

# طراحی کنترل کننده مقاوم $H^\infty$ برای سیستم کنترل بار - فرکانس در شبکه های قدرت چند ناحیه ای

حسین شایقی  
فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

مهدی کراری  
استادیار

محمد باقر منهاج  
دانشیار

مهرداد عابدی  
استاد

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

## چکیده:

در این مقاله یک کنترل کننده مقاوم  $H^\infty$  جهت سیستم کنترل بار - فرکانس شبکه های قدرت با عدم قطعیت های پارامتریک پیشنهاد می گردد. گستره تغییرات پارامترهای سیستم قدرت با تغییر همزمان پارامترها به میزان 20% تا 50% از مقادیر نامی شان به دست می آید. برای تعیین حدود پایداری مقاوم، از آنالیز  $\mu$  MIXED استفاده می شود. نتایج شبیه سازی بر روی یک سیستم چهار ناحیه نشان می دهد که کنترل کننده بار - فرکانس  $H^\infty$  نسبت به تغییر نقطه کار سیستم و افزایش اغتشاش بار مقاوم بوده و دارای عملکرد بسیار خوبی با وجود محدودیت نرخ تولید است. کنترل کننده  $H^\infty$  پیشنهاد شده پایداری کل سیستم را در برابر همه عدم قطعیت های مجاز و افزایش اغتشاش بار تضمین می نماید.

## *Design of $H^\infty$ Controller for Load Frequency Control in Electric Power Systems*

M. Karrari  
Assistant Professor

H. Shayeghi  
Graduate student

M. Abedi  
Professor

M.B. Menhaj  
Associate Professor

Electrical Engineering Department,  
Amirkabir University

### Abstract

*In the paper a robust ( $H^\infty$ ) controller is designed for load frequency control of power systems. The range of parameter variations has been considered to be from 20% up to 50% from their nominal values. Mixed- $\mu$  analysis has been used to determine the stability limits.*

*The simulation results on a 4 - area power system show that the proposed load - frequency controller is robust to load disturbances and changes in operating conditions. The controller performs very well even when the generation rate constraint (GRC) has been considered and guarantees stability in the presence of parametric uncertainties and load disturbances.*

در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت یکی از مشخصات کیفی بسیار مهم تثبیت فرکانس سیستم در مقدار نامی و توان خطوط ارتباطی به میزان از پیش تعیین شده با حداقل نوسانات گذرا می‌باشد. این موضوع به عنوان مسأله کنترل بار - فرکانس (LFC) یا کنترل اتوماتیک تولید (AGC) شناخته شده است. با توجه به ماهیت متغیر بار گذاری، شرایط موجود کاری و آرایش سیستم قدرت و اتصال شبکه‌های مختلف به هم از جمله شبکه ایران به کشورهای همسایه مثل ترکیه و ترکمنستان، اهمیت وجود سیستم کنترل بار - فرکانس جهت بهبود پایداری و عملکرد سیستم قدرت دو چندان می‌گردد.

اولین کنترل کننده ارائه شده در زمینه کنترل بار - فرکانس از نوع تناسبی - انتگرالی بوده که امروزه نیز به طور وسیعی در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. به طور مشخص سابقه تاریخی این موضوع به سال ۱۹۷۰ برمی‌گردد [۲]. از آن زمان تاکنون روش‌های متعددی برای این منظور ابداع و ارائه شده‌اند که گروه عمده‌ای از آنها بر پایه کنترل خطی کلاسیک استوارند [۴-۲]، گروهی دیگر مبتنی بر سایر تئوری‌های کنترلی می‌باشد که از آن جمله می‌توان به کنترل کننده‌های بهینه [۷-۵] و شبکه‌های عصبی [۶] اشاره نمود.

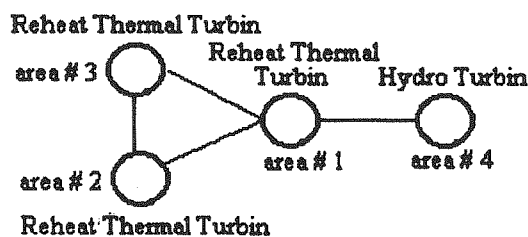
یک فرآیند صنعتی، مانند سیستم‌های قدرت همیشه دارای عدم قطعیت پارامتریک می‌باشد. بنابراین در هنگام طراحی کنترل کننده بار - فرکانس باید این عدم قطعیت‌ها لحاظ گردد. این در حالی است که اکثر کنترل کننده‌های متداول با این فرض طراحی می‌شوند که مدل خطی شده دقیقی از سیستم با پارامترهای ثابت در دسترس می‌باشد. از اینرو، چنانچه پارامترهای سیستم دقیقاً معلوم نبوده و یا اینکه در اثر شرایط کاری مختلف تغییر یابند، این کنترل کننده‌ها نه تنها تضمین کننده پایداری کل سیستم نیستند بلکه عملکرد سیستم را دچار مختل کرده و کارایی مناسب نخواهند داشت. به منظور در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای سیستم چندین محقق از کنترل کننده ساختار متغیر [۹، ۸] و کنترل کننده تطبیقی [۱۱] استفاده کرده‌اند. اشکال عمده و اساسی آنها در نظر نگرفتن عوامل غیرخطی نظیر محدودیت نرخ تولید (GRC) و باند مرده گاورنر و چشم‌پوشی از دینامیک‌های مدل نشده می‌باشد.

در این مقاله ضمن معرفی عدم قطعیت‌های موجود در

سیستم یک کنترل کننده مقاوم بار - فرکانس متمرکز بر پایه روش استاندارد  $H_{\infty}$  طراحی میشود [۱۲ - ۱۱] که در آن علاوه بر در نظر گرفتن عدم قطعیت پارامتریک، خطای مدلسازی نیز به صورت عدم قطعیت ضرب شونده در ورودی لحاظ شده است. محدوده تغییرات پارامترهای سیستم با تغییر دادن پارامترهای سیستم به میزان 20% تا 50% به طور همزمان از مقادیر نامی شان به دست می‌آید. این کنترل کننده دارای ساختار ثابت بوده و علاوه بر تضمین پایداری کل سیستم برای همه عدم قطعیت‌های مجاز در روند طراحی تنها نیاز به بازه پارامترهای سیستم دارد. در ادامه مقاله، پس از توصیف مدل سیستم و معرفی عدم قطعیت‌های پارامتریک در آن به تعریف مقدار تکین ساختاردار و نحوه طراحی کنترل کننده مقاوم  $H_{\infty}$  پرداخته می‌شود. در انتها پس از ارائه نتایج شبیه‌سازی جمع بندی می‌گردد.

## ۲- مدل سیستم

سیستم‌های قدرت، سیستم‌های با ابعاد بزرگ دارای دینامیک پیچیده غیرخطی هستند. با وجود این، جهت طراحی کنترل کننده بار - فرکانس به دلیل آنکه سیستم قدرت تنها در معرض تغییرات کوچک بار در طی عملکرد اسمی است، مدل خطی شده حول نقطه کار برای نمایش دینامیک‌های سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. ارتباط یک سیستم چهار ناحیه‌ای که از سه واحد بخار و یک واحد آبی تشکیل شده در شکل (۱) نشان داده شده است. شکل (۲) نیز بلوک دیاگرام ناحیه‌ای نام از یک سیستم n ناحیه‌ای قدرت را نشان می‌دهد.



شکل (۱) نحوه ارتباط سیستم چهار ناحیه‌ای

باتوجه به متغیرهای حالت انتخاب شده در شکل های (۲ و ۳) معادلات حالت سیستم قدرت n ناحیه ای را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{x} = Ax + B'u + Fd \quad (1)$$

$$\underline{x} = [x_1^T \ x_2^T \ \dots \ x_i^T \ \dots \ x_N^T]^T$$

$$d = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_i \ \dots \ d_N]^T$$

$$u = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_i \ \dots \ u_N]^T$$

$$x^T_i = (x_{i1} \ \dots \ x_{i7}), \quad d_i = \Delta P_{Di}$$

که در آن

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{nn} \end{bmatrix}, \quad B' = [B_1 \ \dots \ B_i \ \dots \ B_N]^T, \quad F = [F_1 \ \dots \ F_i \ \dots \ F_N]^T$$

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_i B_i & k_i \\ \frac{-1}{T_{g1i}} & \frac{-1}{T_{g1i}} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_i T_{g1i}} & 0 \\ -a_1 & \frac{-1}{T_{g3i}} & \frac{-1}{T_{g3i}} & 0 & 0 & \frac{-a_1}{R} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{ti}} & \frac{-1}{T_{ti}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_i}{T_{ti}} & a_2 & \frac{-1}{T_{ti}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{pi}}{T_{pi}} & \frac{-1}{T_{pi}} & \frac{k_{pi}}{T_{pi}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\pi \sum_{j \neq i} T_{ij} & 0 \end{bmatrix}$$

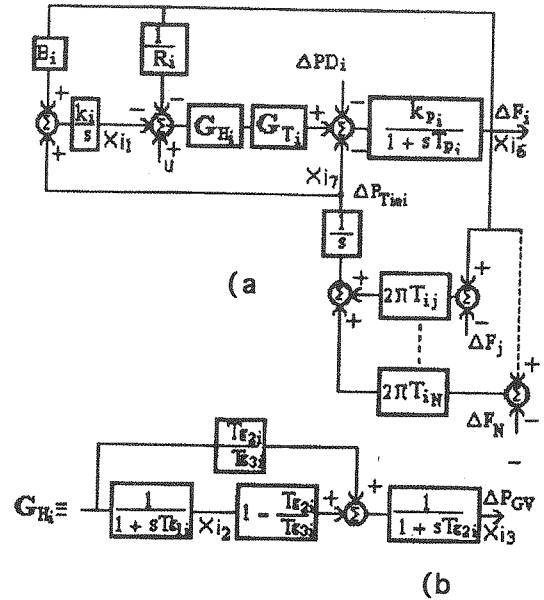
$$a_1 = \frac{T_{g2i}}{T_{g1i} \cdot T_{g3i}}$$

$$a_2 = \frac{k_1 + k_2}{T_{ri}} - \frac{k_1}{T_{ti}}$$

$$A_{ij} = [a_{zk}], \quad z = k = 1, \dots, 7$$

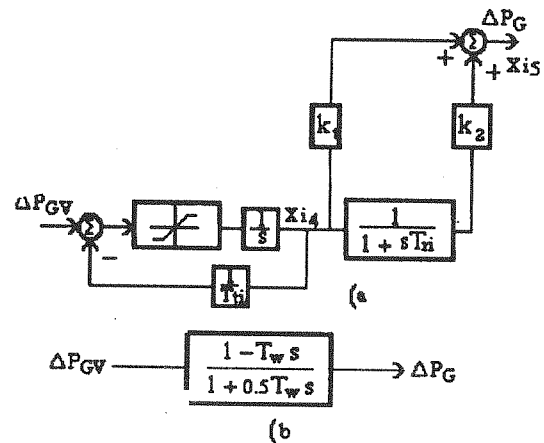
$$a_{zk} = \begin{cases} -2\pi T_{zk} & z = 7, k = 6 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

۸۱



شکل (۲) بلوک دیاگرام ناحیه  $i$  ام (a) و سیستم گاورنر (b)

بلوک دیاگرام توربین واحدهای بخار و آبی در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که می دانیم در عمل، توربین واحدهای بخار و آبی با محدودیت نرخ تولید (GRC) مواجه هستند. با اضافه کردن یک محدودکننده به توربین و همچنین کنترل کننده انتگرال گیر به منظور جلوگیری از پدیده اشباع و هزینه بر بودن کنش کنترلی در نظر گرفته می شود. مقدار GRC در واحدهای بخار 30%/min و در واحدهای آبی 270%/min برای افزایش تولید و 360%/min برای کاهش تولید و مقدار باند مرده نیز در هر دو واحد 0.06% فرض می شود [۱۳].



شکل (۳) بلوک دیاگرام توربین واحدهای بخار (a) و آبی (b)

هر کدام از عدم قطعیت ها را می توان درباره تغییراتش به صورت زیر نشان داد:

$$a_i = a_{i0} + \delta_i \Delta a_i \quad |\delta_i| \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, 17 \quad (3)$$

$$a_{i0} = (\underline{a}_i + \bar{a}_i)/2, \quad \Delta a_i = \bar{a}_i - a_{i0} \quad (4)$$

مقادیر  $a_i$ ,  $\Delta a_i$  با توجه به مقادیر نامی پارامترهای سیستم که در ضمیمه آمده است به دست می آید.

حال اگر ماتریس  $B$  و  $u_i$  را به صورت زیر تعریف نماییم.

$$B = [F \quad B'], \quad u_i = [d \quad u] \quad (5)$$

با ملاحظات اخیر و رابطه (3) برای هر عدم قطعیت، ماتریس  $A$  و  $B$  را می توان به صورت زیر نوشت:

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^{17} \delta_i A_i, \quad B = B_0 + \sum_{i=1}^{17} \delta_i B_i \quad (6)$$

که در آن  $A_0$  و  $B_0$  ماتریس های نامی سیستم بوده و عناصر ماتریس  $A_i$  و  $B_i$  از مشتق گیری مؤلفه های ماتریس  $A$  و  $B$  نسبت به عدم قطعیت نام پدید می آیند. در نتیجه معادلات حالت سیستم را می توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{cases} \dot{x} = (A_0 + \sum_{i=1}^{17} \delta_i A_i) x + (B_0 + \sum_{i=1}^{17} \delta_i B_i) u_i \\ y = C_1 x \end{cases} \quad (7)$$

اگر رتبه ماتریس  $R_i = [A_i \quad B_i]$  برابر  $r_i$  باشد ماتریس های  $L_i \in R^{n \times r_i}$  که در آن  $S_i = [M_i \quad T_i]$ ،  $M_i \in R^{r_i \times r_i}$  و  $T_i \in R^{r_i \times (n-r_i)}$  موجودند به طوری که  $R_i = L_i S_i$  حال با تعریف:

$$Z_i = S_i \begin{bmatrix} x \\ u_i \end{bmatrix}, \quad w_i = \delta_i Z_i \quad (8)$$

$$B_2 \triangleq [L_1 \quad L_2 \quad \dots \quad L_{17}], \quad C_2 \triangleq [M_1^T \quad \dots \quad M_{17}^T], \quad C_3 \triangleq [T_1^T \quad \dots \quad T_{17}^T] = [C_{31} \quad C_{32}]$$

عدم قطعیت ها را از سیستم جدا می نماییم. در این صورت معادلات حالت سیستم و بلوک عدم قطعیت دارای

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{gli}} & a_i & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad F_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{pi}}{T_{pi}} & 0 \end{bmatrix}^T$$

### ۳- معرفی عدم قطعیت های پارامتریک در سیستم

باتوجه به روند گفته شده در بخش ۲ معادلات حالت سیستم چهار ناحیه را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B' u + Fd \\ y = C_1 x \end{cases} \quad (2)$$

که در آن بردار  $y$  شامل تغییرات فرکانس ( $\Delta f_i$ ) و تغییرات توان انتقالی بین نواحی ( $\Delta P_{tie}$ ) می باشد.

از آنجایی که یکی از ویژگی های برجسته سیستم قدرت، متغیر بودن توان تولیدی، شرایط بارگذاری و آرایش سیستم است. لذا پارامترهای مدل فوق تابع نقطه کار و شرایط موجود در سیستم بوده و مقسودار معینی نخواهند داشت. در این مقاله گستره تغییرات پارامترهای سیستم با تغییر دادن  $T_p$  و  $T_{ij}$  به اندازه 50% و  $T_w$ ،  $T_{ri}$ ،  $T_{ii}$ ،  $T_{g3i}$ ،  $T_{g2i}$ ،  $T_{gli}$  به میزان 20% به طور همزمان از مقادیر نامی شان به دست می آید (پارامترهای واحد بخار یکسان بوده و  $R$ ،  $B$  و  $T_p$  نیز در هر چهار ناحیه یکسان است). با این نگرش عدم قطعیت سیستم از نوع ساختاری پارامتریک خواهد بود. فرض می کنیم که  $a_i$  پارامتر دارای عدم قطعیت سیستم بوده و حد بالا و پایین آن نیز به ترتیب  $\bar{a}_i$  و  $\underline{a}_i$  باشد. با ملاحظه در سطرهای ماتریس های  $(A, B, F)$  پارامترهای عدم قطعیت دار سیستم به صورت زیر مشخص می شود:

$$B_i \in [\underline{a}_1 \quad \bar{a}_1], \quad \frac{1}{T_{gli}} \in [\underline{a}_2 \quad \bar{a}_2], \quad \frac{1}{R_i T_{gli}} \in [\underline{a}_3 \quad \bar{a}_3],$$

$$\frac{1}{T_{ii}} \in [\underline{a}_4 \quad \bar{a}_4], \quad \frac{1}{T_{ri}} \in [\underline{a}_5 \quad \bar{a}_5], \quad \frac{K_p}{T_p} \in [\underline{a}_6 \quad \bar{a}_6]$$

$$\frac{1}{T_p} \in [\underline{a}_7 \quad \bar{a}_7], \quad T_{12} \in [\underline{a}_8 \quad \bar{a}_8], \quad T_{13} \in [\underline{a}_9 \quad \bar{a}_9],$$

$$T_{14} \in [\underline{a}_{10} \quad \bar{a}_{10}], \quad T_{23} \in [\underline{a}_{11} \quad \bar{a}_{11}], \quad \frac{1}{T_{g14}} \in [\underline{a}_{12} \quad \bar{a}_{12}]$$

$$\frac{1}{R_i T_{g14}} \in [\underline{a}_{13} \quad \bar{a}_{13}], \quad \frac{T_{g24}}{T_{g14} T_{g34}} \in [\underline{a}_{14} \quad \bar{a}_{14}],$$

$$\frac{1}{T_{g34}} \in [\underline{a}_{15} \quad \bar{a}_{15}], \quad \frac{T_{g24}}{R T_{g14} T_{g34}} \in [\underline{a}_{16} \quad \bar{a}_{16}], \quad \frac{1}{T_w} \in [\underline{a}_{17} \quad \bar{a}_{17}]$$

ساختار زیر خواهد بود:

همچنین  $M$  را می توان چنان تقسیم بندی نمود که تابع انتقال بین  $e$  و  $d$  به صورت تبدیل خطی - کسری زیر قابل تعریف باشد.

$$e = F_u(M, \Delta_P) \cdot d = (M_{22} + M_{21} \Delta_P (I - M_{11} \Delta_P)^{-1} M_{12}) \cdot d \quad (12)$$

مقدار تکین ساختاردار  $\mu$  همیشه بر پایه بلوک عدم قطعیت  $\Delta_P$  یافت می گردد. حال فرض می کنیم بلوک دارای ساختار  $\Delta_P$  متعلق به  $B\Delta_P$  که به صورت زیر تعریف می گردد باشد.

$$B\Delta_P = \{ \Delta_P \in \Delta_P \mid \bar{\sigma}(\Delta_P) \leq 1 \} \quad (13)$$

$$\Delta_P = \text{diag}(\delta_1 I_{k_1}, \dots, \delta_{i_1} I_{k_{i_1}}, \dots, \delta_{s+1} I_{k_{s+1}}, \dots, \delta_{s+f} I_{k_{s+f}}) : \delta_i \in C, \Delta_{s+i} \in C^{m_i \times m_j}, 1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq f$$

که در آن اعداد صحیح  $s$  و  $f$  به ترتیب مبین تعداد بلوک های عددی تکرار شونده و بلوک های کامل هستند و  $M \in C^{n \times n}$  آنگاه برای ماتریس  $\sum_{i=1}^s r_i + \sum_{j=1}^f m_j = n$  مقدار تکین ساختاردار  $\mu$  به فرم زیر تعریف می شود.

$$\mu_{\Delta_P}(M) = \begin{cases} 0 & \text{if } \det(I - M\Delta_P) \neq 0 \\ \frac{1}{\min \{ \bar{\sigma}(\Delta_P) : \Delta_P \in \Delta_P, \det(I - M\Delta_P) = 0 \}} & \text{if } \det(I - M\Delta_P) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

#### قضیه ۱ [۱۴]: پایداری مقاوم

سیستم شکل (۴-ب) برای تمام  $\Delta_P$  های متعلق به  $B\Delta_P$  پایدار است اگر و فقط اگر

$$\sup_{\omega} \mu(M_{11}(j\omega)) \leq 1 \quad (15)$$

اگر چه قضیه فوق محک بسیار خوبی برای آنالیز پایداری مقاوم است اما تعیین مقدار  $\mu$  بسیار مشکل بوده و الگوریتم هایی زیادی بسته به نوع بلوک عدم قطعیت برای تعیین حدود بالا و پایین  $\mu$  ارائه شده است (۱۷-۱۹). روش تکرار Power [۱۷] کامل تر از بقیه روش های بوده اما نشان داده شده است که در حالتی که بلوک عدم قطعیت حقیقی خالص فرض شود ناپایداری نسبی آن بیشتر است. در مرجع [۱۵] پاکارد و پاندی بیان داشته اند که اگر عدم قطعیت مختلط فرض گردد تابع  $\mu$

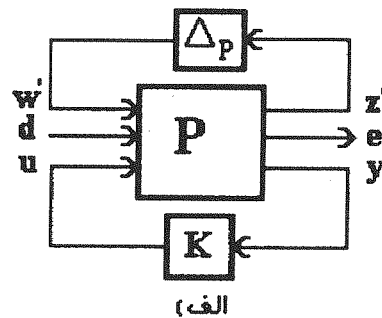
$$P_0: \begin{cases} \dot{x} = A_0 x + B_1 u + B_2 w + F d \\ z = C_2 x + C_{31} u + C_{32} d \\ y = C_1 x \end{cases} \quad (9)$$

$$\Delta = \{ \text{diag}(\delta_1 I_{k_1}, \delta_2 I_{k_2}, \delta_3 I_{k_3}, \delta_4 I_{k_4}, \delta_5 I_{k_5}, \delta_6 I_{k_6}, \delta_7 I_{k_7}, \delta_8 I_{k_8}, \delta_9 I_{k_9}, \delta_{10} I_{k_{10}}, \delta_{11} I_{k_{11}}, \dots, \delta_{17} I_{k_{17}}), \delta_i \in R, \|\Delta\| \leq 1 \} \quad (10)$$

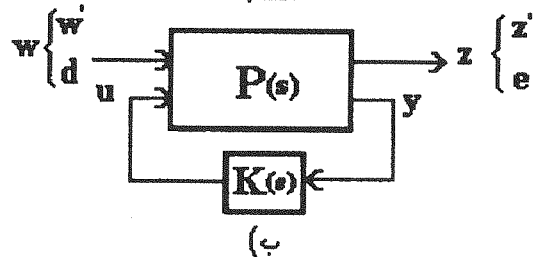
### ۴- مقدار تکین ساختار دار و کاربرد آن

بلوک دیاگرام کلی که در این مقاله برای نتایج به کار خواهیم برد در شکل (۴-الف) نشان داده شده است [۱۶]. هر ترکیبی از پلنت تعمیم یافته ( $P$ )، کنترل کننده ( $k$ ) و عدم قطعیت ها قابل تبدیل به این شکل می باشد. در آنالیز  $\mu$ ، کنترل کننده  $k$  به عنوان جزئی از سیستم اصلی در نظر گرفته می شود. بنابراین شکل (۴-الف) به صورت شکل (۴-ب) تبدیل خواهد شد. در این شکل  $M$  حاصل ترکیب سیستم اصلی ( $P$ ) و کنترل کننده ( $k$ ) می باشد و توسط تبدیل خطی - کسری زیر تعریف می شود، در این دو شکل  $d$  شامل ورودیهای خارجی و اغتشاشات و  $e$  سیگنال خطاست که باید کوچک نگه داشته شود. همچنین  $u$  ورودیهای کنترل و  $y$  متغیرهای اندازه گیری شده می باشد.

$$M = F_P(p, k) = P_{11} + P_{12} K (I - P_{22} K)^{-1} P_{21} \quad (11)$$



(الف)



(ب)

شکل (۴) (الف) چهارچوب کلی سیستم های فیدبک (ب) آنالیز  $\mu$

تعریف می‌کنیم تابع  $F: (0, \infty) \times \mathbb{C}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{R}$  پیوسته بوده به طوری که  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} F(\varepsilon, P) = \mu_{\Delta_1}(P)$ ,  $F(\varepsilon, P) > \mu_{\Delta_1}(P)$

به دلیل آن که حالت حدی  $\mu_{\Delta_{mixed}}(M)$  هنگامی که  $\varepsilon$  به سمت صفر میل می‌نماید به مقدار  $\mu_{\Delta_{real}}(P)$  می‌گراید در این مقاله از این لم برای تعیین مقدار  $\mu_{\Delta_{real}}(P)$  که حل دقیق آن نسبت به مسئله تعیین  $\mu_{\Delta_{mixed}}(M)$  مشکل‌تر است استفاده می‌نماییم.

## ۵- طراحی کنترل کننده مقاوم $H_{\infty}$

شکل (۵) فرموله مسأله طراحی را در چارچوب کلی استاندارد  $H_{\infty}$  و آنالیز  $\mu$  نشان می‌دهد. که در آن ورودی کنترل کننده تغییرات فرکانس نواحی  $(\Delta Fi)$  و تغییرات توان انتقالی بین نواحی  $(\Delta P_{tiei})$  می‌باشد. در برگیرنده ساختار سیستم نامی و همه مدل‌های عدم قطعیت پارامتریک است. مشخصه عملکرد و عدم قطعیت ضربی در ورودی نیز با وزن‌های  $W_p$ ,  $W_c$  مشخص شده است. این وزن‌های نقش بسیار مهمی در عملکرد کنترل کننده ایفا می‌نمایند. مقدار نهایی وزن‌ها به صورت زیر انتخاب شد:

پیوسته بوده و در صورتی که عدم قطعیت شامل انحرافات حقیقی باشد تابع مذکور گسسته خواهد بود.

قضیه ۲ [۱۵]: بلوک  $\Delta$  را انضمام قطری بلوک‌های  $\Delta_1 \in \mathbb{C}^{n_1 \times n_1}$  و  $\Delta_2 \in \mathbb{C}^{n_2 \times n_2}$  فرض می‌کنیم. ماتریس  $M(\varepsilon) \in \mathbb{C}^{(n_1+n_2) \times (n_1+n_2)}$  که تابعی از پارامتر اسکالر  $\varepsilon$  بوده به شکل زیر تعریف می‌گردد:

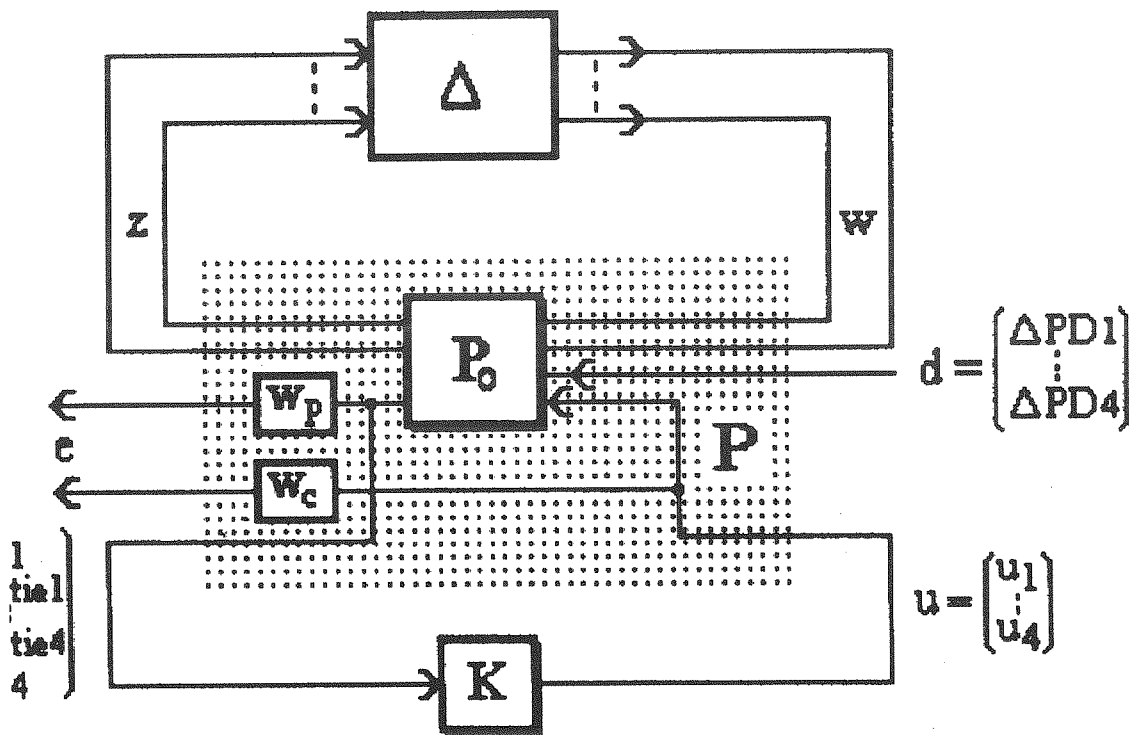
$$M(\varepsilon) = \begin{bmatrix} M_{11}(\varepsilon) & M_{12}(\varepsilon) \\ M_{21}(\varepsilon) & M_{22}(\varepsilon) \end{bmatrix}, \quad M(\varepsilon) = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \varepsilon \rightarrow 0 \quad (16)$$

آنگاه داریم:  $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \mu_{\Delta} [M(\varepsilon)] = \mu_{\Delta_1} (M_{11})$

لم ۱: برای ماتریس  $P \in \mathbb{C}^{n \times n}$  ماتریس  $M(\varepsilon, p)$  را برابر

$$M(\varepsilon, p) = \begin{bmatrix} P & \sqrt{\varepsilon} P \\ \sqrt{\varepsilon} P & \varepsilon P \end{bmatrix} \quad \varepsilon \rightarrow 0 \quad (17)$$

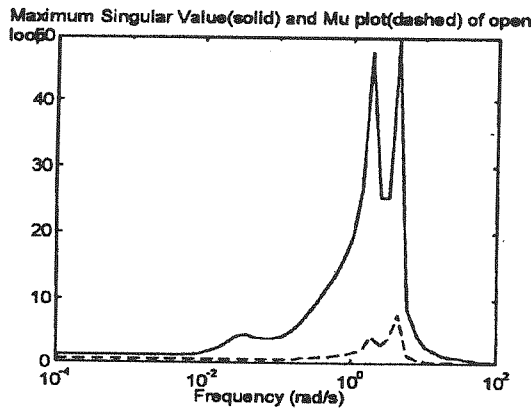
و تابع  $F(\varepsilon, P) = \mu_{\Delta} [M(\varepsilon, P)]$  را برابر



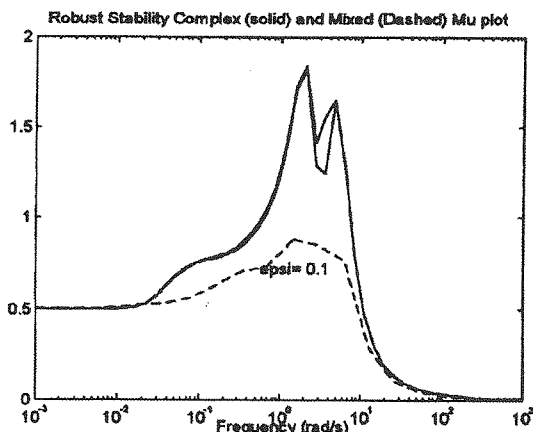
شکل (۵) فرموله مسأله طراحی کنترل کننده  $H_{\infty}$  و آنالیز  $\mu$

$\mu_{\Delta_{real}}(T_{zw})$  می‌گراید. تفاوت مسئله تعیین  $\mu_{\Delta_{mixed}}(M)$  با  $\mu_{\Delta_{real}}(T_{zw})$  این است که در حالت اول عدم قطعیت نزدیک به حقیقی و به صورت  $\mu_{\Delta_{real}} + \epsilon \Delta_{complex}$  بوده حال آنکه در مسئله دوم عدم قطعیت کاملاً حقیقی است.

در شکل (۷) منحنی تغییرات  $\mu_{\Delta_{mixed}}(T_{zw})$  و  $\mu_{\Delta_{complex}}(M)$  آورده شده است. مقدار دقیق  $\mu_{\Delta_{real}}(T_{zw})$  با جستجو در اطراف فرکانس  $1 \text{ rad/s}$  و میل نمودن  $\epsilon$  به سمت صفر به دست می‌آید (شکل (۸) که مطابق این شکل مقدار  $\mu_{\Delta_{real}}(T_{zw})$  برابر ۱ یافت می‌گردد که نشان می‌دهد سیستم دارای پایداری مقاوم می‌باشد. مرتبه کنترل کننده به دست آمده ۳۲ می‌باشد که با استفاده از روش تحقق بالانس [۲۵] به مرتبه ۲۰ کاهش داده شد شکل (۹) ماکزیم مقدار تکین (SSV) کنترل کننده مقاوم را نشان می‌دهد.



شکل (۶) منحنی تغییرات  $\mu_{\Delta_{complex}}(T_{zw})$  سیستم حلقه باز



شکل (۷) منحنی تغییرات  $\mu_{\Delta_{mixed}}$  و  $\mu_{\Delta_{complex}}$

$$W_p(s) = \frac{0.3S + 1.5}{5S + 0.03}, \quad wc = 1 \quad (18)$$

$W_p$ ، وزن عملکرد نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین سیستم حلقه بسته اغتشاشات در خروجی را با نسبت 45 به 1 دفع می‌کند.  $WC$  نشان دهنده این است که در تمامی فرکانس‌ها خطای مدل‌سازی 100% در نظر گرفته شده است.

$P$  هم پلنت تعمیم یافته سیستم است که باید آن را به فرم معادلات استاندارد  $H_m$  زیر درآورد [۱۲]:

$$P: \begin{cases} \dot{x} = A_0x + B_2w' + B_1u \\ z' = C_2x + D_{11}w' + D_{12}u \\ y = C_1x + D_{21}w' + D_{22}u \end{cases} \quad (19)$$

مسئله استاندارد  $H_m$  عبارت است از پیدا کردن کنترل کننده پایدارساز داخلی  $k(s)$  (شکل (۴) - ب) به طوری که  $\|T_{zw}\|_{\infty}$  کوچکتر از  $\gamma$  باشد. پس از مشخص کردن پلنت تعمیم یافته سیستم قدرت مورد بررسی در فرم مسئله استاندارد  $H_m$  جهت اجرای روند طراحی از نرم افزار [۱۶] استفاده شده و کنترل کننده  $H_m$  طراحی گشت. برای تعیین حد تغییرات عدم قطعیت که سبب پایداری مقاوم حلقه بسته می‌گردد از آنالیز  $\mu$  استفاده کرده و مجموعه‌های بسته  $\Delta_{real}$  را برابر رابطه (۱۰)  $\Delta_{mixed}$  و  $\Delta_{complex}$  را به صورت زیر تعریف می‌نماییم:

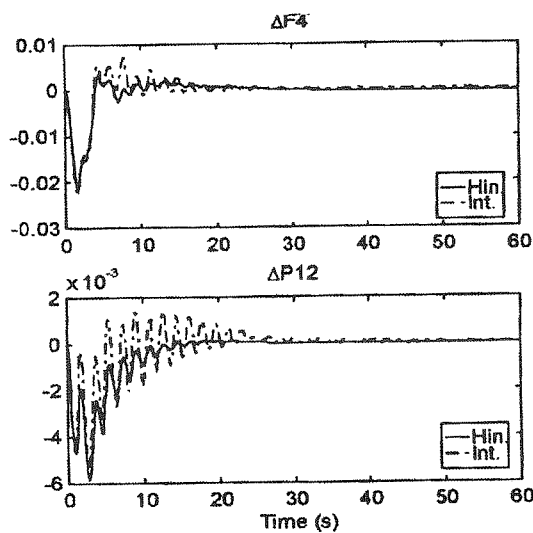
$$\Delta_{complex} = \text{diag}(\delta_1 I_4, \delta_1 I_3, \delta_3 I_3, \delta_4 I_3, \delta_5 I_4, \delta_6 I_4, \delta_7 I_8, \delta_8, \delta_{17}), \delta_i \in \mathbb{C}$$

$$\Delta_{mixed} = \{\text{diag}(\Delta_{real}, \Delta_{complex})\} \quad (20)$$

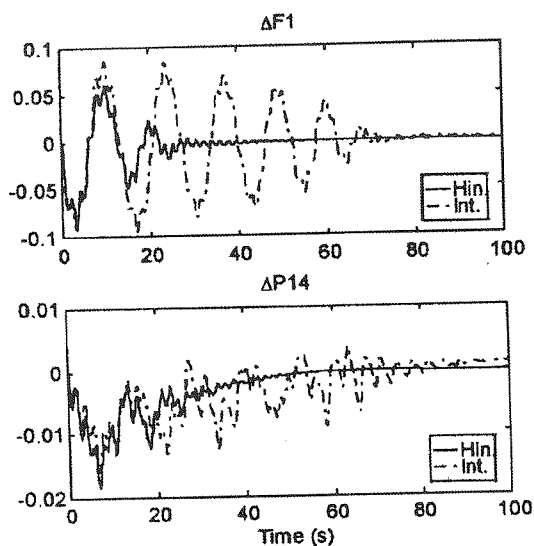
نرم بی نهایت حلقه باز برابر ۵۰ بوده مقدار تکین ساختاردار نیز در این حالت ۱۰ می‌باشد (شکل (۶)). بعد از انجام عمل طراحی کنترل کننده مقاوم نرم سیستم حلقه بسته برابر ۱۰ به دست آمد. از آنجایی که عدم قطعیت‌های مسئله همگی حقیقی هستند باید مقدار  $\mu$  را هنگامی که عدم قطعیت  $\Delta$  عضوی از مجموعه  $\Delta_{real}$  می‌باشد تعیین کنیم. بدین منظور باتوجه به دلایل گفته شده در بخش (۴) از خواص پیوستگی  $\mu$  برای تعیین  $\mu_{\Delta_{real}}[T_{zw}(j\omega)]$  استفاده کرده و تابع  $M[\epsilon, T_{zw}(j\omega)]$  مانند رابطه (۱۷) تشکیل می‌دهیم. به دلیل خواص پیوستگی  $\mu$  هنگامی که  $\epsilon$  به سمت صفر میل می‌نماید مقدار  $\mu_{\Delta_{mixed}}(M)$  نیز به سمت

در ضمیمه آمده است نشان می‌دهند. شکل (۱۲) نتایج شبیه‌سازی را هنگامی که نقطه کار سیستم تغییر کرده و همزمان تغییر بار پله‌ای در نواحی ۱ و ۲ و ۳ اتفاق افتاده است، نشان می‌دهد. شرایط نقطه کار جدید نیز در جدول (۲) آمده است، ارتباط میان نقاط کار و پارامترهای سیستم در مرجع [۱] بیان شده است.

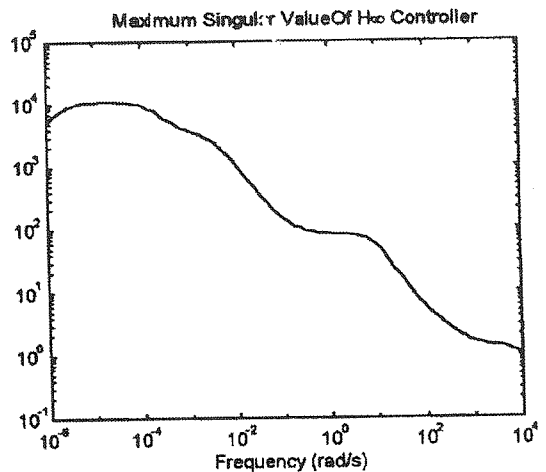
نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده  $H_{\infty}$  خیلی مؤثر بوده و موجب پایداری مقاوم سیستم گشته و از عملکرد بسیار خوبی حتی با وجود محدودیت نرخ تولید (GRC) برخوردار می‌باشد.



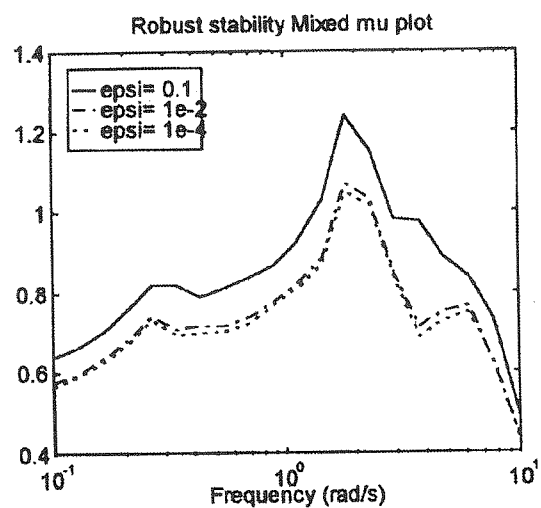
شکل (۱۰) اغتشاش بار پله‌ای ۱٪ در ناحیه ۱



شکل (۱۱) اغتشاش بار پله‌ای ۲٪ در ناحیه ۳ و ۱٪ در ناحیه ۴



شکل (۸) منحنی تغییرات  $\mu_{\Delta_{Mixed}}(M)$



شکل (۹) منحنی تغییرات ماکزیمم مقدار تکین کنترل کننده  $H_{\infty}$

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

به منظور ارزیابی عملکرد کنترل کننده مقاوم و مقایسه پاسخ آن با کنترل کننده انتگرال گیر سیستم چهار ناحیه‌ای نشان داده شده در شکل (۱) در نظر گرفته شد. پارامترهای سیستم در شرایط کاری نامی در ضمیمه داده شده است. قابل ذکر است که در این مقاله بهره بهینه کنترل کننده انتگرال گیر با روش ISE با در نظر گرفتن اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه یک هنگامیکه سیستم در شرایط نامی کار می‌کند به دست آورده شد.

نتایج شبیه‌سازی با اعمال سه نوع اغتشاشات بار پله‌ای بر روی سیستم در شکل‌های (۱۲-۱۵) نشان داده شده است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) نتایج مربوطه را تحت شرایط نقطه کار نامی سیستم که مطابق جدول (۱)



## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترل کننده بار - فرکانس  $H^\infty$  جدید برای بهبود پایداری و عملکرد سیستم قدرت بر پایه روش استاندارد  $H^\infty$  طراحی گردید. کنترل کننده  $H^\infty$  مؤثر واقع شده و پایداری کل سیستم را برای همه عدم قطعیت های مجاز تضمین می نماید. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که سیستم از عملکرد بسیار خوبی حتی با وجود محدودیت نرخ تولید برخوردار است. همچنین به علت ساختار ثابت کنترل کننده مقاوم و پایداری تضمین شده، پیاده سازی این کنترل کننده ساده بوده و می تواند به عنوان واحد خبره برای سیستم های یادگیرنده به کار رود.

## ضمیمه

مقادیر نامی پارامترهای سیستم برابر است با:

واحد بخار:

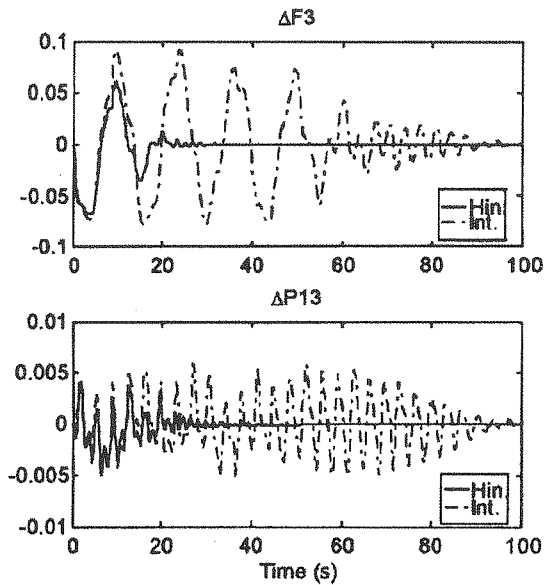
$$T_{g11} = 0.1; T_{t1} = 0.3; T_{r1} = 10; k_1 = k_2 = 0.5; R_1 = 2.4;$$

$$T_{p1} = 20; k_{p1} = 120; B_1 = 0.425; k_i = 0.3$$

واحد آبی:

$$T_{g14} = 50; T_{g24} = 5; T_{g34} = 1; T_w = 0.5; R = 2.4;$$

$$T_p = 20; k_p = 120; B_i = 0.425; k_i = 0.03$$



شکل (۱۲)، اغتشاش بار پله ای ۱.۵٪ در ناحیه ۲ و ۱٪ در ناحیه ۳

جدول (۱) شرایط بهره برداری

Area #	Area op. load PD (puMw)		Syn. Coef. T (pu MW)		
	nominal	new	T	nominal	new
1	0.5	0.5	T12	0.0707	0.092
2	0.5	0.25	T13	0.0707	0.0766
3	0.5	0.2	T14	0.0707	0.0707
4	0.5	0.75	T23	0.0707	0.0866

## مراجع

- [1] O. I. Elgerd, "Electric energy system: an introduction", McGraw Hill, New York, 1982.
- [2] C. E. Fasha and O. I. Elgerd, "The megawatt frequency control Problem: a new approach via optimal control theory, " IEEE Trans. on PAS, vol. 89, pp. 563-567, 1970.
- [3] J. D. Glover and F.C. Schweppe, "Advance load frequency control", IEEE Trans. on PAS vol. 91, pp. 2095-2103, 1972.
- [4] O.P. Malik and A. Kamer, "A load frequency control algorithm based on generalized approach," IEEE Trans. power systems, vol. 3, No. 2, pp. 375-382, 1988.
- [5] C. M. Liaw and K. H. chao, "on the design of an optimal Automatic generation controller for inter connected power system," Int, Journal of control, vol, 58, 1993.
- [6] F. Beaufays and Y. Abdel - Magid, "Application of neural network to load - frequency control in power systems", Neural Networks, vol. 7, No. 1, pp, 183 - 194, 1994.
- [7] S. m. T. Bathee and M. Abedi, "Stochastic optimal load frequency control and dispatch of multiarea power system", IEEE power tech. conference, June 1995.
- [8] W. C. Chan and Y. Y. Hsu, "Automatic genera-

- tion control of interconnected power systems using variable - structure controllers", IEE Proc., vol: 128, Pt. C, No. 5, pp. 269 - 279, 1981.
- [9] A. Y. Sivaramakrishnan and M.V. Hariharan, "Design of variable structure load frequency Controller using pole assignment technique", Int. J. control, Vol. 40, pp. 487-498, 1984.
- [10] C. T. Pan and C. m. Liaw, an adaptive controller for power system load frequency control," IEEE Trans, power systems, Vol. 4, No ." pp. 122 - 128, 1989.
- [11] J. C. Doye, K. Glover, P. khargonekar and B. A. Francis, "State space souldtions to standard H2 and H $\infty$  control Problem", IEEE Trans. on Automatic control, Ac-34, pp. 831-847, 1989.
- [12] B. Shahian and m. Hassul, "control system design using matlab", Prentice-Hall, 1993
- [13] R. Shariat-Yozdi, M. Abedi and M. Menhaj, "Multi-area load frequency control using fuzzy logic", Proc. of ISRF-IEE: Fuzzy system Symposium, PP. 129-139, 1996.
- [14] A. Packard J. C. Doyle, " The complex structured singular value", Automtica, vol. 29m No. 1, pp. 71-109, 1993.
- [15] A. Packard and P. Pandey, "Coutinuity properties the real/complex structural singular value", IEEE Trans. on Automatic control, vol. 38, pp. 415-428, 1993.
- [16] G. J. Balas, J.C. Doyle, K. Glover and A. Packard, " The  $\mu$  - analysis and Synthesis toolbox for use with matlab", The Mathworks Inc., Sourh Natick, 1991.
- [17] P. M. Young. and J. C. Doyle, "Computation of  $\mu$  real and complex uncertainties", IEEE CDC proc., pp. 1230-1235, 1990.
- [18] R. L. Dailey, " Anew algorithm for real structured singular value", ACC Proc., pp. 3036 - 3040, 1990.
- [19] P. M. Young and J. C Doyle, "A lower bound for the mixed  $\mu$  Problem" IEEE Trans. on Automatic control, Vol. 42, pp. 123- 128, 1990.