

# طراحی مقاوم پایدار ساز سیستم قدرت با استفاده از تئوری $H_{\infty}$

علی نجاتی<sup>۱</sup>، محمد تقی حمیدی بهشتی<sup>۲</sup>، مرجانه فرهودی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته کنترل دانشگاه تربیت مدرس : ali62n62@yahoo.com

۲- عضو هیات علمی رشته کنترل دانشگاه تربیت مدرس : mthb55@yahoo.com

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد رشته کنترل دانشگاه تربیت مدرس : Marjan\_frh@yahoo.com

## چکیده

یکی از مسائل بسیار مهم در مطالعات دینامیکی سیستم‌های قدرت، پایدار سازی با استفاده از پایدار ساز سیستم قدرت می‌باشد. در این مقاله پس از معرفی روش طراحی کنترل کننده مقاوم  $H_{\infty}$ ، یک پایدار ساز سیستم قدرت به این روش طراحی می‌شود. هدف از بکارگیری این شیوه از کنترل، تضمین پایداری و کارایی سیستم حلقه بسته با حضور کلیه عدم قطعیت‌های ممکن می‌باشد. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند ناشی از اثر غیر خطی بودن سیستم واقعی، دینامیک‌های مدل نشده، تغییر پارامترهای مدل در اثر تغییرات شرایط محیط، اغتشاشات ناشی از نویز اندازه‌گیری و ... باشند. پس از طراحی کنترل کننده و به منظور بررسی کارایی آن با اعمال تغییر ۲۰ درصدی در مدل سیستم قدرت و مشاهده پاسخ مطلوب سیستم مقاوم بودن کنترل نتیجه می‌شود.

## کلمات کلیدی

پایداری مقاوم، پایدار ساز سیستم قدرت، عدم قطعیت، کارایی مقاوم، کنترل مقاوم

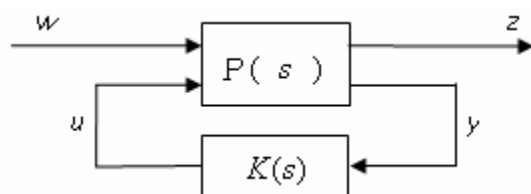
عملکرد سیستم قدرت محاسبه و ثابت نگه داشته می‌شود. واضح است که نقطه کار سیستم قدرت همراه با تغییر بار، عوض می‌شود و لذا طراحی صورت گرفته قابلیت پایدار سازی خود را از دست می‌دهد. علاوه بر این، اگر در پارامترهای AVR، گاورنر و بار نیز تغییراتی ایجاد شود، تغییرات شدیدی در وضعیت سیستم به وقوع خواهد پیوست. بنابراین در عمل پایدار ساز کلاسیک کارایی خوبی نخواهد داشت. جهت اجتناب از این مشکلات تاکنون روش‌های مختلفی ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به استفاده از مجموعه‌های فازی<sup>۲</sup> [۳-۵] اشاره کرد که این روش هم دارای معایبی همچون عدم پاسخدهی مناسب در شرایط نقطه کار اولیه و تغییر در پارامترهای سیستم و قابلیت آموزش‌پذیری کم می‌باشد. حال اگر بتوان به نحوی معایب مورد نظر را برطرف نمود، رفتار دینامیکی سیستم باز هم بهبود خواهد یافت. با توجه به اینکه

## ۱- مقدمه

مسئله پایداری سیستم قدرت در برابر اغتشاشات موجود در شبکه از دیرباز مورد توجه کارشناسان بوده و می‌باشد که با گسترش شبکه‌های قدرت از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری تا حد زیادی بر میرا کردن نوسان‌های الکترومکانیکی به وسیله کنترلرهای موجود روی سیستم قدرت استوار می‌باشد. مطالعه و تحقیقات قابل ملاحظه‌ای جهت افزایش میرایی و پایداری سیستم‌های قدرت بر روی کنترل کننده‌های تحریک ژنراتورها صورت گرفته و نتایج خوبی کسب گردیده است. از مهم‌ترین این کنترل کننده‌ها می‌توان پایدار ساز سیستم قدرت<sup>۱</sup> را نام برد [۱، ۲]. ساختار یک پایدار ساز کلاسیک به نحوی است که تنظیم بهره آن معمولاً در یک شرایط خاصی از

$u$ : بردار سیگنال‌های کنترلی می‌باشد.  
 $y$ : بردار خروجی‌های قابل اندازه‌گیری می‌باشد.  
 $P(s)$ : مدل نامی سیستم که می‌تواند شامل توابع وزنی بکار رفته در طراحی نیز باشد.  
 $\Delta(s)$ : کلیه عدم قطعیت‌های موجود در سیستم را در بر می‌گیرد. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند شامل خطاهای مدل‌سازی سیستم، تغییرات پارامترهای سیستم، خطاهای ناشی از خطی‌سازی سیستم و ... باشند.

جهت مطرح نمودن مسئله استاندارد  $H_\infty$ ، نمایش استاندارد بدون عدم قطعیت به صورت شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۲) - نمایش استاندارد سیستم دقیق تحت کنترل فیدبک

با توجه به بردارهای خروجی و ورودی سیستم،  $P(s)$  بصورت زیر تقسیم بندی می‌شود:

$$P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

با در نظر گرفتن  $P(s)$  به صورت فوق و حذف آرگومان  $s$  از توابع تبدیل می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} z = P_{11}w + P_{12}u \\ y = P_{21}w + P_{22}u \end{cases} \quad (2)$$

با به کارگیری فیدبک خروجی  $u = Ky$ ، رابطه بین  $w$  و  $z$  به صورت زیر بیان می‌شود:

$$z = [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}]w \quad (3)$$

به تابع تبدیل از  $w$  به  $z$  تبدیل کسری خطی (LFT) گفته می‌شود و با نماد  $F_l(P, K)$  نمایش می‌دهند.

$$z = F_l(P, K)w \quad (4)$$

با تعریف مناسبی از  $w$  و  $z$  یا به طور معادل  $P(s)$ ، مسائل طراحی عملی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی به صورت زیر در می‌آیند:

$$\min_K \|F_l(P, K)\|_\infty \quad (5)$$

عمل بهینه‌سازی بر روی کلیه کنترل‌کننده‌های تحقق‌پذیری صورت می‌گیرد که سبب پایداری سیستم حلقه بسته شوند. به

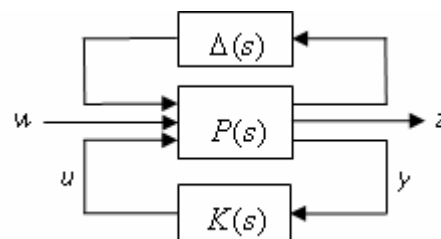
مشکل اساسی در طراحی پایدار ساز سیستم قدرت، تغییرات مدل سیستم می‌باشد و همچنین هدف از بکارگیری تئوری کنترل مقاوم تضمین پایداری و کارآیی سیستم حلقه بسته با حضور کلیه عدم قطعیت‌های<sup>۳</sup> ممکن می‌باشد، استفاده از تئوری کنترل مقاوم منطقی به نظر می‌رسد. به نظر نویسندگان این مقاله، شاید تنها دلیلی که تاکنون در طراحی پایدار ساز سیستم از این روش استفاده نشده است، پیچیدگی‌های حل مسئله به منظور بدست آوردن کنترل کننده بوده است. لکن با توجه به ارائه روش‌های نوین و همچنین وجود نرم افزارهایی که قابلیت حل مسئله را دارند حل مسائل کنترل مقاوم پیچیدگی‌های سابق را ندارند. مطالب ارائه شده در این مقاله به صورت زیر مرتب شده‌اند:

در قسمت دوم روش طراحی کنترل مقاوم  $H_\infty$  معرفی می‌شود و در قسمت سوم مدل خطی سیستم قدرت تک ماشین متصل به شینه بی‌نهایت بیان می‌شود. در قسمت چهارم یک کنترل کننده برای سیستم طراحی می‌شود و با تغییر مدل سیستم مقاوم بودن سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. در قسمت پنجم نتیجه‌گیری و مراجع نیز در انتها می‌باشند.

## ۲- طراحی کنترل کننده مقاوم $H_\infty$

### ۲-۱- مسئله استاندارد $H_\infty$

در مسئله استاندارد  $H_\infty$  از نمایش خاصی از سیستم به نام نمایش استاندارد استفاده می‌شود [۶]. جهت حل مسائل گوناگون مطرح در کنترل به روش  $H_\infty$  در ابتدا باید این مسائل را به شکل استاندارد نمایش داد. شکل ۱ این نمایش را برای یک سیستم غیر دقیق تحت کنترل فیدبک نشان می‌دهد.



شکل (۱) - نمایش استاندارد سیستم غیر دقیق تحت کنترل فیدبک

اجزاء نشان داده شده در این شکل به شرح زیر می‌باشند:  
 $w$ : بردار سیگنال‌های خارجی که به سیستم وارد می‌شوند. این سیگنال‌ها می‌توانند شامل ورودی‌های شناخته شده، اغتشاش، نویز و ... باشند.  
 $z$ : بردار سیگنال‌هایی که معرف رفتار سیستم می‌باشند از قبیل سیگنال خطا.

که در آن،  $W_1(j\omega)$  تابع وزنی حساسیت بوده و  $|W_1^{-1}(j\omega)|$  بیانگر حداکثر میزان اغتشاشات وارد به سیستم می‌باشد. برای برقراری نامساوی فوق در کلیه فرکانس‌ها و با توجه به تعریف نرم  $\infty$  تابع تبدیل، نامساوی فوق به صورت زیر در می‌آید:

$$\|W_1(j\omega)S(j\omega)\|_\infty \leq 1 \quad (12)$$

به نامساوی فوق شرط کارایی مقاوم<sup>۸</sup> گفته می‌شود. این شرط را می‌توان به صورت یک مسئله استاندارد  $H_\infty$  بیان کرد:

$$F(P, K) = W_1 S = W_1 (I - GK)^{-1} = \quad (13)$$

$$W_1 [I - GK(I + GK)^{-1}]$$

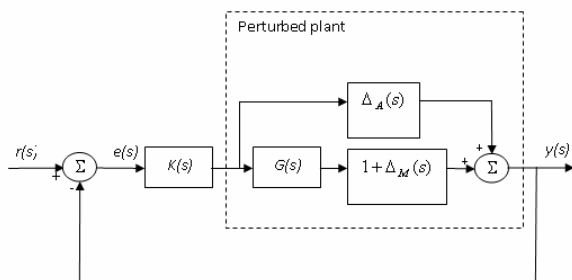
با مقایسه با رابطه ۳ می‌توان نوشت:

$$P = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (14)$$

با در نظر گرفتن تبدیل کسری خطی و ماتریس تابع تبدیل به صورت فوق، مسئله کارایی مقاوم (کاهش حساسیت) به صورت یک مسئله استاندارد  $H_\infty$  تبدیل می‌شود [۷].

### ۲-۳- خطاهای مدل‌سازی و پایداری مقاوم

شکل ۴ سیستم کنترل فیدبک آلوده به عدم قطعیت‌های ضربی<sup>۹</sup>  $\Delta_M(s)$  و جمعی<sup>۱۰</sup>  $\Delta_A(s)$  را نشان می‌دهد. مسئله پایداری مقاوم به این صورت مطرح می‌شود که اگر مدل نامی سیستم بدون در نظر گرفتن  $\Delta_M(s)$  و  $\Delta_A(s)$  پایدار باشد، کران بالایی برای  $\Delta_M(s)$  و  $\Delta_A(s)$  پیدا کنید که با وجود آنها نیز سیستم همچنان پایدار بماند. قضایای زیر، کران‌های مورد نظر را در اختیار طراح قرار می‌دهند.



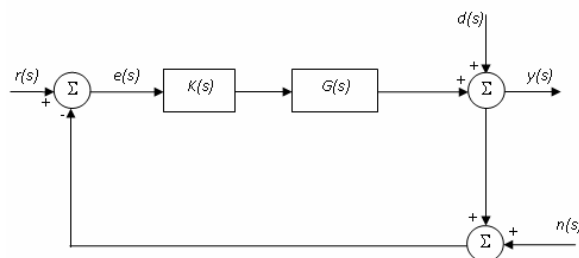
شکل ۴- سیستم کنترل فیدبک آلوده به قطعیت‌های جمعی و ضربی.

**قضیه ۱-** اگر سیستم شکل ۴ بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های  $\Delta_M(s)$  و  $\Delta_A(s)$  پایدار باشد آنگاه اندازه کوچکترین عدم قطعیت  $\Delta_M(s)$  که سبب ناپایداری سیستم می‌شود توسط رابطه زیر بدست می‌آید [۸]:

مسئله بهینه‌سازی به صورت فوق، مسئله استاندارد  $H_\infty$  گفته می‌شود.

### ۲-۲- کارایی مقاوم و مسئله کاهش حساسیت

شکل ۳ سیستم کنترل فیدبک چند ورودی- چند خروجی را در حالت کلی نشان می‌دهد



شکل ۳- نمایش سیستم کنترل فیدبک.

اجزاء نشان داده شده در شکل ۳ عبارت هستند از:

$r$  : ورودی مبنا

$y$  : خروجی

$d$  : ورودی اغتشاش در خروجی

$n$  : نویز اندازه‌گیری

$G$  : مدل نامی سیستم

$K$  : کنترل‌کننده

(توجه: از آرگومان  $s$  صرف نظر شده است).

خروجی  $y$  بر حسب ورودی شناخته شده  $r$  و ناشناخته  $d$  و  $n$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y = S \cdot d + T \cdot (r - n) \quad (6)$$

$S$  و  $T$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$L = G \cdot K \quad (7)$$

$$S = (I + L)^{-1} \quad (8)$$

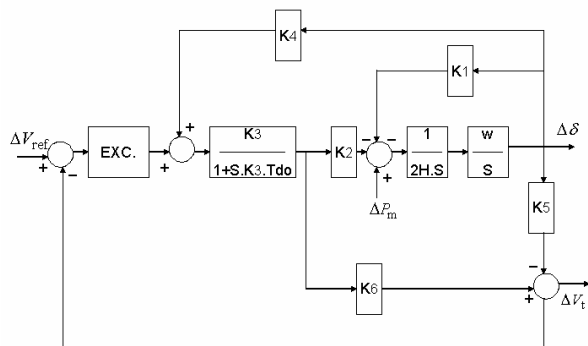
$$R = K(I + L)^{-1} \quad (9)$$

$$T = L(I + L)^{-1} \quad (10)$$

$L$  بهره حلقه<sup>۵</sup>،  $S$  تابع حساسیت،  $R$  تابع حساسیت کنترل‌کننده<sup>۶</sup> و  $T$  تابع مکمل حساسیت<sup>۷</sup> می‌باشند. با توجه به اینکه  $S$  تابع تبدیل بین اغتشاش  $d$  و خروجی  $y$  می‌باشد، به منظور کاهش اثر اغتشاش در خروجی سیستم، لازم است کران بالایی تا حد امکان کوچک برای تابع حساسیت در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر:

$$\bar{\sigma}[S(j\omega)] \leq |W_1^{-1}(j\omega)| \quad (11)$$

دیاگرام این مدل را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این مدل چند متغیره بوده و هر متغیر حالت نشان داده شده در آن، در واقع سه متغیر حالت را در بر می‌گیرد. این مدل پس از خطی شدن معادلات دیفرانسیل حاکم بر شبکه بدست آورده شده است.



شکل (۵)- مدل خطی شده هفرون- فیلیپس.

ماتریس‌های حالت مدل سیستم نیز به صورت زیر می‌باشند:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -122.37 & -0.93 & -144.09 & 0 \\ -0.847 & 0 & -1.597 & 0.26 \\ -381.33 & 0 & -1461.2 & -50 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 6765 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$$D = [0]$$

(۲۱)

## ۴- طراحی کنترل کننده

### ۴-۱- اهداف طراحی پایدار ساز سیستم قدرت

طراحی پایدار ساز سیستم قدرت برای سیستم مدل شده در بخش ۳، به منظور بر آورده شدن اهداف زیر انجام گرفته است:

- ۱- پایدار نمودن سیستم.
- ۲- حداقل نمودن اثر اغتشاشات در خروجی سیستم.
- ۳- مقاوم کردن سیستم در برابر اغتشاشات فرکانس بالا و خطاهای مدل سازی ضربه.
- ۴- فراهم نمودن کارایی مطلوب از قبیل کاهش نوسانات فرکانس در اثر اعمال ورودی پله.
- ۵- مقاوم نمودن سیستم در برابر تغییرات خط انتقال و

$$\bar{\sigma}[\Delta_M(j\omega)] = \frac{1}{\bar{\sigma}[T(j\omega)]} \quad (15)$$

در صورتی که  $|W_3(j\omega)|$  به عنوان معیاری برای بزرگترین عدم قطعیت ضربه در نظر گرفته شود، می‌توان نوشت:

$$\bar{\sigma}[T(j\omega)] \leq |W_3^{-1}(j\omega)| \quad (16)$$

به  $W_3(j\omega)$  تابع وزنی مکمل حساسیت و به نامساوی فوق، شرط پایداری مقاوم گفته می‌شود. برای برقراری این شرط در کلیه فرکانس‌ها و با توجه به تعریف نرم  $\infty$ - تابع تبدیل می‌توان نوشت:

$$\|W_3(j\omega)T(j\omega)\|_{\infty} \leq 1 \quad (17)$$

حال، با تعریف تبدیل کسری خطی به صورت:

$$F_1(P, K) = W_3 T = W_3 G K (I + G K)^{-1} \quad (18)$$

و تعریف  $P$  به صورت:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & -W_3 G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (19)$$

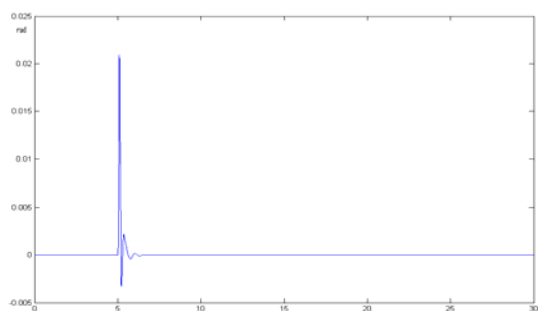
مسئله پایداری مقاوم در برابر قطعیت‌های ضربه به یک مسئله استاندارد  $H_{\infty}$  تبدیل می‌شود. با توجه به اینکه در مسائل عملی عدم قطعیت‌های سیستم به صورت ضربه در نظر گرفته می‌شود از توضیح راجع به عدم قطعیت‌های جمعی صرف نظر می‌کند.

## ۴-۲- انتخاب توابع وزنی

مهمترین مرحله در طراحی کنترل کننده  $H_{\infty}$  تعیین توابع وزنی می‌باشد که تاکنون روش جامعی برای بدست آوردن آنها ارائه نشده است. در حال حاضر، تنها بر اساس تجربه و مهارت طراح و با توجه به اهداف خاص کنترلی مورد نظر از قبیل پهنای باند سیستم حلقه بسته، میزان تضعیف اغتشاشات فرکانس پایین، کمینه نمودن تاثیر نامطلوب خطاهای مدل سازی و ... توابع وزنی مقدماتی بدست آورده شده و با تکرار چندین مرحله سعی و خطا و تست نمودن این موضوع که آیا خواسته‌های مورد نظر چه از نظر پایداری و چه از نظر کارایی حاصل شده‌اند، این توابع مقدماتی اصلاح شده و توابع وزنی نهایی بدست آورده می‌شوند.

## ۳- مدل سازی سیستم قدرت

در این بخش، برای یک سیستم قدرت مدل خطی شده هفرون- فیلیپس<sup>۱۱</sup> در نظر گرفته می‌شود [۹] شکل ۵ بلوک



شکل (۹) - تغییرات فرکانس در پاسخ به ورودی پله پس از اعمال ۲۰٪ تغییرات در مدل.

برای بررسی مقاوم بودن سیستم در برابر تغییرات ۲۰٪ مدل نامی، همان ورودی پله به سیستم حلقه بسته جدید اعمال شده و همان طور که در شکل ۹ دیده می‌شود نتیجه قابل قبول است.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به طراحی یک پایدارساز سیستم قدرت به روش مقاوم  $H_\infty$  پرداخته شده است. نکته اساسی در روش طراحی  $H_\infty$ ، تعیین توابع وزنی حساسیت، مکمل حساسیت و حساسیت ورودی می‌باشد. الگوریتم جامعی برای تعیین این توابع وجود ندارد. اهداف مطلوب از طراحی پایدار ساز سیستم قدرت در توابع وزنی مسئله  $H_\infty$  گنجانده شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهند که تغییرات فرکانس ماشین در اثر اعمال ورودی پله دارای نوسانات کوچکی است که به سرعت میرا می‌شوند. همچنین، نتایج حاصل از اعمال ۲۰٪ تغییرات در مدل ماشین نشان می‌دهند که پایدار ساز سیستم قدرت  $H_\infty$  سیستم را در برابر این گونه تغییرات در مدل ماشین مقاوم نموده است.

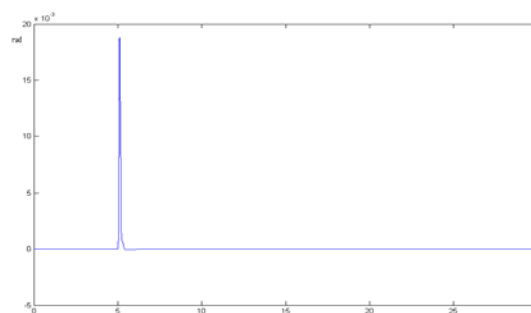
پارامترها مانند تغییر ماتریس‌های مدل در اثر تغییر نقطه کار. جهت برآورده شدن اهداف ۲، ۴ و ۵ کنترل‌کننده به گونه‌ای طراحی شده است که اندازه بزرگ‌ترین مقدار استثنایی تابع حساسیت سیستم حلقه بسته در محدوده اغتشاشات  $(0.1 \text{ rad/sec})$  کوچک‌تر از  $-30 \text{ dB}$  باشد. با وجود چنین تابع حساسیتی، مقاوم بودن سیستم در برابر تغییرات نقطه کار که به صورت تغییرات ماتریس‌های مدل (۲۰٪ مقدار نامی) ظاهر می‌شوند نیز تضمین شده است.

جهت برآورده شدن هدف ۳، کنترل‌کننده به گونه‌ای طراحی شده که اندازه بزرگ‌ترین مقدار استثنایی مکمل حساسیت سیستم حلقه بسته در فرکانس‌های بالا به اندازه کافی کوچک باشد. به کمک توابع وزنی حساسیت  $W_1(j\omega)$  و مکمل حساسیت  $W_3(j\omega)$  اهداف مورد نظر در مسئله استاندارد  $H_\infty$  گنجانده شده‌اند.

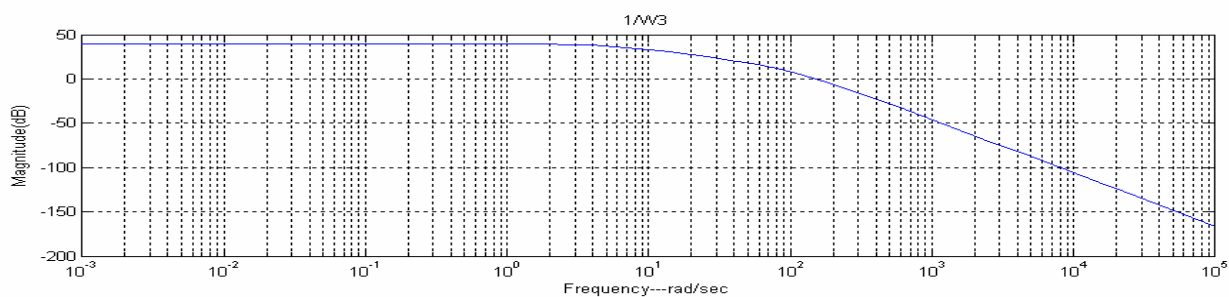
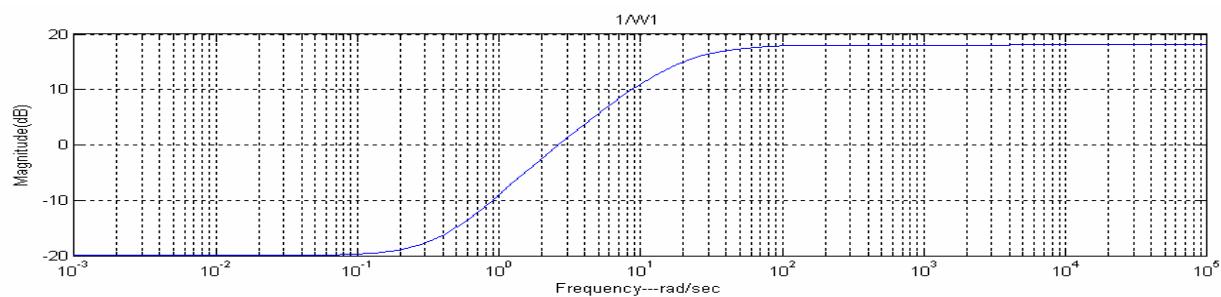
## ۲-۴- نتایج شبیه سازی

در شکل ۶ اندازه معکوس توابع وزنی حساسیت و مکمل حساسیتی که در این طراحی به کار رفته‌اند به صورت لگاریتمی بر حسب فرکانس رسم شده است. پس از افزودن دینامیک توابع وزنی به مدل سیستم و انتخاب ثابت  $\gamma = 1$  کنترل‌کننده  $H_\infty$  حاصل شده است. با به دست آوردن سیستم حلقه بسته و رسم اندازه توابع حساسیت و مکمل حساسیت آن در شکل ۷ دیده می‌شود که منحنی اندازه این توابع در زیر معکوس توابع وزنی مربوطه قرار گرفته‌اند.

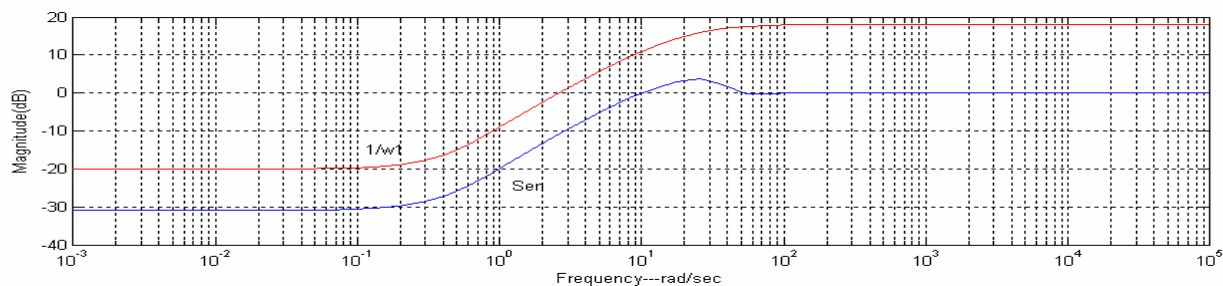
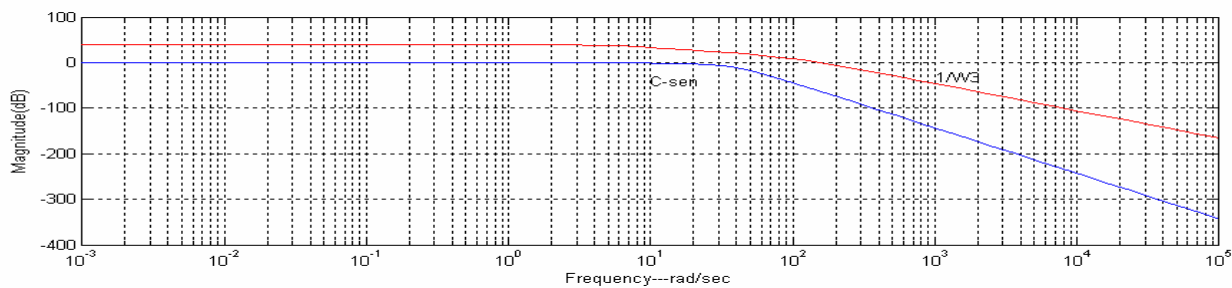
مطابق با شکل ۸ نوسانات فرکانس ماشین در اثر اعمال ورودی پله  $(0.002 pu)$  کوچک بوده و پس از زمان کوتاهی میرا شده‌اند.



شکل (۸) - تغییرات فرکانس در پاسخ به ورودی پله.



شکل (۶) - معکوس توابع وزنی حساسیت و مکمل حساسیت



شکل (۷) - معکوس توابع وزنی ، توابع حساسیت و مکمل حساسیت سیستم حلقه بسته.

## ۶- مراجع

## ۷- پی‌نوشتها

- ۱- Power System Stabilizer
- ۲- Fuzzy Sets
- ۳- Uncertainty
- ۴- Linear fractional transformation
- ۵- Loop gain
- ۶- Controller sensitivity function
- ۷- Complementary Sensitivity Function
- ۸- Robust Performance
- ۹- Multiplicative
- ۱۰- Additive
- ۱۱- Heffron Phillips
- P. Kundur, "**Power System Stability and Control**", [۱]  
McGraw-Hill, New York, 1994.
- Yao-Nan Yu, Electric "**Power System Dynamics**" [۲]  
, Academic Press, New York, 1983.
- N. Hosseinzadeh, A. Kalam, "**A Rule-Based Fuzzy System Stabilizer Tuned by a Neural Network**", IEEE Trans. on Energy Conversion, [۳]  
Vol. 14, No. 3, pp. 773-779, 1999.
- N. Hosseinzadeh, A. Kalam, "**Direct Adaptive Fuzzy Power Stabilizer**" IEEE Transaction on [۴]  
Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1564-1571, 1999.
- J. Lu, M. H. Nehrir, D. A. Pierre, "**A Fuzzy Logic-Based Adaptive Power System Stabilizer for Multi-machine Systems**", in [۵]  
IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting, Seattle, WA, pp. 15-19, 2000.
- J. M. Maciejowski, "**Multivariable Feedback Design**" Cornwall: T. J. Press, 1989. [۶]
- R. Y. Chiang and M. G. Safonov, "**Robust Control Toolbox**." The Math. Works Inc., 1988 [۷]
- J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R. Tannenbaum, "**Feedback Control Theory**". [۸]  
New York: Macmillan, 1992
- Y. N. Yu, "**Electric Power System Dynamics**". [۹]  
New York: Academic Press, 1983.