

# بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چندماشینه با کاربرد TCSC

سعید اباذری<sup>۱</sup>، استادیار، صادق قانعی<sup>۲</sup>، دانش آموخته کارشناسی ارشد

۱- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - abazari-s@eng.sku.ac.ir

۲- دانشکده فنی مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - sadegh.ghh@gmail.com

**چکیده:** پایداری و میرایی نوسانات در سیستم‌های قدرت به هنگام وقوع خطا، عامل مهمی است که توجه زیادی از طراحان سیستم قدرت را به خود معطوف می‌نماید. توسط پایدارساز سیستم قدرت (PSS) می‌توان در میرایی نوسانات در اثر اغتشاشات کوچک عمل نمود. سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر (FACTS) در سیستم‌های قدرت نیز می‌تواند در بهبود پایداری دینامیکی یا میرایی نوسانات با فرکانس کم مؤثر باشند. یکی از عناصر FACTS، TCSC است که با تغییر راکتانس مؤثر خط می‌تواند به سرعت، در میرایی نوسانات کمک نماید. در این مقاله از TCSC در بهبود پایداری دینامیکی با طراحی یک کنترل‌کننده مناسب که از روش‌های فازی بهره می‌گیرد، استفاده شده است. در روش پیشنهادی نیازی به تنظیم پارامترها وجود ندارد و به صورت on-line کنترل‌کننده می‌تواند در میرایی نوسانات کمک کند. نتایج شبیه‌سازی، قدرت کنترل‌کننده TCSC به روش کنترل فازی را در میرایی مناسب نوسانات در یک سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت (SMIB) و سیستم چندماشینه (۹ باس IEEE) نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** TCSC، کنترل‌کننده فازی، پایداری دینامیکی، سیستم‌های چندماشینه.

## Improvement of Dynamic Stability of Multi-Machine Power Systems using TCSC and Fuzzy Control Method

S. abazari<sup>1</sup>, S. ghaedi<sup>2</sup>

1, 2 -Faculty of Engineering, University of shahrekord, shahrekord, Iran

**Abstract:** When an error occurs in a power system, stability and damping of fluctuations is an important factor on which needs to pay attention during the system design. The use of the Power System Stabilizer (PSS) can damp the fluctuations due to small disturbances. Also Flexible AC transmission Systems (FACTS) in a power system, can be effective in improvement of the dynamic stability and in damping of low-frequency fluctuations. One of the FACTS elements is TCSC that can help rapid damping of the oscillation by changing the reactance of the line. In this paper, a TCSC with properly designed fuzzy controller is used to improve the dynamic stability. The proposed method does not need to set the parameters and the on-line controller can help damping of the fluctuations. Simulation results show that the fuzzy based TCSC controller can damp the fluctuations effectively in a power system connected to a single machine infinite bus (SMIB) and also in a multi-machine system (9 BUS IEEE).

**Keywords:** TCSC, Fuzzy Controller, Dynamic Stability, Multi-machine Systems.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۸

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۴/۳۰

نام نویسنده مسئول: دکتر سعید اباذری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی مهندسی

## ۱- مقدمه

در این بررسی‌ها روش‌های کنترلی استفاده شده یا مبتنی بر روش‌های کلاسیک بوده یا با استفاده از کنترل کننده‌های PI یا PID فازی بوده است.

استفاده از تئوری منطق فازی توجه زیادی را برای طراحی یک قانون کنترلی مؤثر به منظور افزایش پایداری سیستم قدرت به خود جلب کرده است [۱۶].

در ساختار کنترل کننده PI-Fuzzy، به دلیل وجود انتگرال‌گیر، حاشیه پایداری کاهش می‌یابد [۱۷]. هم‌چنین ضرایبی برای قسمت PI وجود دارد که برای نقطه کار تنظیم می‌شوند که با تغییر نقطه کار، عملکرد سیستم افت می‌کند. بنابراین با استفاده از کنترل کننده فازی پیشنهادی به جای کنترل کننده PI-Fuzzy، با تغییر شرایط، سیستم مقاوم بوده و نتایج مطلوبی را ارائه می‌دهد.

در مقاله حاضر، یک کنترل کننده فازی پیشنهاد گردیده که علاوه بر مزایای کنترل کننده‌های PI فازی دیگر نیاز به تنظیم پارامتری در کنترل کننده ندارد. این مزیت باعث می‌شود که سیستم بتواند حتی با تغییر توپولوژی به خوبی عمل نماید و رفتار مناسبی در جهت میرایی نوسانات داشته باشد به طوری که هم در سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و هم چندماشینه پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی قدرت کنترل کننده پیشنهادی را نشان می‌دهد.

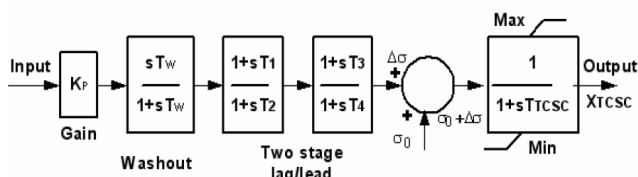
در ادامه، مختصری راجع به ساختار کنترل کننده TCSC و هم‌چنین ساختار کنترل کننده فازی بحث می‌نماییم. سپس به معرفی روش کنترل کننده پیشنهادی و پیاده‌سازی آن در سیستم تک‌ماشینه و چندماشینه می‌پردازیم.

## ۲- ساختار کنترل کننده TCSC

به‌طور معمول یک ساختار Lead-Lag برای کنترل کننده TCSC استفاده می‌شود. ساختار کنترل کننده TCSC در شکل (۱) نشان داده شده است که شامل یک بلوک با بهره  $K_p$ ، یک بلوک RESET و دو مرحله بلوک جبران ساز فاز است [۱۸].

بلوک جبران ساز فاز خصوصیات پیش‌فازی مناسب برای جبران پس‌فازی بین سیگنال ورودی و خروجی را فراهم می‌کند. بلوک RESET، به‌عنوان یک فیلتر بالاگذر با ثابت زمانی  $T_w$  است. نمایش رفتار سیگنال پایدارساز TCSC به‌صورت رابطه (۱) است.

$$U_{TCSC} = K_{TCSC} \left( \frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left( \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left( \frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \Delta\omega \quad (1)$$



شکل (۱): ساختار کنترل کننده TCSC

یکی از مسائل مهم در سیستم‌های قدرت پایداری است که می‌تواند به پایداری زاویه‌ای و پایداری ولتاژ تقسیم شود. در پایداری زاویه‌ای معمولاً پایداری گذرا و پایداری دینامیکی بیش‌تر مورد توجه قرار می‌گیرد. معمولاً اغتشاشات کوچک می‌توانند در درازمدت تأثیرات مخربی بر روی سیستم قدرت به همراه داشته باشند که مطالعه پایداری دینامیکی از این دسته است [۱].

در بهبود پایداری دینامیکی معمولاً از پایدارسازهای سیستم قدرت استفاده می‌شود. پایدارساز سیستم قدرت از سیگنال سرعت فیدبک گرفته و آن را تبدیل به ولتاژ معادل توسط کنترل کننده Lead-Lag می‌نماید و این ولتاژ را به مرجع اضافه می‌نماید [۴-۲].

در سیستم‌های قدرت، تنها با استفاده از PSS معمولی ممکن است میرایی نوسانات درون ناحیه‌ای با اندازه کافی بهبود داده نشود [۵]. هم‌چنین در این روش ما نیاز به تنظیم پارامترها و هماهنگی بین عناصر داریم.

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های سریع در زمینه الکترونیک قدرت، فرصت‌های جدید برای صنعت برق به وجود آورده است. سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر<sup>۲</sup> که قابلیت تغییر توان انتقالی روی خطوط را دارند و از عناصر الکترونیک قدرت بهره می‌گیرند، دارای سرعت قابل ملاحظه‌ای در تغییر قدرت انتقالی هستند [۶].

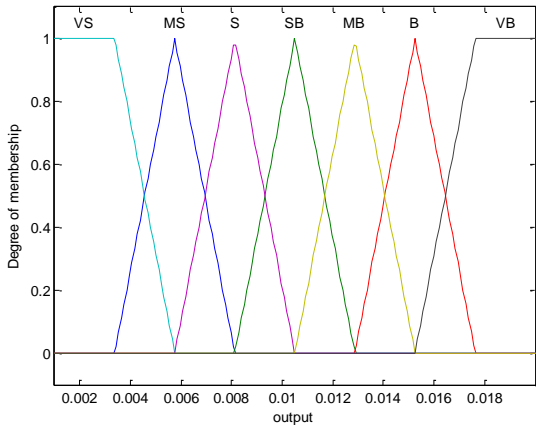
یکی از عناصر FACTS که می‌تواند به بهبود پایداری دینامیکی یا میرایی کمک قابل ملاحظه‌ای نماید، خازن سری کنترل‌شونده با تریستور<sup>۳</sup> (TCSC) است. علت استفاده از TCSC این است که دارای ساختار ساده و هم‌چنین سیستم کنترلی ساده‌ای نسبت به سایر عناصر FACTS است. البته لازم به ذکر است که از این عناصر می‌توان در موارد دیگر نظیر پایداری گذرا نیز استفاده نمود [۷].

در ابتدا روش‌های مختلف کنترلی مبتنی بر تحلیل مقادیر ویژه با استفاده از TCSC برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت مطرح گردید [۸-۱۰]. در ادامه به کمک تجزیه و تحلیل TCSC، مدل‌های خطی و فضای حالت مربوط به آن با دقت بسیار بالایی به دست آمده که این مدل‌ها برای اغلب کاربردها از جمله طراحی کنترل کننده‌های TCSC و بررسی مسئله پایداری از جمله پایداری دینامیکی به روش تحلیلی و روش‌های غیرخطی نظیر کنترل لغزان صورت پذیرفت [۱۱-۱۳]. این روش‌ها دارای پیچیدگی تجزیه و تحلیل می‌باشند. برای رفع این نقیصه روش‌های کنترلی با بهره‌گیری از منطق فازی نظیر کنترل کننده PI فازی خودتنظیم شونده<sup>۴</sup> (STFPIC) مطرح گردید [۱۴]. در ادامه کنترل کننده هیبرید فازی و PID، برای کنترل TCSC در جهت بهبود میرایی مدهای درون ناحیه‌ای نوسانات استفاده شد، که برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی آن از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است [۱۵].

### ۳- کنترل کننده فازی

در بحث پایداری دینامیکی و پایدارسازها معمولاً از سیگنال سرعت بهره می‌گیرند. در اینجا نیز به‌عنوان سیگنال کنترلی از فیدبک سرعت استفاده شده است. شکل (۲) ساختار کلی روش مورد استفاده در طراحی کنترل کننده فازی را نشان می‌دهد. سیگنال  $e(t)$  و مشتق  $e(t)$  ورودی‌های سیستم فازی هستند. در طراحی این کنترل کننده از تابع عضویت مثلثی یکنواخت برای توابع عضویت ورودی و از  $\gamma$  تابع عضویت مثلثی یکنواخت برای تابع عضویت خروجی استفاده شده است. شکل‌های (۳) تا (۵) توابع عضویت مربوطه را نشان می‌دهند.

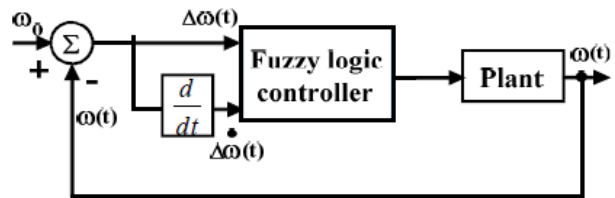
قوانین کنترل کننده فازی بر اساس هر مرحله، پاسخ‌های گذرا و ثابت مطلوب، طراحی شده است. مقادیر خروجی که انتظار می‌رود بهبود یابد، عناصر فازی هستند که با توجه به خطا و مجموع خطا به دست می‌آیند. این قوانین کنترل کننده فازی در جدول (۱) بیان شده است.



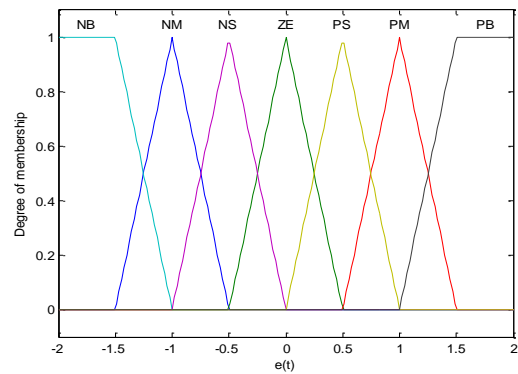
شکل (۵): تابع عضویت خروجی

جدول (۱): قوانین فازی

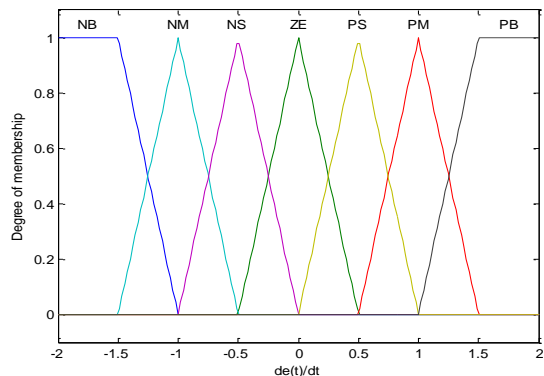
$e(t)/\Delta e(t)$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	VS	VS	VS	SB	MS	S	SB
NM	VS	VS	VS	SB	SB	SB	MB
NS	VS	MS	S	SB	SB	MB	B
ZE	VS	MS	S	SB	MB	B	VB
PS	MS	S	SB	SB	B	VB	VB
PM	S	SB	S	SB	VB	VB	VB
PB	SB	S	M S	SB	VB	VB	VB



شکل (۲): ساختار کنترل کننده فازی



شکل (۳): تابع عضویت ورودی  $e(t)$



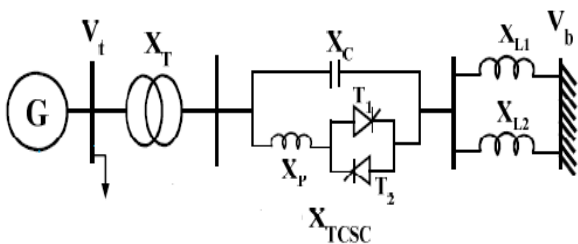
شکل (۴): تابع عضویت ورودی  $de(t)/dt$

### ۴- بررسی سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین

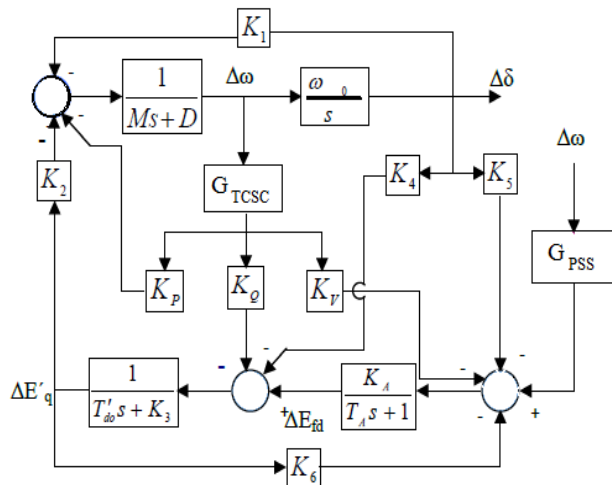
#### بی‌نهایت به همراه TCSC

شبکه قدرت مورد مطالعه در این بخش سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت، به همراه TCSC است که در شکل (۶) نشان داده شده است.

$V_t$  و  $V_b$  به ترتیب ولتاژ باس ژنراتور و ولتاژ شین بی‌نهایت هستند.  $X_T$  راکتانس ترانسفورماتور،  $X_{L1}$  و  $X_{L2}$  راکتانس خطوط انتقال،  $X_C$  راکتانس خازنی،  $X_P$  راکتانس القایی و  $X_{TCSC}$  راکتانس TCSC است.



شکل (۶): سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت به همراه TCSC

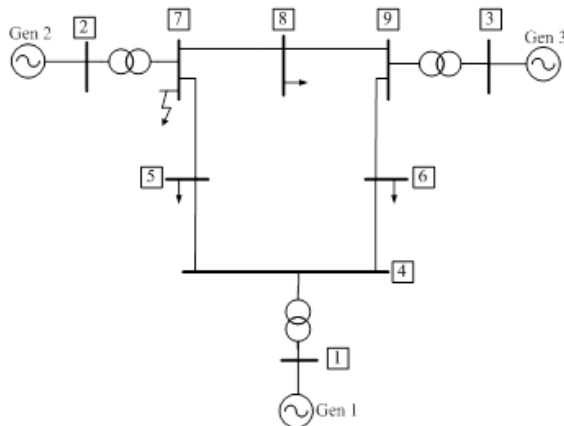


شکل (۷): مدل هفرون فیلیپس سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت به همراه TCSC

با توجه به معادلات حالت، ملاحظه می‌شود که با سیگنال کنترلی  $X_{TCSC}$  می‌توان رفتار سیستم را تحت کنترل در آورد.

### ۵- بررسی سیستم قدرت چندماشینه (۹ باسه IEEE) به همراه TCSC

سیستم قدرت چندماشینه مورد مطالعه در این بخش، سیستم ۹ باسه IEEE است که در شکل (۸) نمایش داده شده و پارامترهای آن نیز در پیوست آورده شده است [۱۹-۲۰].



شکل (۸): سیستم ۹ باسه IEEE

در سیستم ۹ باسه شکل (۸) کنترل‌کننده TCSC در باس ۶ قرار می‌گیرد و مقدار راکتانس TCSC در ماتریس ادمیتانس تأثیر داده شده است. برای ساده‌سازی تجزیه و تحلیل، تمام گره‌ها به‌جز گره‌های داخلی ژنراتورها با استفاده از رابطه کاهش کرون حذف شده‌اند که رابطه برحسب زیر ماتریس‌های خود به‌صورت زیر است:

معادلات نوسان ماشین به‌صورت زیر بیان می‌شوند:

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

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2} H^{-1} (P_m - P_e - D(\omega - \omega_0)) / \omega_0 \quad (3)$$

در معادلات بالا  $\delta$  و  $\omega$  به ترتیب زاویه و سرعت روتور هستند و  $\omega_0$  سرعت سنکرون است.  $P_m$  و  $P_e$  به ترتیب توان ورودی و توان خروجی ژنراتور هستند.

سیستم تحریک نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{E}_{fd} = (T_A)^{-1} (-E_{fd} + K_A (V_{ref} - V_T)) \quad (4)$$

$K_A$  و  $T_A$  به ترتیب بهره و ثابت زمانی سیستم تحریک می‌باشند.

$$\dot{E}'_q = (T'_{d0})^{-1} (E_{fd} - E'_q - (X_d - X'_d) I_d) \quad (5)$$

معادلات (۲) تا (۵) بیانگر معادلات دینامیکی غیرخطی ژنراتور سنکرون می‌باشند که از مدل درجه ۳ برای مطالعه پایداری استفاده شده است. مدل هفرون فیلیپس سیستم قدرت با TCSC و PSS توسط خطی‌سازی معادلات غیرخطی سیستم قدرت حول نقطه کار به دست می‌آید. مدل بلوک دیاگرام مربوطه در شکل (۷) نشان داده شده است. در این مدل علاوه بر ضرایب  $K_1$  تا  $K_6$  که تعریف آن‌ها در [۱] آمده است، ضرایبی نظیر  $K_V$ ،  $K_Q$  و  $K_P$  که ارتباط نزدیکی با کنترل‌کننده TCSC دارد به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$K_V = \frac{\partial V_T}{\partial \sigma}; K_Q = \frac{\partial E'_q}{\partial \sigma}; K_P = \frac{\partial P_e}{\partial \sigma} \quad (6)$$

در این مطالعه با در نظر گرفتن متغیرهای حالت، مدل فضای حالت به‌صورت زیر است:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (7)$$

که داریم:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ \frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} \\ -\frac{KAK_5}{TA} & 0 & \frac{KAK_6}{TA} & -\frac{1}{TA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_P}{M} \\ -\frac{K_Q}{T'_{d0}} \\ -\frac{KAK_V}{TA} \end{bmatrix} [\Delta X_{TCSC}] \quad (8)$$

خطی سازی معادلات دینامیکی غیرخطی سیستم قدرت حول نقطه کار به صورت روابط (۲۰) تا (۲۲) است.

$$\Delta \dot{E}'_q = N1\Delta E'_q + N2\Delta\delta + N4\Delta E_{fd} \quad (20)$$

$$\Delta \dot{\omega} = W1\Delta E'_q + W2\Delta\delta + W3\Delta\omega \quad (21)$$

$$\Delta \dot{E}_{fd} = S1\Delta E'_q + S2\Delta\delta + S4\Delta E_{fd} \quad (22)$$

در این مطالعه با در نظر گرفتن متغیرهای حالت، مدل فضای حالت به صورت (۷) است و ماتریس A فضای حالت برای سیستم چندماشینه به صورت (۲۴) است، که X به صورت (۲۳) است.

$$X = [E'_{qi}, \delta_i, \omega_i, E_{fdi}] \quad (23)$$

$$A = \begin{bmatrix} N1 & N2 & 0 & N4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W1 & W2 & W3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ S1 & S2 & 0 & S4 & 0 & S5 & 0 & 0 \\ T1 & T2 & T3 & 0 & -inv(Tw) & 0 & 0 & 0 \\ T4 & T5 & T6 & 0 & T7 & T8 & 0 & 0 \\ T9 & T10 & T11 & 0 & T12 & T13 & T14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & inv(Tt) & -inv(Tt) \end{bmatrix} \quad (24)$$

پارامترهای ماتریس A در پیوست آورده شده است.

## ۶- نتایج شبیه سازی

اتصال کوتاه هایی که در سیستم قدرت روی می دهند نه تنها باعث قطع کامل شارژ انرژی می شوند، بلکه باعث افزایش انرژی در بخش هایی از سیستم قدرت نیز می شوند. دامنه خود این اغتشاشات ممکن است به مراتب بیش تر از جریان نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورهای سیستم باشد. تداوم شارژ چنین جریان هایی باعث بالا رفتن دمای تجهیزات و آسیب رساندن به سیستم قدرت و تجهیزات و ژنراتورها می شود.

در این بخش، عملکرد کنترل فازی طراحی شده برای TCSC در میرایی نوسانات زاویه روتور سیستم قدرت در سیستم تک ماشینه و سه ماشینه با استفاده از نرم افزار MATLAB مورد بررسی قرار گرفته است. رفتار سیستم های قدرت با طرح های کنترلی زیر تست شده است:

- پایداری سیستم قدرت (PSS) به تنهایی
- کنترل کننده TCSC با پایداری سیستم قدرت (PSS)
- کنترل کننده TCSC با کنترل کننده فازی

هم چنین عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در سیستم تک ماشینه با TCSC، با کنترل کننده PI-Fuzzy که در شکل (۹) نشان داده شده، مقایسه شده است. البته ساختارهای دیگری برای کنترل کننده PI-Fuzzy نیز وجود دارد که ممکن است پاسخ مناسب تری داشته باشند.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

برای حذف شین های بار، ماتریس ادمیتانس شین در رابطه (۹) طوری بخش بندی شده است که n شینی که باید حذف شوند در n سطر اول آن قرار گرفته اند. چون هیچ جریانی به شین های بار وارد یا از آن خارج نمی شود، جریان n ردیف اول صفر است. جریان ژنراتورها با بردار  $I_m$  و ولتاژ بارها و ژنراتورها به ترتیب با بردارهای  $V_n$  و  $E_m$  نمایش داده شده اند. حال بردار ولتاژ  $V_n$  را می توان با استخراج از رابطه سطر اول و جایگزینی در رابطه حاصل از سطر دوم حذف و به رابطه زیر رسید:

$$I_m = Y_{bus}^{red} E_m \quad (10)$$

که در آن  $Y_{bus}^{red}$  ماتریس کاهش یافته ادمیتانس و به صورت زیر است:

$$Y_{bus}^{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm} \quad (11)$$

ماتریس کاهش یافته ادمیتانس شین دارای ابعاد  $m \times m$  است، که در آن m تعداد ژنراتورهاست. توان الکتریکی خروجی هر ماشین را می توان برحسب ولتاژ داخلی ماشین ها به صورت زیر بیان کرد:

$$S_{ei}^* = \dot{E}_i^* I_i \quad (12)$$

یا:

$$P_{ei} = R[\dot{E}_i^* I_i] \quad (13)$$

که در آن:

$$I_i = \sum_{j=1}^m \dot{E}_j Y_{ij} \quad (14)$$

با بیان ولتاژها و ادمیتانس ها به صورت قطبی، یعنی  $\dot{E}_i = |\dot{E}_i| \angle \delta_i$  و  $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$  نتیجه زیر حاصل می شود:

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^m |\dot{E}_i| |\dot{E}_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (15)$$

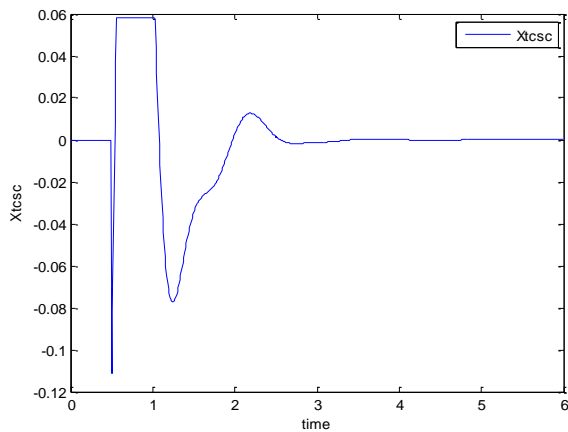
در یک سیستم قدرت n ماشینه، معادلات دینامیکی غیرخطی ژنراتور سنکرون با مدل مرتبه سه به صورت معادلات (۱۶) تا (۱۹) است.

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \quad i = 1 \dots n \quad (16)$$

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei} - D_i(\omega_i - \omega_0)/\omega_0) \quad (17)$$

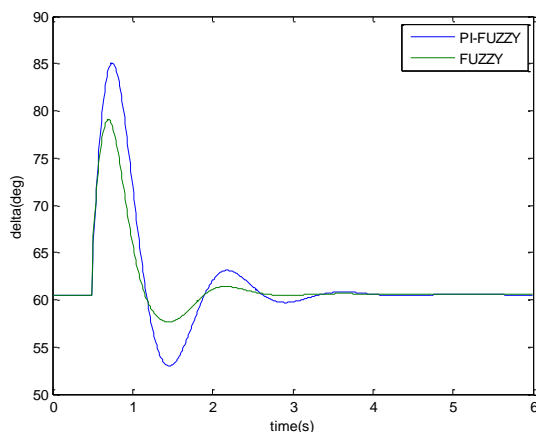
$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T'_{d0}} (E_{fdi} - E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_d) \quad (18)$$

$$\dot{E}'_{fdi} = \frac{1}{T_A} (-E_{fdi} + K_{Ai}(V_{refi} - V_{Ti})) \quad (19)$$

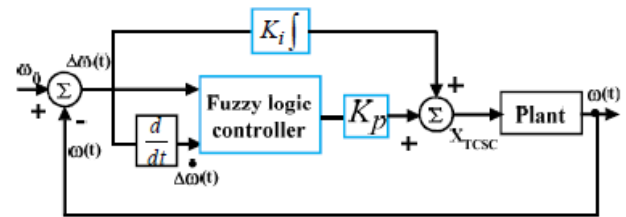


شکل (۱۲): تغییرات  $X_{TCS}$

در این مطالعه جهت مقایسه از کنترل کننده PI-Fuzzy مطابق شکل (۹) برای میرایی نوسانات سیستم قدرت استفاده شده که در آن نیاز به تنظیم پارامترهای PI است. اما کنترل کننده فازی پیشنهاد شده دیگر نیاز به تنظیم پارامتری ندارد. این مزیت باعث می شود، سیستم قدرت بتواند حتی با تغییر توپولوژی نیز به خوبی عمل نماید و رفتار مناسبی در جهت میرایی نوسانات سیستم قدرت داشته باشد. شکل های (۱۳) و (۱۴) این تغییر توپولوژی را با خارج نمودن خط  $L_2$  با راکتانس  $X_{L2}$  پس از رفع خطا نشان می دهد. همان طور که انتظار می رفت کنترل کننده پیشنهادی بهتر عمل می نماید. از لحاظ فیزیکی این مطلب را به این صورت می توان توجیه نمود که کنترل کننده PI-Fuzzy با تغییر توپولوژی بر اساس پارامترهای قبل از این تغییر عمل می نماید، در صورتی که کنترل کننده پیشنهادی بر اساس شرایط جدید تصمیم گیری می نماید و بر اساس قوانین فازی بیان شده در بخش ۳ عمل می نماید.



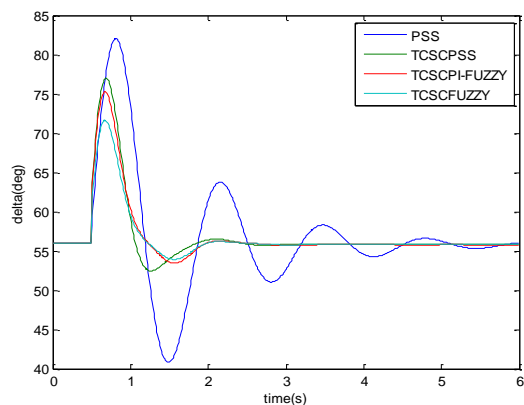
شکل (۱۳): زاویه روتور ژنراتور با تغییر توپولوژی



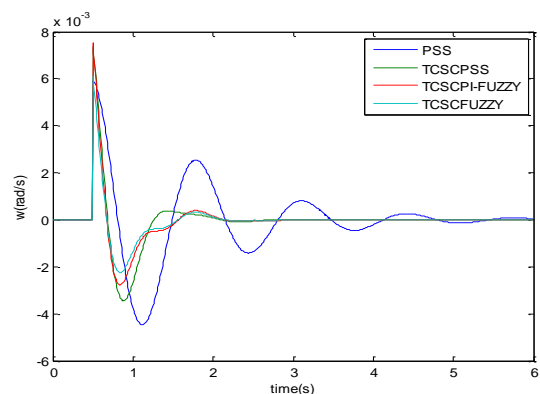
شکل (۹): ساختار کنترل کننده PI-Fuzzy برای مقایسه

### ۵-۱- نتایج شبیه سازی سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بی نهایت (SMIB) به همراه TCSC

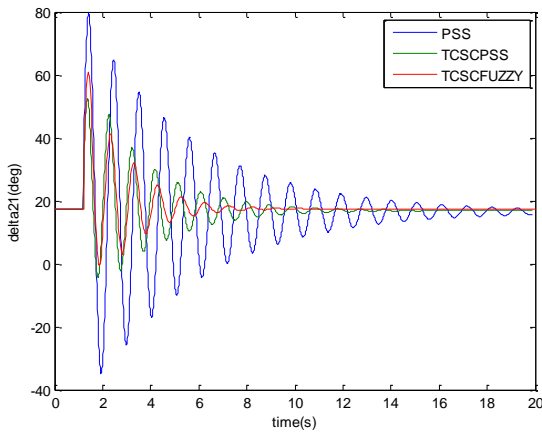
در سیستم قدرت تک ماشینه شکل (۶) فرض می کنیم که در باس  $V_1$  خطای اتصال کوتاهی در زمان  $0.5$  ثانیه رخ دهد و در زمان  $0.6$  ثانیه رفع شود. همان طور که مشاهده می شود نوسانات سیستم بعد از وقوع خطا زیاد است و سیستم ناپایدار می شود. اما با استفاده از کنترل کننده، نوسانات بسیار کاهش پیدا می کنند. هم چنین در شکل های (۱۰) و (۱۱) توانایی کنترل کننده فازی در بهبود نوسانات سیستم قدرت را نسبت به دیگر کنترل کننده ها مشاهده می کنید که در کم تر از  $2/5$  ثانیه میرا می شود. تغییرات  $X_{TCS}$  نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



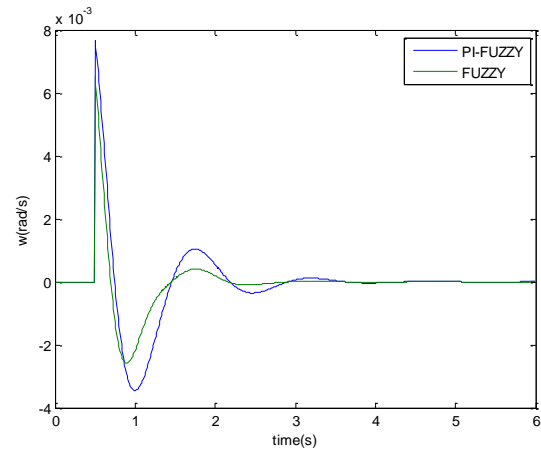
شکل (۱۰): زاویه روتور ژنراتور



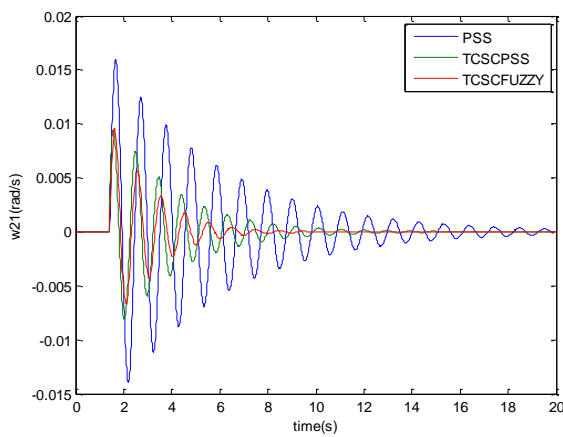
شکل (۱۱): تغییرات سرعت ژنراتور



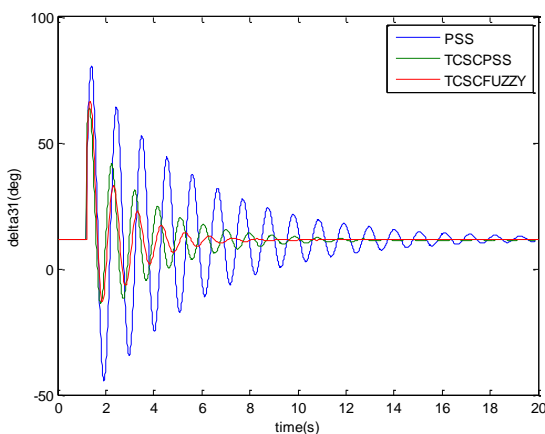
شکل (۱۵): زاویه روتور بین ژنراتور ۱ و ۲



شکل (۱۴): تغییرات سرعت ژنراتور با تغییر توپولوژی



شکل (۱۶): تغییرات سرعت ژنراتور ۱ و ۲



شکل (۱۷): زاویه روتور بین ژنراتور ۱ و ۳

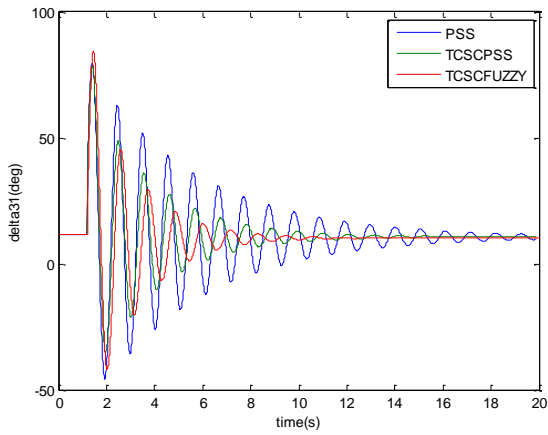
## ۲-۶- نتایج شبیه‌سازی سیستم قدرت چندماشینه (۹ باسه

### IEEE) به همراه TCSC

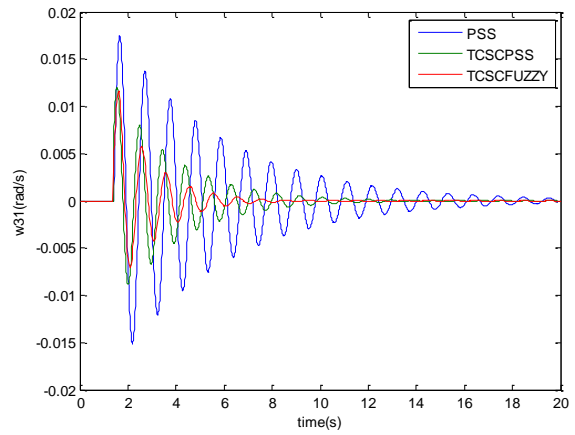
در سیستم قدرت سه‌ماشینه، ۹ باس شکل (۸) فرض می‌کنیم که در باس ۷ خطای اتصال کوتاهی در زمان ۰/۶ ثانیه رخ دهد و در زمان ۰/۷ ثانیه رفع شود. همان‌طور که در شکل‌های (۱۵) تا (۱۸) مشاهده می‌شود، نوسانات سیستم بعد از وقوع خطا زیاد است و سیستم ناپایدار می‌شود. اما با استفاده از کنترل‌کننده نوسانات بسیار کاهش پیدا می‌کند. همچنین توانایی کنترل‌کننده فازی در بهبود نوسانات سیستم قدرت و میرایی آن‌ها نسبت به کنترل‌کننده PSS و TCSC را مشاهده می‌کنید. تغییرات  $X_{TCSC}$  نیز در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

شکل‌های (۲۰) و (۲۱) تغییرات زاویه روتور، با توجه به تغییر محل خطا که در باس ۵ در مدت‌زمان ۱۰۰ میلی‌ثانیه است را نشان می‌دهند، که این نتایج تأییدی بر کارایی روش در شرایط مختلف است.

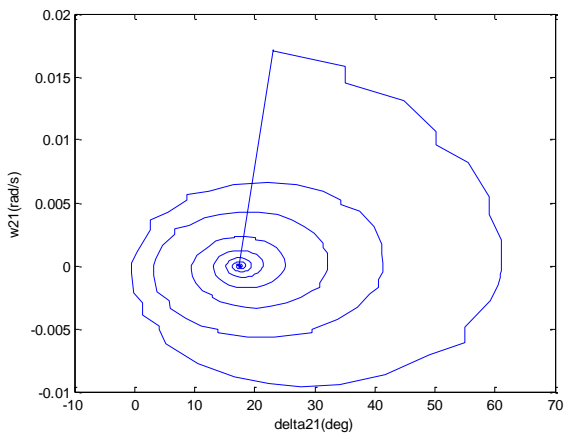
تحلیل صفحه فازی، یک روش گرافیکی برای مطالعه سیستم‌های مرتبه دوم است. ایده اصلی این روش ایجاد مسیرهای حرکتی برحسب شرایط اولیه متفاوت در فضای حالت مرتبه دوم سیستم دینامیکی و سپس بررسی ویژگی‌های کیفی این مسیرهاست. به دلیل گرافیکی بودن، این روش ابزار مناسبی برای مشاهده رفتار سیستم فراهم می‌آورد. در شکل‌های (۲۲) و (۲۳) نمودار صفحه فاز سیستم نمایش داده شده است. محور افقی زاویه ماشین و محور عمودی سرعت ماشین است. شکل‌های (۲۲) و (۲۳) به‌وضوح توانایی کنترل‌کننده فازی را در پایداری سیستم قدرت نشان می‌دهد. همچنین در این شکل‌ها همگرایی سیستم به نقطه کار اولیه پس از چند نوسان، قابل مشاهده است.



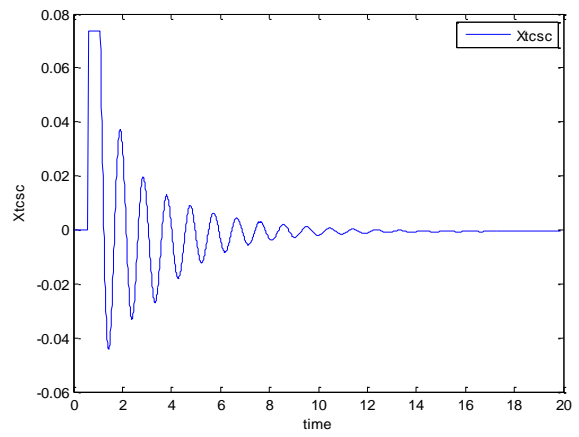
شکل (۱۸): تغییرات سرعت ژنراتور ۱ و ۳



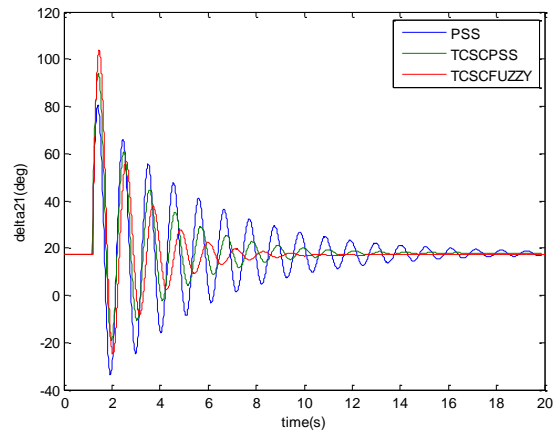
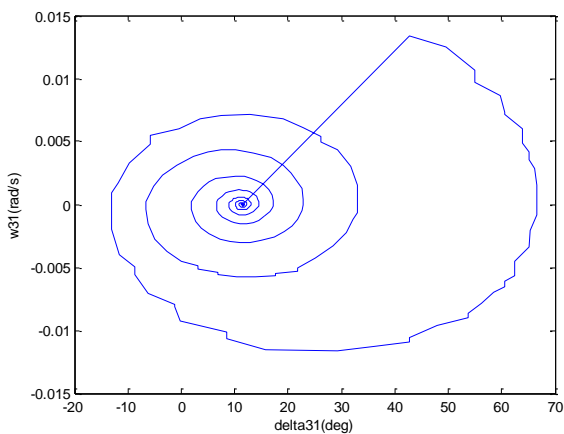
شکل (۲۱): زاویه روتور بین ژنراتور ۱ و ۳ با تغییر محل خطا (شین ۵)



شکل (۱۹): تغییرات  $X_{TCSC}$



شکل (۲۲): نمودار صفحه فاز سیستم با کنترل کننده فازی برای  $w_{21}$  و  $\delta_{21}$



شکل (۲۳): نمودار صفحه فاز سیستم با کنترل کننده فازی برای  $w_{31}$  و  $\delta_{31}$

شکل (۲۰): زاویه روتور بین ژنراتور ۱ و ۲ با تغییر محل خطا (شین ۵)



## ۷- نتیجه گیری

همان طور که ملاحظه شد بهبود پایداری دینامیکی در سیستم‌های قدرت تنها با استفاده از PSS در میرایی نوسانات سیستم قدرت میسر نمی‌شود. با اضافه شدن عناصر FACTS نظیر TCSC بهبود قابل ملاحظه‌ای در میرایی نوسانات و میزان فراجش ایجاد گردید. کنترل کننده پیشنهادی فازی بر روی سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت و سیستم قدرت چندماشینه (۹ باس IEEE) پیاده‌سازی گردید. علاوه بر تأثیر قابل ملاحظه‌ای که در کاهش دامنه نوسانات داشت، نسبت به تغییر توپولوژی مقاوم بوده و هم‌چنین نسبت به سایر روش‌ها که نیازمند به تنظیم پارامترها هستند این روش دیگر نیاز به تنظیم پارامتر ندارد که این نشان از عملکرد مؤثر این روش است. نتایج شبیه‌سازی‌ها قدرت کنترل کننده TCSC به روش کنترل فازی را در میرایی مناسب نوسانات سیستم قدرت نسبت به روش‌های مرسوم نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [2] C. Y. Chung, K. W. Wang, C. T. Tse and R. Niu, "Power system stabilizer (PSS) design by probabilistic sensitivity indexes (PSIs)," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 17, no. 3, Aug. 2002.
- [3] C. Y. Chung, K. W. Wang, C. T. Tse, X. Y. Bian and A. K. David, "Probabilistic eigen value sensitivity analysis and PSS design in multimachine systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp.1439-1445, 2008.
- [4] P. He, Y.B. Wei, C.X. Yang and K.W. Wang, "Adaptive power system stabilizer design for multi-machine power systems," *IET Conferences*, PP. 1-6, Nov. 2009.
- [5] H. Boules, S. Peres and T. Margotin, "Analysis and design of a robust coordinated AVR/PSS," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 2, May 1998.
- [6] K. R. Padiyar, *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*, Tunbridge Wells: Anshan, 2009.
- [7] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.
- [8] S. G. Jalali, R. H. Lasseter, and I. Dobson, "Dynamic response of a thyristor controlled switched capacitor," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1609-1615, Jul. 1994.
- [9] P. Mattavelli, G. C. Verghese and A. M. Stankovic, "Phasor dynamics of thyristor controlled series capacitor systems," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 12, no. 2, pp. 1259-1267, Aug. 1997.
- [10] A. D. Del Rosso and V. M. Doña "A study of TCSC controller design for power system stability improvement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, 2003.
- [11] D. Jovicic and G. N. Pillai, "Analytical modeling of TCSC dynamics," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1097-1104, Apr. 2005.
- [12] T. Sansawatt and I. Ngamroo, "Sliding mode control design of TCSC for robust power system stabilization using dynamic compensation observer technique," *In Proc. 41st Int. Conf. UPEC '06*, vol. 2, pp. 447-451, Sep 2006.
- [13] X. Nong and L. Dichen, "Nonlinear stabilized controller design for TCSC," *In IEEE Conf. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pp. 2069-2099, Apr. 2008.
- [14] S. Hameed, "Power system stability enhancement using reduced rule base self - tuning fuzzy PI controller for TCSC," *in Proc.*

## پیوست

جدول (۲): پارامترهای سیستم چندماشینه

شماره ژنراتور	۱	۲	۳
نوع	آبی	بخار	بخار
توان نامی (MVA)	۲۴۷/۵	۱۹۲	۱۲۸
ولتاژ نامی (kV)	۱۶/۵	۱۸	۱۳/۸
ضریب توان	۱	۰/۸۵	۰/۸۵
سرعت (r/min)	۱۸۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰
H	۲۳/۶۴	۶/۴	۳/۰۱
X <sub>d</sub> (p.u)	۰/۱۴۶۰	۰/۸۹۵۸	۱/۳۱۲۵
X' <sub>d</sub> (p.u)	۰/۰۶۰۸	۰/۱۱۹۸	۰/۱۸۱۳
X <sub>q</sub> (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۸۶۴۵	۱/۲۵۷۸
X' <sub>q</sub> (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۱۹۶۹	۰/۲۵
T <sub>do</sub> (sec)	۸/۹۶	۶	۵/۸۹
T' <sub>qo</sub> (sec)	۰	۰/۵۳۵	۰/۶
X <sub>i</sub> (p.u)	۰/۰۳۳۶	۰/۰۵۲۱	۰/۰۷۴۲

$$\begin{aligned}
 T1 &= KC * W1 \\
 T2 &= KC * W2 \\
 T3 &= KC * W3 \\
 T4 &= \text{inv}(T2) * KC * T1 * W1 \\
 T5 &= \text{inv}(T2) * KC * T1 * W2 \\
 T6 &= \text{inv}(T2) * KC * T1 * W3 \\
 T7 &= \text{inv}(T2) - (\text{inv}(T2) * \text{inv}(T) * T1) \\
 T8 &= -\text{inv}(T2) \\
 T9 &= \text{inv}(T4) * \text{inv}(T2) * KC * T1 * T3 * W1 \\
 T10 &= \text{inv}(T4) * \text{inv}(T2) * KC * T1 * T3 * W2 \\
 T11 &= \text{inv}(T4) * \text{inv}(T2) * KC * T1 * T3 * W3 \\
 T12 &= \text{inv}(T4) * T3 * (\text{inv}(T2) - (\text{inv}(T2) * \text{inv}(T) * T1)) \\
 T13 &= \text{inv}(T4) - T3 * \text{inv}(T4) * \text{inv}(T2) \\
 T14 &= -\text{inv}(T4)
 \end{aligned}$$

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Power System Stabilizer
- <sup>2</sup> Flexible AC Transmission Systems
- <sup>3</sup> Thyristor Controlled Series Capacitance
- <sup>4</sup> Self-Tuning Fuzzy PI Controller