

طراحی کنترل کننده غیرمتمرکز برای سیستمهای ابعاد- وسیع غیر خطی با SSV

محمد داداشی محمدرضا جاهد مطلق محمد فرخی

mo_dadashi@yahoo.com

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران

کلمات کلیدی: سیستم ابعاد وسیع غیر خطی، کنترل غیرمتمرکز، مقادیر ویژه ساختاری

چکیده

در این مقاله طراحی کنترل کننده مقاوم غیرمتمرکز براساس مقادیر ویژه ساختار یافته (Structural Singular Values) ارائه می شود، به طوری که بتواند در برابر اغتشاشات و تغییر پارامترهای سیستمهای ابعاد- وسیع، عملکرد خوبی داشته باشد. شرط پایداری سیستم کلی را نیز می توان با رسیدن به حاشیه تعامل و حاشیه فاز و بهره کافی در طول طراحی هر کنترل کننده غیرمتمرکز محلی با استفاده از تئوری فیدبک برآورده کرد. در این مقاله کنترل کننده طراحی شده به یک سیستم ابعاد- وسیع غیر خطی با دو زیرسیستم (بار- فرکانس) اعمال شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که کنترل کننده فوق عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده های کلاسیک قبلی دارد.

۱- مقدمه

یکی از مسائلی که در سیستمهای ابعاد وسیع مطرح می شود مشکل محاسبات است و این هم به دلیل دینامیک بالای اینگونه سیستمها است. همانطور که می دانید سیستمهای ابعاد- وسیع سیستمهایی هستند که بتوان آنها را به تعدادی زیرسیستم تجزیه کرد، ممکن است این زیرسیستمها پایدار، یا ناپایدار باشند [1,3,4]. طراحی کنترل کننده متمرکز برای چنین سیستمهایی با توجه به فاصله جغرافیایی و عدم دسترسی بلادرنگ به اطلاعات همه زیرسیستمها و عدم ارسال بلادرنگ فرامین کنترلی بصورت مرکزی با مشکلات مواجه گردید [2,5]. بنابراین در سیستمهای ابعاد بالا سعی بر غیرمتمرکز سازی سیستم است، چون طراحی کنترل کننده به روشهای غیرمتمرکز فقط با توجه به اطلاعات و حالت های مربوط به آن ناحیه طراحی می گردد و البته در نهایت عملکرد سیستم کلی نیز باید رضایتبخش باشد [6,7]. در اینگونه سیستمها برای کنترل دقیق خطا از روشهای مختلفی می توان استفاده کرد. اگر برخی از حالتها مشاهده پذیر نباشد، طراحی کنترل کننده فیدبک که به بردار حالت حاصل از مشاهده پذیری اندازه گیریهای حالت های هر ناحیه بستگی دارد، مشکل خواهد بود. این روش برای سیستمهای ابعاد وسیع با ابعاد بالا که متغیرهای حالت آن زیاد است، مناسب نمی باشد [8]. برای یک سیستم ابعاد- وسیع گسترده، روشهایی همچون کنترل کننده هایی براساس سیستمهای با ساختار متغیر (Variable Structural Systems) و پایدارسازی سیستمهای خطی نامعین با معادله ریکاتی تحقیقاتی ارائه شده است [9]. مقاوم سازی همه روشهای بالا بر پایه روشهای فضای حالت می باشند.

مسئله طراحی کنترل کننده غیرمتمرکز برای سیستم ابعاد- وسیع می تواند به یک مسئله معادل طراحی کنترل کننده غیرمتمرکز برای یک سیستم کنترل MIMO تبدیل گردد. حال می توان کنترل مقاوم را در حوزه فرکانس تحت روشهای H_{∞} , μ -synthesis برای چنین سیستم MIMO طراحی کرد [11,10].

در این مقاله از روش مبتنی بر مقادیر ویژه ساختار یافته استفاده می شود. در این روش کنترل کننده هر ناحیه بطور مستقل طراحی میگردد. در سیستمهای ابعاد- وسیع می توان شرط پایداری را با رسیدن به حاشیه تعامل و حاشیه فاز و بهره کافی هر ناحیه برآورده کرد. طراحی کنترل کننده های محلی برای دستیابی به عملکردهای رضایت بخش سیستم، ساده ترند [8,11]. کنترل کننده طراحی شده برای یک سیستم ابعاد- وسیع غیرخطی (بار- فرکانس) اعمال شده است.

۲- طراحی

کنترل کننده غیرمتمرکز SSV هر ناحیه بدون توجه به ارتباط زیرسیستمها طراحی می شوند. ابتدا مقاوم سازی را براساس معادلات خطی انجام می دهیم و بعد از طراحی می توان برای مدل با عناصر غیرخطی اعمال کرد.

۲-۱- تبدیل مسئله ابعاد وسیع به یک مسئله MIMO

یک مدل فضای حالت سیستم ابعاد- وسیع:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}\end{aligned}\quad (1)$$

بطور کلی یک سیستم ابعاد- وسیع (۱) می تواند مانند یک سیستم شامل m زیرسیستم، مدل شود.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_m\mathbf{x} + \mathbf{B}_m\mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}_m\mathbf{x}\end{aligned}\quad (2)$$

در این مقاله روش طراحی برای یک سیستم ابعاد- وسیع با m زیرسیستم، ارائه شده است. $G(s)$ تابع تبدیل و $Y(s) = G(s)U(s)$ ، $U(s)$ ، $Y(s)$ با $m \times m$

$$G(s) = [g_{ij}(s)]_{i,j=1,\dots,m}\quad (3)$$

می تواند بصورت زیر محاسبه شود:

$$G(s) = \mathbf{C}_m (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_m)^{-1} \mathbf{B}_m\quad (4)$$

حال طراحی m کنترل کننده غیرمتمرکز به طراحی یک ماتریس قطری زیر تبدیل می شود:

$$F(s) = \text{diag}[f_i(s)]_{i=1,\dots,m}$$

اگر $G(s)$ در $g_{ij}(s) (i \neq j)$ برابر صفر باشند (تعاملی بین زیرسیستمها نباشد)، مسئله به یک مسئله SISO تبدیل می گردد. ولی چون $g_{ij}(s) (i \neq j)$ مخالف صفر می باشند، باید $f_i(s)$ را برای هر زیرسیستم طوری طراحی کنیم که پایداری حلقه بسته زیرسیستم تأمین گردد (شکل ۲).

سؤالی که مطرح می شود این است که چه شرایطی باید در نظر گرفت تا با برآورده شدن آن، پایداری سیستم کلی تضمین می گردد؟ (شکل ۱). جواب این سؤال در [12] داده شده است. ما فقط شرطی را آورده ایم که با برآورده شدن آن کنترل کننده قطری، سیستم کلی را پایدار می کند.



۲-۲- طراحی کنترل غیرمتمرکز سیستم MIMO

تابع تبدیل سیستم $G(s) = [g_{ij}(s)]_{i,j=1,\dots,m}$ یک پلنت MIMO به صورت زیر تجزیه می گردد:

$$G(s) = \tilde{G}(s) + \hat{G}(s) \quad (۵)$$

$\tilde{G}(s)$ یک ماتریس قطری و در ضمن همه عناصر قطری $\hat{G}(s)$ صفر و عناصر غیر قطری نیز همان عناصر سیستم اصلی هستند. با استفاده از روابط بالا ماتریس خطای نسبی بصورت زیر تعریف می گردد:

$$E(s) = \hat{G}(s)\tilde{G}^{-1}(s), \quad \tilde{H}(s) = \text{diag}[h_i(s)], \quad H(s) = \text{feedback}[F(s), G(s)] \quad (۶)$$

برای هر زیرسیستم کنترل کننده غیرمتمرکز با توجه به اطلاعات حاشیه فاز و بهره مورد نظر طراحی می گردد [12]. نظریه ارائه شده برای پایداری سیستم حلقه بسته $H(s)$ بصورت زیر می باشد.

$H(s)$ پایدار است اگر:

الف- $G(s), \tilde{G}(s)$ قطبهایش در سمت چپ محور موهومی باشند.

ب- $\tilde{H}(s)$ پایدار باشد.

$$|h_i(j\omega)| < \mu^{-1}(E(j\omega)) \quad (۷)$$

μ : مقدار ویژه ساختار یافته

$$\forall \omega (i = 1, \dots, m)$$

می توان شرط ج را بصورت کلی تر نیز نوشت:

$$\delta_{\max} |\tilde{H}(j\omega)| < \mu^{-1}(E(j\omega)), \quad \forall \omega \quad (۸)$$

δ_{\max} : ماکزیمم مقدار ویژه

می توان در شرط ج از ماتریس تابع وزنی قطری نیز استفاده کرد که در حالت ویژه می توان $W(s) = I$ در نظر گرفت [6,13].

حال با توجه به طراحی می توان شرایط پایداری و همچنین حاشیه فاز و بهره را برای هر کدام از زیرسیستمها چک کرد و سپس شرط پایداری سیستم کلی (ج) را بررسی نمود.

در اینجا تابع تبدیل سیستم اصلی را به صورت قطری (زیرسیستمهای مجزا) در نظر می گیریم. تابع تبدیل کنترل کننده قطری $F_i(s) = \text{diag}[f_i(s)]$ را بر اساس اطلاعات حاشیه فاز و حاشیه بهره، طوری طراحی می کنیم که عملکرد زیرسیستمها و در نهایت سیستم ابعاد وسیع بهبود یابد.

۲-۲- شبیه سازی

در این مقاله یک سیستم دو ناحیه ای مشابه (بار-فرکانس) در نظر گرفته است. باید یاد آوری کرد که این مدل غیرخطی ترین مدل بار-فرکانس است که برای اولین بار در این مقاله ارائه می گردد.

در این مقاله کنترل کننده طراحی شده برای یک سیستم ابعاد وسیع با $m = 2$ اعمال شده است، که می توان آنرا برای ابعاد بالاتر یا با زیرسیستمهای ($m > 2$) بیشتر نیز تعمیم داد. پارامترهای سیستم مورد مطالعه به قرار زیر است:

$$T_{ti} = 0.3s, \quad T_{gi} = 0.08s, \quad T_{pi} = 20s, \quad R_i = 2.4\text{Hz/puMW}, \quad K_{pi} = 120\text{Hz/puMW}$$

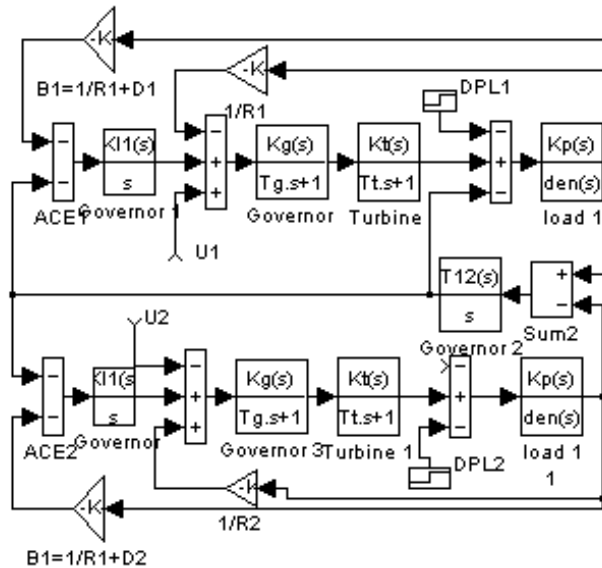
$$T_{12} = 0.545\text{puMW}, \quad B_i = 0.425\text{puMW/Hz}, \quad \Delta P_{D1} = 0.03\text{pu}, \quad \Delta P_{D2} = 0.0\text{pu}$$

$$K_{i=1} = 1, a_{12} = -1, -0.1 \leq \delta_{\text{governor}} \leq 0.1 \text{ pu/s}, -0.03 \leq \Delta P_{\text{governor}} \leq 0.03 \text{ pu}$$

$$-0.09 \leq \Delta P_{\text{Turbine}} \leq 0.09 \text{ pu/s}, \delta_{\text{backlash}} = \%0.1$$

در این مثال هدف بهبود زمان نشست و کاهش دامنه گذرای خطا می باشد. در صورتیکه دامنه خطا در حداقل زمان کاهش نیابد یا دچار نوسان شود، این نوسانات با نوسانات بین ماشینی و زیرهارمونیکی موجود در زیرسیستمها هماهنگ شده و باعث ناپایداری سیستم کلی می گردند. بنابراین در شبکه گسترده لازم است خطای فرکانس و زمان گذرای آن به حداقل برسد.

سیستم ساده شده شکل (۳) بلوک دیاگرام کنترل بار- فرکانس یک سیستم قدرت دو ناحیه ای را نشان می دهد. برای کنترل خطا، لازم است متغیرهای انتگرال خطا و توان ارتباطی در معادلات حالت لحاظ شوند، که این کار توسط حلقه دوم که یک انتگرالگیر است صورت می گیرد. پارامترها بر حسب پیونیت هستند و $B_1, B_2, \frac{K_{i1}}{S}, \frac{K_{i2}}{S}, a_{12}$ شبیه سیستم SISO در محدوده پایداری در نظر گرفته می شوند [14].



شکل ۳- بلوک دیاگرام سیستم دو ناحیه ای

متغیرهای فضای حالت در مدل فضای حالت:

$\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T$; $\mathbf{y} = [y_1, y_2]^T = [\Delta f_1, \Delta f_2]^T$ و $\mathbf{x} = [\Delta f_1, \Delta P_{T1}, \Delta P_{G1}, \Delta P_{C1}, \Delta P_{tie}, \Delta f_2, \Delta P_{T2}, \Delta P_{G2}, \Delta P_{C2}]^T$
 فرکانس دو ناحیه بدست می آید و تغییرات بار، تغییرات توان ارتباطی دو ناحیه یا N ناحیه که از انتگرال تغییرات فرکانس در دو ناحیه بدست می آید و تغییرات فرکانس می باشند. ماتریسهای فضای حالت را نیز می توان براساس معادلات حالت نوشت [9,15]. حال با توجه به طراحی می توان شرایط پایداری و همچنین حاشیه فاز و بهره را برای هر کدام از زیرسیستمها را چک کرد و سپس شرط پایداری سیستم کلی (ج) را بررسی نمود.
 تابع تبدیل کنترل کننده قطری $\mathbf{F}_i(s) = \text{diag}[f_i(s)]$ را بر اساس اطلاعات زیرسیستمها طوری طراحی می کنیم که عملکرد زیرسیستمها و در نهایت سیستم ابعاد وسیع رضایتبخش باشد.

برای یک سیستم دو ناحیه ای مشابه، تابع تبدیل کنترل کننده غیرمترکز، $i=1, 2$ ، بدست آمده است. در شکل (۶) دیاگرام بود حلقه باز $(f_i(s) * g_{ii}(s))$ زیرسیستمها بعد از اضافه کردن کنترل کننده قطری برای سیستم قطری (زیرسیستمها) مشاهده می گردد. قبل از اضافه کردن کنترل کننده غیرمترکز براساس مقادیر ویژه ساختار یافته، حاشیه بهره هر زیرسیستم در $\omega = 6.35 \text{ rad/s}$ ، $G_M(i,i) = -5.71 \text{ dB}$ or $-\text{dB}(\text{gain}(g_{ii}))$ و حاشیه فاز هر زیرسیستم در $\omega = 5.06 \text{ rad/s}$ ، $\phi_G = 12.5^\circ$ or $\text{phase}(g_{ii})$ می باشد که بعد از اضافه شدن کنترل کننده، بهره در $\omega = 6.35 \text{ rad/s}$ ، $\text{dB}(\text{gain}(f_i * g_{ii}))$ به 13.2 dB کاهش می یابد و فاز در $\omega = 5.06 \text{ rad/s}$ ، $\text{phase}(f_i * g_{ii})$ به 62° درجه می رسد.

می توان حاشیه فاز و بهره حلقه باز $f_1.g_{11}$ ، $f_2.g_{22}$ را (بعد از اضافه شدن $F = \text{diag}[f_1, f_2]$ به قطره های تابع تبدیل G ، یا $[f_1.g_{11}, f_2.g_{22}]$) محاسبه کرد. حاشیه فاز در $\omega = 3.7 \text{ rad/s}$ ، $\phi_{fg}(ii) = 114^\circ$ و حاشیه بهره در $\omega = 12.3 \text{ rad/s}$ به $G_M(f_i.g_{ii}) = 25 \text{ dB}$ کاهش می یابد.

اما در شکل (۷) می توان حاشیه فاز و حاشیه بهره حلقه بسته را در هر کدام از زیرسیستمها، بعد از اصلاح بدست آورد. تابع تبدیل قطری حلقه بسته سیستم بعد از اضافه نمودن کنترل کننده غیرمترکز SSV بصورت زیر می باشد.

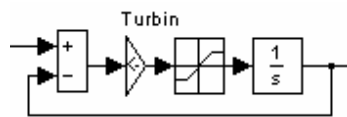
$$H_{\text{diag}}(s) = \text{diag}[h_{ii}(s)], \quad h_{ii}(s) = \frac{f_i(s) * g_{ii}(s)}{1 + f_i(s) * g_{ii}(s)} :$$

با توجه به شکل (۷) حاشیه فاز و حاشیه بهره و حاشیه تعامل زیرسیستمهای مشابه را نیز می توان بدست آورد. حاشیه بهره در $\omega = 12.2 \text{ rad/s}$ به $G_M(h_{ii}(s)) = 24.5 \text{ dB}$ کاهش می یابد. حاشیه فاز نیز بی نهایت خواهد بود. چون در دیاگرام بود، $\text{dB}[\text{gain}(h_{ii}(s))]$ زیر محور حقیقی قرار دارد و آنرا قطع نمی کند. همچنین می توان حاشیه تعامل را که کوتاهترین فاصله عمودی دو منحنی شکل (۸) می باشد، بدست آورد. در این مدل حاشیه تعامل برای هر زیرسیستم در $\omega = 3.2 \text{ rad/s}$ حدوداً برابر 3.98 dB می باشد. با توجه به شکل (۳) شرط پایداری سیستم کلی نیز تضمین می گردد:

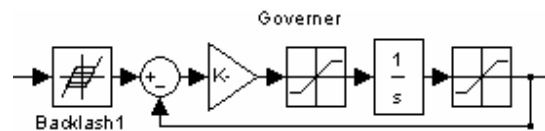
$$\sigma_{\max}(\tilde{H}(j\omega)) = 0.6328 < \mu^{-1}(EE(j\omega)) = 0.7076$$

حال با مقاوم سازی سیستم حول نقطه کار و با قرار دادن مدل غیرخطی عناصر، می توان نتایج خطای فرکانس و توان خط ارتباطی را مشاهده کرد.

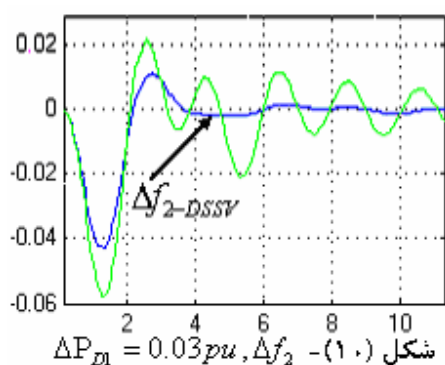
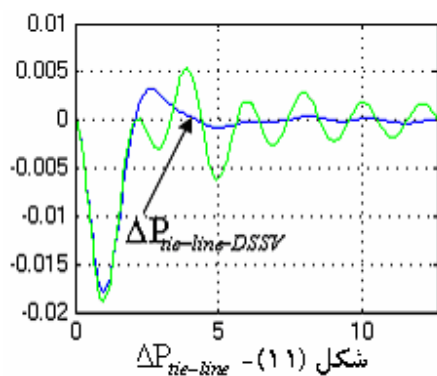
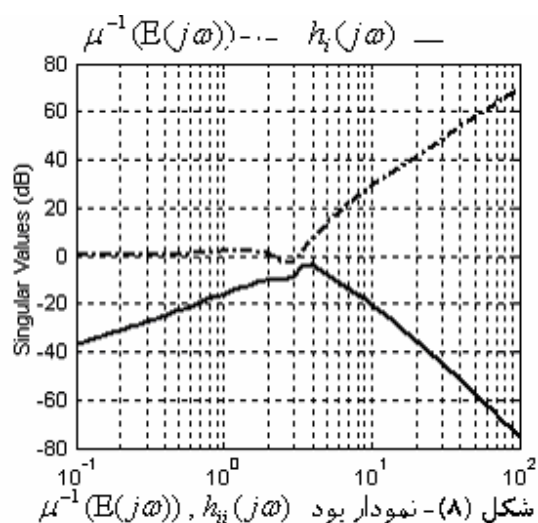
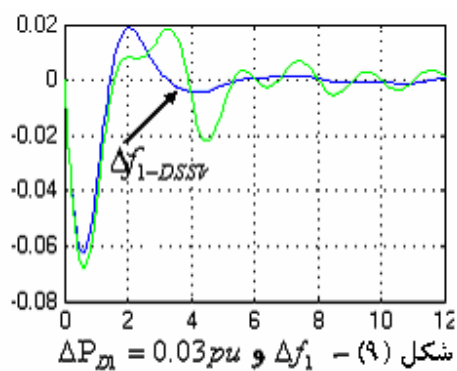
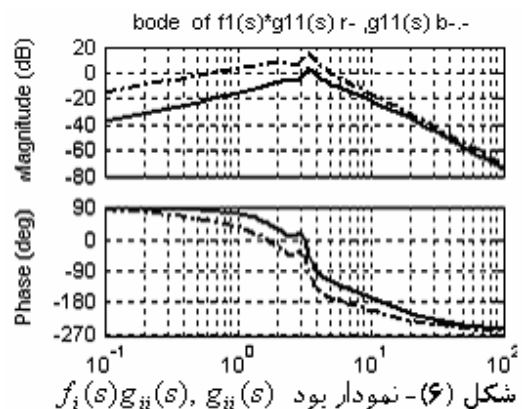
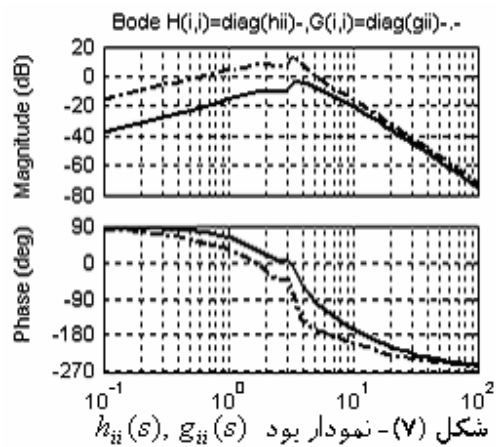
مدل غیرخطی گاورنر با نرخ تغییرات شیر و ماکزیمم تغییرات تولید و همچنین لقی بصورت شکل (۴) قابل نمایش است [16]. لقی موجود باعث می شود تا گاورنر به تغییرات سرعت کمتر از باند مرده عکس العمل نشان ندهد. مدل غیرخطی توربین را نیز می توان با حداکثر و حداقل نرخ تولید، به صورت شکل (۵) نمایش داد [16,17].

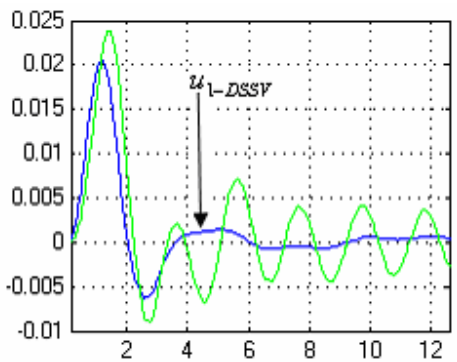


شکل (۵) - مدل غیرخطی توربین

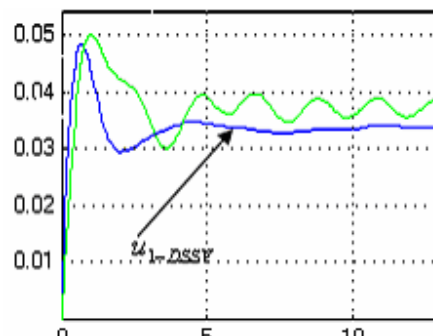


شکل (۴) - مدل غیرخطی گاورنر





شکل (۱۳) - سیگنال کنترل ناحیه دوم u_2



شکل (۱۴) - سیگنال کنترل ناحیه اول u_1

۳- نتیجه

در این مقاله کنترل کننده غیرمتمرکز محلی براساس مقادیر ویژه ساختار یافته پیشنهاد می شود. در سیستمهای ابعاد- وسیع N ناحیه ای عملی (قدرت) ممکن است، استفاده از ماتریس وزنی قطری غیر واحد در شرط پایداری سیستم کلی (ج) مفید باشد.

شرطهایی که بیان شد پایداری سیستمهای خطی را تحت تغییرات پارامترهای سیستم و اغتشاشات تضمین می کنند اما برای مدل با عناصر غیرخطی محافظه کارانه عمل می کنند. البته اگر اتصالات داخلی بین زیرسیستمها (نواحی) ضعیف باشد، شرط (ج) یا (ج) از اعتبار و اطمینان بیشتری برخوردار خواهد بود. جیرانسازهای غیرمتمرکز محلی بخاطر سادگی و برای دستیابی به عملکردهای مطلوب سیستم، مناسب هستند اما برای طراحی نامتقارن می باشند.

طراحی کنترل کننده به روشهای فیدبک حالت [3]، با تغییرات پارامترهای سیستم مشکل خواهد بود. زیرا در طراحی گین فیدبک به روش معادلات ریکاتی، انتخاب ماتریسهای T, U و همچنین ماتریسهای Q, R با تغییر پارامترهای سیستم امکان پذیر نیست.

کنترل کننده غیرمتمرکز محلی SSV با حاشیه فاز و بهره و حاشیه تعامل مناسب، عملکرد سیستم را با مقاوم سازی حول نقطه کار بهبود می بخشد. البته این روش برای سیستمهای با ابعاد بالاتر نیز قابل تعمیم است. همچنین برای زیرسیستمهای با اتصالات ضعیف، نظیر سیستمهای قدرت جوابهای بسیار مطلوبی از نظر دامنه گذرا و زمان نشست خطا و خطای خط ارتباطی حاصل می شود. نتایج شبیه سازی بیان می کند که عملکرد سیستم نسبت به روشهای پیشنهادی قبلی [4] بهتر و مقاومتر است.

۴- مراجع

- [1] Jamshidi M, "Large-Scale Systems", North Holland, New York, 1983.
- [2] Siljak D.D., "Large-scale Dynamic Systems", North Holland, New York, 1978.
- [3] Valery A.Ugrin. "State-feedback and robust control large-scale systems "American ControConf. 1998.

- [4] M.K., "Multilevel Control and other schemes for Large-Scale Systems", *IEEE Trans.SMC-7*, pp. 144-152, March 1982.
- [5] Aoki M., "Some control problems associated with decentralized dynamical systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol.16, pp. 515-518, 1971.
- [6] Mrari, M., "Interaction measures for large-scale systems under decentralized control", *Automatica*, 1986, 49, pp.1556-1568.
- [7] Chen, Y.H., "Decentralized Robust Control System design for large-scale systems", *Int. J. control*, 47, 1195-1205, 1988.
- [8] Yang, T.C.; "Applying structured singular value and a new LQR design to robust decentralized power system ", *IEEE, Int. Conference on industrial technology*, 1996, pp.880-884.
- [9] Zhou, R., "Robust controller design for large-scale power systems", *IEE proc. C*, 1993, 140, pp.11-16.
- [10] Glover, K., "Robust and optimal control", *Prentice Hall*, 1996.
- [11] Maciejowski, J.M., "Multivariable feedback design", *Addison-Wesley*, 1989.
- [12] M.H.Kazemi, "Sufficient condition for stability of decentralized control feedback structures", *IEEE, Confer. On Decision and Control San Diago California USA*, 1997.
- [13] Saberi, A. and H. Khalil., "Decentralized stabilization of a class of nonlinear interconnected systems", *Int. J. Control*, 36, pp. 803-818, 1983.
- [14] Sivar.A.Y., Harr., M. ;" Design of variable structure load-frequency controller using pole assignment", *Int.J.contrl*, 1984, 40, pp.478-498
- [15] Wen.C.; "New robust adaptive load-frequency controller with system parametric uncertain", *Trans.Distrib.*, 1994, 141, pp.116-122.
- [16] Kundur, "Power System Stability and Control", *Publication of Tarbiat Modarres University*, 1987.
- [17] Young-H.M., "Fuzzy Logic Based Extended Integral Control for Load Frequency Control", *IEEE, Trans. On power-ytems*, vol.14, No.1, 1999, pp.145-150.