

## کنترلر نامتمرکز تطبیقی مقاوم بار- فرکانس سیستم‌های قدرت با استفاده از شناسایی اثرات تداخلی

مهدی کراری

محمد حسین کاظمی

دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دانشگاه شاهد

واژه‌های کلیدی: کنترلرهای نامتمرکز، سیستم‌های ابعاد وسیع، کنترل بار- فرکانس و کنترل تطبیقی مقاوم

### چکیده:

می‌باشد، وجود ندارد. دیگر خواص مهم کنترلر پیشنهادی عبارتند از: (۱) نیازی به دانستن پارامترهای سیستم وجود ندارد، (۲) کنترلر پیشنهادی در برابر تغییرات نقاط کار مقاوم می‌باشد، (۳) فقط اطلاعات ورودی و خروجی زیرسیستمها بصورت محلی مورد نیاز می‌باشد، (۴) مقاوم بودن سیستم نهایی در برابر تغییرات پارامترها تضمین می‌شود.

نتایج شبیه سازی، رفتار مطلوب سیستم را تحت کنترلر نامتمرکز مذکور حتی در حضور اختلالات پارامتری و اثرات تداخلی شدید، اغتشاشات خارجی و اثرات غیرخطی سیستم نشان می‌دهد.

### ۱- مقدمه

یکی از مسائل مهم در کنترل سیستم‌های قدرت مسئله LFC می‌باشد که در آن چگونگی تأمین توان مورد نیاز در فرکانس مطلوب با کمترین نوسان و

در این مقاله، روش نوینی جهت طراحی کنترلر نامتمرکز تطبیقی مقاوم بار-فرکانس سیستم‌های قدرت با پارامترهای ناشناخته ارائه می‌گردد. در روشهای کنترل نامتمرکز بار-فرکانس، معمولاً اثرات تداخلی بین زیرسیستمها به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شوند. این عمل منجر به یک کنترلر محافظه کار خواهد شد طوریکه بتواند در بدترین وضعیت، پایداری سیستم کل را حفظ نماید. به همین جهت و همچنین برای بهبود رفتار سیستم تحت کنترل، در روش پیشنهاد شده در این مقاله اثرات تداخلی ناشی از سایر زیرسیستمها تخمین زده شده و در اختیار کنترلرهای تطبیقی محلی قرار می‌گیرند طوریکه اثرات تداخلی به نحو موثری خنثی گردند. در روش پیشنهادی نیازی به ارضای شرط تطابق<sup>۱</sup>، که فرض اصلی اکثر کارهای گذشته

زمینه کنترلرهای PI یکی از استراتژی‌های اولیه بشمار می‌روند که در سیستم‌های صنعتی نیز کاربرد فراوان دارند. بدلیل خواص غیرخطی اجزاء سیستم‌های قدرت، در برخی از روش‌های معمول، پس از خطی سازی سیستم حول نقطه کار، طراحی کنترلر انجام می‌شود [۳-۵]. در صورتیکه بر اثر تغییرات شدید بار، نقاط کار سیستم‌های قدرت در یک سیکل روزانه دستخوش تغییرات شدید اتفاقی هستند و در نتیجه یک کنترلر ثابت نمی‌تواند جوابگو باشد. به همین خاطر، برخی از محققان، کنترلرهای مقاوم و کنترلرهای ساختار متغیر را که نسبت به تغییر پارامترها از حساسیت کمتری برخوردار هستند، پیشنهاد داده‌اند [۹-۶]. در اکثر این روش‌ها، متغیرهای حالت، مورد نیاز می‌باشند که در عمل معمولاً این متغیرها ناشناخته و یا غیرقابل دسترس هستند.

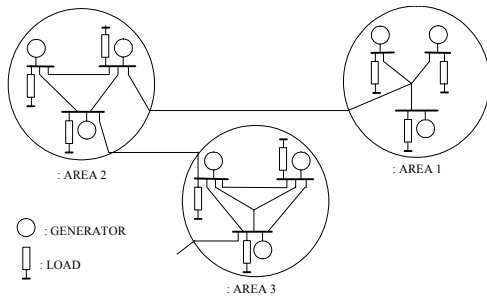
در برخی از روش‌های اخیر برای رفع مشکلات کنترلی عنوان شده در سیستم‌های قدرت، تکنیک‌های مختلف کنترل تطبیقی، که توانایی مقابله با تغییرات وسیعتری از پارامترهای سیستم را دارند، پیشنهاد شده است [۱۰-۱۲]. هدف اصلی در این نوع استراتژی‌های کنترلی، افزایش حاشیه پایداری و برقرار سازی شرایط پیچیده سیستم‌های قدرت می‌باشد. از طرف دیگر به علت وجود خطوط طولانی انتقال در سیستم‌های قدرت، نامتمرکز سازی ساختار کنترلر به واحدهای مجزا، یکی از اهداف مهم در کنترل این سیستم‌ها به حساب می‌آید. به همین دلیل، کنترل نامتمرکز به عنوان یکی از روش‌های موثر در کنترل سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای مورد تأکید قرار گرفته است [۱۵-۱۳، ۱۰، ۷، ۵].

در روش پیشنهادی در این مقاله، جهت کنترل بار و فرکانس یک سیستم قدرت ابعاد وسیع، ابتدا برای هر ناحیه یک رویکرد تطبیقی محلی طراحی می‌گردد تا

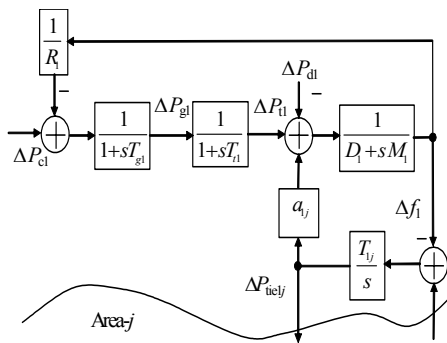
خطای ماندگار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بالا بودن ابعاد سیستم، غیر خطی بودن، نداشتن نقاط کار ثابت، ناشناخته بودن اکثر پارامترهای سیستم و غیرعملی بودن بکارگیری کنترلر متمرکز، از جمله مشکلات اصلی در LFC، می‌باشند. این مشکلات لزوم استفاده از کنترلر نامتمرکز تطبیقی مقاوم را بیشتر روشن می‌سازد [۱]. در روش‌های کنترل نامتمرکز بار-فرکانس، معمولاً اثرات تداخلی بین زیرسیستم‌ها به عنوان اغتشاش در نظر گرفته می‌شوند. این عمل باعث می‌شود که کنترلر طراحی شده یک کنترلر محافظه کار باشد طوریکه بتواند در بدترین شرایط، پایداری سیستم کل را تضمین نماید. در این مقاله اثرات تداخلی ناشی از سایر زیرسیستم‌ها تخمین زده شده و در اختیار کنترلرهای تطبیقی محلی قرار می‌گیرند طوریکه اثرات تداخلی به نحو موثری خنثی گردند.

در این مقاله، یک سیستم نمونه قدرت سه ناحیه‌ای با پارامترهای ناشناخته جهت کنترل بار و فرکانس معرفی می‌شود تا کنترلر پیشنهادی روی آن پیاده سازی گردد. از آنجا که کنترلر ارائه شده دارای ساختار نامتمرکز می‌باشد، براحتی قابل پیاده سازی عملی می‌باشد و همچنین از قابلیت رفع خطا برخوردار است به این معنا که چنانچه خطایی در یکی از واحدها رخ دهد، بقیه واحدها بکار خود ادامه می‌دهند و کنترل خود را از دست نمی‌دهند. تطبیقی بودن کنترلر باعث می‌شود که بر مشکل ناشناخته بودن پارامترها و تغییر شرایط کاری فائق آید و مقاوم بودن آن، پایداری سیستم را در برابر نامعینی‌هایی از قبیل اختلالات پارامتری، نویز و اغتشاشات خارجی و سایر محدودیت‌ها، تضمین می‌نماید.

در سالهای گذشته توجه زیادی روی مسئله کنترل بار و فرکانس در سیستم‌های قدرت و استراتژی‌های مختلف برخورد با آن، وجود داشته است [۲]. در این



شکل (۱): سیستم قدرت چند ناحیه‌ای



شکل (۲): بلوک دیاگرام ناحیه اول

متغیرهای حالت و پارامترهای آن واحد را تخمین بزنند. سپس یک ترکیب خطی از تخمین متغیرهای حالت و متغیرهای حالت سیستم مرجع همراه با بهره‌های قابل تنظیم، به عنوان سیگنال کنترل ورودی در نظر گرفته می‌شود. بهره‌های کنترل، تحت قوانین تطبیقی مقاوم طوری تنظیم می‌گردند که سیگنال خطا بطور مجانبی به سمت صفر همگرا گردد. حال اگر اثرات تداخلی به عنوان اغتشاش در نظر گرفته شود، همانند آنچه در [۱] مطرح گردیده است، آنگاه کنترلر بدست آمده بسیار محافظه کارانه خواهد شد، لذا برای رفع این نقیصه، یک تخمینگر به هریک از کنترلرهای محلی اضافه می‌گردد تا بتوانند از تخمین اثرات تداخلی استفاده کنند و این اثرات نامطلوب را تا حد ممکن خنثی سازند.

همچنین شرط تطابق، که یکی از فرض‌های اصلی در اکثر کارهای گذشته می‌باشد در روش پیشنهادی وجود ندارد و روش پیشنهادی در سیستم‌هایی که شرط تطابق در آنها صادق نیست نیز براحتی قابل پیاده سازی می‌باشد.

## ۲- معرفی سیستم تحت کنترل

معمولاً برای کنترل بار و فرکانس از مدل‌های خطی شده و ساده شده‌ای استفاده می‌شود. در تکنیکهای کنترلی پیشرفته، همچنانکه در اینجا نیز در نظر گرفته می‌شود، خطای تولید شده ناشی از خطی سازی و ساده سازی، به عنوان اختلالات پارامتری و دینامیک‌های مدل نشده در نظر گرفته می‌شود. سیستم نمونه قدرت جهت کنترل بار و فرکانس، سیستمی است که در [۱] معرفی گردیده است و مطابق با شکل (۱) می‌باشد. در شکل (۲)، بلوک دیاگرام ناحیه اول نشان داده می‌شود که سایر نواحی نیز دارای بلوک دیاگرام مشابه می‌باشند.

بر اساس بلوک دیاگرام شکل (۲)، بردار حالت  $x$  بردار کنترل  $u$ ، بردار خروجی  $y$ ، و بردار اغتشاش  $d$  بصورت زیر تعریف می‌شوند.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} \Delta P_{c1} \\ \Delta P_{c2} \\ \Delta P_{c3} \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} \Delta P_{d1} \\ \Delta P_{d2} \\ \Delta P_{d3} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}$$

$$x_1 = [\Delta P_{tie1} \quad \Delta f_1 \quad \Delta P_{t1} \quad \Delta P_{g1}]^T$$

$$x_2 = [\Delta P_{tie2} \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{t2} \quad \Delta P_{g2}]^T$$

$$x_3 = [\Delta P_{tie3} \quad \Delta f_3 \quad \Delta P_{t3} \quad \Delta P_{g3}]^T$$

$$y_1 = [\Delta P_{tie1} \quad \Delta f_1]^T, y_2 = [\Delta P_{tie2} \quad \Delta f_2]^T$$

$$y_3 = [\Delta P_{tie3} \quad \Delta f_3]^T$$

که؛

معادله دینامیکی \* را برای واحد قدرت محلی  $i$  ام در نظر بگیرید. قدم اول در طراحی کنترلر پیشنهادی، طراحی یک رویکرد تطبیقی می‌باشد بطوریکه ماتریس‌های ناشناخته  $G_i$  و  $B_i$  و بردار حالت  $x_i$  را تخمین بزنند. از آنجا که  $(C_i, A_i)$  رویت پذیر است، ماتریس  $G_{0i}$  را می‌توان طوری انتخاب کرد که  $(A_i + G_{0i}C_i)$  پایدار مجانبی باشد. بنابراین معادله \* را می‌توان بطورت زیر بازنویسی نمود.

$$\dot{x}_i = (A_i + G_{0i}C_i)x_i + (G_i - G_{0i})C_i x_i + B_i u_i + h_i, \quad y_i = C_i x_i \quad (2)$$

سپس یک رویکرد تطبیقی بصورت زیر می‌توان معرفی نمود.

$$\dot{\hat{x}}_i = (A_i + G_{0i}C_i)\hat{x}_i + (\hat{G}_i - G_{0i})y_i + \hat{B}_i u_i + \hat{h}_i + v_i, \quad \hat{y}_i = C_i \hat{x}_i \quad (3)$$

که؛  $\hat{x}_i$  و  $\hat{h}_i$  به ترتیب تخمین بردار متغیرهای حالت و اثرات تداخلی می‌باشند و  $\hat{G}_i$  و  $\hat{B}_i$  تخمین پارامترهای  $G_i$  و  $B_i$  هستند. با تعریف  $\phi_i := \hat{G}_i - G_i$ ،  $\psi_i := \hat{B}_i - B_i$  و  $\tilde{h}_i = \hat{h}_i - h_i$  از معادلات \* و \*، معادله خطای تخمین،  $e_i = \hat{x}_i - x_i$ ، بصورت زیر حاصل می‌گردد.

$$\dot{e}_i = (A_i + G_{0i}C_i)e_i + [\psi_i \quad \phi_i \quad \tilde{h}_i] \begin{bmatrix} u_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} + v_i \quad (4)$$

$$e_i = C_i e_i$$

می‌توان نشان داد که معادله خطای فوق و قانون تطبیقی

$$\dot{\ell}_i = -X_i^T C_i^T (\hat{y}_i - y_i) \quad (5)$$

$$\ell_i := \text{Vec}([\hat{B}_i \quad \hat{G}_i \quad \hat{h}_i])$$

به همراه سیگنال کمکی

$$v_i = -X_i X_i^T C_i^T (\hat{y}_i - y_i) \quad (6)$$

که؛

$\Delta f_i$ : تغییرات افزایشی فرکانس

$\Delta P_{gi}$ : تغییرات افزایشی موقعیت شیر گاورنر ناحیه  $i$  ام

$\Delta P_{ci}$ : ورودی کنترل ناحیه  $i$  ام

$M_i$ : ثابت اینرسی معادل در ناحیه  $i$  ام

$T_{gi}$ : ثابت زمانی گاورنر ناحیه  $i$  ام

$a_{ij}$ : نسبت ظرفیت MW نامی ناحیه  $i$  به ناحیه  $j$

$R_i$ : مشخصه drooping

$\Delta P_{di}$ : تغییرات افزایشی خروجی ناحیه  $i$  ام

$\Delta P_{tieij}$ : تغییرات افزایشی در توان tie-line مابین

نواحی  $j$  و  $i$

$\Delta P_{di}$ : اغتشاش ورودی ناحیه  $i$  ام

$D_i$ : ضریب دمپینگ معادل ناحیه  $i$  ام

$T_{ti}$ : ثابت زمانی توربین ناحیه  $i$  ام

$T_{ij}$ : ضریب سنکرون سازی در شرایط عادی

### ۳- استراتژی کنترل

یک سیستم قدرت ابعاد وسیع متشکل از  $N$  زیرسیستم را در نظر بگیرید. بدون از دست دادن کلیت مسئله، برای هر ناحیه می‌توان دینامیکی طبق رابطه زیر در نظر گرفت.

$$\dot{x}_i = (A_i + G_i C_i)x_i + B_i u_i + h_i \quad (1)$$

$$y_i = C_i x_i, \quad i = 1, \dots, N$$

که؛  $x_i \in \mathcal{R}^{n_i}$ ،  $u_i \in \mathcal{R}^{m_i}$ ،  $y_i \in \mathcal{R}^{m_i}$  به ترتیب

بردارهای متغیرهای حالت، سیگنال‌های کنترل، و

خروجی‌های واحد  $i$  ام هستند و  $(C_i, A_i, B_i)$  رویت

پذیر و کنترل پذیر می‌باشد. ماتریس‌های  $G_i$  و

$B_i$  ناشناخته و ماتریس‌های  $(C_i, A_i)$  شناخته شده و

دارای ساختاری رویت پذیر می‌باشند. سیگنال  $h_i$

اثرات تداخلی سایر واحدها می‌باشد:

$$h_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N A_{ij} x_j$$

که؛  $K_{ei} \in \mathfrak{R}^{m_i \times n_i}$  بهره فیدبک خطا،  
 $K_{0i} \in \mathfrak{R}^{m_i}$  بهره پیش‌خور، و  $K_{ri} \in \mathfrak{R}^{m_i \times m_i}$   
 سیگنال کمکی هستند و فرض می‌شود دارای ابعاد  
 مناسب می‌باشند و  $\hat{e}_i = \hat{x}_i - x_{mi}$   
 در این صورت، دینامیک سیستم خطا را می‌توان  
 بصورت زیر خلاصه نمود.

$$\dot{\hat{e}}_i = T_i A_{mi} T_i^{-1} e_i + \Delta A_i x_i - \tilde{T}_i B_{mi} r_i + B_i \varphi_i \eta_i + B_i K_{ei}^* (\hat{x}_i - x_i), \quad e_{li} = C_i e_i \quad (9)$$

$$\Delta A_i := T_i^* A_{mi} T_i^{*-1} - T_i A_{mi} T_i^{-1}$$

$$\tilde{T}_i := T_i - T_i^*$$

$$\eta_i := \begin{bmatrix} \hat{x}_i - x_{mi} \\ r_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_{i1} \\ \vdots \\ \eta_{i(m_i+n_i+1)} \end{bmatrix}$$

$$\theta_i := [K_{ei} \quad K_{ri} \quad K_{0i}]$$

$$\varphi_i := \theta_i - \theta_i^*$$

در [۲۰] نشان داده شده است که قانون تطبیق زیر  
 سبب می‌شود سیستم خطای (۹) به یک مجموعه  
 مانده‌ای همگرا شود.

$$\tilde{\theta}_{iF} = -\hat{Y}_{iF}^T C_i^T (y_i - y_{mi}) - \sigma_{iF} \theta_{iF} \quad (10)$$

که؛

$$\sigma_{iF} = \begin{cases} \sigma_{0i} \|e_{li}\| & \text{if } \|\theta_{iF}\| \geq \theta_{0i} \\ 0 & \text{if } \|\theta_{iF}\| < \theta_{0i} \end{cases}$$

$$\hat{Y}_{iF} = [Y_i \hat{B}_{di} \quad -Y_{Ti}]$$

$$\theta_{iF} = \text{Vec}([\theta_i \quad T_i]), \quad \hat{B}_{di} = I_{m_i+n_i+1} \otimes \hat{B}_i$$

$$\tilde{\theta}_i = \text{Vec}(\varphi_i), \quad \tilde{\theta}_{Ti} = \text{Vec}(\tilde{T}_i), \quad \tilde{\theta}_{iF} = \begin{bmatrix} \tilde{\theta}_i \\ \tilde{\theta}_{Ti} \end{bmatrix}$$

که  $\otimes$  نشانه ضرب رونکر می‌باشد و

$$X = [X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{2m_i}, X_{2m_i+1}]$$

$$\dot{X}_{ij} = (A_i + G_{0i} C_i) X_{ij} + I u_{ij}$$

$$\dot{X}_{i(j+m_i)} = (A_i + G_{0i} C_i) X_{i(j+m_i)} + I y_{ij}$$

$$\dot{X}_{i(1+2m_i)} = (A_i + G_{0i} C_i) X_{i(1+2m_i)} + I$$

$$\text{for } j=1, \dots, m_i$$

پایدار یکنواخت بوده و خطای تخمین،  $e_{li}$  بطور  
 نمایی به سمت صفر میل می‌نماید. بعلاوه اگر ورودی  
 $u_i$  شرط PE بودن را دارا باشد، خطای تخمین  
 و همچنین خطای تخمین پارامترها نیز به سمت صفر  
 همگرا خواهند شد [۲۰].

قدم بعدی در روش پیشنهادی عبارتست از طراحی  
 یک کنترل کننده تطبیقی محلی طوریکه خروجی  
 $y_i$  بتواند خروجی زیرسیستم مرجع را بطور نمایی  
 دنبال نماید.

$$\dot{x}_{mi} = A_{mi} x_{mi} + B_{mi} r_i$$

$$z_{mi} = T_i x_{mi}, \quad y_{mi} = C_i z_{mi} \quad (V)$$

که؛  $x_{mi} \in \mathfrak{R}^{n_i}$  بردار متغیرهای حالت،  
 $r_i \in \mathfrak{R}^{m_i}$  بردار ورودی‌های قطعه‌ای پیوسته  
 یکنواخت محدود، و  $y_{mi} \in \mathfrak{R}^{m_i}$  بردار خروجی‌های  
 سیستم مدل مرجع می‌باشند. ماتریس‌های  $A_{mi}$  و  $B_{mi}$   
 ماتریس‌های دلخواه هستند که  $A_{mi}$  یک ماتریس پایدار  
 با قطب‌های مطلوب می‌باشد. ماتریس  $T_i$  یک ماتریس  
 تبدیل ناشناخته نامفرد می‌باشد که جهت تأمین شرایط  
 پایداری در نظر گرفته شده است و تحت قوانین تطبیق  
 مناسبی به سمت مقادیر بهینه خود، یعنی؛  $T_i^*$ ، میل  
 می‌نماید.

با بکارگیری تخمینگر تطبیقی (۳) و استفاده از  
 قانون تطبیق (۵)، کنترل زیر انتخاب می‌گردد.

$$u_i = K_{ei} \hat{e}_i + K_{ri} r_i + K_{0i} \quad (8)$$

عملی پیاده‌سازی رابطه (۱۱) دچار مشکل گردد. برای حل این مشکل استفاده از فیلتر پایین‌گذر زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$\hat{H}_{fi}(s) = \frac{\hat{H}_i(s)}{\alpha_i s + 1}$$

که؛  $\hat{H}_{fi}(s)$  و  $\hat{H}_i(s)$  به ترتیب توابع بتدیل لاپلاس سیگنالهای  $\hat{h}_{fi}$  و  $\hat{H}_i$  می‌باشند و ثابت زمانی  $\alpha_i$  پهنای باند فیلتر فوق را مشخص می‌سازد. انتخاب مناسب ثابت زمانی فیلتر از نقطه نظر عملی بسیار مهم می‌باشد که با توجه به سیستم مورد نظر بصورت سعی و خطا جهت کاهش هر چه بیشتر سیگنالهای نویزی، بطور مناسب تعیین می‌گردد. حال، قدم بعدی خنثی سازی اثرات تداخلی در الگوریتم کنترلی می‌باشد. دو روش جهت انجام این امر وجود دارد:

(۱) یکی از شرایطی که در اکثر تحقیقات انجام شده در این زمینه فرض می‌شود برقرار باشد، ارضای شرط تطابق می‌باشد [۲۱]، این شرط بیان می‌دارد که اثرات تداخلی را می‌توان بصورت  $\hat{h}_{fi} = B_i z_i$  برای بعضی سیگنال  $z_i$  نوشت. با فرض برقراری این شرط به راحتی می‌توان اثرات تداخلی را با کم کردن  $z_i$  از  $u_i$  در معادله (۱۱) حذف نمود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= (A_i + G_i C_i)x_i + B_i(u_i - z_i) + h_i \\ &\equiv (A_i + G_i C_i)x_i + B_i u_i \end{aligned}$$

متأسفانه شرط تطابق در اکثر مسائل عملی صادق نیست. در سیستم مورد نظر این مقاله که در بخش ۲ معرفی گردید نیز این شرط صادق نیست. بنابراین برای حذف و خنثی سازی اثرات تداخلی راه حل دیگری مورد نیاز می‌باشد که در زیر بیان می‌گردد.

(۲) رابطه (۱) که معادله دینامیکی زیرسیستم‌های یک سیستم ابعاد وسیع را توصیف می‌کند در نظر

$$\dot{Y}_{ij} = T_i A_{mi} T_i^{-1} Y_{ij} + I \eta_{ij}, \quad j = 1, \dots, n_i + m_i + 1$$

$$Y_i = [Y_{i1}, Y_{i2}, \dots, Y_{i(n_i+m_i+1)}]$$

$$\dot{Y}_{Tij} = T_i A_{mi} T_i^{-1} Y_{Tij} + I \rho_{ij}, \quad j = 1, \dots, n_i$$

$$Y_{Ti} = [Y_{Ti1}, Y_{Ti2}, \dots, Y_{Tin_i}]$$

$\rho_{ij}$  ها عناصر ماتریس  $B_{mi} r_i$  هستند، یعنی؛

$$B_{mi} r_i = [\rho_{i1} \quad \dots \quad \rho_{in_i}]^T$$

#### ۴- تخمین و خنثی سازی اثرات تداخلی

در قسمت قبل همگرایی متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم، تحت کنترل پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. در معادلات بدست آمده در قسمت قبل، اثرات تداخلی نقشی همچون اغتشاش را بازی می‌کردند. در این قسمت از مقاله برای بهبود هر چه بیشتر رفتار سیستم و کاهش تأثیرات نامطلوب سیگنالهای اثرات تداخلی، این سیگنالها تخمین زده شده و اثر آنها خنثی می‌گردد.

تعریف می‌کنیم  $\hat{H}_i := \hat{h}_i + \Delta h_i$ ، که  $\Delta h_i$  تغییرات تخمین اثرات تداخلی می‌باشد. هنگامیکه متغیرهای حالت و پارامترهای سیستم به سمت مقدار نهایی خود نزدیک شوند،  $\Delta h_i$  به سمت صفر میل خواهد نمود. از معادله (۱) خواهیم داشت:

$$h_i = \dot{x}_i - (A_i + G_i C_i)x_i - B_i u_i$$

با بکارگیری متغیرهای حالت و پارامترهای تخمین زده شده نتیجه می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{H}_i &= \hat{x}_i - A_i \hat{x}_i - \hat{G}_i \hat{y}_i - \hat{B}_i u_i \quad (11) \\ \hat{y}_i &= C_i \hat{x}_i \quad \text{که؛} \end{aligned}$$

وجود جمله مشتق  $\hat{x}_i$  در معادله فوق و تقویت شدید سیگنالهای نویزی سبب می‌شود که از نقطه نظر

بگیرید. این زیرسیستم خود می‌تواند به دو زیرسیستم بصورت زیر تجزیه شود.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i1} &= (A_i + G_i C_i) x_{i1} + B_i u_i \\ y_{i1} &= C_i x_{i1} \end{aligned} \quad (12)$$

و

$$\begin{aligned} \dot{x}_{i2} &= (A_i + G_i C_i) x_{i2} + h_i \\ y_{i2} &= C_i x_{i2} \end{aligned} \quad (13)$$

تخمین پارامترهای سیستم، یعنی؛  $\hat{G}_i$  در دسترس باشند و خطاهای تخمین نیز به اندازه کافی کوچک شده باشند، می‌توان تخمین  $y_{i2}$  را از معادله  $\cdot$  بصورت زیر معرفی کرد.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{i2} &= (A_i + \hat{G}_i C_i) \hat{x}_{i2} + \hat{h}_{fi} \\ \hat{y}_{i2} &= C_i \hat{x}_{i2} \end{aligned} \quad (15)$$

روشن است که خروجی  $\hat{y}_{i2}$  در سیستم پایدار فوق بطور مجانبی به سمت  $y_{i2}$  میل می‌نماید. بنابراین هدف کنترلی در  $\cdot$  را می‌توان بصورت یافتن سیگنال کنترلی  $u_i$  برای  $\cdot$  به شرط آنکه رابطه زیر را ارضا نماید، بیان نمود.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{i1} + \hat{y}_{i2} - y_{mi}| = 0 \quad (16)$$

در مسئله مورد نظر که یک مسئله رگولاتور است،  $y_{mi} \equiv 0$  می‌باشد. در نتیجه اگر  $\hat{y}_{i2} - y_{mi} = 0$  به عنوان یک سیگنال مرجع مورد استفاده قرار گیرد، اثر تداخلی حذف گردیده و نتیجه اصلی، یعنی؛  $y_i \rightarrow 0$  حاصل می‌گردد.

## ۵- نتایج شبیه سازی

در این قسمت جهت نشان دادن قابلیت روش پیشنهادی، کنترلر معرفی شده در قسمت ۳ روی سیستم قدرت توصیف شده در قسمت ۲ پیاده سازی می‌گردد. الگوریتم قسمت ۴ نیز جهت تخمین اثرات تداخلی و خنثی سازی آنها بکار گرفته می‌شود.

قدم اول در طراحی کنترلر نامتمرکز مطلوب برای سیستم مورد نظر، طراحی رویگرهای محلی می‌باشد. رویگرهای محلی مطابق با رابطه (۳) ساخته می‌شوند که ماتریس‌های  $G_{0i}$  و  $A_i$  بصورت زیر انتخاب می‌گردند.

در این صورت به راحتی می‌توان نشان داد که خروجی  $y_i$  از (۱) برحسب خروجی‌های زیرسیستم‌های فوق، بصورت  $y_i = y_{i1} + y_{i2}$  قابل بیان است. بنابراین هدف کنترلی عبارت خواهد شد از تعیین کنترلی که شرط زیر را برقرار سازد.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_{i1} + y_{i2} - y_{mi}| = 0 \quad (14)$$

به عبارت دیگر سیگنال  $(y_{i1} + y_{i2})$  می‌بایست بسمت خروجی مطلوب  $y_{mi}$  میل نماید.

همانطور که مشاهده می‌شود، معادله (۱۲) یک سیستم بدون اثرات تداخلی را نمایش می‌دهد. بنابراین براحتی می‌توان روش ارائه شده در قسمت ۳ را روی آن پیاده‌سازی نمود بطوریکه خروجی  $y_{i1}$  بتواند یک سیگنال مرجع را بصورت نمایی دنبال نماید. به عبارت دیگر، اگر هیچ اثر تداخلی وجود نداشته باشد، آنگاه  $y_{i2}$  صفر خواهد شد و براحتی می‌توان یک کنترلر تطبیقی برای سیستم اصلی (۱) طراحی نمود. اما وجود اثرات تداخلی باعث پیدایش سیگنال مزاحم  $y_{i2}$  می‌شود که اثر آنرا می‌توان با اصلاح سیگنال مرجع خنثی نمود.

از طرف دیگر معادله (۱۳)، سیستمی را توصیف می‌کند که دارای ورودی  $h_i$  (اثرات تداخلی) می‌باشد. بنابراین چنانچه تخمین اثرات تداخلی، یعنی؛  $\hat{h}_{fi}$  و

شکل (۳)، تغییرات فرکانس و توان هر ناحیه را بر اثر اغتشاش پله‌ای 0.01 pu در ناحیه دوم، بدون هیچگونه کنترل نشان می‌دهد. این اغتشاش در زمان صفر وارد و حدود ده ثانیه ادامه می‌یابد. همانطور که از شکل پیداست، سیستم پس از حدود سه ثانیه ناپایدار می‌شود. شکل (۴)، پاسخ فوق را در حالت استفاده از کنترلر معرفی شده در قسمت ۳، نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، تغییرات فرکانس و توان بدون هیچگونه خطای ماندگاری بسرعت به سمت صفر میل می‌کنند. همچنین اغتشاشات مختلف دیگری نیز به سیستم اعمال گردید که پاسخ مناسب و مورد قبولی از سیستم دیده شد که برای جلوگیری از تعدد بالای شکلها از نمایش آنها صرف نظر شده است.

برای آنکه مقاوم بودن کنترل پیشنهادی در برابر عدم قطعیت‌های احتمالی نشان داده شود، به پارامترهای  $T_{12}$  و  $T_{23}$  که تأثیر مستقیمی در اثرات تداخلی دارند اختلالاتی وارد می‌کنیم. سیستم تا حدی پاسخ خوب خود را حفظ می‌نماید. اما هنگامیکه این دو پارامتر به اندازه شدیدتری تغییر می‌کنند (حدوداً ۳ برابر)، همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، اثرات تداخلی به حدی شدید شده‌اند که اگر چه سیستم پایداری خود را حفظ کرده است و در حال تطبیق خود با شرایط موجود است لیکن پاسخ نوسانی و نامطلوبی را تولید نموده است.

جهت کاهش این نوسانات، و نشان دادن اثر خنثی سازی اثرات تداخلی در بدست آوردن یک پاسخ خوب و مناسب، الگوریتم قسمت ۴ پیاده سازی می‌گردد. شکل (۶) نتیجه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود رفتار سیستم به میزان قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است در حالیکه سیگنالهای کنترل نیز نسبت به حالت قبل انرژی بیشتری صرف نکرده‌اند. شکل (۷) تخمین سیگنالهای اثرات تداخلی را در هر ناحیه نشان

$$G_{01} = \begin{bmatrix} -11.8862 & 9.5351 \\ 19.2960 & -81.6645 \\ 79.6732 & -193.2059 \\ 102.8572 & -188.5061 \end{bmatrix}$$

$$G_{02} = \begin{bmatrix} -23.8302 & 35.7628 \\ 29.9808 & -111.1410 \\ 160.3170 & -357.8501 \\ 173.9856 & -367.1521 \end{bmatrix}$$

$$G_{03} = \begin{bmatrix} -4.7478 & 4.7555 \\ 2.5575 & -68.8186 \\ 34.4818 & -141.3355 \\ 19.8337 & -119.5056 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -2.0496 & -0.0078 & 0 & 0 \\ -9.9566 & 9.5496 & 5 & 0 \\ 24.7232 & -24.6802 & -5 & 5 \\ -38.8996 & 37.3504 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -2.0002 & -0.0004 & 0 & 0 \\ -0.6507 & 8.6668 & 5.9880 & 0 \\ 1.2666 & -18.5977 & -4.1667 & 4.1667 \\ -2.5651 & 37.2200 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} -2.1005 & 0.0087 & 0 & 0 \\ 16.2549 & 8.6005 & 6.6667 & 0 \\ -27.9323 & -16.5684 & -4.0000 & 4.0 \\ 59.7642 & 35.2097 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

قانون تطبیق (۵) جهت تنظیم پارامترهای تخمینگر و تخمین پارامترهای سیستم بکار می‌رود. متغیرهای حالت و پارامترها در حدود ۳ ثانیه و بدون هیچگونه خطای ماندگاری همگرا می‌شوند، که به علت خلاصه سازی و همچنین به دلیل اینکه بعداً پاسخهای کنترلر آورده خواهد شد از نشان دادن پاسخهای تخمینگر خودداری شده است.

سیستم مدل مرجع در نظر گرفته شده برای هر ناحیه، مطابق با معادله (۷) و بصورت زیر می‌باشد.

$$A_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ -6 & -0.1 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & -5 & 5 \\ -1448.9 & -73.2 & -53.2 & -27.9 \end{bmatrix}, B_{mi} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$



## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش کنترل تطبیقی مقاوم نامتمرکز مدل مرجع برای سیستم‌های قدرت با پارامترهای ناشناخته جهت کنترل بار- فرکانس ارائه گردید. در این روش، ابتدا برای هر واحد قدرت یک رویکرد تطبیقی محلی طراحی می‌گردد تا متغیرهای حالت و پارامترهای آن واحد را تخمین بزند. سپس یک ترکیب خطی از تخمین متغیرهای حالت و متغیرهای حالت سیستم مرجع همراه با بهره‌های قابل تنظیم، به عنوان سیگنال کنترل ورودی در نظر گرفته می‌شود. بهره‌های کنترل، تحت قوانین تطبیقی مقاوم طوری تنظیم می‌گردند که خطای حالت تعریف شده بین سیستم مورد نظر و سیستم مرجع و همچنین بهره‌های کنترلی بطور یکنواخت محدود باقی بمانند. نتایج شبیه سازی، رفتار مطلوب سیستم را تحت کنترلر نامتمرکز مذکور حتی در حضور اختلالات پارامتری شدید، اغتشاشات خارجی و اثرات غیرخطی سیستم نشان می‌دهد.

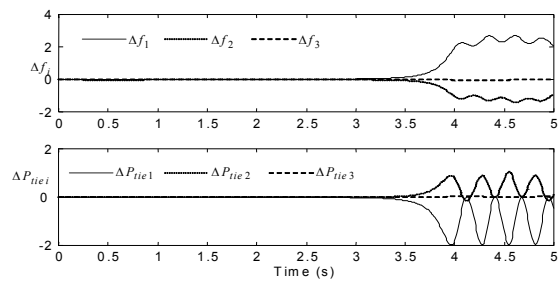
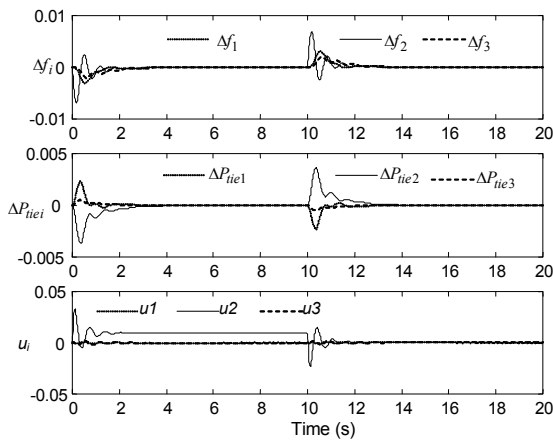
در این مقاله همچنین روشی برای مقابله با اثرات تداخلی، علی‌رغم عدم ارضای شرط تطابق در سیستم قدرت مورد نظر، ارائه گردید. در نتایج شبیه‌سازی، نشان داده شد که استفاده از شناسایی اثرات تداخلی باعث می‌شود سیستم در برابر اختلالات بیشتری رفتار مطلوب خود را حفظ نماید بطوریکه برای یک مثال نمونه، کنترلر نامتمرکز بدون استفاده از شناسایی اثرات تداخلی نتوانست رفتار مطلوب را بدست بیاورد در حالیکه با استفاده از شناسایی اثرات تداخلی رفتار مطلوب حاصل گردید. به عبارت دیگر می‌توان نتیجه گرفت استفاده از شناسایی اثرات تداخلی علاوه بر کاهش محافظه کاری باعث می‌شود هر زیرسیستم استقلال بیشتری پیدا کند و نسبت به اختلالات وارده از سایر زیرسیستم‌ها مقاومت بیشتری داشته باشد.

می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بدست آمده و سایر نتایج (که برای جلوگیری از تعدد شکلها از نمایش آنها صرف نظر می‌شود) مقاوم بودن کنترل پیشنهادی را در برابر اثرات تداخلی بالا نشان می‌دهند.

نکته قابل توجه در مباحث مطرح شده، تطبیق ماتریس  $T_i$  است که شرایط تطبیق آن متفاوت با تطبیق  $\theta_i$  است زیرا در تطبیق  $\theta_i$ ، تغییراتی در بهره‌های کنترل‌کننده حادث می‌شود که ضمن تضمین پایداری خطای تعقیب نیز کاهش یافته و به سمت صفر برود در صورتیکه در تطبیق  $T_i$  هدف اصلی کاهش خطای تعقیب نیست، بلکه بدست آوردن شرایطی است که امکان طراحی یک کنترل تطبیقی را فراهم سازد. در حقیقت با وارد کردن  $T_i$  پارامترهای مجهول جدیدی به سیستم اضافه می‌شود اما در عوض شرایط وجود پاسخ برای مسئله مورد نظر فراهم می‌گردد.

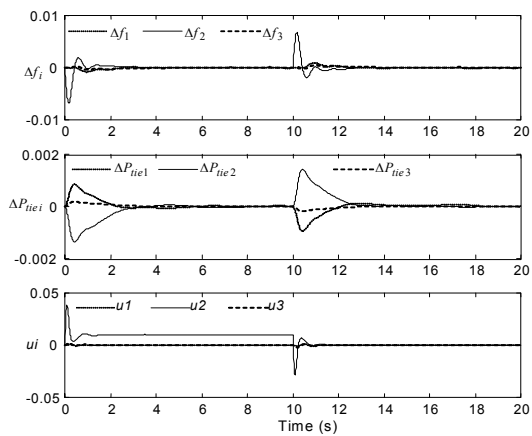
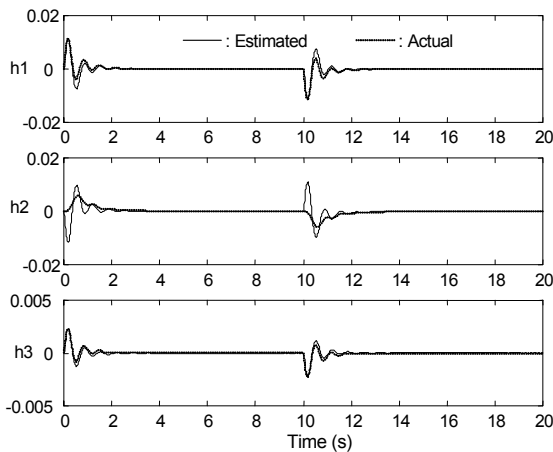
برای تطبیق  $T_i$  لازم است که نکات ظریفی را در نظر گرفت. تطبیق  $T_i$  بایستی بسیار آهسته‌تر از تطبیق  $\theta_i$  صورت گیرد. عدم تطبیق  $T_i$  باعث بوجود آمدن خطای ماندگار فاحش می‌گردد، بنابراین بهتر است که در شرایط ماندگار، تطبیق موثرتری روی  $T_i$  صورت گیرد تا حدی که خطای ماندگار در تمام حالتها به حد مطلوب کاهش یابد، در این صورت  $T_i$  به  $T_i^*$  نزدیک شده است و می‌توان از این به بعد تطبیق روی  $T_i$  را بسیار آهسته انجام داد و یا حتی آنرا متوقف ساخت. در سیستم قدرت ارائه شده، مقادیر نهایی ماتریس‌های تبدیل  $T_i$  بصورت زیر خواهند شد.

$$T_1^* = T_2^* = T_3^* = \begin{bmatrix} 0.9737 & 0 & 0 & 0.0532 \\ 0 & 0.9737 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9737 & -0.0001 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9723 \end{bmatrix}$$



شکل (۳): تغییرات توان و فرکانس بر اثر اغتشاش پله‌ای 0.01 pu در ناحیه دوم، بدون کنترل بار و فرکانس

شکل (۴): تغییرات توان و فرکانس بر اثر اغتشاش پله‌ای 0.01 pu در ناحیه دوم، هنگامیکه از کنترلر پیشنهادی همراه با خنثی‌سازی اثرات تداخلی استفاده می‌شود.

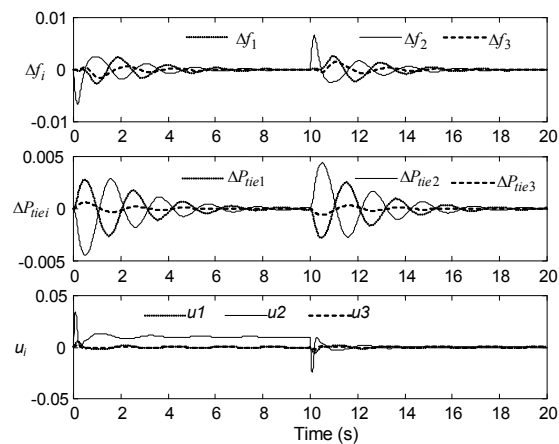


شکل (۴): تغییرات توان و فرکانس بر اثر اغتشاش پله‌ای 0.01 pu در ناحیه دوم، هنگامی که از کنترلر پیشنهادی استفاده شده است.

شکل (۷): تخمین اثرات تداخلی در هر ناحیه

## ۶- مراجع

- [۱] محمد حسین کاظمی، مهدی کراری، محمد باقر منهای، "طراحی کنترلر نامتمرکز تطبیقی مقاوم مدل مرجع جهت کنترل بار- فرکانس سیستم‌های قدرت"، هفدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، PSC، ۱۳۸۱.
- [2] C.E. Fosha and O.I. Elgerd, "The megawatt-frequency control problem: a new approach via optimal control theory," *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, NO. 4, April 1970.
- [3] M. Aldeenn and F. Crusca, "Multi-



شکل (۵): تغییرات توان و فرکانس بر اثر اغتشاش پله‌ای 0.01 pu در ناحیه دوم، هنگامی که اثرات تداخلی افزایش یافته‌اند.

- with system parametric uncertainties," *IEE Proc., Gener. Transm. Distrib.*, vol. 141, NO. 3, pp. 184-190, 1994.
- [13] S. Jain, and F. Khorrami, "Application of a decentralized adaptive output feedback based on backstepping to power systems," *Proc. 34<sup>th</sup> IEEE CDC*, pp. 1585-1590, 1995.
- [14] Y. Wang, G. Guo, and D. J. Hill, "Robust decentralized control of a class of nonlinear systems and applications to multi-machine power system stabilization," *Proc. 36<sup>th</sup> IEEE CDC*, San Diego, pp. 3102-3107, 1997.
- [15] T. C. Yang and H. Cimen, "Applying structured singular values and a new LQR design to robust decentralized power system load-frequency control," *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, pp. 880-884, 1996.
- [16] H. Elliott and W.A. Wolovich, "Parameter adaptive control of linear multivariable systems," *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 27, 340-352, 1982.
- [17] H. Ito, H. Ohmori and A. Sano, "Robust performance of decentralized control systems by sequential designs," *Proceeding of the 31<sup>st</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1333-1339, 1992.
- [18] A. G. Sparks and D. S. Bernstein, "The scaled popov criterion and bounds for the real structured singular value," *Proceeding of the 33<sup>rd</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2998-3002, 1994.
- [19] C. T. Chen, *Introduction to Linear System Design*, New York, NY: Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980.
- [20] M. H. Kazemi, Mehdi Karrari, and M. B. Menhaj, "Decentralized Robust Adaptive Output-Feedback Controller for Power Systems Load Frequency Control," *Electrical Engineering*, vol. 84, NO. 2, pp 75-83, 2002.
- [21] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989.
- machine power system stabilizer design based on new LQR approach," *IEE Proc., Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, NO. 5, pp. 494-502, 1995.
- [4] J. W. Chapman, M. D. Ilic, and C. A. King, "Stabilizing a multi-machine power system via decentralized feedback linearization excitation control," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, NO. 3, pp. 830-839, 1993.
- [5] A. Heniche, H. Bourles, and M. P. Houry, "A decentralized controller for voltage regulation of power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, NO. 3, pp. 1461-1466, 1995.
- [6] Y. Guo, D. J. Hill, and Y. Wang, "Robust decentralized excitation control of multi-machine power systems," *American Control Conf. (ACC)*, San Diego, pp. 3833-3837, 1999.
- [7] H. Jiang, H. Cai, J.F. Dorsey, and Z. Qu, "Toward a globally robust decentralized control for large-scale power systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 5, NO. 3, pp. 309-319, MAY 1997.
- [8] A. Y. Sivaramakrishnan, M. V. Hariharan, and M. C. Sailam, "Design of variable structure load-frequency controller using pole assignment technique," *International Journal of Control*, vol. 40, pp. 487-498, 1984.
- [9] N. N. Bengiamin and W. C. Chan, "Multilevel load-frequency control of interconnected power systems," *IEE Proc. C, Gener. Transm. Distrib.*, vol. 125, pp. 521-526, 1978.
- [10] K. Okada, R. Yokoyama, G. Shirai, and H. Sasaki, "Decentralized load frequency control with load prediction in multi-area power system," *Proceeding of the 27<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 649-654, 1988.
- [11] C. T. Pan and C. M. Liaw, "An adaptive controller for power system load-frequency control," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 4, NO. 1, pp. 122-128, 1989.
- [12] Y. Wang, R. Zhou, and C. Wen, "New robust adaptive load-frequency control