

## استفاده از کنترلر منطق فازی در طراحی پایدارساز سیستم قدرت

امین علوی اشکفتکی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

### چکیده

هدف سیستم قدرت به عنوان یک سیستم دینامیکی می‌تواند تحت تاثیر اختلالات قرار گیرد و بسیار مهم است که این اختلالات منجر به ناپایداری سیستم نشود. پایدارساز سیستم قدرت (PSS) تجهیزاتی است که قادر است با کنترل تحریک ژنراتور سنکرون، پایداری شبکه را تامین نماید. به همین دلیل استفاده از آن در سیستم‌های قدرت بسیار رایج است. نکته بسیار مهم، نوع روش کنترلی است که در طراحی این تجهیز از آن استفاده می‌گردد. در روش‌های سنتی از یک کنترل کننده پیشفاز - پسفاز استفاده می‌شده است که این نوع کنترلر تنها برای یک نقطه کار جوابگو است و در نقاط کار دیگر لزوماً عملکرد مناسبی ندارد. این عیب بزرگ منجر به استفاده از روش‌های دیگری در ساختار پایدارساز سیستم قدرت گردید. یکی از این روش‌ها استفاده از کنترلر منطق فازی (FLC) است که یک روش هوشمندانه برای حل مشکل مطرح شده می‌باشد. در این مقاله کارآمد بودن و برتری این روش نسبت به روش‌های سنتی به وضوح نشان داده می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** سیستم قدرت، سیستم دینامیکی، پایدارساز سیستم قدرت، ژنراتور سنکرون، پایداری شبکه، کنترل کننده پیشفاز، کنترلر منطق فازی.

<sup>1</sup> Power System Stabilizer

<sup>2</sup> Fuzzy Logic Controller

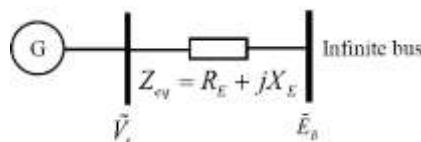
## ۱- مقدمه

سیستم قدرت یک سیستم دینامیکی است که اختلالات بر آن تاثیرگذار بوده و این اختلالات منجر به تغییرات زاویه روتور ژنراتورها می‌شوند. اگر پس از ایجاد این تغییرات نقطه کار جدیدی برای زاویه روتور ژنراتورها حاصل شد، سیستم پایدار می‌باشد در غیر این صورت ناپایداری به وجود آمده است. زمانی که از تنظیم‌کننده ولتاژ (AVR) در ساختار ژنراتور استفاده می‌شود، می‌تواند منجر به منفی شدن گشتاور میراساز گردد که این موضوع در ارتباط مستقیم با ناپایداری سیستم قرار دارد. به عبارت دیگر افزایش گشتاور میراساز است که می‌تواند پایداری سیستم را افزایش دهد؛ به همین دلیل بایستی با استفاده از پایدارساز سیستم قدرت این گشتاور را افزایش داد و در حقیقت نقطه کار پایدار جدیدی برای سیستم ایجاد نمود. به دلیل کاربرد بسیار حیاتی این تجهیز یعنی پایدارساز سیستم قدرت، استفاده از آن در شبکه قدرت بسیار رایج است. این تجهیز در حقیقت از طریق کنترل تحریک، پایداری سیستم را تامین می‌نماید. نکته مهم نوع روش کنترلی است که در PSS مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش سنتی یعنی کنترل‌کننده پیشفاز - پسفاز، تنها برای یک نقطه کار نتیجه مطلوبی دارد و هیچ الزامی برای کارایی مناسب در نقاط کار مختلف وجود ندارد. به همین دلیل روش‌های دیگری برای حل این مشکل مطرح شده‌اند.

یک روش کنترلی در پاسخ به این مشکل،  $H_{\infty}$  است. نتایج به‌دست آمده از شرایط مختلف کاری نشان می‌دهد که این روش عملکرد مناسبی را از خود نشان می‌دهد (Jabali et al, 2013). (Islam et al, 2013)، از الگوریتم بهینه‌سازی BAT برای طراحی بهینه PSS استفاده می‌کند. در حقیقت این الگوریتم بهینه‌ساز به دنبال پارامترهای مناسب برای PSS در شرایط مختلف می‌گردد. طراحی PSS می‌تواند بر اساس جبران‌ساز فاز محلی انجام گیرد. در این روش برای حذف نوسانات به وجود آمده پارامترهای ژنراتور و ترانس به تنهایی کفایت می‌کنند (Lv et al, 2015). (Farah et al, 2012)، طراحی PSS را مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی انجام می‌دهد. در حقیقت در این روش مسئله طراحی به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی مطرح می‌گردد. (Sharma et al, 2012)، برای طراحی PSS از یک روش متفاوت یعنی روش برش توازن<sup>۴</sup> استفاده می‌نماید. می‌توان پارامترهای بهینه PSS را با استفاده از الگوریتم صدای خرد شده بیگ - بنگ بزرگ<sup>۵</sup> به دست آورد. این الگوریتم بهینه‌سازی قادر است در شرایط مختلف نتایج مناسبی را ایجاد نماید (Dincel and Gene, 2012). (Pombo et al, 2013)، طراحی بهینه PSS را بر اساس موقعیت بهینه قطب‌ها انجام می‌دهد. نتایج به دست آمده کارایی مناسب این روش را نشان می‌دهد. در این مقاله برای حل مشکل مطرح شده در ارتباط با طراحی سنتی PSS از کنترلر منطق فازی استفاده می‌شود. این کنترلر هوشمند به جای منطق ریاضی از منطق جملات استفاده می‌نماید و همین موضوع باعث سادگی آن در عین کارایی بالایی می‌گردد. در قسمت‌های بعدی این مقاله ابتدا مدل ماشین سنکرون و کنترلر منطق فازی معرفی شده سپس شبیه‌سازی و نتایج آن مطرح می‌گردد و در انتها نتیجه‌گیری این مقاله ذکر می‌شود.

## ۲- روش مدل ماشین سنکرون متصل به شین بی‌نهایت

در این مقاله از مدل هفرون فیلیپس برای مدل سازی ماشین سنکرون متصل به شین بی‌نهایت که در شکل شماره ۱ قابل مشاهده است، استفاده می‌گردد (Kushwaha and Khare, 2013).



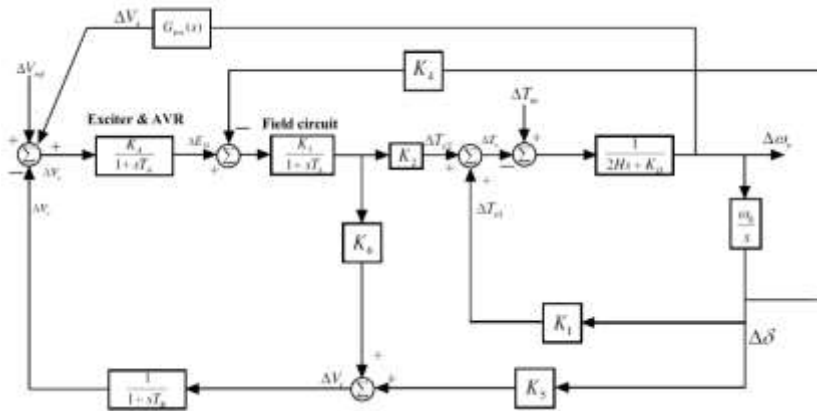
شکل شماره ۱. مدار معادل ژنراتور سنکرون متصل به شین بی‌نهایت

<sup>3</sup> Automatic Voltage Regulator

<sup>4</sup> Balance Truncation Method

<sup>5</sup> big bang-big crunch algorithm

بلوک دیاگرام مربوط به این مدل با در نظر گرفتن بلوک PSS نیز در شکل شماره ۲ ارائه شده است (Kushwaha and Khare, 2013).



شکل شماره ۲. بلوک دیاگرام مدل هفرون فیلیپس با در نظر گرفتن بلوک PSS

اطلاعات مربوط به سیستم مورد نظر در جدول شماره ۱ ذکر شده‌اند (Kushwaha and Khare, 2013).

جدول شماره ۱. اطلاعات مربوط به سیستم مورد نظر

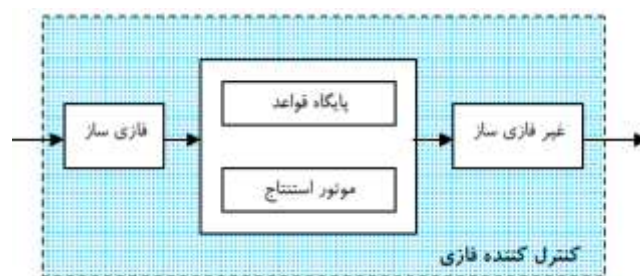
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
P	۰/۹	$K_D$	۰
Q	۰/۳	$X_e$	۰/۱۶۵
$X_d$	۱/۸۱	$R_e$	۰/۰۰۳
$X_q$	۱/۷۶	$T'_{d0}$	۸
$X'_d$	۰/۳	$\omega_0$	۳۱۴
H	۳/۵	$f_0$	۵۰

در بلوک دیاگرام شکل شماره ۲ ضرایب  $K_1$  تا  $K_6$  با توجه به (Padiyar, 2008) به دست می‌آیند.

### ۳- کنترلر منطق فازی

کنترل فازی که در حقیقت محاسبه با کلمات به جای اعداد است، یک روش کنترل بر اساس منطق فازی می‌باشد. این کنترلر شامل یک سری از قواعد است که از طریق آن‌ها پردازنده قادر خواهد بود با در نظر گرفتن سیگنال و مشتق آن، سیگنال کنترلی را به دست آورد. این نوع کنترل را می‌توان اجرای عمل کنترل توسط یک اپراتور دانست.

یک اپراتور با در نظر گرفتن رفتار سیستم (ورودی به اپراتور) و طبق تجربیات و دانسته‌های خود (پایگاه قواعد) یک فرمان کنترلی (خروجی) را می‌دهد یا پارامترهای یک کنترل‌کننده را تنظیم می‌نماید. یک کنترلر فازی متشکل از چهار جزء اصلی فازی‌کننده، پایگاه قواعد، بخش تصمیم‌گیری و غیرفازی‌کننده طبق شکل شماره ۳ است.



شکل شماره ۳. اجزا مختلف کنترلر فازی

ورودی‌های این کنترلر سیگنال سرعت و مشتق آن یعنی شتاب است که در بخش شبیه‌سازی به طور دقیق‌تری بررسی می‌شوند.

#### ۴- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی در چهار گام توسط نرم‌افزار MATLAB صورت می‌گیرد. فرض بر آن است که در تمامی گام‌ها گشتاور مکانیکی ورودی به میزان ۰/۰۵ در ثانیه ۱ افزایش می‌یابد.

گام اول: ولتاژ تحریک ثابت

گام دوم: لحاظ کردن AVR

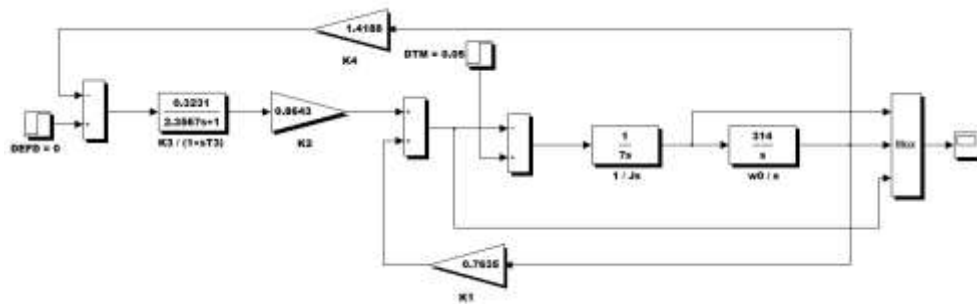
گام سوم: در نظر گرفتن PSS با روش کنترلی سنتی

گام چهارم: لحاظ کردن PSS با روش کنترلر منطق فازی

#### ۴-۱- گام اول، ولتاژ تحریک ثابت

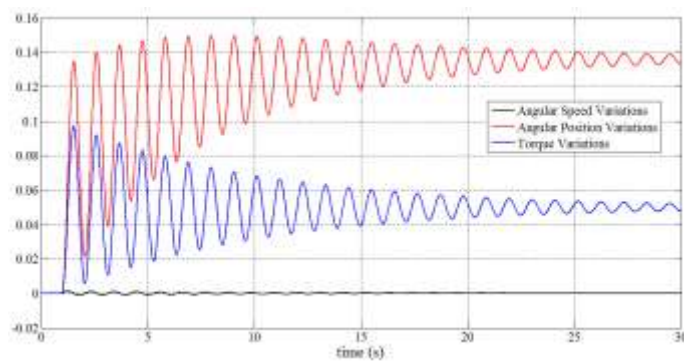
در این حالت AVR و PSS در نظر گرفته نمی‌شوند و ساده‌ترین مدل ممکن به دست می‌آید. فرض بر آن است که گشتاور ورودی به میزان ۰/۰۵ در ثانیه ۱ افزایش پیدا می‌کند. بلوک دیاگرام مربوط به این وضعیت در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است. ضرائب  $K_1$  تا  $K_4$  نیز با استفاده از داده‌های جدول شماره ۱ و روابط مربوط به (Padiyar, 2008) به دست می‌آیند.

$$K_1=0.7635, K_2=0.8643, K_3=0.3230, K_4=1.4188$$



شکل شماره ۴. بلوک دیاگرام گام اول

نتایج حاصل از شبیه‌سازی که در شکل شماره ۵ ارائه شده‌اند، نشان‌دهنده پایداری سیستم بعد از تغییر در گشتاور ورودی است ولی زمان نشست بسیار بالا بوده و قابل قبول نیست.

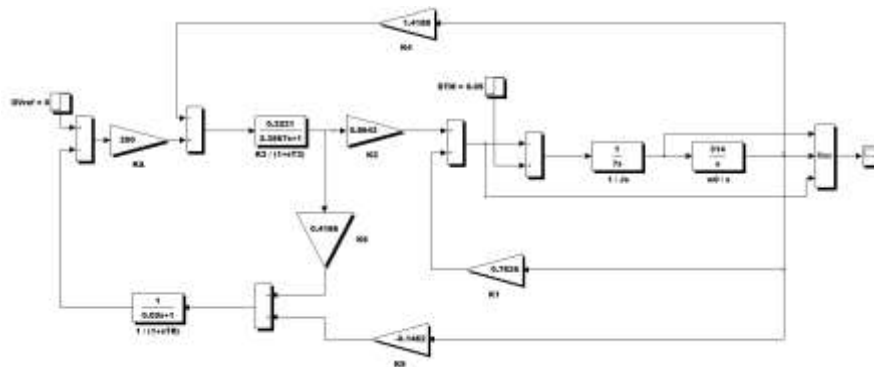


شکل شماره ۵. نتایج حاصل از بلوک دیاگرام شکل شماره ۴

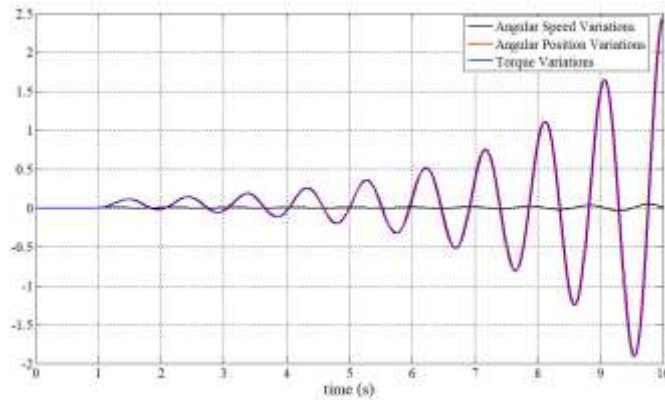
#### ۴-۲- گام دوم، لحاظ کردن AVR

در این حالت مشابه وضعیت قبلی تغییرات در گشتاور ورودی ۰/۰۵ در ثانیه ۱، مقادیر بهره ( $K_A$ ) و ثابت زمانی ( $T_R$ ) به ترتیب ۲۰۰ و ۰/۰۲ فرض می‌شوند. بلوک دیاگرام این وضعیت و نتایج آن نیز در شکل‌های شماره ۶ و ۷ ارائه شده‌اند. ضرائب  $K_1$  تا  $K_6$  عبارتند از:

$$K_1=0.7635, K_2=0.8643, K_3=0.3230, K_4=1.4188, K_5=-0.1462, K_6=0.4166$$



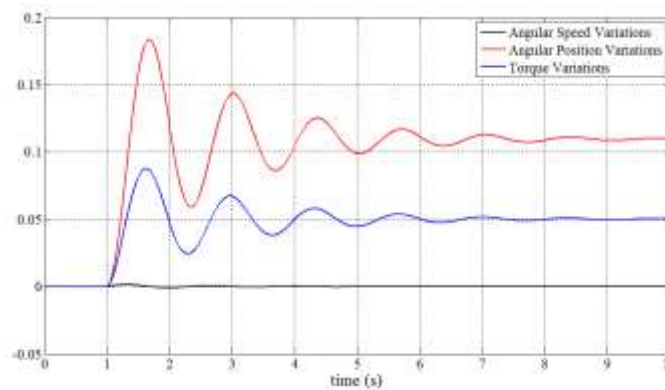
شکل شماره ۶. بلوک دیاگرام گام دوم



شکل شماره ۷. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۶ به ازای  $K_5$  منفی

با توجه به نمودارهای فوق می‌توان دریافت که در نظر گرفتن AVR منجر به ناپایداری دینامیکی شده است. بنابراین بایستی از PSS استفاده شود تا سیستم را پایدار نماید.

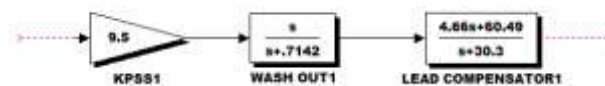
اگر ضریب  $K_5$  مثبت فرض شود، نمودارهای شکل شماره ۸ به دست می‌آیند. با توجه به این نمودارها پایداری سیستم مشهود است.



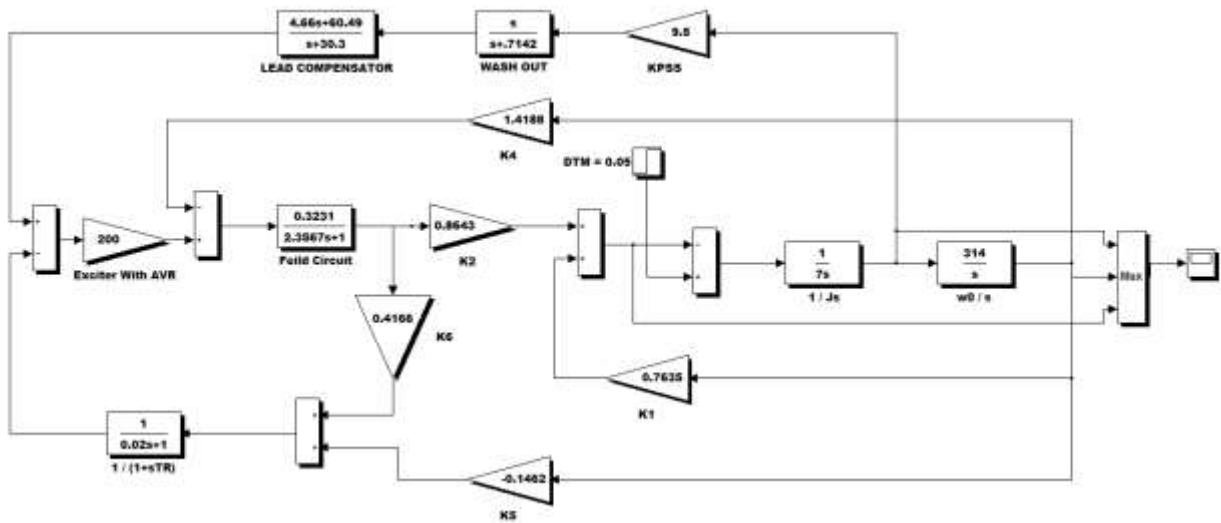
شکل شماره ۸. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۶ به ازای  $K_5$  مثبت

#### ۳-۴ گام سوم، در نظر گرفتن PSS با روش کنترلی سنتی

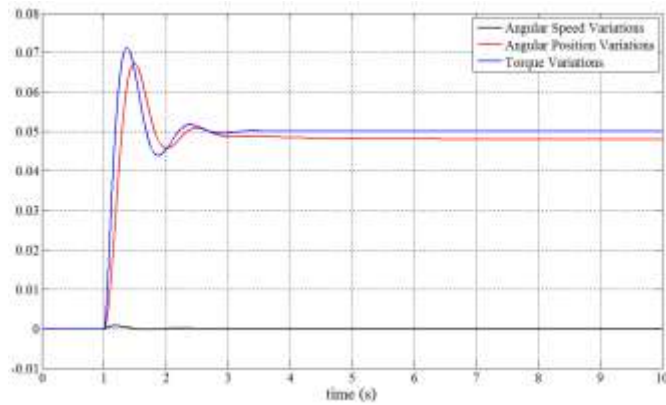
در این گام تمامی اطلاعات مشابه گام قبلی است با این تفاوت که از بلوک PSS استفاده گردیده است. تابع تبدیل این بلوک، بلوک دیاگرام کلی این مدل و نتایج به ازای  $K_5$  منفی و مثبت به ترتیب در شکل‌های شماره ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ ارائه شده‌اند.



شکل شماره ۹. بلوک PSS

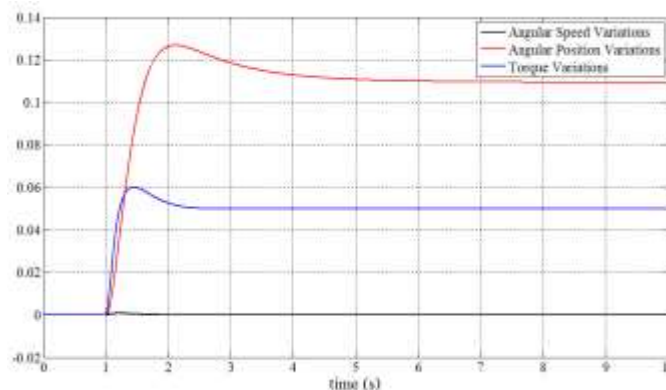


شکل شماره ۱۰. بلوک دیاگرام گام سوم



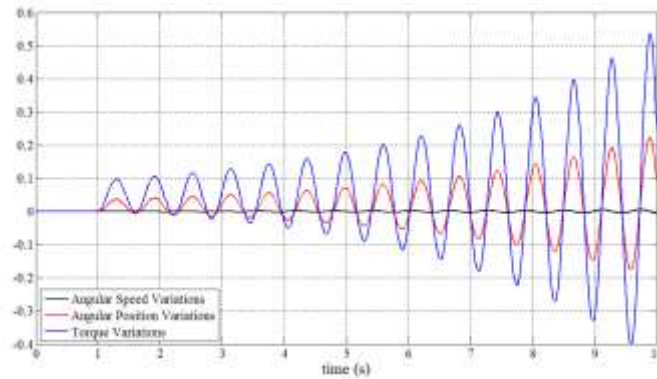
شکل شماره ۱۱. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۰ به ازای  $K_5$  منفی

با توجه به شکل شماره ۱۱ می‌توان نتیجه گرفت که حتی با  $K_5$  منفی نیز پایداری به دست می‌آید.



شکل شماره ۱۲. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۰ به ازای  $K_5$  مثبت

البته این نوع کنترلر تنها برای این نقطه کار با ضرایب  $K_1$  تا  $K_6$  مطلوب است. اگر ضریب  $K_5$ ،  $-1/1462$  فرض شود، می‌توان دید که حتی سیستم ناپایدار نیز می‌گردد. شکل شماره ۱۳ مربوط به این وضعیت است.



شکل شماره ۱۳. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۰ به ازای  $K_5 = -1/1462$

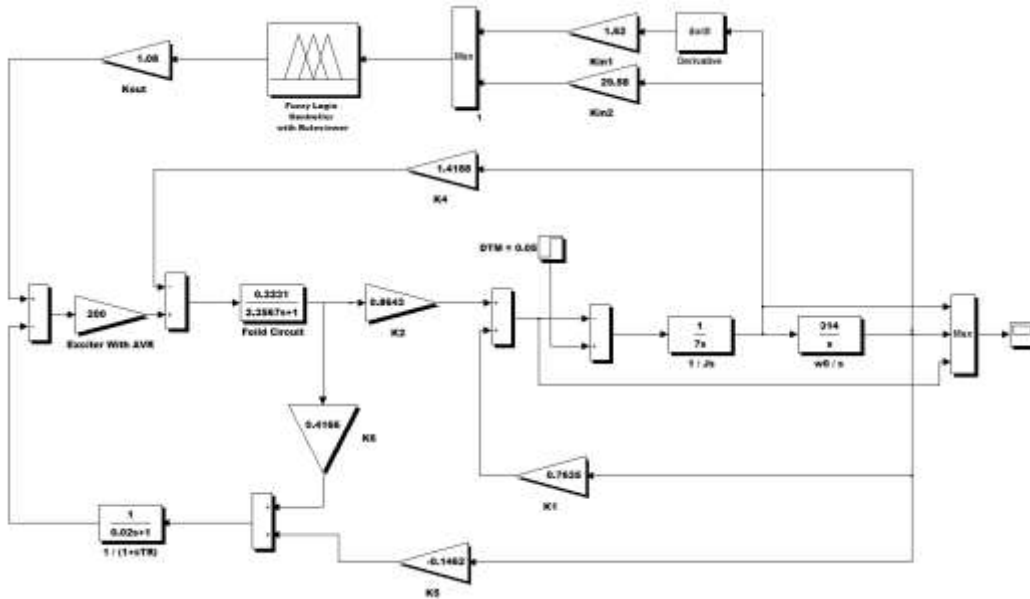
#### ۴-۴ گام چهارم، لحاظ کردن PSS با روش کنترلر منطق فازی

در این گام نیز تمامی اطلاعات مشابه گام قبلی است و تنها، تفاوت در بلوک PSS است. بلوک دیاگرام مربوط به این حالت در شکل شماره ۱۴ ارائه شده است. ورودی‌های کنترلر منطق فازی سیگنال‌های سرعت و شتاب هستند. برای این منظور از پنجره FIS EDITOR در نرم‌افزار MATLAB که در شکل شماره ۱۵ ارائه شده است، استفاده گردید. ضرائب وزنی مربوط به ورودی‌ها و خروجی کنترلر منطق فازی عبارتند از [۸]:

$$K_{in1}=1.62$$

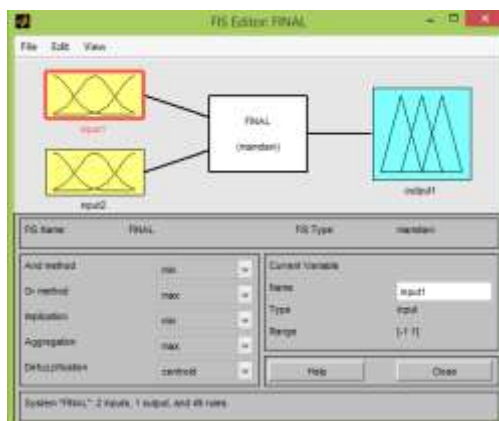
$$K_{in2}=29.58$$

$$K_{out}=1.08$$



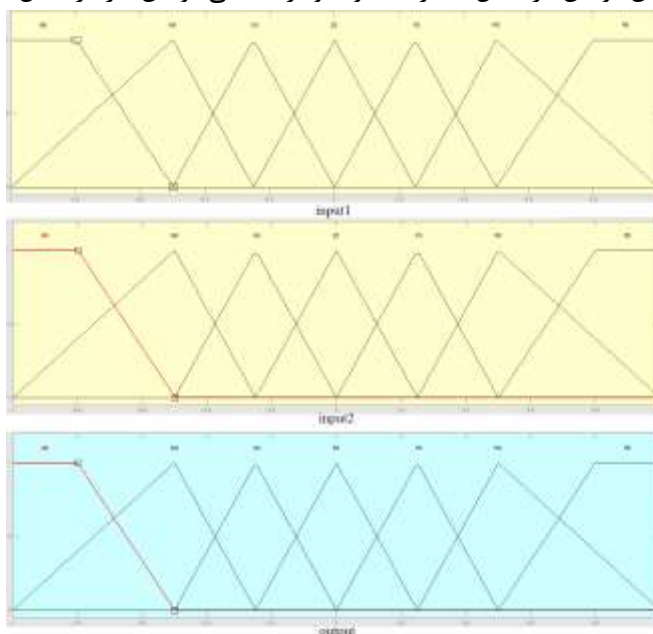
شکل شماره ۱۴. بلوک دیاگرام گام چهارم





شکل شماره ۱۵. پنجره FIS EDITOR در نرم افزار MATLAB

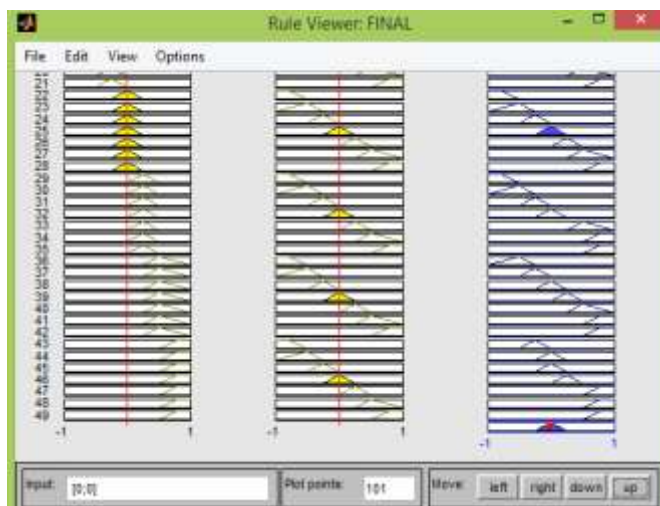
مجموعه‌های عضویت برای دو ورودی و خروجی این کنترلر در شکل شماره ۱۶، قوانین مورد استفاده در این کنترلر در جدول شماره ۲، نمودار مشاهده‌گر این قوانین در شکل شماره ۱۷ و نمودار سطحی قوانین نیز در شکل شماره ۱۸ ارائه شده‌اند.



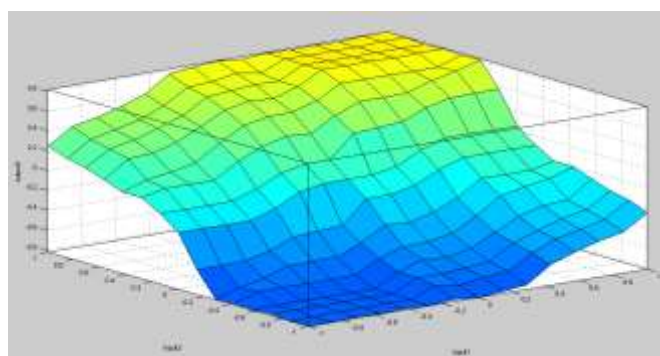
شکل شماره ۱۶. مجموعه‌های عضویت برای دو ورودی و یک خروجی

جدول شماره ۲. قوانین مورد استفاده در کنترلر منطق فازی

input2 \ input1	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE	ZE	PS
NM	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
NS	NB	NB	NM	ZE	PS	PM	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NB	NM	NS	ZE	PM	PB	PB
PM	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PB	NS	ZE	ZE	PS	PB	PB	PB

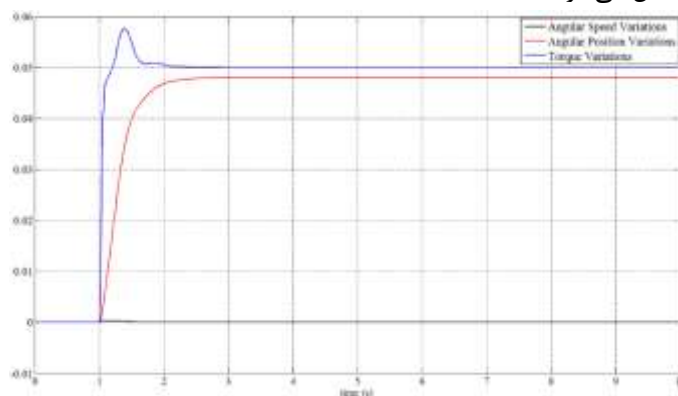


شکل شماره ۱۷. نمودار مشاهده گر قوانین

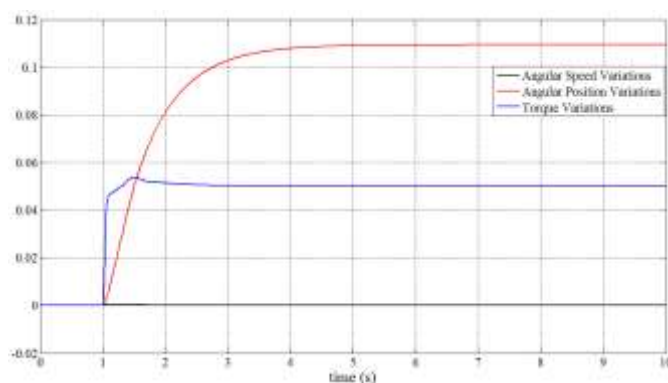


شکل شماره ۱۸. نمودار سطحی قوانین

نتایج به دست آمده به ازای  $K_5$  منفی و مثبت در شکل‌های شماره ۱۹ و ۲۰ قابل مشاهده هستند. می‌توان دید که حتی به ازای  $K_5$  منفی هم پایداری حاصل می‌شود.

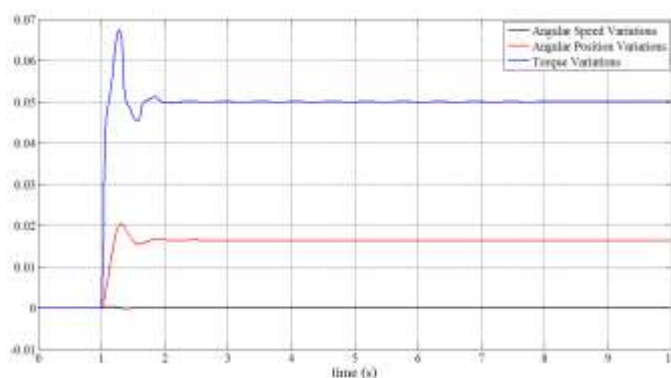


شکل شماره ۱۹. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۴ به ازای  $K_5$  منفی



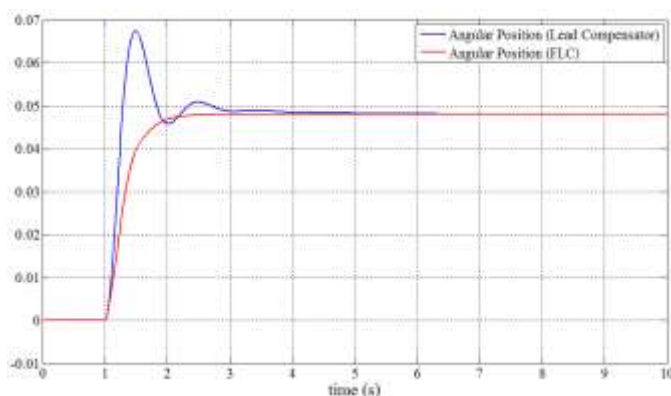
شکل شماره ۲۰. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۴ به ازای  $K_S$  مثبت

تفاوت این کنترلر با کنترل‌کننده‌های سنتی عملکرد مطلوب آن برای تمامی نقاط کار می‌باشد. به عنوان مثال اگر  $K_S$ ،  $1/1462$  - فرض شود. می‌توان دید همچنان سیستم پایدار باقی می‌ماند. نمودارهای مربوط به وضعیت ذکر شده در شکل شماره ۲۱ ارائه شده است.

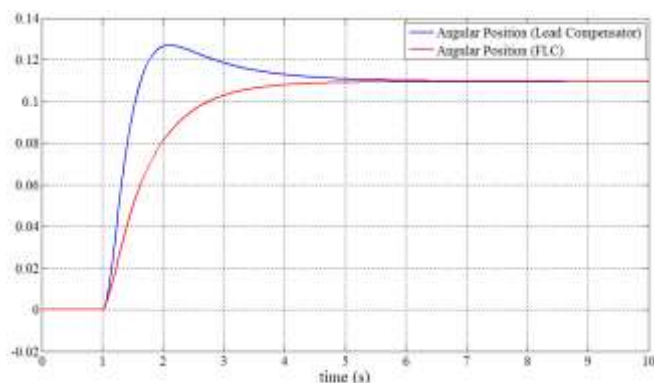


شکل شماره ۲۱. نمودارهای بلوک دیاگرام شکل شماره ۱۴ به ازای  $K_S = -1/1462$

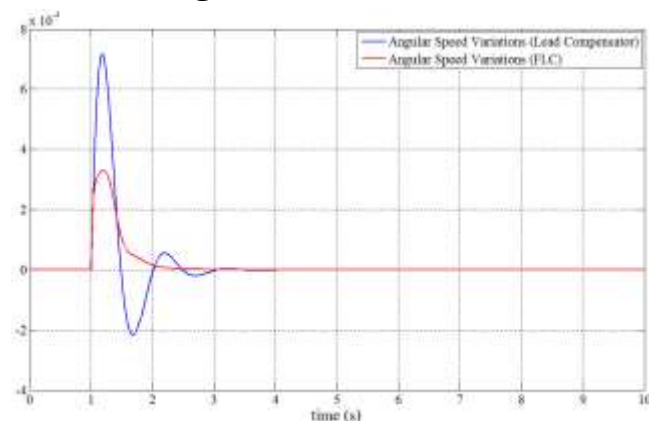
علاوه بر کارایی کنترلر منطق فازی در تمامی نقاط کار، مزیت دیگر آن نسبت به کنترلرهای سنتی، زمان نشست و بالازدگی کمتر آن است. این موضوع به ازای  $K_S = 0.1462$  و  $K_S = -0.1462$  در شکل‌های شماره ۲۲ تا ۲۵ به ترتیب قابل مشاهده است.



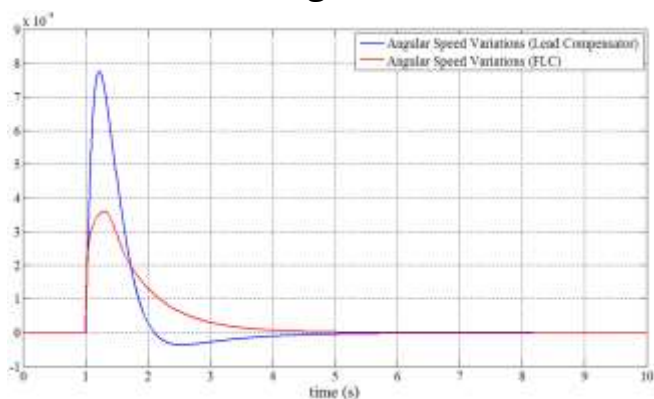
شکل شماره ۲۲. نمودار تغییرات موقعیت زاویه ژنراتور با کنترلر سنتی و کنترل‌کننده منطق فازی به ازای  $K_S$  منفی



شکل شماره ۲۳. نمودار تغییرات موقعیت زاویه ژنراتور با کنترلر سنتی و کنترل کننده منطق فازی به ازای  $K_s$  مثبت



شکل شماره ۲۴. نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای ژنراتور با کنترلر سنتی و کنترل کننده منطق فازی به ازای  $K_s$  منفی



شکل شماره ۲۵. نمودار تغییرات سرعت زاویه‌ای ژنراتور با کنترلر سنتی و کنترل کننده منطق فازی به ازای  $K_s$  مثبت

با توجه به نمودارهای ۲۴ و ۲۵ مشخص است که در هر دو نوع کنترلر بعد از تغییر در گشتاور ورودی نهایتاً تغییرات سرعت زاویه‌ای صفر خواهد شد. همچنین پاسخ مطلوب‌تر کنترلر منطق فازی نسبت به کنترلرهای سنتی نیز در نمودارهای فوق کاملاً مشهود است.

## ۵- نتیجه‌گیری

همه حفظ پایداری سیستم قدرت در صورت ایجاد تغییر یا اختلال امری ضروری است. برای نیل به هدف مذکور می‌توان از پایدارساز سیستم قدرت استفاده کرد. در صورتی که برای طراحی این تجهیز از کنترلرهای سنتی پیشفاز - پسفاز استفاده شود، عملکرد مطلوبی در آن نقطه کار از خود نشان خواهد داد ولی در نقاط کار دیگر ممکن است چنین نباشد. برای حل این مشکل از کنترلر منطق فازی استفاده گردید. این کنترلر نه تنها در تمامی نقاط کار پایداری را فراهم می‌نماید بلکه پاسخ مطلوب‌تر یعنی زمان نشست و بالازدگی کمتری را نیز ایجاد می‌نماید. این روش یک روش هوشمندانه‌ای است که به جای درگیری در منطق ریاضی، تنها با استفاده از منطق جملات هدف ما را برآورده می‌سازد.

#### منابع

1. Jabali, M. B. A., Kazemi, M. H. and Joudaki, S., (2013) "A proposed approach for modeling of power system uncertainties to design robust PSS," *2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Mashhad, pp. 1-6.
2. Islam, N. N., Hannan, M. A., Shareef, H. and Mohamed, A., (2013) "Power system stabilizer design using BAT optimization algorithm in multimachine power system," *Research and Development (SCORed), 2013 IEEE Student Conference on*, Putrajaya, pp. 540-544.
3. Lv, C., Du, W. and Littler, T., (2015) "Comparison of power system stabilizer design based on local and global model," *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*, Beijing, pp. 1-5.
4. Farah, A., Guesmi, T., Hadj Abdallah, H. and Ouali, A., (2012) "Optimal design of multimachine power system stabilizers using evolutionary algorithms," *2012 First International Conference on Renewable Energies and Vehicular Technology*, Hammamet, pp. 497-501.
5. Sharma, A. and Gupta, R., (2012) "Design of Robust Power System Stabilizer Using Balance Truncation Method," *Computational Intelligence and Communication Networks (CICN), 2012 Fourth International Conference on*, Mathura, pp. 622-626.
6. Dincel, E. and Gene, V. M. I., (2012) "A power system stabilizer design by big bang-big crunch algorithm," *Control System, Computing and Engineering (ICCSC), 2012 IEEE International Conference on*, Penang, pp. 307-312.
7. Pombo, J. A. N., Mariano, S. J. P. S. and Calado, M. R. A., (2013) "Power system stabilizer design based on output optimal control techniques," *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 13th International Conference on*, Wroclaw, pp. 272-277.
8. Kushwaha, M. and Khare, R., (2013) "Dynamic stability enhancement of power system using fuzzy logic based power system stabilizer," *Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on*, Sri Rangalatchum Dindigul, pp. 213-219.
9. Padiyar, K. R., (2008) "Power System Dynamics Stability and Control," BS Publications, pp.221-227.