



## طراحی پایدارساز سیستم قدرت با استفاده از روش کنترل بهینه

صابر فلاحتی علی آبادی<sup>1</sup>، ابوالفضل حلواپی<sup>2</sup>، هادی صفا<sup>3</sup>

<sup>1</sup>کارشناس ارشد، دانشگاه کاشان، s\_falahati@yahoo.com

<sup>2</sup>استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه کاشان، halvaei@kashanu.ac.ir

<sup>3</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، hadisafa66@gmail.com

چکیده: نوسانات فرکانس پائین از موضوعاتی است که سالها در سیستمهای قدرت تحت مطالعه و بررسی محققین بوده است. این نوسانات سبب ایجاد تداخلاتی در سیستمهای قدرت می گردند و به همین منظور برای میرایی آنها از پایدارسازهای سیستم قدرت بهره گرفته می شود. برای طراحی این پایدارسازها راههای متعددی پیشنهاد شده است. در این مقاله برای طراحی پایدارساز از روش کنترل بهینه استفاده شده و حالات مختلفی از این نوع طراحی تحت بررسی قرار گرفته است.

کلیدواژه – نوسانات فرکانس پائین، پایدارساز سیستم قدرت، کنترل بهینه، سیستم کاهش مرتبه یافته

### 1- مقدمه

سیستمهای قدرت پیچیده و غیرخطی بوده و به دلایل بسیار نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پائینی تولید می نمایند. نوسانات الکترومکانیکی بین زنراتورهای سنکرون متصل به هم یکی از پدیدههای ذاتی در سیستمهای قدرت است. برای غلبه بر این مشکل و یا به عبارت دیگر برای میرا نمودن این نوسانات، پایدارسازهای سیستم قدرت (PSSs) در سیستمهای قدرت به وفور استفاده می شوند. مطالعات بسیاری برای طراحی پایدارسازها انجام شده اند. در روشهای سنتی، جبران سازهای پیشفاز – پسفاز مورد استفاده قرار می گرفتند [1 و 2]. هدف اصلی در این نوع پایدارسازها بر روی شیفت دادن قطبهای با پایداری ضعیف و یا ناپایدار به سمت چپ صفحه مختلط بود. این روش وابسته به کنترل حد فاز و حد بهره می باشد [3]. در سالهای اخیر روشهای متعددی برای طراحی PSS معرفی شده است [4-6]. در این مقاله از روش کنترل بهینه برای طراحی پایدارساز استفاده می شود. همچنین در این مقاله طراحی به ازای وزنهای مختلف و نیز متغیرهای حالت متعدد صورت گرفته و تاثیر هر یک بر روی پایداری سیستم بررسی شده است.

ادامه مقاله به صورت زیر بخش بندی شده است: در بخش دوم سیستم مورد مطالعه معرفی می گردد. در بخش سوم به طراحی پایدارساز کلاسیک پرداخته می شود. در بخش چهارم پایدارساز به روش کنترل بهینه برای حالات مختلف طراحی شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری بیان خواهد شد.

### 2- سیستم مورد مطالعه

برای طراحی پایدارساز از مدل هفرون فیلیپس<sup>1</sup> که در واقع نمایانگر مدل شبکه تک ماشینه متصل به شین بی نهایت می باشد و با در نظر گرفتن مدل درجه سه ژنراتور سنکرون و مدل ساده سیستم تحریک بدست می آید، استفاده شده است [7]. در ضمن برای بررسی و مقایسه بین دو حالت طراحی کلاسیک و طراحی با استفاده از روش کنترل بهینه، ورودی پله  $U_E$  (ولتاژ سیستم تحریک) مد نظر قرار گرفته است. این مدل دارای دو بخش مکانیکی و الکتریکی است که مد بخش مکانیکی دارای فرکانس مختلط با قسمت حقیقی مثبت و فرکانس بیشتر نسبت به بخش الکتریکی می باشد. مدل سیستم مذکور در شکل (1) آورده شده است. پارامترهای سیستم مورد نظر در ضمیمه آورده شده اند.

<sup>1</sup> Heffron-Phillips

برای طراحی پایدارساز به روش کلاسیک از سه بلوک استفاده می‌شود که اولین بلوک، سنسور سرعت و دومین بلوک یک فیلتر میانگذر بوده و بلوک سوم یک تقویت کننده می‌باشد.

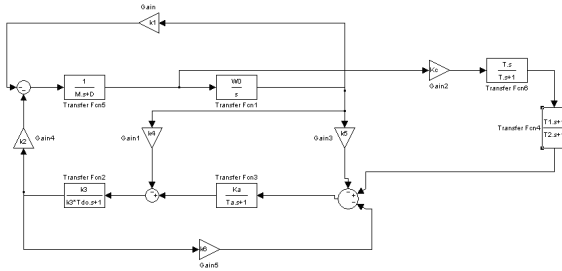
تابع تبدیل کلی سه بلوک مذکور به صورت زیر می‌باشد:

$$(1) \quad \frac{sT}{1+sT} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} K_c$$

از آنجا که برای پایدار نمودن سیستم، گشتاور باید با سرعت همفاز باشد، بلوک دوم باید یک پیشفاز ایجاد نماید زیرا سرعت با عبور از چند بلوک در حالت بدون PSS نسبت به گشتاور پسفاز است. با توجه به پارامترهای سیستم، صورت کلی معادله (1) به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$(2) \quad 7.09 \frac{3s}{1+3s} \frac{1+0.6851s}{1+0.1s}$$

مدل هفرون-فیلیپس به همراه PSS با ورودی سرعت در شکل (3) نشان داده شده است. در طراحی این PSS از فرکانس  $\omega_n$  بخش مکانیکی استفاده شده است. مقادیر ویژه سیستم در این حالت در جدول (1) آورده شده‌اند. شکل موج خروجی سرعت در این حالت در شکل (4) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود سیستم پایدار شده و همه مقادیر ویژه دارای بخش حقیقی منفی گشته‌اند. لازم به ذکر است که دو مقدار ویژه اضافه شده به سیستم به دلیل حضور کنترل کننده می‌باشند.

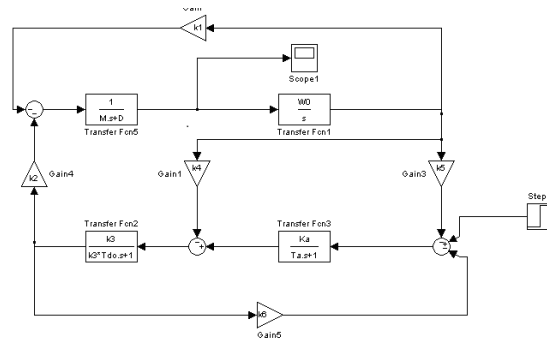


شکل 3: مدل هفرون-فیلیپس به همراه پایدارساز کلاسیک

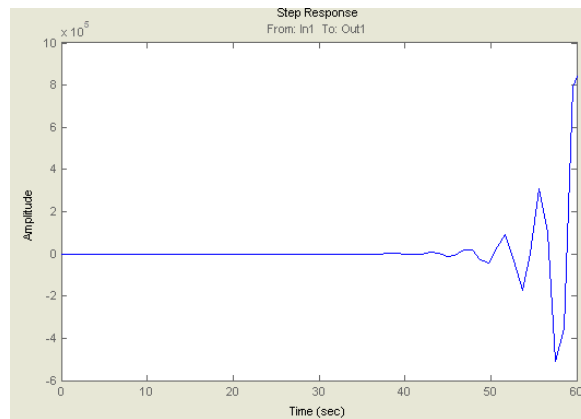
#### 4- طراحی پایدارساز با استفاده از روش کنترل بهینه

برای پایدارسازی سیستم با استفاده از روش کنترل بهینه ابتدا معادلات حالت سیستم بدست آورده می‌شود. می‌توان اثبات نمود که معادلات حالت سیستم شکل (1) به صورت زیر می‌باشد:

$$(3) \quad \dot{X} = AX + BU$$



شکل 1: سیستم تحت مطالعه

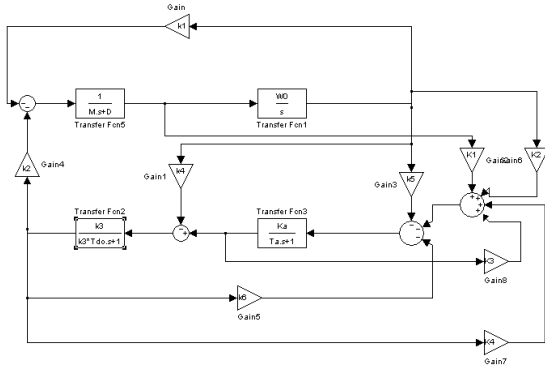


شکل 2: شکل موج سرعت خروجی بدون استفاده از پایدارساز

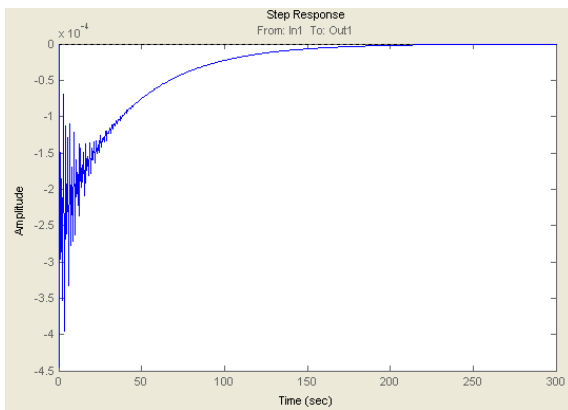
در حالتی که از پایدارساز استفاده نشود، خروجی سرعت به صورت شکل (2) خواهد بود. مقادیر ویژه سیستم در این حالت در جدول (1) آورده شده‌اند. همانطور که از جدول (1) می‌توان مشاهده نمود قسمت حقیقی مقادیر ویژه بخش مکانیکی سیستم مثبت بوده که این امر سبب ناپایداری سیستم شده و در نتیجه سبب نیاز به پایدارساز خواهد شد.

#### 3- طراحی پایدارساز به روش کلاسیک

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، برای پایدار نمودن سیستم نیاز هست تا برای سیستم، پایدارساز طراحی گردد. در این بخش ابتدا به طراحی پایدارساز به روش کلاسیک پرداخته شده و در مرحله بعد پایدارساز با استفاده از روش کنترل بهینه طراحی می‌گردد.



شکل 5: مدل هفرون-فیلیپس به همراه پایدارساز به روش کنترل بهینه



شکل 6: شکل موج سرعت خروجی با استفاده از پایدارساز به روش کنترل بهینه

#### 4-1- طراحی به روش کنترل بهینه و به ازای وزن‌های مختلف

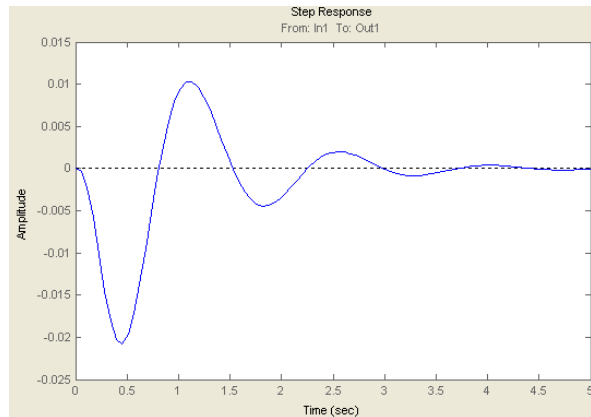
در این قسمت پایدارساز به ازای وزن‌های مختلف Q طراحی شده و مقایسه‌ای بین مقادیر ویژه سیستم به ازای آنها صورت می‌گیرد. لازم به ذکر است که در تمام حالت‌ها R=1 قرار داده می‌شود. باید توجه داشت که همواره باید مصالحه‌ای بین سرعت رسیدن به حالت ماندگار و اندازه سیگنال کنترلی صورت گیرد، چرا که افزایش سیگنال کنترلی سبب افزایش نویزپذیری سیستم و یا به عبارت دیگر سبب حساسیت بیشتر آن نسبت به نویز می‌گردد. همچنین افزایش سیگنال کنترلی سبب می‌گردد که سیستم به حالت اشباع نزدیکتر شده و در نتیجه نتوان کنترل مناسبی روی سیستم داشت [8]. در هر حال در این مقاله از اثر به اشباع رفتن سیستم و مشکلات ناشی از افزایش سیگنال کنترلی صرف نظر شده و تنها تابع وزن Q مد نظر قرار گرفته

$$X = [\Delta\delta, \Delta\omega, \Delta e'_q, \Delta E_{fd}] \quad (4)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ \omega_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{do}} & \frac{-1}{K_3 T'_{do}} & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & \frac{-K_A K_5}{T_A} & \frac{-K_A K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix} \quad (5)$$

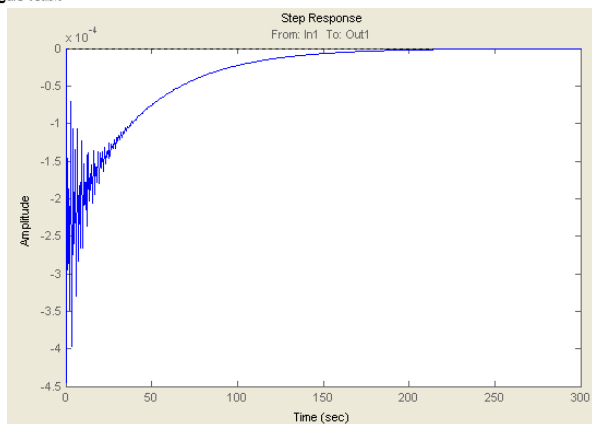
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$U = \Delta E_{fd} \quad (7)$$

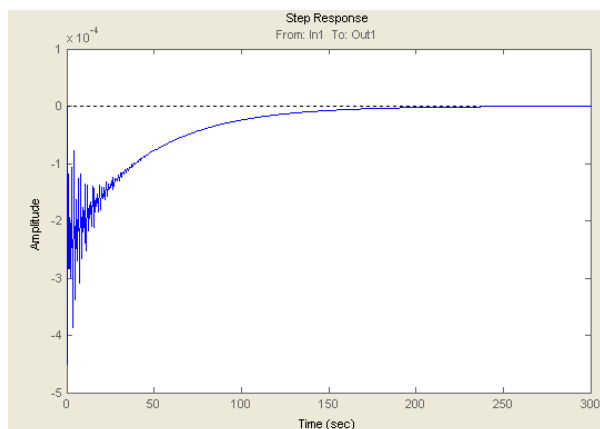


شکل 4: شکل موج خروجی سرعت سیستم در حالت استفاده از پایدارساز کلاسیک

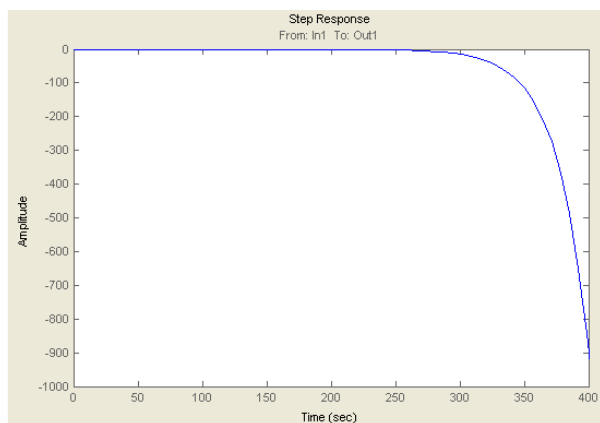
برای طراحی پایدارساز به روش کنترل بهینه ابتدا همه متغیرهای حالت را در نظر گرفته و کنترل بهینه با دو پارامتر R=1 و Q=[1 0 0 0, 0 1 0 0, 0 0 1 0, 0 0 0 1] انجام می‌شود. در این حالت مدل سیستم به صورت شکل (5) در می‌آید. در این صورت پارامترهای K<sub>1</sub> تا K<sub>4</sub> به ترتیب، 11.8331، 0.6108، 2.9972 و 0.9806 محاسبه شده و شکل موج خروجی سرعت به صورت شکل (6) خواهد شد. مقادیر ویژه سیستم در این حالت در جدول (1) آورده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود سرعت پایدار شدن سرعت در این حالت نسبت به زمانی که از روش کلاسیک استفاده می‌شود بسیار بیشتر شده است



شکل 7: خروجی سرعت به ازای وزن شماره 2



شکل 8: خروجی سرعت به ازای وزن شماره 3



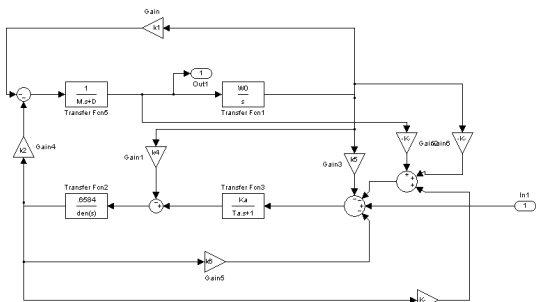
شکل 9: خروجی سرعت به ازای وزن شماره 4

است. خلاصه مقادیر ویژه به ازای وزن‌های مختلف در جدول (2) آورده شده است.

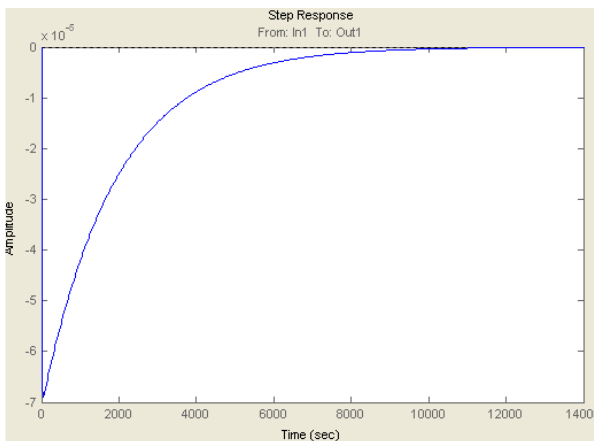
شکل‌های (7) تا (10) تغییرات خروجی سرعت را به ازای وزن‌های مختلف نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها و مقادیر ویژه می‌توان مشاهده نمود که از بین تابع وزن‌های مختلف، حالت شماره 5 با احتساب همه شرایط از همه بهتر است زیرا با وجود اینکه زمان رسیدن به حالت ماندگار آن زیاد می‌باشد، دارای انحراف کمی از صفر است. نکته قابل توجه این است که به ازای تابع وزن شماره 4 سیستم ناپایدار می‌گردد.

جدول 1: مقادیر ویژه سیستم به ازای حالات مختلف	
حالت	مقادیر ویژه
بدون استفاده از پایدارساز	$0.2949 + 4.9581i$ $0.2949 - 4.9581i$ $-10.3928 + 3.2827i$ $-10.3928 - 3.2827i$
پایدارساز به روش کلاسیک	$-18.7028$ $-4.6183 + 7.4830i$ $-4.6183 - 7.4830i$ $-1.1262 + 4.3317i$ $-1.1262 - 4.3317i$ $-0.3372$
پایدارساز به روش کنترل بهینه	$-3017.1233$ $-0.1242 + 4.7101i$ $-0.1242 - 4.7101i$ $-0.024$

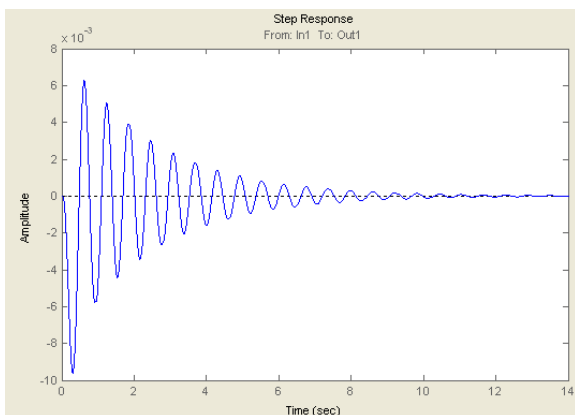
جدول 2: مقادیر ویژه سیستم به ازای وزن‌های مختلف		
شماره	وزن Q	مقادیر ویژه
1	$Q=[1\ 0\ 0\ 0; 0\ 1\ 0\ 0; 0\ 0\ 10; 0\ 0\ 0\ 1]$	$-3017$ $-1 + 4.7i$ $-0.1 - 4.7i$ $-0.02$
2	$Q=[10\ 0\ 0\ 0; 0\ 1\ 0\ 0; 0\ 0\ 10; 0\ 0\ 0\ 1]$	$3018$ $-1 + 4.7i$ $-0.1 - 4.7i$ $-0.02$
3	$Q=[100\ 0\ 0\ 0; 0\ 1\ 0\ 0; 0\ 0\ 10; 0\ 0\ 0\ 1]$	$-3031$ $-0.1 + 4.7i$ $-0.1 - 4.7i$ $-0.02$
4	$Q=[10\ 0\ 0\ 0; 0\ 10\ 0\ 0; 0\ 0\ 1\ 0; 0\ 0\ 0\ 1]$	$-11560.28$ $-1 + 4.7i$ $-0.1 - 4.7i$ $0.04$
5	$Q=[10\ 0\ 0\ 0; 0\ 10\ 0\ 0; 0\ 0\ 10\ 0; 0\ 0\ 0\ 0]$	$-10661$ $0.1 + 4.7i$ $-0.1 - 4.7i$ $-0.0005$



شکل 11: مدار مربوط به سه متغیر حالت  $[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_{fd}]$



شکل 10: خروجی سرعت به ازای وزن شماره 5



شکل 12: شکل موج خروجی سرعت مربوط به سه متغیر

حالت  $[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_{fd}]$

#### 2-4- طراحی کنترل کننده با روش کنترل بهینه برای

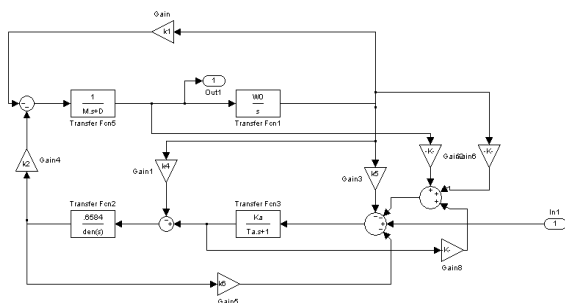
##### سیستم کاهش مرتبه یافته

در این بخش PSS، به روش کنترل بهینه و به ازای متغیرهای حالت مختلف طراحی شده و اثر انتخاب متغیرهای حالت مختلف، با احتساب مقادیر ویژه آن و نیز رسم سرعت خروجی آنها مورد بررسی قرار می گیرد. لازم به ذکر است که در تمام بخش های زیر  $R=1$  و وزن  $Q$  را به صورت یک ماتریس قطری که تنها درایه اول آن 10 و بقیه درایه های روی قطرش 1 می باشد، در نظر گرفته شده اند.

#### 2-2-4- طراحی PSS به ازای متغیرهای حالت

$[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e'_q]$

شکل مدار و خروجی سرعت در این حالت در شکل (13) رسم شده اند. همانطور که در شکل ها نیز می توان مشاهده نمود، در این حالت نیز سیستم پایدار می باشد. نوسانات سرعت خروجی در این حالت نسبت به حالت قبل بسیار کمتر بوده و سیستم از لحاظ پایداری وضعیت بهتری دارد.

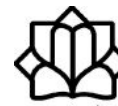


#### 1-2-4- طراحی PSS به ازای متغیرهای حالت

$[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_{fd}]$

شکل مدار در این حالت به صورت شکل (11) خواهد بود. بعد از بدست آوردن ماتریس  $A$  و محاسبات مربوط به بدست آوردن مقادیر  $K1$  تا  $K3$  می توان مقادیر ویژه سیستم و شکل موج خروجی سرعت را بدست آورد. در این حالت شکل موج خروجی سرعت به صورت شکل (12) خواهد بود. همانطور که مشاهده می شود سیستم با این انتخاب متغیر حالت پایدار بوده و دامنه نوسانات سرعت بسیار کم و مدت زمان کاهش آن نیز کوتاه می باشد.





$K_A$	50
$T_A$	0.05
$F_0$	60

### مراجع

power system  $H_\infty$  [1] Hardiansyah, S. Furuyé, J. Irisawa, "A robust stabilizer design using reduced-order models". Electr Power Energy Syst 2006;28:21-8.

[2] C.T. Tse, S.K. Tso, "Refinement of conventional PSS design in multimachine system by modal analysis". IEEE Trans Power Syst 1993;8(2).

[3] K. Ogata, "Modern control engineering", 3rd ed. Prentice-Hall International, Inc.; 1997.

[4] P. Lakshmi, M. Abdullah Khan, "Design of a robust power system stabilizer using Fuzzy logic for a multimachine power system", Electr Power Syst Res 1998;47(March):39-46.

[5] T. Lie Tjing, A.M. Sharaf, "An adaptive fuzzy logic power system stabilizer", Electr Power Syst Res 1996;38(May):75-81.

[6] S.M. Radaideh, I.M. Nejdawi, M.H. Mushtaha, "Design of power system stabilizers using two level fuzzy and adaptive neuro-fuzzy inference systems", Electrical Power and Energy Systems -35 (2012) 47-56.

[7] دکتر مهدی کراری، دینامیک و کنترل سیستم‌های قدرت، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، 1389

[8] دکتر علی خاکی صدیق، اصول کنترل مدرن، انتشارات دانشگاه تهران، 1389

	-0.02
$[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_{fd}]$	-0.4 + 10.2i -0.4 - 10.2i -12.4 -6.98
$[\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e'_q]$	-1360 -0.08 + 4.8i -0.08 - 4.8i -0.11
$[\Delta\omega, \Delta\delta]$	0.86 + 8.46i 0.86 - 8.5i -15.8 -6.1

### ضمیمه

پارامترهای سیستم مورد مطالعه	
$K_1$	0.5441
$K_2$	1.2067
$K_3$	0.6584
$K_4$	0.6981
$K_5$	-0.0955
$K_6$	0.8159
$M$	9.26
$D$	0
$T_{do}$	7.76