligned} \quad (20)$$

که در رابطه (۲۰)،  $A_i$  و یا  $B_{i-20}$  یک برچسب زبانی مانند «کوچک» یا «بزرگ» هستند. در واقع  $O_{1,i}$  نشان دهنده درجه تعلق ورودی‌ها به برچسب‌های زبانی است. تابع تعلق برای  $A$  یا  $B$  را می‌توان تابع زنگوله‌ای تعمیم یافته، که به صورت زیر است، در نظر گرفت:

در شکل (۶) برای یک مدل فازی سوگنوی مرتبه اول، به عنوان نمونه، دو قانون از قوانین اگر-آنگاه فازی را می‌توان به صورت زیر نوشت:

قانون ۱: اگر  $\Delta\delta$  در  $A_1$  است و  $\Delta\omega$  در  $B_1$  است، آن گاه  $f_1 = p_1 \Delta\delta + q_1 \Delta\omega + r_1$  است.

قانون ۲: اگر  $\Delta\delta$  در  $A_2$  است و  $\Delta\omega$  در  $B_2$  است، آن گاه  $f_2 = p_2 \Delta\delta + q_2 \Delta\omega + r_2$  است.

با فرض آنکه خروجی گره  $i$ -ام از لایه  $l$ -ام با  $O_{l,i}$  نشان داده شود و با توجه به شکل (۶) برای لایه‌های مختلف داریم:

لایه ۱: هر گره  $i$  در این لایه یک گره تطبیقی با

لایه ۵: تک گره موجود در این لایه یک گره ثابت است که با برجسب  $\Sigma$  نشان داده شده است. این گره، خروجی کلی را به عنوان جمع تمامی سیگنال‌های ورودی اش محاسبه می‌کند:

$$\text{overall output} = O_{s,i} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (25)$$

با توجه به شکل (۶) و لایه‌های مختلف آن، می‌توان مشاهده نمود که وقتی مقادیر پارامترهای بنیادی ثابت هستند، خروجی کلی را می‌توان به صورت یک ترکیب خطی از پارامترهای نهایی بیان نمود:

$$(26)$$

$$\begin{aligned} f &= \frac{w_1}{w_1 + \dots + w_{20}} f_1 + \dots + \frac{w_{20}}{w_1 + \dots + w_{20}} f_{20} \\ &= \bar{w}_1 (p_1 \Delta \delta + q_1 \Delta \omega + r_1) + \dots \\ &\quad + \bar{w}_{20} (p_{20} \Delta \delta + q_{20} \Delta \omega + r_{20}) \\ &= (\bar{w}_1 \Delta \delta) p_1 + (\bar{w}_1 \Delta \omega) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + \dots \\ &\quad + (\bar{w}_{20} \Delta \delta) p_{20} + (\bar{w}_{20} \Delta \omega) q_{20} + (\bar{w}_{20}) r_{20} \end{aligned}$$

که رابطه فوق نسبت به پارامترهای  $p_i$ ،  $q_i$  و  $r_i$  و  $i=1, \dots, 20$  خطی است. با توجه به رابطه (۲۶) می‌توان پارامترها را به دو مجموعه دسته‌بندی کرد: مجموعه پارامترهای خطی و مجموعه پارامترهای غیر خطی. حال می‌توان با اعمال الگوریتم آموزش هیبرید مقادیر پارامترها را به دست آورد. روش آموزش هیبرید ترکیبی از روش‌های آموزش پارامترهای خطی و پارامترهای غیر خطی است. مراحل آموزش در این روش به صورت زیر است [۱۹]:

- ۱- انتخاب ساختار شبکه و مقادیر اولیه برای پارامترهای خطی شبکه؛
- ۲- اجرای یک بار روش کمترین مربعات خطی<sup>۱۴</sup>

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c_i}{a_i} \right|^{2b}} \quad (21)$$

که  $\{a_i, b_i, c_i\}$  یک مجموعه از پارامترهاست. با تغییر مقدار این پارامترها تابع زنگوله‌ای شکل تغییر خواهد کرد. بنابراین، فرم‌های مختلف توابع تعلق برای مجموعه فازی A حاصل می‌شود. پارامترهای موجود در این لایه را پارامترهای بنیادی<sup>۱۲</sup> می‌نامند. لایه ۲: هر گره در این لایه، یک گره ثابت است که با برجسب  $\Pi$  نشان داده شده است. خروجی گره‌ها در این لایه به صورت زیر است:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(\Delta \delta) \mu_{B_i}(\Delta \omega), \quad i = 1, \dots, 20. \quad (22)$$

هر خروجی گره نشان‌دهنده میزان شدت آتش یک قانون است.

لایه ۳: هر گره در این لایه، یک گره ثابت است که با برجسب N نشان داده شده است. I-امین گره نسبت شدت آتش قانون i-ام را به مجموع شدت‌های آتش شدن تمامی قوانین محاسبه می‌کند:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + \dots + w_{20}}, \quad i = 1, \dots, 20. \quad (23)$$

خروجی‌های این لایه شدت آتش نرمالیزه شده نامیده می‌شوند.

لایه ۴: هر گره i در این لایه یک گره تطبیقی با یک تابع گره به صورت زیر است:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i \Delta \delta + q_i \Delta \omega + r_i) \quad (24)$$

که  $\{p_i, q_i, r_i\}$  مجموعه پارامترهای این لایه است. پارامترهای این لایه را پارامترهای نهایی<sup>۱۳</sup> می‌نامند.

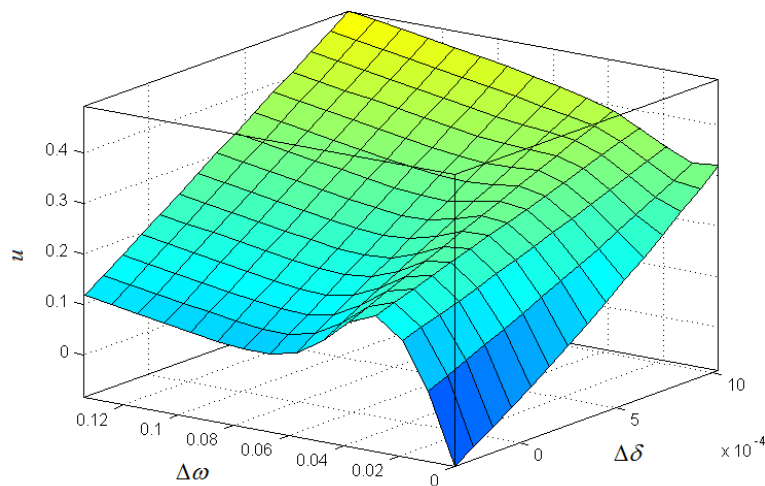


برای محاسبه بهترین جواب پارامترهای خطی؛

- ۳- در صورتی که تابع هدف شرط توقف را برآورده کرد، پایان آموزش شبکه و در غیر این صورت زمان اجرای گام ۴ است؛
- ۴- اجرای یک بار تکرار آموزش بر پایه مشتق برای تازه‌سازی پارامترهای غیر خطی و بازگشت به مرحله

۲.

با توجه به توضیحات ارائه شده و با کمک نرم‌افزار Matlab کنترل کننده فازی-عصبی مورد نظر را می‌توان طراحی کرد. سطح قوانین<sup>۱۵</sup> برای کنترل کننده طراحی شده در شکل (۷) آورده شده است.



شکل (۷): سطح قوانین برای کنترل کننده فازی-عصبی

همان طور که از شکل (۷) دیده می‌شود، کنترل کننده طراحی شده همانند یک کنترل کننده غیر خطی عمل می‌کند، زیرا رابطه بین  $\Delta\omega$  و  $\Delta\delta$  به طور کامل غیر خطی است.

#### نتایج شبیه سازی

در این تحقیق سه حالت مختلف بررسی می‌گردد. در دو حالت اول توان مکانیکی و ولتاژ مرجع به صورت پله‌ای تغییر خواهند نمود. در این دو حالت انحراف سرعت زاویه‌ای ( $\Delta\omega$ ) و انحراف زاویه‌ای روتور ( $\Delta\delta$ ) مشاهده خواهند شد. در حالت سوم گین سیستم تحریک تغییر می‌یابد و پاسخ کنترل کننده‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مقادیر پارامترهای

می‌توان با افزایش تعداد توابع تعلق و همچنین تعداد قوانین موجود در پایگاه قوانین، عملکرد کنترل کننده را بهبود بخشید. با افزایش تعداد توابع تعلق و قوانین زمان شبیه سازی افزایش می‌یابد. در این تحقیق کنترل کننده فازی-عصبی را با تعداد ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ قانون طراحی کردیم و مشاهده کردیم که حالت بهینه، استفاده از ۲۰ قانون است. با انتخاب ۳۰ یا ۴۰ قانون در پایگاه قوانین، نه تنها بهبودی در عملکرد کنترل کننده مشاهده نشد، بلکه زمان شبیه سازی نیز به مراتب افزایش یافت. برای انتخاب بهینه تعداد قوانین و یا توابع تعلق، راهکار مشخصی موجود نیست و تعداد مناسب آنها باید توسط آزمایش‌های متعدد پیدا شود.

سیستم که در شبیه‌سازی‌ها استفاده شد، در ضمیمه جمع‌آوری شده است. همچنین شرایط بارگذاری و نحوه تغییر پارامترهای سیستم در شرایط بارگذاری مختلف در جدول (۱) نشان داده شده است.

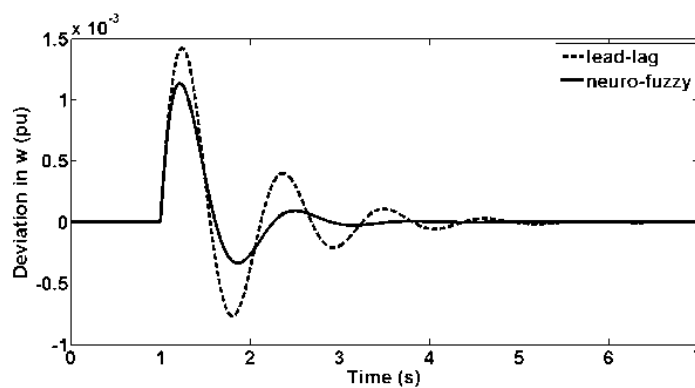
جدول (۱): شرایط بارگذاری

شرایط بارگذاری	P(pu)	Q(pu)	تغییر پارامترها	$\delta_0$ (deg)
نامی	۰/۸	۰/۳۶۹۴	تغییری نداریم	۵۰/۰۴
سبک	۰/۵	۰/۱۶۹	۵۰٪ افزایش در راکتانس خط	۳۴/۳۷
سنگین	۱/۱	۰/۶۴۷۹	۱۰٪ کاهش در راکتانس خط و ۵٪ افزایش در ولتاژ ترمینال	۶۱/۶

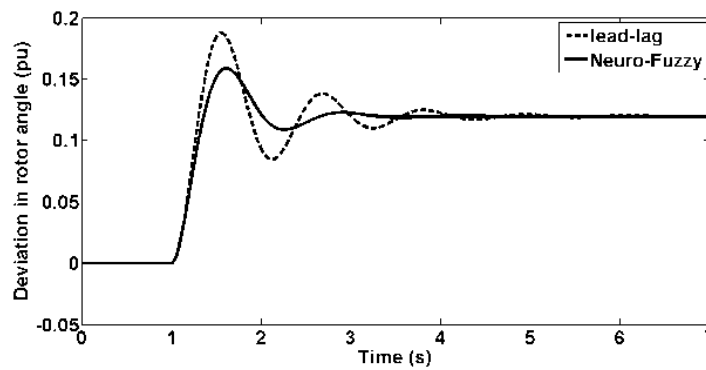
pu در زمان  $t=1s$  انجام گرفت. نتایج شبیه‌سازی برای بار نامی و افزایش پله‌ای توان مکانیکی ورودی در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است.

#### تغییر در توان مکانیکی ورودی

شبیه‌سازی‌ها در این حالت برای تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به میزان افزایش ۱۰٪ ( $\Delta P_m=0.1$ )

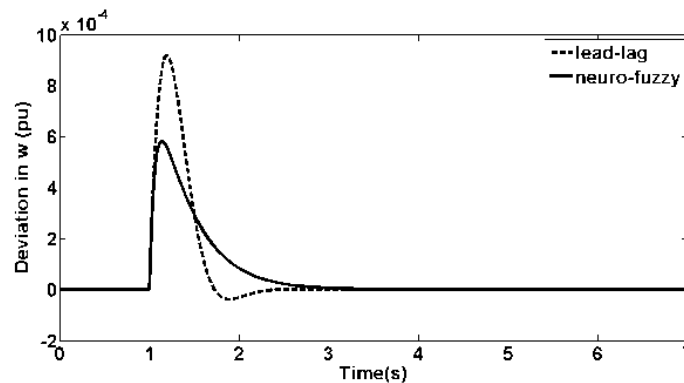


شکل (۸): انحراف سرعت زاویه‌ای بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار نامی

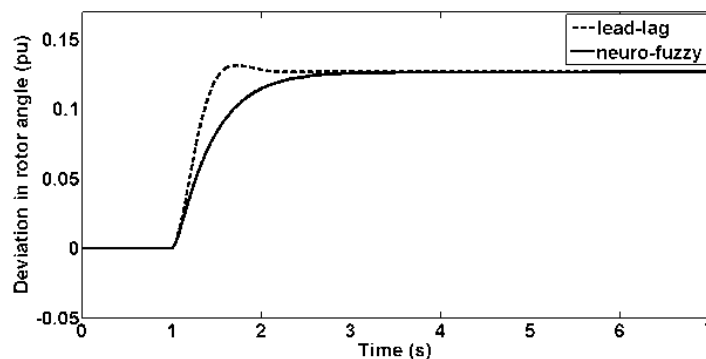


شکل (۹): انحراف زاویه‌ای روتور بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار نامی

نتایج شبیه‌سازی برای بار سبک و تغییر پله‌ای در توان مکانیکی ورودی در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است.

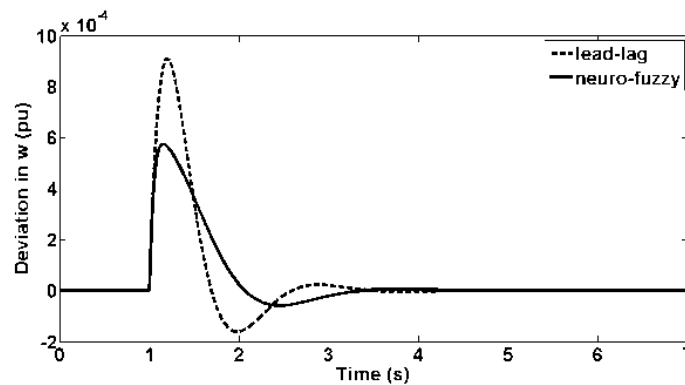


شکل (۱۰): انحراف سرعت زاویه‌ای بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار سبک

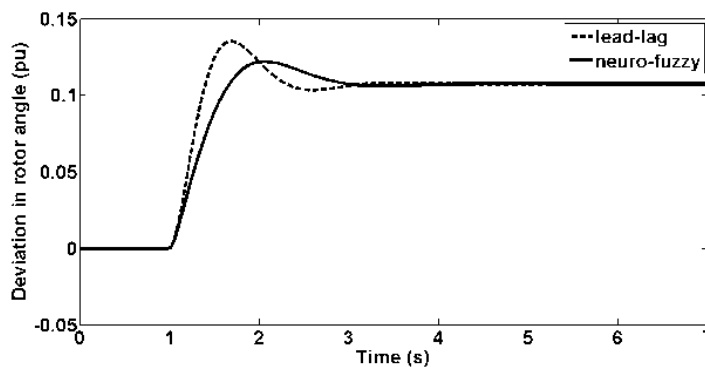


شکل (۱۱): انحراف زاویه‌ای روتور بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار سبک

همچنین، شکل‌های (۱۲) و (۱۳) بیانگر نتایج شبیه‌سازی برای بار سنگین و تغییر پله‌ای در توان مکانیکی ورودی هستند.



شکل (۱۲): انحراف سرعت زاویه‌ای بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار سنگین

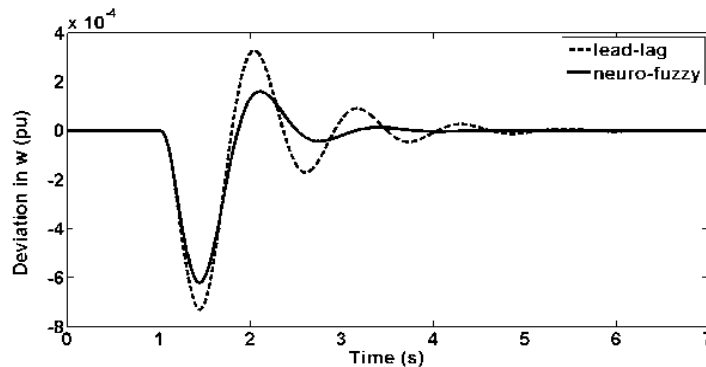


شکل (۱۳): انحراف زاویه‌ای روتور بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار نامی

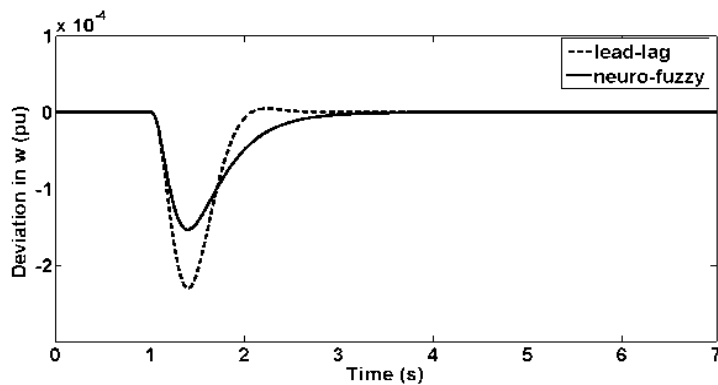
### تغییر در ولتاژ مرجع

در این حالت، ولتاژ مرجع به میزان ۰.۵٪ ( $\Delta V_{ref}$ ) در  $t=1s$  افزایش یافته، نتایج بررسی می‌شوند. شکل‌های (۱۴) تا (۱۶) نشان‌دهنده نتایج شبیه‌سازی برای تغییر در ولتاژ مرجع و به ترتیب تحت بارهای نامی، سبک و سنگین هستند.

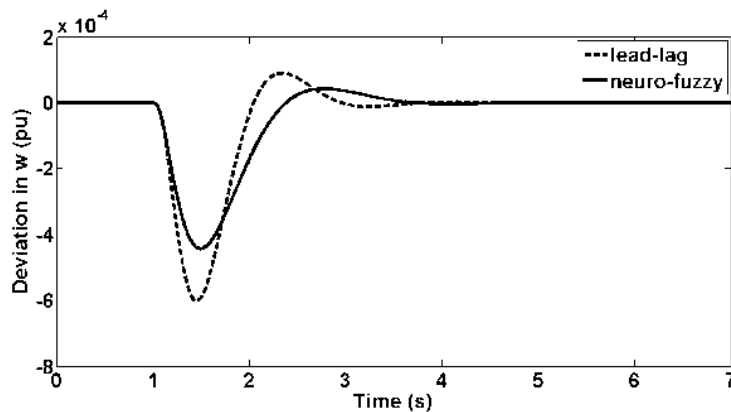
همان‌طور که از شکل‌های (۸) الی (۱۳) مشخص است، پاسخ کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز به خوبی پاسخ کنترل‌کننده عصبی-فازی نیست و کنترل‌کننده فازی-عصبی زمان نشست را کاهش داده است. همچنین، فراجاهش به میزان قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با پاسخ‌های کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز کاهش یافته است.



شکل (۱۴): پاسخ سرعت زاویه‌ای برای ۰.۵٪ تغییر در ولتاژ مرجع در حالت بار نامی



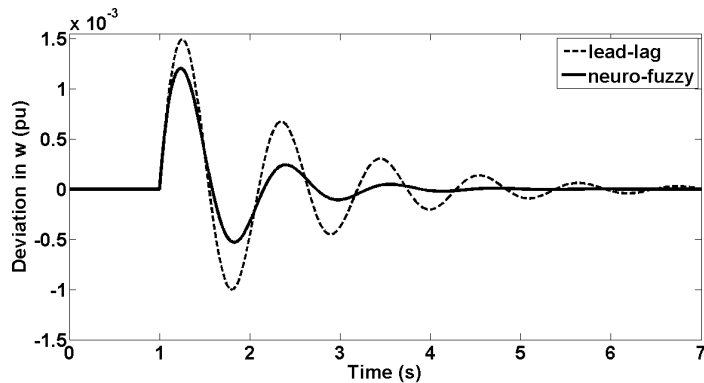
شکل (۱۵): پاسخ سرعت زاویه‌ای برای ۵٪ تغییر در ولتاژ مرجع در حالت بار سبک



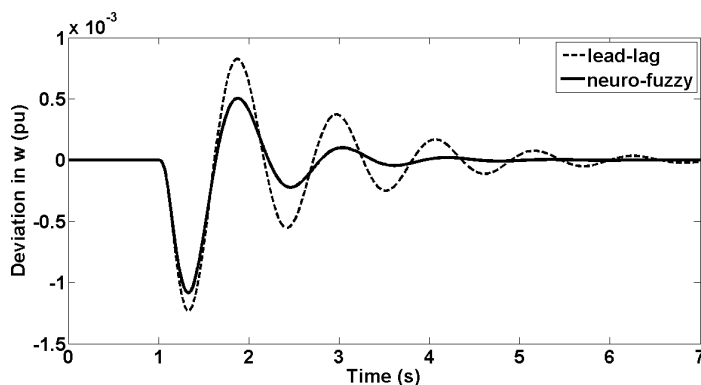
شکل (۱۶): پاسخ سرعت زاویه‌ای برای ۵٪ تغییر در ولتاژ مرجع در حالت بار سنگین

در بار نامی و برای تغییر در توان مکانیکی ورودی و تغییر در ولتاژ مرجع انجام گرفت. نتایج شبیه سازی در شکل های (۱۷) و (۱۸) آورده شده است.

تغییر در گین سیستم تحریک برای بررسی تأثیر تغییر گین سیستم تحریک، در این حالت  $K_A=200$  قرار داده شد و شبیه سازی ها



شکل (۱۷): انحراف سرعت زاویه‌ای بر اثر تغییر پله‌ای توان مکانیکی ورودی به اندازه ۰/۱ pu در حالت بار نامی برای  $K_A=200$



شکل (۱۸): پاسخ سرعت زاویه‌ای برای ۵٪ تغییر در ولتاژ مرجع در حالت بار نامی برای  $K_A=200$

### نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت TCSC در افزایش پایداری گذرا و میرا نمودن نوسان‌های فرکانس پایین سیستم قدرت، در این مقاله کنترل‌کننده تطبیقی فازی-عصبی برای TCSC ارائه گردید. کنترل‌کننده برای سیستم تک ماشین وصل شده به باس بی نهایت به همراه TCSC طراحی شد. سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم شامل کنترل‌کننده فازی-عصبی ارائه شده، برای بارها و شرایط مختلف، با نتایج به دست آمده از سیستم شامل کنترل‌کننده سنتی پیش‌فاز-پس‌فاز مقایسه شد. مقایسه نشان داد که کنترل‌کننده فازی-عصبی، توانایی خوبی در کاهش زمان نشست و کاهش دامنه نوسان‌های فرکانس پایین دارد.

### ضمیمه

مقادیر پارامترهای سیستم در شبیه‌سازی:

**Generator:**  $H = 4.0, D = 0, X_d = 1.0, X_q = 0.6, X'_d = 0.3, T'_{d0} = 5.044, f = 60$

**Exciter (IEEE Type ST1):**  $K_A = 50, T_A = 0.04$

**Transmission line and Transformer:**  $(X_L = 0.7, X_T = 0.1) = 0.0 + j0.8$

**TCSC Controller:**  $X_{TCSC0} = 0.25, X_C = 0.21, X_P = 0.0525$

**Lead-Lag compensator:**  $K_T = 62.9885, T_1 = 0.1210, T_2 = 0.1531, T_3 = 0.2931, T_4 = 0.2728$

همان‌طور که از شکل‌های (۱۷) و (۱۸) مشخص است، افزایش گین سیستم تحریک باعث افزایش نوسان‌های سیستم می‌شود، اما در این حالت نیز کنترل‌کننده فازی-عصبی در مقایسه با کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد.

در نتیجه، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فازی-عصبی نرخ میرایی نوسان‌های را افزایش و دامنه نوسان‌های فرکانس پایین را کاهش می‌دهد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی بین کنترل‌کننده سنتی پیش‌فاز-پس‌فاز و کنترل‌کننده فازی-عصبی طراحی شده در این مقاله، نشان می‌دهد که کنترل‌کننده فازی-عصبی زمان نشست، میزان فراجش و دامنه نوسان‌های فرکانس پایین را کاهش می‌دهد. همچنین با توجه به قابلیت تطبیق کنترل‌کننده فازی-عصبی، این کنترل‌کننده نسبت به عدم قطعیت‌های ساختاری و پارامتری موجود در سیستم، مقاوم است؛ در صورتی که این قابلیت در کنترل‌کننده پیش‌فاز-پس‌فاز وجود ندارد و در واقع، در این سیستم کنترل با تغییر ساختار یا پارامترهای سیستم، باید یک کنترل‌کننده جدید طراحی شود.

- Interconnection Considering Multiple Power Flow Scenarios and External Disturbances", IEEE Trans. On Power Systems, pp.226, 2009.
- [11] Saejia, M. Ngamroo, I., "Wide Area Robust TCSC Controller Design Considering Communication Delay Uncertainty", International Conference on Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 996, 2010.
- [12] X. X. Zhou, J. Liang, "Nonlinear Adaptive Control of TCSC to Improve the Performance of Power Systems", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol.146, Issue 3, pp. 301 – 305, 1999.
- [13] Johansson, N. Angquist, L. Nee, H. P., "An Adaptive Controller for Power System Stability Improvement and Power Flow Control by Means of a Thyristor Switched Series Capacitor", IEEE Trans. On Power Systems, pp.381, 2010.
- [14] D. Chen, R. R. Mohler, L. K. Chen, "Synthesis of Neural Controller Applied to Flexible AC Transmission Systems", IEEE Trans. On Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 47, Issue 3, pp. 376-388, 2000.
- [15] Hameed, Salman, "Power System Stability Enhancement Using Reduced Rule Base Self-Tuning Fuzzy PI Controller for TCSC", 2010 IEEE PES, pp.1, 2010.
- [16] Dai Wenjin Chen Xiangjie Lin Qingsheng, "Fuzzy Self-Adaptive PID Control Based on BP Neural Network for TCSC", International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, pp.178, 2009.
- [17] Wagh, S. R. Kamath, A. K. Singh, N. M., "Nonlinear Model Based Control with Prior Knowledge Based Learning", 7<sup>th</sup> Asian Control Conference, pp. 1576, 2009.
- [18] Wagh, S. R. Kamath, A.K. Singh, N. M., "A Nonlinear TCSC Controller Based on Control Lyapunov Function and Receding Horizon Strategy for Power System Transient Stability Improvement", IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA, pp. 813, 2009.
- [19] Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, Eiji Mizutani, " Neuro-Fuzzy and Soft
- منابع:
- [1] Barkhordary, M.; Nabavi, S.M.H.; Motlagh, M.R.J.; Kazemi, A, "A Robust Feedback Linearization Controller Design for Thyristor Control Series Capacitor to Damp Electromechanical Oscillations", IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 2587 – 2592, 2006.
- [2] B. H. Li, Q. H. Wu, P. Y. Wang, X. X. Zhou, "Influence of the Transient Process of TCSC and MOV on Power System Stability", IEEE Trans. On Power Systems, VOL. 15, NO. 2, pp. 798-803, 2000.
- [3] A. Claudio, T. F. Zeno, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, pp. 158-165, 1999.
- [4] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission System", IEEE Press, 2000.
- [5] Sidhartha Panda, R. N. Patel, N. P. Padhy, "Power System Stability Improvement by TCSC Controller Employing a Multi-Objective Genetic Algorithm Approach", International Journal of Intelligent Systems and Technologies, pp. 266-273, 2006.
- [6] L Fan, A. Feliachi and K. Schoder, "Selection and Design of a TCSC Control Signal in Damping Power System Inter-Area Oscillations for Multiple Operating Conditions", Electrical Power & Energy Sys., pp. 127-137, 2002.
- [7] S. Panda, S. C. Swain, A. K. Baliarsingh, C. Ardil, "Optimal Supplementary Damping Controller Design for TCSC Employing RCGA", International Journal of Intelligent Systems and Technologies, pp. 36-45, 2009.
- [8] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill.
- [9] X. Chen, N. Pahalawatththa, U. Annakkage, C. Kumble, "Controlled Series Compensation for Improving the Stability of Multi Machine Power Systems", IEE Proc.–Gen. Trans. Distrib, pp. 361–366, 1995.
- [10] Simoes, A. M. Savelli, D. C. Pellanda, P. C. Martins, N. Apkarian, P., "Robust Design of a TCSC Oscillation Damping Controller in a Weak 500-kV

[21] H. F. Wang, F. J. Swift, "A Unified Model for the Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part I: Single-machine Infinite-bus Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, pp.941-946, 1997.

Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence", Prentice-Hall, 1997.

[20] IEEE Std 421.5-1992, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", 1992.

فهرست علائم			
مجموع راکتانس راستای محور d	$X_{d\Sigma}$	زاویه آتش تریستور	$\alpha$
مجموع راکتانس راستای محور q	$X_{q\Sigma}$	القاگر بایپس TCSC	L
مجموع راکتانس گذرا راستای محور d	$X_{d\Sigma}'$	ظرفیت خازن TCSC	C
مجموع راکتانس گذرا در راستای محور q	$X_{q\Sigma}'$	راکتانس TCSC	$X_{TCSC}$
زاویه هدایت کنترل کننده TCSC	$\sigma$	راکتانس نامی خازن ثابت C	$X_c$
نسبت جبران	K	راکتانس القایی القاگر L	$X_p$
فرکانس سیستم	$\omega_0$	راکتانس مؤثر	$X_{Eff}$
ولتاژ ترمینال	$V_T$	راکتانس خازن سری ثابت بیرونی	$X_{CF}$
ولتاژ باس بینهایت	$V_B$	راکتانس محور d ژنراتور سنکرون	$X_d$
ولتاژ مرجع	$V_R$	راکتانس محور q ژنراتور سنکرون	$X_q$
		راکتانس گذرا محور d ژنراتور سنکرون	$X_d'$
		راکتانس گذرا محور q ژنراتور سنکرون	$X_q'$

زیر نویس ها:

- 1- Low Frequency Oscillations
- 2- Power System Stabilizer (PSS)
- 3- Flexible AC Transmission Systems
- 4- Thyristor Controlled Series Compensator
- 5- Conventional Lead-Lag Compensator
- 6- Pole Placement Technique
- 7- Fuzzy Inference System
- 8- ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
- 9- Ability of Adapting to Changes
- 10- Fault Tolerance Capability
- 11- Recovery Capability
- 12- Premise Parameters
- 13- Consequent Parameters
- 14- LSE: Least Square Error
- 15- Rules Surface