

طراحی پایدارساز غیرخطی فازی برای سیستم‌های قدرت دارای تأخیر زمانی

محمد مرادی^۱، کارشناس ارشد؛ امیرحسین ابوالمعصومی^۲، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - واحد علوم و تحقیقات (مرکزی) - دانشگاه آزاد اسلامی - تهران - ایران - moradibargh@yahoo.com

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اراک - اراک - ایران - a-abolmasoumi@araku.ac.ir

چکیده: به علت استفاده از وسایل اندازه‌گیری و لینک‌های ارتباطی برای انتقال اطلاعات اندازه‌گیری شده، تأخیر زمانی به‌طور گسترده در سیستم‌های قدرت وجود دارد. این تأخیر زمانی روی پایداری سیگنال کوچک تأثیر گذاشته و باعث کاهش میرایی نوسانات فرکانس پایین می‌شود. بنابراین، برای کارایی بهتر پایدارسازهای سیستم قدرت، باید اثر تأخیر زمانی در محاسبات طراحی لحاظ شود. این مقاله اثر تأخیر زمانی روی پایداری سیگنال کوچک سیستم تحریک ژنراتور که به‌وسیله پایدارساز سیستم قدرت تأمین می‌شود را بررسی می‌کند و با استفاده از روش T-S فازی یک پایدارساز سیستم قدرت که در آن اثر تأخیر زمانی در ولتاژ اندازه‌گیری شده ترمینال ژنراتور لحاظ شده است، طراحی می‌شود. در این مقاله شرایط پایدارسازی توسط توابع لیاپانوف - کراسوفسکی به‌صورت نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI) بیان می‌شود و از حل نامساوی‌های ماتریسی خطی، بهره‌های کنترلی پایدارساز استخراج می‌گردند. این پایدارساز روی یک شبکه تک‌ماشینه و چندماشینه آزمایش می‌شود و نتایج به‌دست‌آمده با پایدارساز مرسوم که در طراحی آن‌ها از اثر تأخیر زمانی صرف‌نظر می‌شود و همچنین با یک جبران‌ساز تأخیری تطبیقی که در مراحل طراحی آن اثر تأخیر در نظر گرفته شده است، مقایسه می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها با نرم‌افزار MATLAB انجام شده و نتایج حاصل شده کارایی این پایدارساز را نسبت به پایدارسازهای مرسوم نمایش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایدارساز سیستم قدرت، پایداری نوسانات فرکانس پایین، مدل T-S فازی دارای تأخیر زمانی، نامساوی‌های ماتریسی خطی، معیار پایداری لیاپانوف - کراسوفسکی.

Nonlinear Fuzzy Stabilizer Design for Power Systems with Time Delay

M. Moradi¹, MSc; A. H. Abolmasoumi², Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Science and Research Branch (Markazi), Islamic Azad University, Tehran, Iran, Email: moradibargh@yahoo.com

2- Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran, Email: a-abolmasoumi@araku.ac.ir

Abstract: Due to the use of measurement devices and using communication links for transferring the measured data, time delays are usual problems in power systems. These time delays influence on small signal stability of systems and might decrease the damping of the low frequency fluctuations; hence, to have a desirable performance of power system stabilizer (PSS), the effect of time delays should be considered in design calculations. This paper investigates the effect of time delays on the small signal stability of a generator excitation control system compensated with PSS and by using T-S fuzzy control method, a PSS with inclusion of time delays in terminal voltage is designed. The stabilization conditions are obtained by suggesting delay-independent Lyapunov-Krasovskii functional in terms of Linear Matrix Inequality (LMI) and the controller gains are determined from numerical solutions of LMIs. The proposed stabilizer is tested on both single and multiple machine systems and the results are compared with the conventional stabilizers which generally neglect the effect of the time delays and with an adaptive delay compensator in design of which the effect of delays are taken into account. Simulations are performed by MATLAB software. The results of simulations show the efficiency of the presented stabilizer in comparison with conventional stabilizers.

Keywords: Power system stabilizer, stability of small signal oscillations, T-S fuzzy with time delays, linear matrix inequality, Lyapunov-Krasovskii stability criterion.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۱۳، ۱۳۹۵/۰۳/۰۴ و ۱۳۹۵/۰۴/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴

نام نویسنده مسئول: امیرحسین ابوالمعصومی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - اراک - دانشگاه اراک - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

نامساوی‌های ماتریسی خطی، در یک سیستم قدرت که در ارسال ولتاژ اندازه‌گیری شده در ترمینال ژنراتور دارای تأخیر زمانی است، به تعیین حد تأخیر زمانی و تعیین معیار پایداری می‌پردازد. در تمامی مراجع [۱۶-۲۲] فقط به تحلیل اثر تأخیر زمانی در پایداری سیگنال کوچک سیستم‌های قدرت و اینکه سیستم قدرت به ازای چه مقدار تأخیر زمانی پایداری خود را از دست می‌دهد، اشاره شده است. بنابراین ارائه یک روش مناسب برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت که بتواند حتی با وجود این تأخیرهای زمانی کارایی خود را حفظ نماید، مؤثر می‌باشد.

در [۲۳] برای سیستم‌های قدرتی که دارای تأخیر متغیر با زمان هستند یک جبران‌کننده طراحی می‌شود که در آن تأخیرهای زمانی به چند سطح محدود می‌شوند و سپس برای هر سطح یک جبران‌کننده طراحی می‌شود و با اندازه‌گیری لحظه‌ای، از جبران‌ساز مناسب با آن استفاده می‌شود. این روش نیاز به اندازه‌گیری دقیق و لحظه‌ای مقدار تأخیر زمانی دارد و در صورتی که تأخیر زمانی به‌طور متناوب تغییر کند، نیاز است که کنترل‌کننده نیز به‌طور متناوب تغییر کند و در صورتی که در زمان قطع و وصل بین کنترل‌کننده‌ها، تأخیر زمانی تغییر کند و یا زمان قطع و وصل بین کنترل‌کننده‌ها زیاد باشد، کنترل‌کننده‌ها نمی‌توانند تأخیر را جبران کنند و کارایی کنترل‌کننده کاهش می‌یابد و در بعضی مواقع ناپایداری اتفاق می‌افتد.

در [۲۴] با استفاده از روش طراحی لحظه‌ای، بعد از اینکه تأخیر زمانی تشخیص داده شد، کنترل‌کننده طراحی می‌شود که در این صورت روش طراحی لحظه‌ای می‌تواند دارای خطا باشد. در [۲۵] سیستم قدرت، به‌صورت یک سیستم کنترلی مدل می‌شود و با استفاده از تکنیک کنترل‌کننده فیدبک حالت و با حل معادلات ماتریسی خطی به بررسی تأخیر زمانی می‌پردازد. این نوع کنترل‌کننده‌ها بر اساس روش کنترل خطی و خطی‌سازی معادلات حالت سیستم قدرت طراحی می‌شوند، به صورتی که مشخصه سیستم‌های قدرت به‌صورت غیرخطی و دینامیکی است. بنابراین، به دلیل ثابت بودن پارامترها، کنترل‌کننده طراحی شده به ازای تغییرات بزرگ در سیستم کارایی لازم را ندارد. مرجع [۲۶] با استفاده از تکنیک کنترل مقاوم یک پایدارساز طراحی می‌کند. روش کنترل مقاوم برای یک بازه از تغییرات شرایط بهره‌برداری مناسب می‌باشد و در یک بازه بهره‌برداری محدود و مشخص کارایی لازم را دارند. در [۲۷] با استفاده از تکنیک تبدیل PAD و تبدیل کسری خطی (LFI) جهت مدل‌سازی تأخیر زمانی پیشنهاد می‌شود و با استفاده از تقریب PAD و همچنین جهت دستیابی به اهداف چندگانه مثل کاهش اثر اغتشاش ورودی، از روش حساسیت مرکب H_{∞} برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شده است. روش تقریب پاده نیز روشی برای تقریب سیستم‌های تأخیردار در حوزه فرکانس می‌باشد که با ظهور روش‌های نوین حوزه زمان در تحلیل سیستم‌های تأخیردار بهتر است که از دسته روش‌هایی که مبتنی بر تقریب‌های تیلور نیستند استفاده شود که نسبت به تقریب پاده عملکرد و تضمین پایداری بسیار بهتری دارند.

توسعه شبکه‌های قدرت، نوسانات با فرکانس کم را در سیستم‌های قدرت به همراه داشته است. بروز اغتشاش‌هایی نسبتاً کوچک و ناگهانی در شبکه باعث به وجود آمدن چنین نوساناتی در سیستم‌های قدرت می‌شود [۱]. در حالت عادی این نوسانات به‌سرعت میرا شده و دامنه نوسانات از مقدار معینی فراتر نمی‌رود. اما بسته به شرایط نقطه کار و مقادیر پارامترهای سیستم، ممکن است این نوسانات برای مدت طولانی ادامه یافته و در بدترین حالت دامنه آن‌ها افزایش یابد و در بعضی موارد باعث خاموشی محلی یا منطقه‌ای در شبکه برق شود [۲]. امروزه در جهت بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین، از پایدارساز سیستم قدرت استفاده می‌شود. با توجه به اهمیت پایداری سیگنال کوچک، در [۳] به نوساناتی که در شمال شرقی شبکه برق ایران، در تاریخ ۲۰۰۸/۱/۲۱ اتفاق افتاد و ناشی از نوسانات فرکانس پایین مودهای داخلی و بین ناحیه‌ای بود، اشاره شده است و با بررسی چگونگی رشد این مودها و عدم وجود میرایی کافی برای آن‌ها که در نهایت باعث جدا شدن و خاموشی منطقه‌ای شمال‌شرقی ایران شد، نشان داده می‌شود که در صورت وجود پایدارساز سیستم قدرت و تنظیم مناسب آن با دیگر وسایل کنترلی، می‌توان موجب بهبود و حذف این مودهای نوسانی شد.

برای طراحی پایدارساز سیستم قدرت از روش‌های متفاوتی مانند روش مبتنی بر پس‌فاز - پیش‌فاز [۴]، تئوری کنترل بهینه [۵، ۶]، تئوری‌های کنترل تطبیقی [۷]، کنترل مقاوم [۸]، شبکه‌های عصبی مصنوعی [۹]، ژنتیک [۱۰] و کنترل فازی [۱۱] استفاده می‌شود. در [۱۲] با استفاده از کنترل‌کننده‌های سیستم‌های انتقال ac قابل‌انعطاف (FACTS) سعی شده است میرایی موردنیاز برای پایداری نوسانات فرکانس پایین بین‌ناحیه‌ای فراهم شود. در اکثر مقالات ارائه‌شده در زمینه طراحی پایدارساز سیستم قدرت، به علت استفاده از اطلاعات محلی و کوچک بودن مقدار تأخیر زمانی در ارسال اطلاعات از وسیله اندازه‌گیری به پایدارساز، معمولاً از اثر تأخیر زمانی صرف‌نظر می‌شود. با گسترش و تولید تجهیزات ارتباطی و اندازه‌گیری مثل وسایل اندازه‌گیری فازوری، مهندسی قدرت استفاده از این تجهیزات را برای کنترل سطح گسترده‌ای از شبکه، پیشنهاد می‌کند [۱۳]. در این صورت اثر تأخیر زمانی در کاربردهای سطح گسترده که بین ده‌ها میلی‌ثانیه تا صدها میلی‌ثانیه است، می‌تواند قابل‌توجه باشد و نباید به‌سادگی از آن صرف‌نظر شود و لحاظ کردن اثر تأخیر زمانی در مطالعات پایداری سیستم قدرت و طراحی کنترل‌کننده و پایدارساز دارای اهمیت است و با عدم تأثیر تأخیر زمانی در محاسبات طراحی پایدارسازها، حتی تأخیر زمانی کوچک نیز می‌تواند باعث کاهش کارایی پایدارساز سیستم قدرت و در بعضی موارد باعث ناپایداری شبکه شود [۱۴]. بیش‌ترین مقدار تأخیر زمانی که به ازای آن سیستم قدرت می‌تواند پایداری خود را حفظ نماید، حد تأخیر زمانی می‌گویند [۱۵].

مراجع [۱۶-۲۰] به بررسی اثر تأخیر زمانی در سیستم‌های قدرت و تعیین حد تأخیر زمانی می‌پردازند. در مراجع [۲۱، ۲۲] با استفاده از

$$\begin{aligned} x_\tau &= x(t - \tau) \\ u_\tau &= u(t - \tau) \end{aligned} \quad (2)$$

که در رابطه بالا، τ مقدار تأخیر زمانی می‌باشد. بنابراین با در نظر گرفتن تأخیر زمانی، رابطه (۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), x(t - \tau), u(t), u(t - \tau)) \\ 0 &= g(x(t), x(t - \tau), u(t), u(t - \tau)) \end{aligned} \quad (3)$$

رابطه (۳) شکل کلی معادلات جبری دیفرانسیلی تأخیری (DDAE) را نمایش می‌دهد [۱۵، ۱۸]. اگر x_0 نقطه تعادل سیستم رابطه (۳) باشد، بنابراین با خطی‌سازی حول نقطه تعادل داریم [۱۵، ۱۹]:

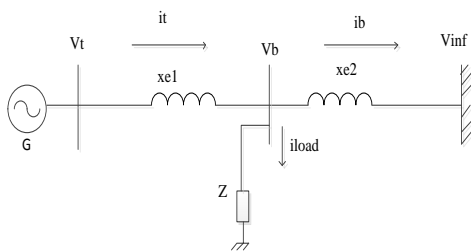
$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A_o \Delta x(t) + A_{i\tau} \Delta x(t - \tau_i) \\ &+ \dots + A_{i\tau} \Delta x(t - \tau_i) + B_o \Delta u(t) \\ &+ B_{i\tau} \Delta u(t - \tau_i) + \dots + B_{i\tau} \Delta u(t - \tau_i) \end{aligned} \quad (4)$$

که در آن، $A_o = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_0}$ ، $A_{i\tau} = \frac{\partial f}{\partial x_{i\tau}} \Big|_{x_0}$ ، $B_o = \frac{\partial f}{\partial u} \Big|_{u_0}$ و $B_{i\tau} = \frac{\partial f}{\partial u_{i\tau}} \Big|_{u_0}$.

در نتیجه ماتریس حالت سیستم به دست می‌آید. با استفاده از رابطه (۵) می‌توان تحلیل مقادیر ویژه را انجام داد.

$$\lambda = \det(\lambda I - A_o - \sum_{i=1}^k A_{i\tau} e^{-\lambda \tau_i}) \quad (5)$$

بنابراین، اگر تمام قسمت‌های حقیقی مقادیر ویژه در سمت چپ محور موهومی باشند، سیستم دینامیکی دارای تأخیر، پایدار است. این روش تحلیل پایداری با استفاده از تحلیل مقادیر ویژه است. با توجه به تعاریف بالا سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۱: سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت

معادلات حالت برای سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$\delta = \omega_0 \omega \quad (6)$$

$$\dot{\omega} = \frac{1}{2H} [P_m - E'_q i_q] \quad (7)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T_{d0}} [E_{fd} - E'_q + (x_d - x'_d) i_d] \quad (8)$$

$$\dot{E}'_{fd} = \frac{1}{T_e} [k_e (v_{ref} - |v_t| + u_s) + E_{fd}] \quad (9)$$

$$|v_t| = \sqrt{(x_q i_q)^2 + (E'_q - x'_d i_d)^2} \quad (10)$$

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر در مهندسی کنترل برای مدل‌سازی، پایدارسازی و حذف اغتشاش مورد توجه قرار گرفته است، روش فازی T-S (تاگاسی - سوگنو) است [۲۸، ۲۹]. مدل فازی پیشنهاد شده به وسیله [۳۰] که بعدها بنام T-S فازی شناخته شد و بر اساس قوانین if-then فازی است، یک رابطه ورودی-خروجی داخلی از سیستم غیرخطی نمایش می‌دهد.

در واقع با توجه به اینکه اکثر مقالات ارائه شده در زمینه پایداری سیستم قدرت در حضور تأخیر زمانی فقط به تحلیل اثر تأخیر زمانی در پایداری سیستم قدرت پرداخته‌اند و مقالات بسیار کمی در زمینه طراحی پایدارساز برای میرایی نوسانات فرکانس پایین در حضور تأخیر زمانی ارائه شده است؛ بنابراین، در این مقاله با استفاده از روش T-S فازی برای سیستم‌های قدرت که دارای تأخیر زمانی هستند، یک پایدارساز طراحی می‌شود. پایدارساز طراحی شده، به صورتی است که در حضور تأخیرهای زمانی بزرگ نیز بتواند کارایی خود را حفظ کند و به طور مناسب سیستم قدرت را پایدار کند. ویژگی اصلی روش T-S فازی، بیان دینامیک‌های داخلی با قوانین فازی به وسیله مدل تکه‌ای خطی از سیستم است و مدل فازی کلی سیستم از مجموع مدل‌های فازی سیستم خطی به دست می‌آید. شرایط پایدارسازی با استفاده از توابع لیاپانوف - کراسوفسکی به صورت نامساوی‌های ماتریسی خطی (LMI) بیان می‌شود. از حل این نامساوی ماتریسی خطی، بهره‌های پایدارساز T-S فازی به دست خواهد آمد و پایدارساز فازی پیشنهادی با پایدارساز مرسوم که در طراحی آن‌ها از اثر تأخیر زمانی صرف نظر می‌شود و همچنین با یک جبران‌ساز تأخیری تطبیقی که در مرجع [۲۳] بیان شده است و در مراحل طراحی آن اثر تأخیر در نظر گرفته شده است، مقایسه می‌گردد. ساختار این مقاله به این صورت است که بعد از این قسمت، در قسمت دوم معادلات سیستم قدرت همراه با تأخیر زمانی نمایش داده می‌شود. در قسمت سوم روش T-S فازی همراه با شرایط کافی برای پایدارسازی با استفاده از توابع لیاپانوف - کراسوفسکی مناسب به صورت نامساوی ماتریسی خطی بیان می‌شود. در قسمت چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بر روی سیستم تک‌ماشینه و چندماشینه نمایش داده می‌شود و در قسمت پنجم نتیجه‌گیری خواهد شد.

۲- مدل‌سازی سیستم قدرت

سیستم‌های قدرت معمولاً توسط یک مجموعه معادلات جبری دیفرانسیلی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (1)$$

$$0 = g(x(t), u(t))$$

که در آن، $f(x(t), u(t))$ تابع معادلات دیفرانسیلی و $g(x(t), u(t))$ تابع معادلات جبری و $x(x \in R^n)$ متغیرهای حالت و $u(u \in R^m)$ بردار ورودی را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن تأخیر زمانی در متغیر حالت یا ورودی داریم:

زمانی [۳۱] گفته می‌شود. بنابراین مدل T-S فازی از مجموع زیرسیستم‌های خطی به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(p(t)) \{A_{i0}x(t) + A_{i\tau}x(t-\tau) + B_{i0}u(t) + B_{i\tau}u(t-\tau)\} \quad (15)$$

در این مقاله با توجه به نوع تأخیر در سیستم قدرت بیان شده در قسمت قبل، از مدل T-S فازی بدون تأخیر در ورودی استفاده می‌شود. بنابراین در رابطه (۱۵)، $B_{i\tau}u(t-\tau) = 0$ خواهد بود، یعنی:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(p(t)) \{A_{i0}x(t) + A_{i\tau}x(t-\tau) + B_{i0}u(t)\} \quad (16)$$

در رابطه بالا داریم:

$$h_i(\theta(t)) = \frac{\prod_{j=1}^p M_{ij}(\theta(t))}{\sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^p M_{ij}(\theta(t))} \quad (17)$$

$M_{ij}(\theta(t))$ درجه عضویت فازی می‌باشد که $\sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) = 1$ و $h_i(\theta(t)) \geq 0$ با استفاده از طرح جبران ساز موازی [۳۱]، برای سیستم T-S فازی با تأخیر زمانی، قوانین کنترلی به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$\begin{aligned} & \text{Control Rule } i \\ & \text{IF } \theta_1(t) \text{ is } \mu_{i1} \text{ and, ..., and } \theta_p(t) \text{ is } \mu_{ip} \\ & \text{THEN } u(t) = -F_i x(t), \quad i = 1, \dots, r. \end{aligned} \quad (18)$$

از مجموع کنترل کننده زیرسیستم‌های خطی، کنترل کننده کلی به دست می‌آید و باید توجه داشت که طرح کنترلی در کل غیرخطی است و به صورت زیر بیان خواهد شد:

$$u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i(\theta(t)) F_i x(t). \quad (19)$$

با جایگذاری (۱۹) در (۱۶) سیستم حلقه بسته به صورت زیر می‌شود:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(\theta) h_j(\theta) [(A_{i0} - B_{i0} F_j) + A_{i\tau} x(t-\tau)] \quad (20)$$

۳-۱- شرایط پایدار سازی

در این قسمت با استفاده از انتخاب توابع لیاپانوف- کراسوفسکی مناسب شرایط لازم برای پایدار سازی رابطه (۲۰) بیان می‌گردد. هدف در اینجا به دست آوردن ماتریس بهره‌های فیدبک F_i است.

پیش قضیه ۱: با انتخاب تابع لیاپانوف- کراسوفسکی زیر [۳۱]:

$$V(x) = x(t)^T P x(t) + \int_{t-\tau}^t x(s)^T R_p x(s) ds \quad (21)$$

با مشتق گرفتن از $V(x)$ و با استفاده از واقعیت زیر برای دو بردار

$$x_1 \text{ و } x_2 \text{ و ماتریس } Y \text{ و ماتریس مثبت معین } R$$

$$x_1^T Y x_2 + x_2^T Y^T x_1 \leq x_1^T Y R^{-1} Y^T x_1 + x_2^T R x_2 \quad (22)$$

که در روابط بالا، δ زاویه توان برحسب رادیان، ω سرعت روتور برحسب رادیان بر ثانیه، ω_0 سرعت ماشین سنکرون برحسب رادیان بر ثانیه، P_m توان مکانیکی ورودی برحسب پرینویت، E'_q ولتاژ گذرا در محور q برحسب پرینویت، E_{fd} نیروی محرکه الکتریکی در سیم پیچ‌های تحریک برحسب پرینویت، I_d و I_q به ترتیب جریان‌های محورهای d و q برحسب پرینویت، H ثابت اینرسی برحسب پرینویت، T_{d0} ثابت زمانی مدار باز برحسب ثانیه، k_e بهره تنظیم کننده ولتاژ در سیستم تحریک، ولتاژ مرجع تنظیم کننده ولتاژ برحسب پرینویت، v_i ولتاژ ترمینال برحسب پرینویت، u_s سیگنال پایدار ساز سیستم قدرت برحسب پرینویت، x_d و x'_d به ترتیب راکتانس محور d و راکتانس گذرای محور d برحسب پرینویت است.

در سیستم‌های قدرت مدرن، ورودی سیستم تحریک می‌تواند از اندازه‌گیری ولتاژ باس‌هایی با فاصله دورتر از ژنراتور انتخاب شود [۱۵، ۱۶، ۲۱، ۲۲]. در این صورت اطلاعات اندازه‌گیری شده دارای تأخیر زمانی می‌باشد. در صورتی که یک تأخیر زمانی در v_i ایجاد شود، رابطه (۹) که مربوط به سیستم تحریک است، باید به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} [k_e (v_{ref} - |v_i(t-\tau)| + u_s) + E_{fd}] \quad (11)$$

که در رابطه بالا داریم:

$$|v_i(t-\tau)| = \sqrt{(x'_q i_q(t-\tau))^2 + (E'_q(t-\tau) - x'_d i_d(t-\tau))^2} \quad (12)$$

۳- طراحی پایدار ساز سیستم قدرت فازی

همان‌طور که در رابطه (۳) بیان شد، مدل دینامیکی سیستم غیرخطی همراه با تأخیر در متغیرهای حالت و تأخیر در ورودی کنترلی به صورت زیر است:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), x(t-\tau), u(t), u(t-\tau)) \quad (13)$$

طرح کنترلی منطق فازی پیشنهادی به این صورت است که معادلات حالت دینامیکی غیرخطی به چند زیرسیستم خطی داخلی تبدیل می‌شود و سپس با استفاده از طرح جبران ساز توزیع شده موازی [۳۱]، برای هر یک از زیرسیستم‌های خطی داخلی با استفاده از قانون فیدبک حالت، یک کنترل کننده خطی در نظر گرفته خواهد شد و باید توجه داشت که در کل کنترل کننده یک ساختار فازی از همه کنترل کننده‌های خطی داخلی است و کنترل کننده در کل غیرخطی است [۳۲-۳۴]. روش منطق فازی بر اساس قوانین if-then است. در نتیجه مدل قوانین T-S فازی تأخیری به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} & \text{Rule } i \\ & \text{IF } \theta_1(t) \text{ is } \mu_{i1}, \dots, \text{ and } \theta_p(t) \text{ is } \mu_{ip} \\ & \text{THEN} \\ & \dot{x}(t) = A_i x(t) + A_{i\tau} x(t-\tau_1) + B_i u(t) + B_{i\tau} u(t-\tau_2) \end{aligned} \quad (14)$$

که در آن، $0 < \tau_1 < \infty$ و همچنین $0 < \tau_2 < \infty$ مقدار تأخیر زمانی و r تعداد قوانین فازی است. به این روش مدل سازی، مدل T-S فازی با تأخیر

داریم:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) = & \sum_{i=1}^r h_i^2(p)x(t)^T \{PG_{ii} + G_{ii}^T P \\ & + PA_{ir}R_1^{-1}A_{ir}^T P + R_1\}x(t) \\ & + 2 \sum_{i=1}^r \sum_{i < j} h_i h_j x(t)^T \{P(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}) \\ & + (\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2})^T P + \frac{1}{2}P(A_{ir}R_1^{-1}A_{ir}^T \\ & + A_{jr}R_1^{-1}A_{jr}^T)P + R_1\}x(t) \end{aligned} \quad (23)$$

بنابراین اگر پیش قضیه زیر برقرار باشد، آنگاه مشتق لیاپانوف منفی خواهد بود، یعنی $\dot{V}(x) < 0, \forall x \neq 0$.

پیش قضیه ۲: اگر $P > 0$ و $R_1 > 0$ باشد، در صورتی که سیستم حلقه بسته نامساوی زیر را برقرار نماید، سیستم حلقه بسته رابطه (۲۰) پایداری مجانبی است [۳۱]:

$$\begin{aligned} PG_{ii} + G_{ii}^T P + PA_{id}R_1^{-1}A_{id}^T P + R_1 < 0, \\ i = 1, \dots, r, \\ P(\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2}) + (\frac{G_{ij} + G_{ji}}{2})^T P \\ + \frac{1}{2}P(A_{id}R_1^{-1}A_{id}^T + A_{jd}R_1^{-1}A_{jd}^T)P + R_1 \leq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

با استفاده از مکمل شور [۳۵] می توان نامساوی بالا را به صورت یک نامساوی ماتریسی خطی (LMI) تبدیل کرد. بنابراین سیستم حلقه بسته با کنترل کننده (۱۹) به صورتی که $1 \leq i \leq r$ و M_i و $W_1 > 0, X > 0$ باشد و شرایط نامساوی ماتریسی خطی زیر را راضی نماید، پایدار خواهد بود [۳۱]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} L & X \\ X & -W_1 \end{bmatrix} < 0 \quad 1 \leq i \leq r \\ L = A_{io}X + XA_{io}^T + A_{i\tau}W_1A_{i\tau}^T - B_{io}M_i - M_i^T B_{io}^T \\ \begin{bmatrix} U_{ij} + V_{ij} + W_{ij} & X \\ X & -\frac{1}{2}W_1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad 1 \leq i \leq j \leq r \\ U_{ij} = A_{io}X + XA_{io}^T + A_{jo}X + XA_{jo}^T, \\ V_{ij} = -B_{io}M_j - M_j^T B_{io}^T - B_{jo}M_i - M_i^T B_{jo}^T, \\ W_{ij} = A_{i\tau}W_1A_{i\tau}^T + A_{j\tau}W_1A_{j\tau}^T \end{aligned} \quad (25)$$

که در رابطه بالا $W_1 = R_1^{-1}, P \neq 0$ می باشد و ماتریس بهره های کنترل کننده از رابطه $F_i = M_i X^{-1}$ به دست می آید.

۴- شبیه سازی ها

پارامترهای عددی سیستم تک ماشینه متصل به شین بی نهایت شکل ۱ در ضمیمه آمده است. در اینجا فرض می شود که ژنراتور توان ۱ p.u را تولید می کند. برای به دست آوردن زیرسیستم های خطی نیاز به محاسبه نقطه تعادل سیستم می باشد. نقطه تعادل سیستم با استفاده از $\dot{x}(t) = 0$

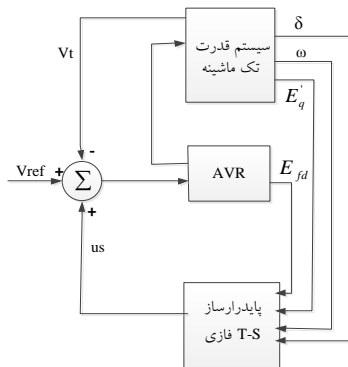
محاسبه می شود که در این مثال نقطه تعادل برابر $x_e = [0.5502 \quad 0 \quad 1/187 \quad 1/956]$ خواهد بود. برای بررسی پایداری در مواردی که نقطه تعادل $(x_e, u_e) \neq 0$ هستند، باید نقاط تعادل به مبدأ منتقل شود [۳۲-۳۴]. بنابراین نیاز به یک تغییر کوچک برای ایجاد تعادل در سیستم است، برای این منظور با در نظر گرفتن متغیرهای حالت به صورت $x = [\delta \quad \omega \quad E'_q \quad E'_{fd}]^T$ و با انتخاب $\zeta = x - x_e$ و $v = u - u_e$ به صورت زیر خواهد شد:

$$\dot{x}(t) = f(\zeta + x_e, v + u_e) \quad (26)$$

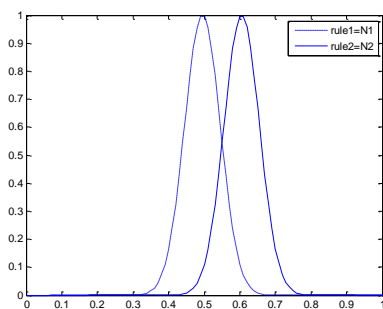
با انتخاب یک بازه مناسب به صورت $\delta_e \pm 10\%$ برای تغییرات زاویه ای ژنراتور می توان نقاط خطی سازی را به ازای $\delta_e + 10\% = 0.60522$ و $\delta_e - 10\% = 0.49518$ محاسبه کرد. بنابراین نقاط خطی سازی به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\begin{aligned} \bar{x} = [0.49518 \quad 0 \quad 1.3007 \quad 2.2508] \\ \bar{x} = [0.60522 \quad 0 \quad 1.0937 \quad 1.73] \end{aligned} \quad (27)$$

در شکل ۲ بلوک دیاگرام پایدارساز فازی نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۲ دیده می شود که ورودی به پایدارساز فازی، فیدبک از متغیرهای حالت سیستم و خروجی پایدارساز فازی، سیگنال پایدارکننده می باشد. بنابراین، با انتخاب توابع عضویت گوسی به صورت شکل ۳ برای بازه تغییرات $\delta = [0.49518 \quad 0.60522]$ قوانین فازی محاسبه می شود؛ با توجه به موارد گفته شده برای متغیرهای حالت، E'_{fd} و E'_q نیز از توابع عضویت گوسی به ازای بازه تغییرات $[1/30.7 \quad 1/0.937]$ ، $E'_{fd} = [1/73 \quad 2/25.8]$ استفاده می شود.



شکل ۲: بلوک دیاگرام ساختار پایدارساز T-S فازی



شکل ۳: توابع عضویت انتخابی برای متغیر δ

پارامترهای مربوط به CPSS با احتساب تولید ۵۰٪ میرایی برای سیستم قدرت تک‌ماشینه در ضمیمه آورده شده است [۳۲]. در شکل‌های ۴ تا ۶، رفتار سیستم به ازای تأخیر $\tau = 0.15$ ، $\tau = 0.06$ و $\tau = 0.2$ مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴، با تأخیر ۰/۰۶ ثانیه روی ولتاژ اندازه‌گیری‌شده باس ترمینال ژنراتور سیستم تک‌ماشینه شکل ۱، زاویه روتور ژنراتور با استفاده از پایدارساز مرسوم تقریباً بعد از گذشت ۴ ثانیه و با استفاده از پایدارساز مبتنی بر مرجع [۲۳] بعد از گذشت ۳ ثانیه پایدار می‌شود؛ ولی با پایدارساز پیشنهادی در زمان کم‌تری، زیر ۱ ثانیه به پایداری می‌رسد. در شکل ۵ دیده می‌شود که در تأخیر زمانی ۰/۱۵ ثانیه پایدارساز سیستم قدرت مرسوم میرایی لازم را تهیه نمی‌کند و سیستم دارای میرایی ضعیف است و زاویه روتور ژنراتور با دامنه فرکانس ثابت دارای نوسان است و پایدارساز مبتنی بر جبران‌ساز تأخیر زمانی تطبیقی پیشنهادشده توسط [۲۳] تقریباً بعد از گذشت ۵ ثانیه می‌تواند سیستم قدرت را پایدار کند؛ ولی پایدارساز پیشنهادی همچنان قبل از ۱ ثانیه به خوبی میرایی موردنیاز را تهیه می‌کند. در شکل ۶، در تأخیر ۰/۲ ثانیه پایدارساز سیستم قدرت مرسوم کارایی خود را به‌طور کامل از دست می‌دهد و دامنه فرکانس نوسانات افزایش می‌یابد و سیستم به سمت ناپایداری می‌رود و همچنین دیده می‌شود که کارایی پایدارساز بیان‌شده توسط مرجع [۲۳] نیز کاهش می‌یابد و زاویه روتور با فرکانس پایین نوسان دارد، ولی با وجود پایدارساز فازی پیشنهادی در تأخیر زمانی ۰/۲ ثانیه نیز نوسانات سیستم به خوبی پایدار می‌شود و مقدار تأخیر زمانی در کارایی پایدارساز پیشنهادی اختلالی ایجاد نمی‌کند.

جدول ۱ مقادیر ویژه سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت را با وجود پایدارساز T-S فازی طراحی‌شده را نمایش می‌دهد. در جدول زیر به ازای تأخیرهای زمانی متفاوت دیده می‌شود که با افزایش مقدار تأخیر زمانی قسمت حقیقی مقادیر ویژه تمایل دارند که به سمت راست حرکت کنند و در واقع سیستم ناپایدار شود؛ اما پایدارساز فازی طراحی‌شده به خوبی سیستم را پایدار می‌کند و قسمت حقیقی مقادیر ویژه به خوبی در قسمت چپ باقی می‌ماند و همواره سیستم را پایدار می‌کند.

برای نمایش قابلیت انعطاف و کارایی، پایدارساز پیشنهادی روی یک سیستم چندماشینه نیز آزمایش می‌شود. شکل ۷ یک سیستم قدرت ۴ ماشینه، ۱۳ باسه دوناچی‌های که در اغلب مسائل پایداری سیگنال کوچک از آن استفاده می‌شود را نمایش می‌دهد [۳۷]، اطلاعات مربوط به سیستم در جدول ۱ و ۳ در پیوست ب آورده شده است. ژنراتور ۳ به‌عنوان ژنراتور مینا برای ایجاد مرجع زاویه‌ای برای سیستم قدرت انتخاب می‌شود. نتایج حاصل از پخش بار در جدول ۲ پیوست ب آمده است. ژنراتورهای G1، G2 و G3 دارای پایدارساز مرسوم بوده و با توجه به اینکه ولتاژ باس ترمینال ژنراتور G4 دارای تأخیر باشد، پایدارساز پیشنهادی روی ژنراتور G4 آزمایش خواهد شد.

با خطی‌سازی معادلات حول نقاط خطی‌سازی منتقل‌شده به مبدأ، زیرسیستم‌های خطی محاسبه می‌شوند:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.1791 & 0 & -0.0776 & 0 \\ -0.1626 & 0 & -0.5142 & 0.1667 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

$$A_{r1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1382.7 & 0 & -4667.7 & 0 \end{bmatrix}$$

(۲۸)

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 \\ -0.1405 & 0 & -0.092 & 0 \\ -0.1938 & 0 & -0.5142 & 0.1667 \\ 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

$$A_{r2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1546.8 & 0 & -4573.6 & 0 \end{bmatrix}$$

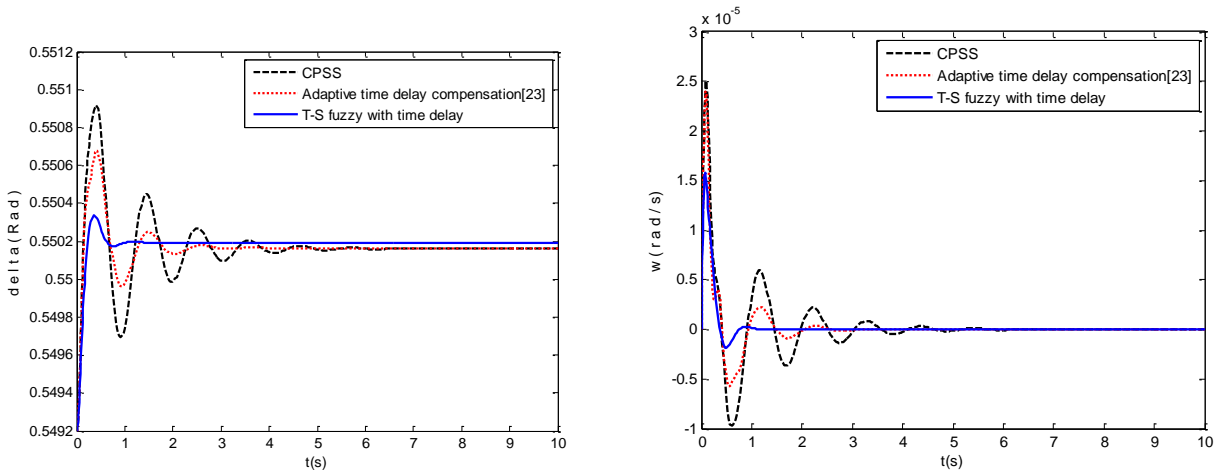
$$B_1 = B_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 10000]$$

با حل روابط نامساوی ماتریسی خطی (۲۵) با جعبه‌ابزار YALMIP [۳۶] که یک جعبه‌ابزار اضافه‌شده به نرم‌افزار MATLAB برای حل نامساوی‌های ماتریسی است، بهره‌های فیدبک داخلی محاسبه خواهد شد، که به صورت زیر است:

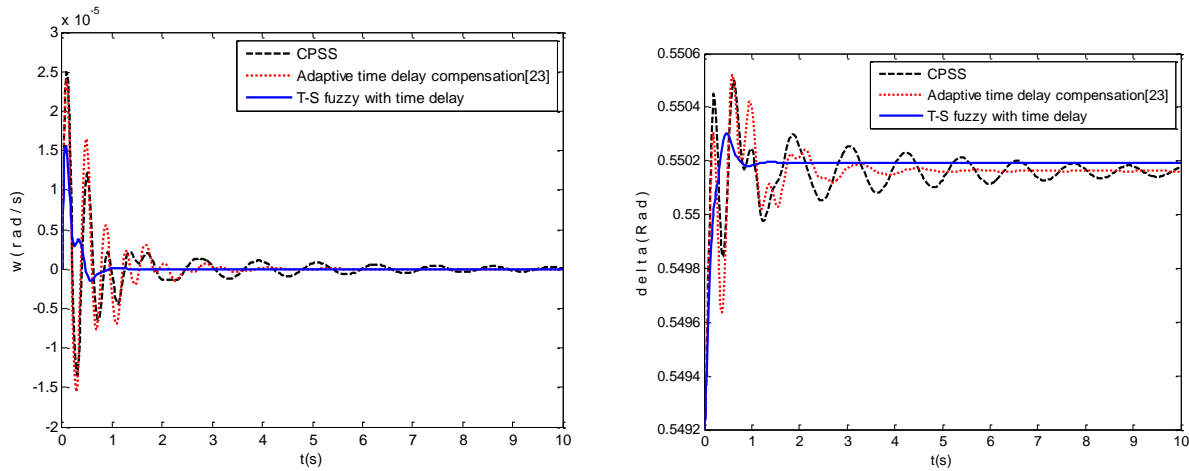
$$F_1 = [-0.9378 \quad -275.3835 \quad 2.2075 \quad 0.0033] \\ F_2 = [-1.1477 \quad -270.2345 \quad 2.24 \quad 0.0033] \quad (۲۹)$$

با شبیه‌سازی غیرخطی می‌توان کارایی پایدارساز پیشنهادی را در مقایسه با پایدارسازهای طراحی‌شده با مرجع [۲۳] که مبتنی بر جبران‌سازی تأخیر زمانی تطبیقی (ATDC) است و در طراحی آن اثر تأخیر زمانی در نظر گرفته شده است مقایسه می‌شود. همچنین روش فازی پیشنهادی با پایدارساز مبتنی بر روش کلاسیک و مرسوم که در طراحی آن‌ها اثر تأخیر زمانی در نظر گرفته نشده و تابع تبدیل آن‌ها به صورت زیر است را مشاهده نمود:

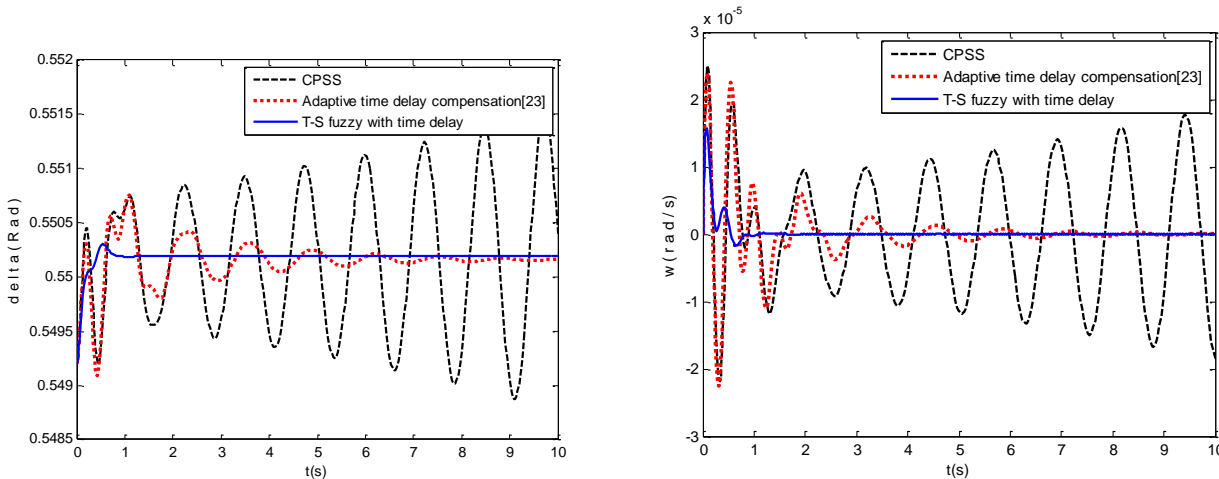
$$G_{PSS} = K_{CPSS} \frac{(ST_w)(1+ST_1)(1+ST_3)}{(1+ST_w)(1+ST_2)(1+ST_4)} \quad (۳۰)$$



شکل ۴: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و w سیستم قدرت تک‌ماشینه با تأخیر 0.06 ثانیه در ولتاژ ترمینال ژنراتور



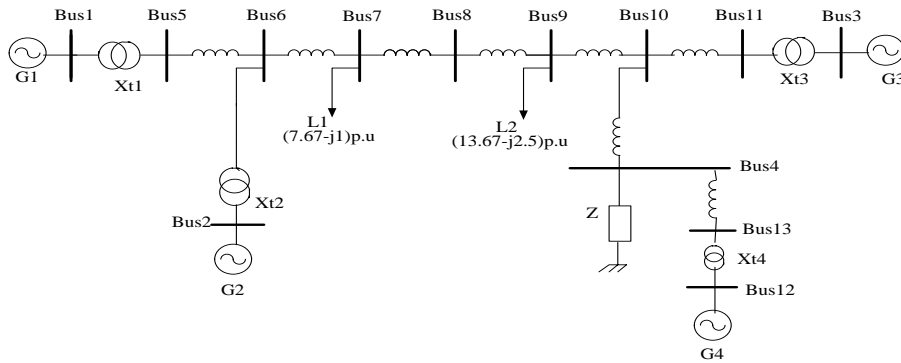
شکل ۵: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و w سیستم قدرت تک‌ماشینه با تأخیر 0.15 ثانیه در ولتاژ ترمینال ژنراتور



شکل ۶: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و w سیستم قدرت تک‌ماشینه با تأخیر 0.2 ثانیه در ولتاژ ترمینال ژنراتور

جدول ۱: تحلیل مقادیر ویژه برای سیستم قدرت تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت با حضور پایدارساز T-S فازی طراحی شده

Time delay	$\tau = 0.06$ s	$\tau = 0.15$ s	$\tau = 0.2$ s	$\tau = 0.3$ s
eigenvalue	$-72/9323$	$-66/8204$	$-65/7310$	$-64/6090$
	$-17.4426 \pm 28.2708j$	$-15.7977 \pm 21.1388j$	$-15.5612 \pm 19.5481j$	$-15.3155 \pm 17.7734j$
	$-4.6816 \pm 6.0733j$	$-4.3825 \pm 4.6338j$	$-4.3303 \pm 3.9808j$	$-4.3037 \pm 2.8445j$

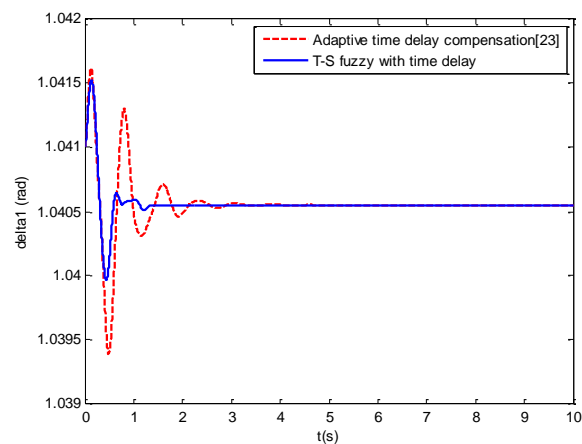
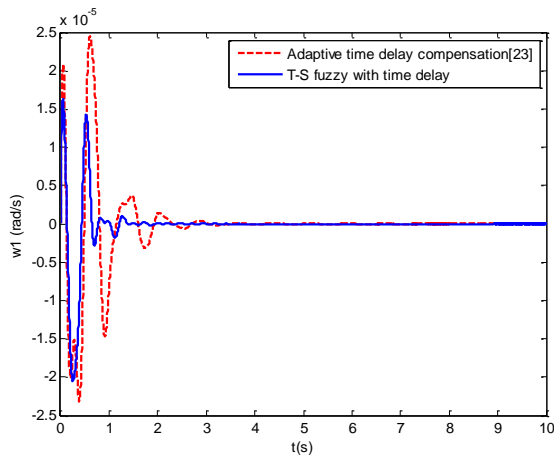


شکل ۷: سیستم قدرت چهار ماشینه دوسطحی

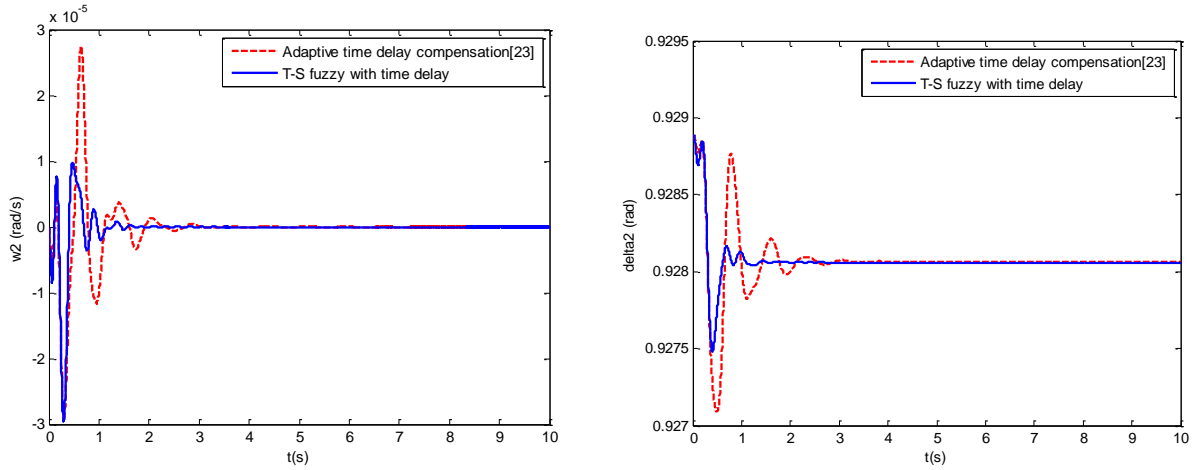
روی ژنراتور G4 در تأخیر ۰/۰۶ ثانیه و حتی تأخیرهای بزرگ‌تر روی ولتاژ ترمینال، پایداری سیستم حفظ خواهد شد. باید توجه داشت که به علت اینکه در سیستم‌های قدرت شرایط بهره‌برداری دائماً در حال تغییر است، نیاز به پایدارسازی است که بتواند در حضور تأخیر زمانی کارایی خود را حفظ نماید و دارای سرعت میراکنندگی مناسب باشد تا قبل از تغییرات شرایط بهره‌برداری سیستم را پایدار نماید؛ به همین دلیل جبران‌ساز بیان‌شده در مرجع [۲۳] دارای عملکرد مناسب نبوده و پایدارساز فازی پیشنهادی از عملکرد مناسب‌تری برخوردار است.

شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ نیز پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω را برای ژنراتورهای G1، G2 و G3 را برای تأخیر ۰/۲ ثانیه نمایش می‌دهد. دیده می‌شود که در تأخیر ۰/۲ ثانیه پایدارساز طراحی شده با روش مرجع [۲۳] به‌طور کلی کارایی خود را از دست می‌دهند. این در حالی است که پایدارساز طراحی شده با روش پیشنهادی در این مقاله به‌خوبی کارایی خود را حفظ می‌نماید و پایداری سیستم قدرت را تأمین می‌کند.

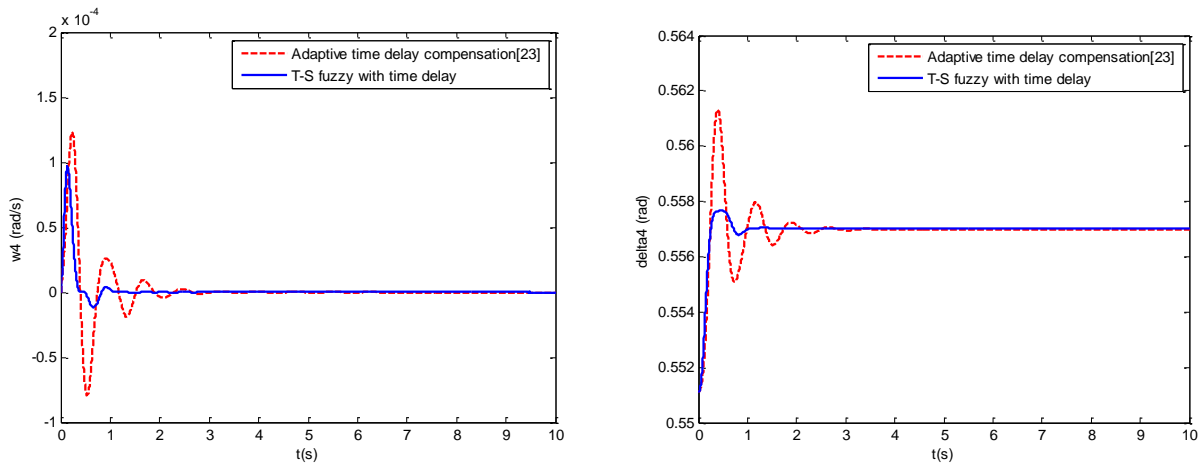
در شکل‌های ۸ تا ۱۳، رفتار سیستم قدرت چندماشینه را به ازای تأخیرهای $\tau = 0.04$ و $\tau = 0.06$ در ولتاژ باس ترمینال ژنراتور G4 نمایش داده می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω را برای ژنراتورهای G1 و G2 را در صورت نصب جبران‌ساز تأخیری تطبیقی پیشنهادشده توسط مرجع [۲۳] و همچنین پایدارساز فازی پیشنهادی در این مقاله را روی ژنراتور G4، نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد که در صورت نصب پایدارساز پیشنهادی روی ژنراتور G4 اثر مطلوبی روی باقی ژنراتورهای سیستم می‌گذارد و ژنراتورهای دیگر نیز در زمان کم‌تری به پایداری می‌رسند. شکل ۱۰ پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω را در ژنراتور G4 با تأخیر زمانی ۰/۰۴ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4 نمایش می‌دهد. از شکل ۱۰ نتیجه می‌شود که پایدارساز پیشنهادی در زمان کم‌تری، زیر ۱ ثانیه پایداری لازم را برای ژنراتور G4 فراهم می‌کند. با توجه به شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ دیده می‌شود، در تأخیر ۰/۰۶ ثانیه در صورتی که از روش جبران‌ساز تأخیر زمانی تطبیقی بیان‌شده در مرجع [۲۳] روی ژنراتور G4 استفاده شود، سرعت میرایی سیستم کاهش می‌یابد و نوسانات زاویه‌ای روتور با سرعت بسیار پایین میرا می‌شود و این در صورتی است که با نصب پایدارساز فازی پیشنهادی



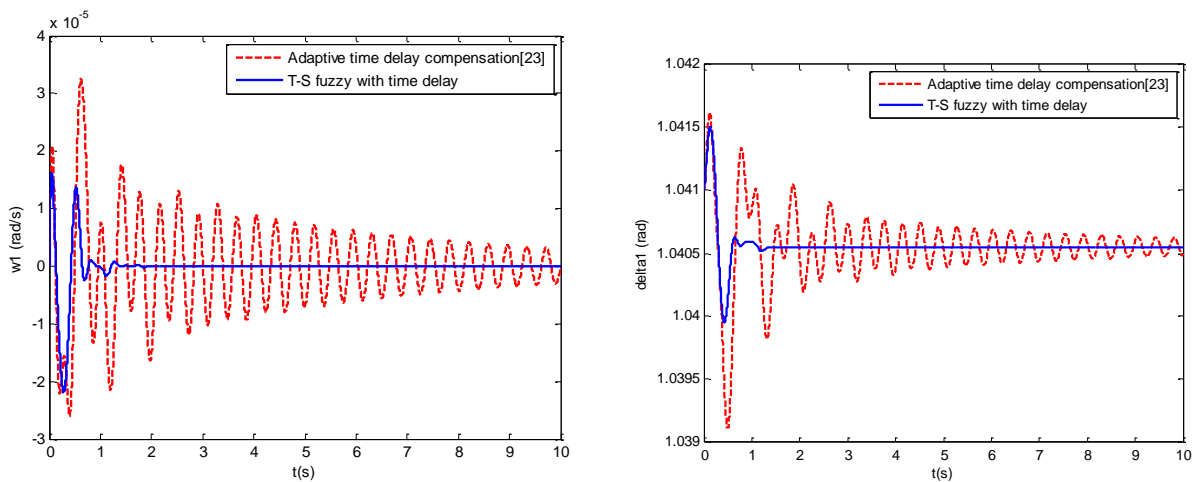
شکل ۸: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و ω برای ژنراتور G1 با تأخیر زمانی ۰/۰۴ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



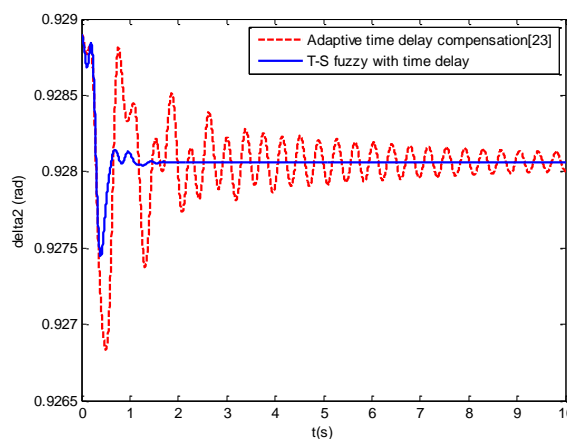
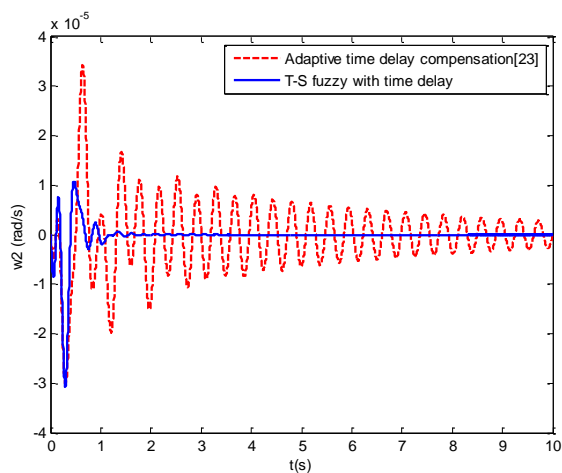
شکل ۹: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و ω برای ژنراتور G2 با تأخیر زمانی ۰/۰۴ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



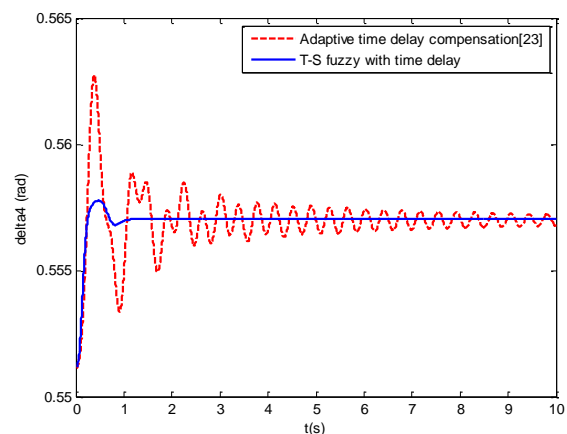
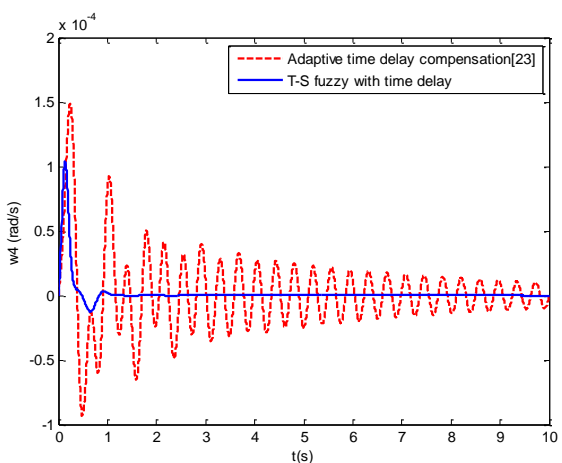
شکل ۱۰: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و ω برای ژنراتور G4 با تأخیر زمانی ۰/۰۴ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



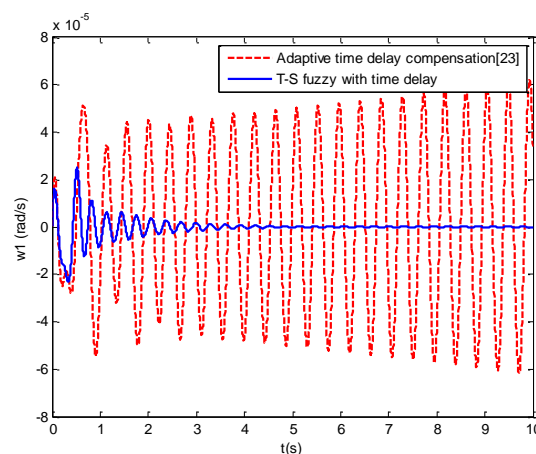
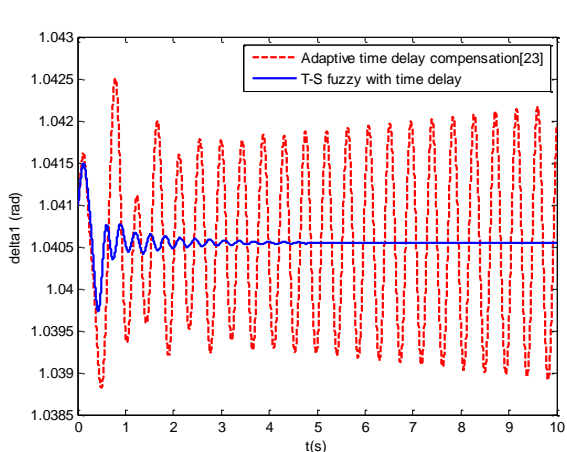
شکل ۱۱: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و ω برای ژنراتور G1 با تأخیر زمانی ۰/۰۶ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



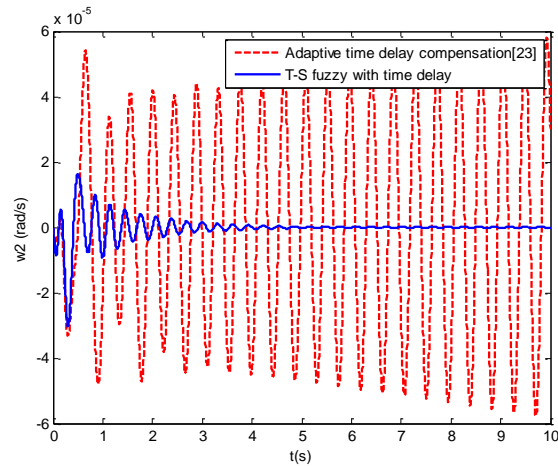
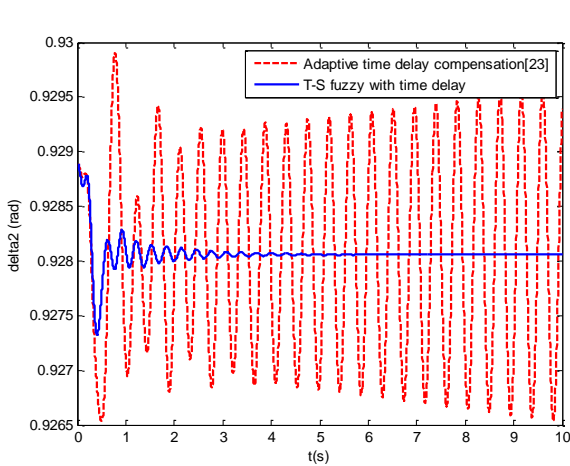
شکل ۱۲: پایداری دینامیکی متغیرهای δ و ω برای ژنراتور G2 با تأخیر زمانی ۰/۰۶ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



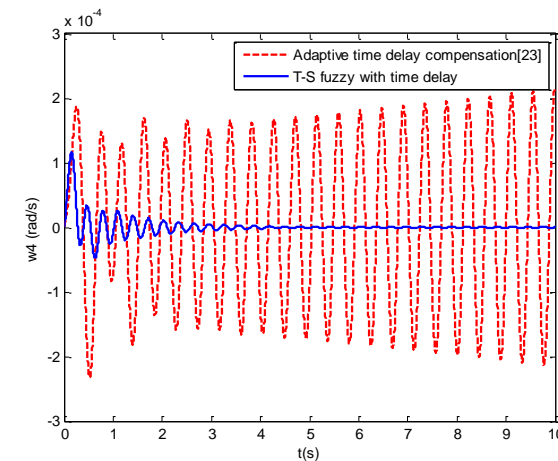
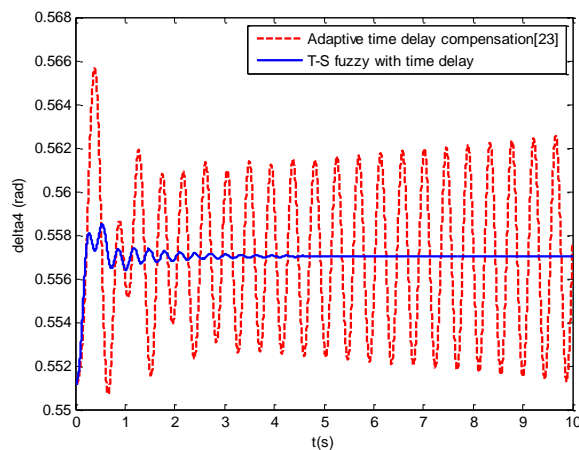
شکل ۱۳: پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω برای ژنراتور G4 با تأخیر زمانی ۰/۰۶ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



شکل ۱۴: پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω برای ژنراتور G1 با تأخیر زمانی ۰/۲ ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



شکل ۱۵: پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω برای ژنراتور G2 با تأخیر زمانی 0.2 ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4



شکل ۱۶: پایداری دینامیکی متغیرهای حالت δ و ω برای ژنراتور G4 با تأخیر زمانی 0.2 ثانیه روی ولتاژ ترمینال ژنراتور G4

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، نحوه مدل سازی معادلات دینامیکی شبکه قدرت با وجود تأثیر تأخیر زمانی ارائه شد و با استفاده از روش T-S فازی برای شبکه های قدرت که دارای تأخیر زمانی هستند، یک پایدارساز برای میرایی نوسانات فرکانس پایین طراحی گردید. با استفاده از این روش معادلات غیرخطی شبکه قدرت به چند زیرسیستم خطی تبدیل شد و برای هر زیرسیستم با استفاده از طرح جبران سازی توزیع شده موازی، یک کنترل کننده داخلی طراحی گردید که از مجموع زیرسیستم های خطی و کنترل کننده های خطی داخلی، معادلات غیرخطی سیستم قدرت محاسبه شده است و کنترل کننده به دست آمده در کل غیرخطی خواهد بود. شرایط پایدارسازی با استفاده از توابع لیاپانوف- کراسوفسکی به صورت یک سری نامساوی های ماتریسی خطی بیان گردید. با حل این نامساوی های ماتریسی خطی، بهره های فیدبک داخلی محاسبه می شود. این پایدارساز روی سیستم قدرت تک ماشینه و چندماشینه که دارای

تأخیر روی ولتاژ اندازه گیری شده باس ترمینال ژنراتور هستند، آزمایش شده و با پایدارساز مرسوم که در طراحی آن اثر تأخیر زمانی صرف نظر شده و همچنین با جبران ساز تأخیری تطبیقی بیان شده در مرجع [۲۳] که در طراحی آن اثر تأخیر در نظر گرفته شده؛ مقایسه شده است. از نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که پایدارساز سیستم قدرت مرسوم که در طراحی آن ها اثر تأخیر زمانی صرف نظر می شود، در حضور تأخیر زمانی های بسیار کوچک نیز کارایی خود را از دست می دهد و با افزایش مقدار بسیار کمی به مقدار تأخیر زمانی، دیگر توانایی لازم برای تولید میرایی را ندارد و سیستم ناپایدار خواهد شد. همچنین دیده می شود که جبران ساز بیان شده در مرجع [۲۳] با افزایش مقدار تأخیر دارای سرعت میراکنندگی پایین است و سیستم بعد از گذشت زمان بیش تری میرا می شود و این در حالی است که تأخیر زمانی روی کارایی پایدارساز فازی پیشنهادی تأثیر نداشته و پایدارساز پیشنهادی به خوبی میرایی لازم را تهیه می کند و حتی با افزایش مقدار تأخیر زمانی سیستم پایدار باقی می ماند. بنابراین نتیجه می شود که در سیستم های قدرت به دلیل

جدول ۴: اطلاعات مربوط به خطوط

انتقال در سیستم قدرت چندماشینه

از باس شماره	به باس شماره	راکتانس خط (xs) p.u
۱	۵	۰/۰۱۶
۵	۶	۰/۰۲۵
۲	۶	۰/۰۱۶
۶	۷	۰/۰۱
۷	۸	۰/۰۵۵
۸	۹	۰/۰۵۵
۹	۱۰	۰/۰۱
۱۰	۴	۰/۱۵
۱۰	۱۱	۰/۰۲۵
۱۱	۳	۰/۰۱۶
۴	۱۳	۰/۰۷۵
۱۳	۱۲	۰/۰۷۵

تغییرات شرایط بهره‌برداری نیاز به پایدارسازی است که سرعت میراکنندگی مناسب را داشته باشد و پایدارساز فازی پیشنهادی در این مقاله می‌تواند در حضور تأخیر زمانی‌های مختلف کارایی خود را حفظ کند و سیستم را به‌خوبی پایدار نماید.

پیوست‌ها

الف- پارامترهای مربوط به سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بی‌نهایت

$$\omega = 377, H = 5, P_m = 1 p.u,$$

$$T'_d = 6s, T_e = 0.1, k_e = 100,$$

$$V_\infty = 1.07 \angle 0, X'_d = 0.32, xq = 0.32,$$

$$z = \sqrt{0.612 + 3/1816} j$$

پارامترهای مربوط به پایدارساز سیستم قدرت مرسوم (CPSS)

$$k_{CPSS} = 15, T_\omega = 10, T_1 = T_r = 0.2148,$$

$$T_r = T_f = 0.595$$

ب- اطلاعات سیستم قدرت چندماشینه

اطلاعات مربوط به پایدارساز سیستم قدرت برای ژنراتورهای G1, G2 و G3

$$k_{CPSS} = 15, T_\omega = 10, T_1 = T_r = 0.2148,$$

$$T_r = T_f = 0.595$$

مراجع

- [1] J. Talaq, "Optimal power system stabilizers for multi machine systems," *Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 793-803, 2012.
- [2] Y. J. Lin, "Proportional plus derivative output feedback based fuzzy logic power system stabilizer," *Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 301-307, 2013.
- [3] A. Irvani, M. Karrari and O. P. Malik, "Study of a major oscillations event in northeastern area of the Iranian power network," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 7, pp. 1292-1298, 2011.
- [4] P. W. Sauer and M. A. PAI, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, 1998.
- [5] G. Dill and A. E Silva, "Robust design of power system controllers based on optimization of pseudospectral functions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, 2013.
- [6] S. Wang, "A novel objective function and algorithm for optimal PSS parameter design in a multi-machine power," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, 2013.
- [7] S. Zhang and F. L. Luo, "An improved simple adaptive control applied to power system stabilizer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 2, pp. 369-375, 2009.
- [8] C. Zhu, M. Khammash, V. Vittal and W. Qiu, "Robust power system stabilizer design using H_∞ loop shaping approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 810-818, 2003.
- [9] S. Kamalasan, G. D. Swann and R. Yousefian, "A novel system-centric intelligent adaptive control architecture for power system stabilizer based on adaptive neural networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1074-1085, 2014.
- [10] H. Alkhatib and J. Duveau, "Dynamic genetic algorithms for robust design of multimachine power system stabilizers," *Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 45, no. 1, pp. 242-251, 2013.

جدول ۲: اطلاعات حاصل از بارگذاری ژنراتورها در سیستم

قدرت چندماشینه

	ولتاژ ترمینال (p.u)	زاویه	توان اکتیو (p.u)	توان راکتیو (p.u)
ژنراتور ۱	۱/۱۴۶۶	۵۱/۲۲۱۳	۶/۶۴۵۶	۳/۰۸۱۸۵
ژنراتور ۲	۱/۰۸۹۱۳	۴۳/۵۷۸۸	۶/۶۴۵۸	۲/۰۶۱۸
ژنراتور ۳	۱/۰۳	۱۶/۵۰۹۴	۷/۱۳۹	۱/۷۸۷۸
ژنراتور ۴	۱/۰۲	۱۶/۲۸۴۹	۱	۰/۲۰۹۸

جدول ۳: اطلاعات مربوط به ژنراتورها در سیستم قدرت

چندماشینه

پارامترها	ژنراتور ۱	ژنراتور ۲	ژنراتور ۳	ژنراتور ۴
H	۶/۵	۶/۵	۶/۱۷۵	۵
x_d	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۶
x'_d	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۳۲
T'_{d0}	۸	۸	۸	۶
x_q	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۳۲
T'_{q0}	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴
x'_q	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۰۳۳	۰/۳۲
K_e	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۱۰۰
T_e	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۱

- compensation,” *IET Gener. Transmiss. Distrib.*, vol. 6, no. 9, 2012.
- [25] S. B. Wang, X. Y. Meng and T. W. Chen, “Wide-area control of power systems through delayed network communication,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 495–503, 2012.
- [26] W. Yao, L. Jiang, Q. H. Wu, J. Y. Wen and S. J. Cheng, “Delay-dependent stability control for power system with multiple time-delays,” *Transactions on Power Systems*, vol. PP, no. 99, pp. 1-7, 2015.
- [۲۷] سعید اباذری، مجتبی برخورداری یزدی و عباس عرب دردری، «طراحی کنترل کننده مقاوم SVC مبتنی بر WAMS با در نظر گرفتن نامعینی تأخیر زمانی سیگنال‌های راه‌دور»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۴، صفحات ۱۲-۲، ۱۳۹۴.
- [28] Q. Gao, X. J. Zeng, G. Feng and Y. Wang, “T-S-fuzzy-model-based approximation and controller design for general nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Man and Cybernetics Systems Part B: Cybernetics*, vol. 42, no. 4, pp. 1143-1154, 2012.
- [29] X. Zhao, L. Zhang, P. Shi, and H. R. Karimi, “Novel stability criteria for T-S fuzzy systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 2, pp. 313-323, 2014.
- [30] T. Takagi and M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” *IEEE Transactions on Man and Cybernetics Systems*, vol. SMC-15, no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [31] K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, Wiley Publishing, 2001.
- [32] N. S. D. Arrifano and V. A. Oliveira, “Fuzzy stabilization of power systems in a co-generation scheme subject to random abrupt variations of operating conditions,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 384-393, 2007.
- [33] N. S. D. Arrifano and V. A. Oliveira, “Robust H fuzzy control approach for a class of markovian jump nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy System*, vol. 14, no. 6, 2006.
- [34] N. S. D. Arrifano and V. A. Oliveira, “State feedback fuzzy model based control for markovian jump nonlinear systems,” *Controle & Automatica Sociedade Brasileira de*, vol. 15, no. 3, 2004.
- [35] S. Boyd and L. E. Ghaoui, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, SIAM Publishing, Philadelphia, 1994.
- [36] J. Lofberg, “YALMIP: a toolbox for modeling and optimization in MATLAB,” *IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design*, pp. 284-289, 2004.
- [37] P. Kundur, *Power Systems Stability and Control*, New York: Electrical Power Research Institute, McGraw Hill, 1994.
- [11] Y. J. Lin, “Proportional plus derivative output feedback based fuzzy logic power system stabiliser,” *Elsevier International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 301-307, 2013.
- [۱۲] سعید اباذری و صادق قائدی، «بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چندماشین با کاربرد TCSC»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۵، شماره ۲، صفحات ۹-۱، ۱۳۹۴.
- [13] H. Ali and D. Dasgupta, “Effects of time delays in the electric power grid,” *Springer Berlin Heidelberg in Critical Infrastructure Protection VI*, vol. 390, pp. 139-154, 2012.
- [14] H. Wu and G. T. Heydt, “The impact of time delay on robust control design in power systems,” *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 27–31, 2002.
- [15] H. Jia, X. Cao, X. Yu and P. Zhang, “A simple approach to determine power system delay margin,” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-7, 2007.
- [16] F. Milano and M. Anghel, “Impact of time delays on power system stability,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 59, no. 4, pp. 889-900, 2012.
- [17] W. Hongxia, K. S. Tsakalis and G. T. Heydt, “Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1935-1941, 2014.
- [18] A. B. Chowdhury, A. Kulhareet and G. Raina, “A study of the SMIB power system model with delayed feedback,” *International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, pp. 1-6, 2011.
- [19] J. Hongjie and N. Guangyu, “Study on the impact of time delay to power system small signal stability,” *IEEE Mediterranean Electro-technical Conference (MELECON)*, pp. 1011-1014, 2006.
- [20] Z. Jianyun and S. Yuanzhang, “Effect of delayed input on oscillation damping using wide area power system stabilizer,” *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-4, 2005.
- [21] X. Yu and Z. Jinli, “A LMI based approach to power system stability analysis with time delay,” *TENCON 2008 IEEE Region 10 Conference*, pp. 1-6, 2008.
- [22] Q. Sun, A. Haiyun, J. Hongjie and Y. Xiaodan, “An improved power system stability criterion with multiple time delays,” *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, 2009.
- [23] L. Cheng, G. Chen, W. Gao, F. Zhang and G. Li, “Adaptive time delay compensator (ATDC) design for wide-area power system stabilizer,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 6, 2014.
- [24] P. Zhang, D. Y. Yang, K. W. Chan and G. W. Cai, “Adaptive wide-area damping control scheme with stochastic subspace identification and signal time delay