



PSC 2007

98-F-PSS-707

کنترل چند ناحیه ای بار- فرکانس در فضای رقابتی صنعت برق با روش کنترل فیدبک خروجی بهینه

جواد ساده^(2,1)

استادیار

الیاس رخشانی⁽¹⁾

دانشجوی کارشناسی ارشد- کنترل

۱) گروه کارشناسی ارشد کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گناباد

۲) گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

با همکاری کمیته تحقیقات و استانداردهای شرکت برق منطقه ای خراسان

واژه‌های کلیدی : کنترل بار- فرکانس، فضای تجدید ساختار شده، کنترل فیدبک خروجی بهینه، فیدبک حالت کامل، رویت گرهای حالت

است. در این شرایط تنها متغیرهای حالتی که قابلیت اندازه گیری داشته و در دسترس می باشند، بعنوان خروجی تعریف شده و از آنها جهت فیدبک استفاده می شود. نکته مهم این که ماتریس ضرائب فیدبک خروجی بصورت بهینه، با حداقل کردن تابع معیاری بدست می آید. بعلاوه ضمن مشاهده رفتار دینامیکی قابل قبول در روش فیدبک خروجی بهینه، قدرت این روش در ردیابی مناسب تغییرات بارهای خارج از قرارداد بسیار چشم گیر می باشد. همچنین نتایج شبیه سازی های انجام شده بر روی سیستم دو ناحیه ای با وجود کنترلر فیدبک خروجی بهینه موید عملکرد مناسب این کنترلر در بهبود دینامیک فرکانس سیستم می باشد. ضمنا نتایج حاصله، با روش فیدبک حالت بهینه و رویتگرهای حالت نیز مقایسه شده اند.

چکیده:

با بروز تجدید ساختار در فضای سنتی صنعت برق، بسیاری از مباحث مهم در صنعت برق دچار تحول گردید. یکی از این مباحث، مساله کنترل بار- فرکانس، در سیستمهای قدرت می باشد. در این راستا سیستم های متداول کنترل بار- فرکانس به منظور در نظر گرفتن اثر قراردادهای دولطوفه بر دینامیک سیستم، بهبود یافته اند. در این مقاله سعی شده با استفاده از روش فیدبک خروجی با دیدگاهی کاربردی، عملکرد دینامیکی سیستم کنترل بار - فرکانس در یک سیستم چند ناحیه ای در فضای تجدید ساختار شده بهبود یابد. از آنجا که در فضای عملی و کاربردی، دسترسی و اندازه گیری تمام متغیرهای حالت محدود نمی باشد، در این مقاله استفاده از روش فیدبک خروجی جهت حل این مشکل پیشنهاد شده

۱- مقدمه :

می باشد. در این راستا نیز مقالات گوناگونی ارائه شده اند که هر یک به روشی متفاوت سعی در بررسی مساله کنترل فرکانس در فضای تجدیدساختار شده دارند.

در سال ۱۹۹۷ محقق هندی بنام کومار و همکارانش اولین اصول لازم برای شبیه سازی کامپیوتری مساله کنترل فرکانس با اعمال قیود بازار را مطرح کردند [2-3].

در مرجع [4]، ضمن ارائه یک مدل ساده و در عین حال کامل به معروفی ایده ای جدید تحت عنوان ماتریس مشارکت توزیع پرداخته شده است.

مراجع [5-6] نیز از اصول موجود در کنترل مقاوم بطور وسیعی در زمینه کنترل فرکانس استفاده نموده اند.

در مرجع [7] روشی مفید برای بکاربردن منطق فازی در این زمینه ارائه شده است. در مدل ارائه شده در این مرجع، از یک سوئیچ فازی استفاده شده است.

یکی از نکات مهمی که در بیشتر مقالات بررسی شده به چشم می خورد، وجود فرضیاتی ایده آل گرایانه می باشد. بطوری که اگر در معادلات حالت سیستم های بررسی شده دقت کنیم متوجه می شویم که جهت بهبود دینامیک سیستم نیاز به دسترسی و اندازه گیری کلیه متغیرهای حالت، از جمله: خطای کنترل ناحیه (ACE)⁴، یا انگرال این خطای $\int ACE$ ، توان خروجی توربین و توان خروجی گاورنر می باشد، اما در عمل، دسترسی و اندازه گیری تمام این متغیرها محدود نخواهد بود، ضمن آنکه اطلاعات مربوط به نواحی همچوar نیز معمولاً برای سایر نواحی در دسترس نمی باشد.

در این مقاله از روش کنترل فیدبک خروجی بهینه، برای بهبود نوسانات فرکانسی یک سیستم چند ناحیه ای در فضای تجدید ساختار شده صنعت برق، استفاده شده است. استفاده از روش کنترل فیدبک خروجی جهت رفع مشکل عدم دسترسی به برخی از متغیرهای حالت سیستم در فضای عملی می باشد. در این راستا لازم است از تنها متغیرهای حالت قابل اندازه گیری سیستم که به عنوان خروجی تعریف شده اند، برای فیدبک استفاده شود. با توجه به اینکه فرکانس خروجی در بلوک کنترلی در هر ناحیه ای مشخص

مبحث کنترل بار - فرکانس یکی از مباحث مهمی است که همواره با رشد و توسعه سیستمهای قدرت از اهمیت خاصی برخوردار بوده، چرا که لزوم حفظ فرکانس در مقدار نامی و نیز ربدیابی به موقع تغییرات بار، بخصوص در هنگام تغییرات دینامیکی در تولید و مصرف بر کسی پوشیده نیست. توجه شود که علاوه بر حلقه اول کنترلی شامل پاسخ طبیعی گاورنر به تغییر بار، یک کنترل کمکی یا حلقه ثانویه کنترلی نیز در مرکز کنترل میزان تولید لازم را بین همه ژنراتور ها تقسیم می کند. از کنترل تولید و فرکانس عموماً با عنوان کنترل بار- فرکانس (LFC^1)¹ نام برده می شود [1]. در گذشته مبحث کنترل بار - فرکانس در فضای سنتی به شکلی مطلوب مورد بررسی قرار گرفته است. در ساختار صنعت برق سنتی، کل سیستم در تمام کشور زیر نظر و انحصار دولت بود و وظیفه تولید، انتقال و توزیع برق در هر منطقه بر عهده یک شرکتی با ساختار عمودی (VIU^2)² و دارای حق انحصاری قرار داشت. اما با بروز تجدید ساختار در صنعت برق ابعاد مساله کمی پیچیده تر شده است. حال مبحث کنترل فرکانس در سایه بکارگیری انواع قراردادهای موجود در مدل دوطرفه³ یا مدل پول در بازار باید بررسی می گردید. در راستای قوانین جدید در صنعت برق در جهت ارائه محصولی (انرژی الکتریکی) با کیفیت تر، تعاریف و وظایف جدیدی نیز مطرح گردید، که یکی از این وظایف تحت عنوان خدمات جانبی می باشد.

وجود خدمات جانبی برای بازاری آزاد و رقابتی صد در صد ضروریست. کنترل توان راکتیو و ولتاژ، رزروهای چرخشی و غیر چرخشی و نیز کنترل توان حقیقی و تنظیم فرکانس، از جمله مهم ترین خدمات جانبی می باشند. لذا توجه داریم که مبحث کنترل بار- فرکانس یکی از مهم ترین بخش‌های مربوط به خدمات جانبی در صنعت برق هر کشوری خواهد بود. در حال حاضر نگرش موجود در این مبحث به شکل تلاشی برای حرکت از فضای سنتی به فضای رقابتی در صنعت برق

¹ Load Frequency Control² Vertically integrated utility³ Bilateral⁴ Area control error

	1	2	3	4	DISCO
1	cpf_{11}	cpf_{12}	cpf_{13}	cpf_{14}	G
2	cpf_{21}	cpf_{22}	cpf_{23}	cpf_{24}	E
3					N
Area2	cpf_{31}	cpf_{32}	cpf_{33}	cpf_{34}	C
4	cpf_{41}	cpf_{42}	cpf_{43}	cpf_{44}	O

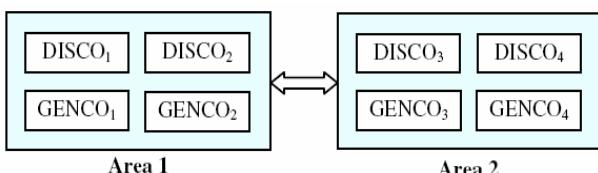
شکل ۱: ماتریس مشارکت توزیع یک سیستم دو ناحیه ای

این فاکتور مشارکت به این صورت محاسبه می گردد:

$$cpf_{ij} = \frac{\text{سهم تولید کننده } i \text{ ام}}{\text{کل تقاضای مورد نیاز}}$$

در هر ستون همواره $\sum_i cpf_{ij} = 1$ و قطر اصلی این ماتریس مربوط به تقاضاهای محلی و عناصر قطرهای غیر اصلی نیز مربوط به تقاضاهای شرکت های توزیع یک ناحیه از نواحی دیگر می باشد.

در این بررسی فرض شده که تمامی واحدها شرایط لازم جهت شرکت در فرایند کنترل بار- فرکانس را دارا می باشند، در حالیکه ممکن است بنا به شرایطی برخی از واحدهای تولیدی در کنترل فرکانس شرکت نداشته باشند.



شکل ۲: نمای کلی سیستم دو ناحیه ای در فضای رقابتی

^۶ در تمامی روابط اندیس زمربود به شرکت توزیع و اندیس آ مربود به تولید کننده می باشد.

و قابل اندازه گیری می باشد، با استفاده از روش کنترل فیدبک خروجی فرضیات و تحلیل ها جنبه واقعی تری به خود خواهند گرفت. با این روش هر چند روابط پیچیده تر می گردند اما وابستگی به متغیرهای حالت سیستم کاهش یافته است. ضمن آنکه به منظور فراهم آوردن امکان مقایسه روش پیشنهادی با روشهای دیگر، روشهای کنترل فیدبک حالت کامل، رویتگرهای مرتبه کامل و کاهش مرتبه یافته نیز شبیه سازی گردیده اند و نتایج حاصل از این شبیه سازی ها ارائه و با یکدیگر مقایسه شده اند.

۲ - نحوه مدلسازی قراردادهای بازار جهت

مطالعات کنترل بار-فرکانس :

در فضای تجدیدساختار شده صنعت برق همواره تعدادی تولید کننده^۱ و مصرف کننده^۲ وجود دارند. به منظور تجسم بهتر روابط بازار و بکارگیری انواع قراردادهای مابین تولیدکنندگان و مصرف کنندگان در مدل AGC^3 ماتریسی تحت عنوان ماتریس مشارکت توزیع یا DPM^4 تعریف گردیده است. نمونه ای از این ماتریس در شکل ۱ مشاهده می شود. این ماتریس برای سیستم مشخص شده در شکل ۲ که در هر ناحیه دو شرکت توزیع و دو تولید کننده وجود دارد، بکار می رود[۴]. به کمک این ایده هر تولید کننده ای می تواند با توجه به قرارداد مربوطه با هر مصرف کننده در هر ناحیه ای ارتباط داشته باشد. ستونهای این ماتریس مربوط به تقاضای مصرف کننده و سطرهای آن نیز مربوط به سهم هر واحد تولیدی در تامین تقاضای بار می باشد. فاکتور مشارکت قراردادی cpf_{ij}^5 مشخص می کند که شرکت توزیع j ام چه سهمی از کل تقاضای مورد نیاز خود را بر اساس قرارداد منعقده، از تولید کننده i ام تامین می کند.

¹ Genco

² Disco

³ Automatic generation control

⁴ Distributed Participation Matrix

⁵ Contract Participation Factor

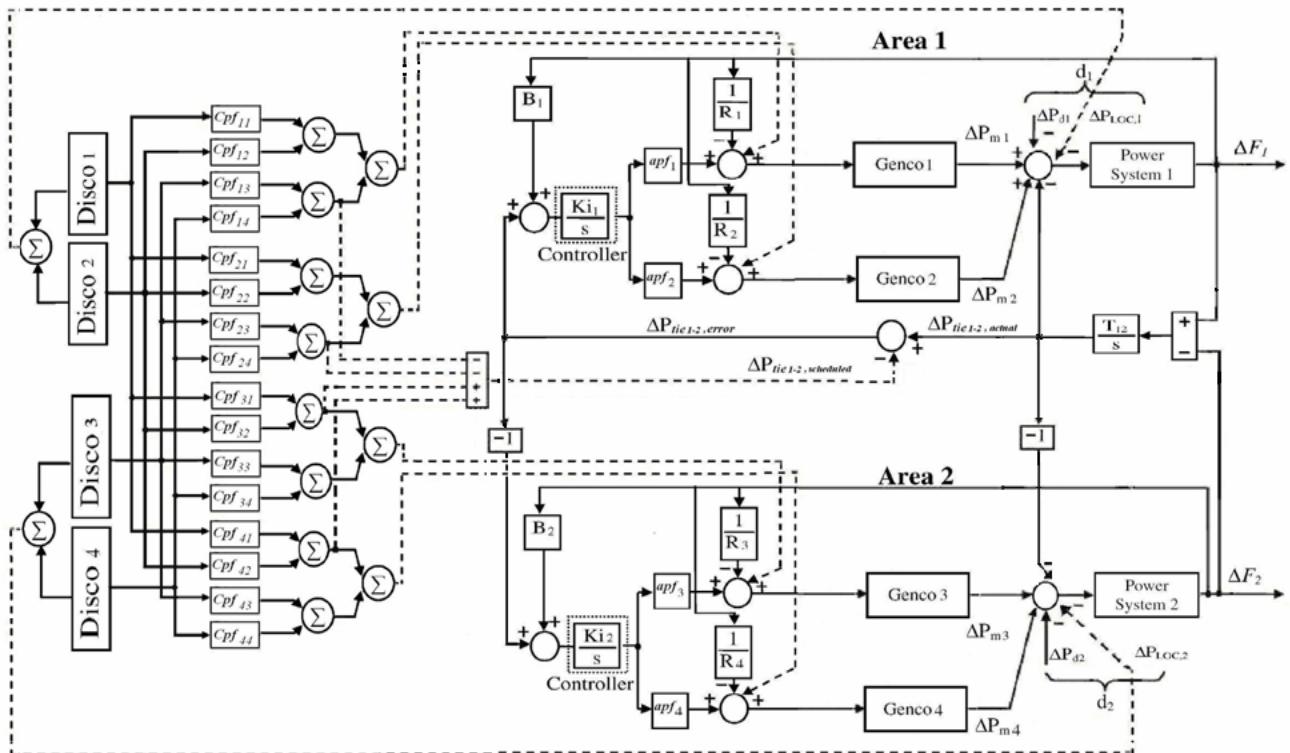
۳- ساختار کنترل بار-فرکانس یک سیستم دو

ناحیه ای در فضای رقابتی صنعت برق:

در شکل ۳ مدل کاملی از سیستم کنترل فرکانس دو ناحیه ای در فضای تجدیدساختار شده رسم شده است. این مدل، مدلی خطی سازی شده حول نقطه کار بوده و توجه داریم که تغییرات بار و فرکانس مقادیر کوچکی دارند. این مدل برگرفته از مدل‌های ارائه شده در مراجع [4] و [7] می‌باشد.

$$\Delta P_{mi} = \sum_j c_{pfij} \Delta P_{Lj} \quad (1)$$

میزان تولید قراردادی هر تولید کننده از رابطه (۱) بدست می‌آید ضمن آنکه در تمام روابط ΔP_{Lj} ، کل تقاضای شرکت توزیع زام خواهد بود. همچنین توان انتقالی برنامه ریزی شده بین ناحیه ای برای یک سیستم دو ناحیه ای از رابطه (۲) بدست می‌آید.



شکل ۳: بلوک کامل سیستم کنترل بار- فرکانس دو ناحیه ای در فضای تجدید ساختار شده

۴- طراحی کنترلر جهت بهبود دینامیک بار-فرکانس:

به منظور بهبود دینامیک کنترل فرکانس در این مقاله استفاده از روش فیدبک خروجی بهینه پیشنهاد شده است و منظور فراهم آوردن امکان مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های دیگر، روش کنترل فیدبک حالت کامل و رویتگر های حالت نیز بررسی گردیده اند. در این بخش بطور مختصر هر یک از این روشها تشریح شده است.

۴-۱- فیدبک حالت بهینه:

به منظور کنترل بهینه و مناسب تر سیستم معرفی شده با رابطه (۶) ماتریس بهره فیدبک حالت معرفی شده در رابطه (۱۰) را بگونه ای تعیین می کنیم که شاخص عملکرد بهینه رابطه (۱۱) مینیمم گردد.

$$u(t) = -K \cdot x(t) \quad (10)$$

$$J = \int [x^T(t) \cdot Q \cdot x(t) + u^T(t) \cdot R \cdot u(t)] dt \quad (11)$$

برای برآورده کردن این هدف بهره حالت از رابطه (۱۲) بدست می آید، بطوریکه P یک ماتریس حقیقی متقارن مثبت معین است که از رابطه جبری ریکاتی (۱۳) و با کمک جعبه ابزار های نرم افزار *Matlab* قابل محاسبه است.

$$K = R^{-1} \cdot B^T \cdot P \quad (12)$$

$$A^T \cdot P + P \cdot A - P \cdot B \cdot R^{-1} \cdot B^T \cdot P + Q = 0 \quad (13)$$

تعیین ماتریس های Q و R به نظر طراح بستگی داشته و بشکل مناسبی انتخاب می شوند [۱].

۴-۲- رویتگر های حالت:

یک رویتگر، سیستمی دینامیکی می باشد که با دریافت ورودی

$$d_n = \Delta P_{Loc,n} + \Delta P_{dn} \quad (8)$$

$$\Delta P_{Loc,n} = \sum_j \Delta P_{Lj} \quad (9)$$

و خروجی های یک سیستم، متغیر های حالت آنرا تخمین می‌زنند. از رویتگرها زمانی استفاده می‌گردد که همگی یا بعضی از متغیر های حالت سیستم در دسترس و یا قابل اندازه

$$\Delta P_{tie1-2,scheduled} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=3}^4 c p f_{ij} \Delta P_{Lj} - \sum_{i=3}^4 \sum_{j=1}^2 c p f_{ij} \Delta P_{Lj} \quad (2)$$

و با توجه به شکل سه میزان خطای موجود در توان انتقالی نیز مطابق رابطه (۳) محاسبه می شود.

$$\Delta P_{tie1-2,error} = \Delta P_{tie1-2,actual} - \Delta P_{tie1-2,scheduled} \quad (3)$$

ضمن آنکه سیگنال $\Delta P_{tie1-2,error}$ در رابطه (۳) به صورت زیر در تشکیل ACE بکار می رود.

$$ACE_1 = B_1 \Delta f_1 + \Delta P_{tie1-2,error} \quad (4)$$

$$ACE_2 = B_2 \Delta f_2 + \Delta P_{tie2-1,error} \quad (5)$$

مدل فضای حالت این سیستم دو ناحیه ای مطابق روابط (۶) و (۷) می باشد، که در آن x بردار متغیرهای حالت و u بردار متغیرهای کنترل و y بردار خروجی سیستم می باشد [۴].

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (6)$$

$$y = C \cdot x \quad (7)$$

در روابط فوق ماتریس های A B و C بر اساس شکل ۳ تعیین می شوند. همچنین بردار کنترل u شامل ۶ ورودی و بردار x نیز شامل ۹ متغیر حالت می باشند.

$$u = [\Delta P_{L1} \quad \Delta P_{L2} \quad \Delta P_{L3} \quad \Delta P_{L4} \quad \Delta P_{d1} \quad \Delta P_{d2}]^T$$

$$x = [\Delta f_1 \quad \Delta f_2 \quad \Delta P_{m1} \quad \Delta P_{m2} \quad \Delta P_{m3} \quad \Delta P_{m4}]$$

$$\int ACE_1 \quad \int ACE_2 \quad \Delta P_{tie1-2,actual}]$$

ΔP_{di} های ΔP_{Li} مربوط به تقاضای قراردادی و نیز مربوط به شرایط تخطی از قرارداد و اغتشاشات بارهای محلی می باشد و متغیر های حالت نیز شامل انحراف فرکانس هر ناحیه Δf_n ، توان خروجی هر واحد تولیدی ΔP_{mi} ، خطای کنترلی ناحیه ای یا ACE_n و انحراف توان انتقالی خط انتقال ΔP_{tie} می باشند. در مدل فوق d_n مجموع تقاضای بار در ناحیه n می باشد، که جهت تنظیم مناسب فرکانس باید توسط سیستم حس گردد و از روابط (۸) و (۹) بدست می آید. $\Delta P_{Loc,n}$ کل تغییرات پیش بینی شده مربوط به بارهای قراردادی و ΔP_{dn} نیز شامل مجموع اغتشاشات در بار ناحیه ای و خارج از قراردادهای بازار می باشد [۷].

نمی باشد؛ این نتیجه بسیار مهم در بخش شبیه سازی سوم ارائه خواهد شد. در روش فیدبک خروجی هدف اصلی، کنترل بهینه سیستم معرفی شده در رابطه (۶) میباشد. برای این منظور از قانون کنترل رابطه (۱۴) استفاده می کنیم، به نحوی که شاخص عملکرد رابطه (۱۵) مینیمم گردد.

$$u = -K \cdot y \quad (14)$$

$$J = \frac{1}{2} \int [x^T(t) Q x(t) + u^T R u(t)] dt \quad (15)$$

$$\dot{x} = (A - B K C)x = A_c x \quad (16)$$

با جایگزینی رابطه (۱۴) در رابطه (۱۵) داریم:

$$J = \frac{1}{2} \int x^T (Q + C^T K^T R K C)x dt \quad (17)$$

محاسبه شاخص فوق با شرط دینامیکی رابطه (۱۶) کمی مشکل است، لذا به منظور حل استاتیکی این مساله بهینه سازی ماتریس نیمه معین مثبت، ثابت و متقارن P را بگونه ای فرض می کنیم که رابطه (۱۸) برآورده گردد.

$$\frac{d}{dt}(x^T P x) = -x^T (Q + C^T K^T R K C)x \quad (18)$$

لذا در نهایت شاخص عملکرد به فرم زیر تبدیل می گردد:

$$J = \frac{1}{2} x^T(0)Px(0) - \frac{1}{2} \lim_{t \rightarrow \infty} x^T(0)Px(0) \quad (19)$$

با فرض پایداری سیستم بعد از مدت زمانی معین، حالت x به صفر می رسد، لذا:

$$J = \frac{1}{2} x^T(0)Px(0) \quad (20)$$

حال با ترکیب روابط (۱۶) و (۱۸) به رابطه (۲۱) می رسیم.

$$-x^T(Q + C^T K^T R K C)x = \frac{d}{dt}(x^T P x) = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \\ = x^T(A_c^T P + P A_c)x \quad (21)$$

لذا می توان به معادله لیاپانوفی رابطه (۲۲) دست پیدا کرد:

$$g \equiv A_c^T P + P A_c + C^T K^T R K C + Q = 0 \quad (22)$$

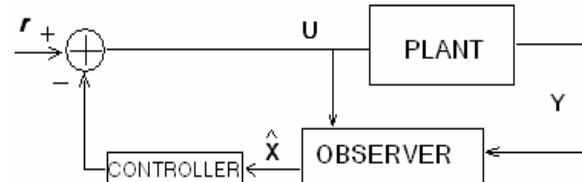
حال برای حل مساله بهینه سازی از روش ضربگر لاگرانژ می توان استفاده کرد. بطوریکه با اعمال معادله (۲۲) در ضربگر لاگرانژ C همیلتونی رابطه (۲۴) تشکیل می گردد.

$$X = E \left\{ x(0)x^T(0) \right\} \quad (23)$$

$$H = \text{tr}(P X) + \text{tr}(g S) \quad (24)$$

با اعمال مشتقات جزئی در رابطه (۲۴) به سه معادله می رسیم:

گیری نباشد. در شکل ۴ یک نمای کلی از سیستم کنترل با رویتگر حالت مشاهده می شود. بكمک رویتگر مرتبه کامل تمامی متغیر های حالت سیستم تخمین زده می شود اما از آنجایی که انجام عمل تخمین برای تمامی متغیرهای حالت یک



شکل ۴: نمای کلی سیستم کنترل فیدبک حالت با رویتگر

سیستم بزرگ دارای هزینه زیاد می باشد و در عمل نیز نصب تمامی مبدلها^۱ مورد نیاز در اندازه گیری حالتها غیر ممکن است، می توان تنها آن دسته از حالتها که قابل اندازه گیری نیستند را تخمین زد، که در این راستا رویتگر های کاهش یافته بکار می روند. از مزایای استفاده از رویتگر های حالت، تخمین حالتها سیستم و امکان طراحی مستقل کنترل فیدبک حالت از رویتگر با استفاده از اصل جداپذیری^۲ می باشد [8].

۳-۴- فیدبک خروجی بهینه:

کنترل فیدبک خروجی یکی از روش‌های سودمند در کنترل مدرن می باشد. در این روش از تنها متغیرهای حالت قابل اندازه گیری سیستم، که بعنوان خروجی تعریف شده اند، برای فیدبک استفاده می شود. یکی از نکات مهم در این بحث چگونگی تعیین ضرائب بهینه فیدبک خروجی برای دستیابی به بهترین رفتار دینامیکی سیستم می باشد. توجه شود که تنها خروجی های قابل اندازه گیری در سیستم کنترل فرکانس مورد بحث، شامل: انحراف فرکانس Δf ، خروجی توربین ها ΔP_m و توان جاری در خط انتقال ΔP_{tie} می باشند، که ماتریس خروجی C نیز بر همین اساس انتخاب می شود. از جمله مزایای بکارگیری روش فیدبک خروجی اعمال دیدگاهی واقع گرایانه و استفاده از خروجی های قابل اندازه گیری برای فیدبک می باشد. علاوه بر این به جهت قدرت خوب این روش در ردیابی مناسب تغییرات بار، به تنظیمات مجدد نیازی

¹ Transducers

² Separation Principle

ب: شبیه سازی دوم (بر اساس قراردادهای آزاد)

ج: شبیه سازی سوم (تخطی از قرارداد)

داده ها و پارامتر های بکار رفته در ضمیمه آورده شده اند.

الف: شبیه سازی اول:

در این بخش هر ژنراتوری فقط با شرکت های توزیع درون ناحیه خودش و مطابق ماتریس DPM فرضی زیر قرارداد دارد.

$$DPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

این ماتریس بیان کننده نحوه ارتباط تولید کنندگان و مصرف کنندگان می باشد. عنوان مثال از روی ستون اول این ماتریس مشخص می شود که شرکت توزیع ۱ پنجاه درصد از تقاضای بار مصرفی خود را از تولید کننده ۱ و مابقی را نیز از تولید کننده ۲ در همان ناحیه خود تامین می کند.

همچنین فرض می کنیم که فاکتورهای مشارکت خطای کنترلی ناحیه بشرح زیر باشند:

$$apf_1 = 0.5 \quad apf_2 = 1 - apf_1 = 0.5$$

$$apf_3 = 0.5 \quad apf_4 = 1 - apf_3 = 0.5$$

در این قسمت از شبیه سازی بار تقاضا شده ΔP_{Li} توسط شرکت های توزیع ۱ و ۲ که در ماتریس مشارکت فوق سهم دارند، تغییری معادل pu ۱، خواهد داشت. توجه شود که با توجه به ماتریس DPM شرکت های توزیع ۳ و ۴ در این قسمت، هیچ مشارکتی در قراردادهای بازار ندارند و فقط پاسخگوی بارهای محلی ناحیه خود خواهند بود. نتایج شبیه سازی در این شرایط، در شکلهای ۵ تا ۸ رسم شده است.

لازم به ذکر است که میزان تولید قراردادی حالت ماندگار هر تولید کننده نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\Delta P_{mi} = cpf_{ii} \Delta P_{L1} + cpf_{i2} \Delta P_{L2} + cpf_{i3} \Delta P_{L3} + cpf_{i4} \Delta P_{L4} \quad (31)$$

$$\Delta P_{m1} = 0.5 \times \Delta P_{L1} + 0.5 \times \Delta P_{L2} = 0.1 \text{ pu MW}$$

$$\Delta P_{m2} = 0.1 \text{ pu MW}$$

$$\Delta P_{m3} = 0 \text{ pu MW} \quad \text{and} \quad \Delta P_{m4} = 0 \text{ pu MW}$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial S} = A_c^T P + PA_c + C^T K^T R K C + Q \quad (25)$$

$$0 = \frac{\partial H}{\partial P} = A_c S + S A_c^T + X \quad (26)$$

$$0 = \frac{1}{2} \frac{\partial H}{\partial K} = R K C S^T - B^T P S C^T \quad (27)$$

$$A_c = A - B K C \quad (28)$$

$$J = 1/2 \cdot \text{tr}(P X) \quad (29)$$

حل همزمان سه معادله (۲۵)، (۲۶) و (۲۷) به منظور تعیین K بهینه دشوار می باشد. برای این منظور از یک الگوریتم تکراری می توان کمک گرفت. ضمن آنکه از رابطه (۲۷) می توان به رابطه میانی (۳۰) برای بهره فیدبک خروجی K دست پیدا کرد، بطوریکه این رابطه در الگوریتمی که برای محاسبه گین بهینه استفاده شده، بکار خواهد رفت [۹]:

$$K = R^{-1} B^T P S C^T (C S C^T)^{-1} \quad (30)$$

۵- نتایج شبیه سازی :

بر اساس توضیحات بخش ۴، شبیه سازی ها نیز با سه روش کنترلی، به شرح زیر انجام شده اند:

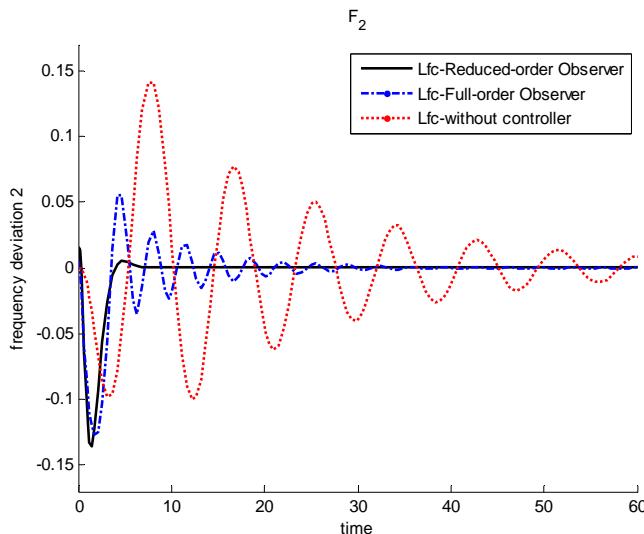
-۱ فیدبک حالت کامل: از آنجائی که در این روش به تمامی متغیرهای حالت نیاز است امکان بهبود دینامیکی بسیار مناسبی فراهم می شود، اما از نظر ردیابی بار عملکردی ضعیف وجود دارد.

-۲ رویتگر حالت: به ازای دو نوع رویتگر مرتبه کامل و مرتبه کاهش یافته بررسی ها انجام شده است. استفاده از این روش به جهت مقابله با مشکل عدم دسترسی به برخی متغیرهای حالت و انجام مقایسات با روش پیشنهادی بوده است.

-۳ روش فیدبک خروجی: این روش، کنترلری بهینه را ارائه می دهد، که ضمن ردیابی بسیار خوب تغییرات بارهای غیرقراردادی، مشکل عدم دسترسی به برخی از متغیرهای حالت را نیز رفع کرده است.

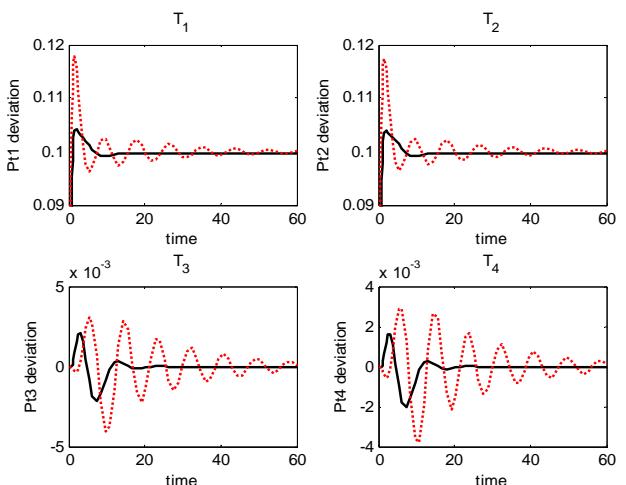
ضمن آنکه تمامی روشهای فوق برای سه نوع مختلف از شرایط قراردادهای بازار به این شرح انجام شده اند:

الف: شبیه سازی اول (براساس قراردادهای درون ناحیه ای)

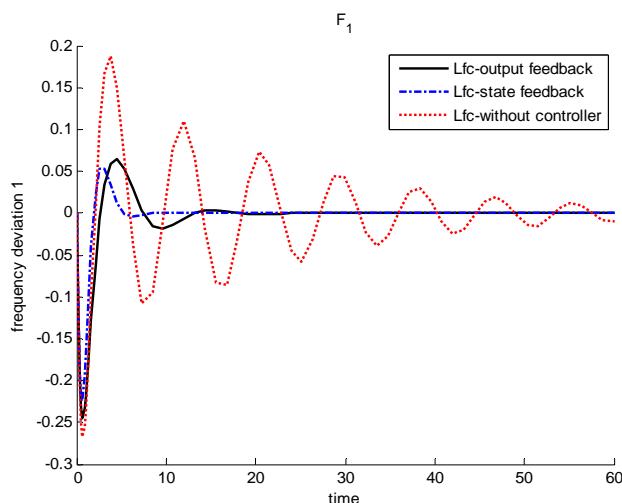


شکل ۶-ب: پاسخ فرکانسی ناحیه ۲ سیستم(نقطه چین) در مقایسه با روینگر کامل (خط و نقطه) و روینگر کاهش مرتبه (خط ممتد)

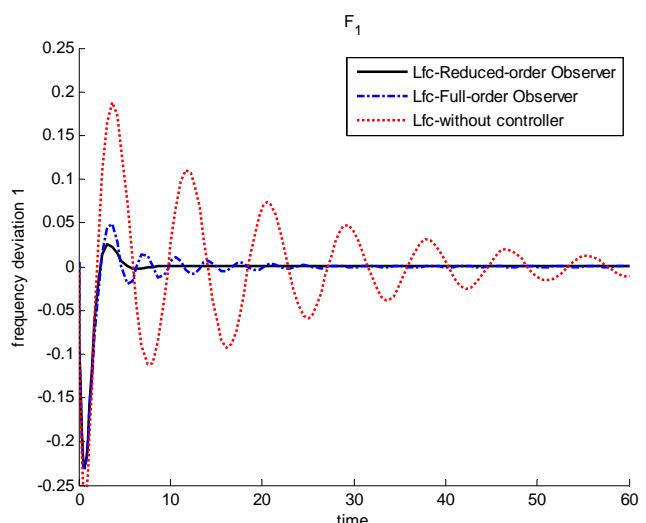
در شکل ۵ نیز مقادیر تولید قراردادی هر واحد تولیدی در مقایسه با روش فیدبک خروجی رسم شده است.



شکل ۵: خروجی هر تولید کننده در شبیه سازی اول در مقایسه با روش فیدبک خروجی (خط ممتد)



شکل ۷-الف: پاسخ فرکانسی ناحیه ۱ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتد)



شکل ۶-الف : پاسخ فرکانسی ناحیه ۱ سیستم(نقطه چین) در مقایسه با روینگر کامل (خط و نقطه) و روینگر کاهش مرتبه (خط ممتد)

بعلت صفر بودن عناصر غیر قطری ماتریس مشارکت توزیع،

در این قسمت، قرارداد بین ناحیه‌ای وجود نداشته و مطابق

شکل ۸ مقدار حالت ماندگار توان انتقالی نیز صفر است.

ب : شبیه سازی دوم :

در این قسمت هر تولید کننده‌ای در انتخاب و برقراری قرارداد با هر شرکت توزیعی در هر ناحیه‌ای آزاد می‌باشد. با کمک ماتریس مشارکت توزیع، می‌توان ترکیبی از قراردادهای بازار را مدلسازی نمود. در این مرحله فرض می‌کنیم که میزان بار تقاضا شده توسط هر یک از شرکت‌های توزیع که در ماتریس مشارکت توزیع سهم دارند، تغییری معادل pu ۰,۱ داشته باشد. فرض می‌کنیم ماتریس مشارکت توزیع به صورت زیر باشد:

$$DPM = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 1 & 0.7 \\ 0.3 & 0.25 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

این ماتریس نحوه ارتباط واحدهای تولیدی با مصرف کنندگان را مشخص می‌کند. بعنوان مثال ستون اول این ماتریس مشخص می‌کند که پنجاه درصد، بیست درصد و سی درصد از بار تقاضا شده توسط شرکت توزیع ۱ به ترتیب توسط تولیدکنندگان اول، دوم و چهارم تامین می‌شود.

ضمن آنکه فاکتور‌های مشارکت خطای کنترلی ناحیه یا apf بشكل زیر فرض شده است :

$$apf_1 = 0.75 \quad apf_2 = 1 - apf_1 = 0.25$$

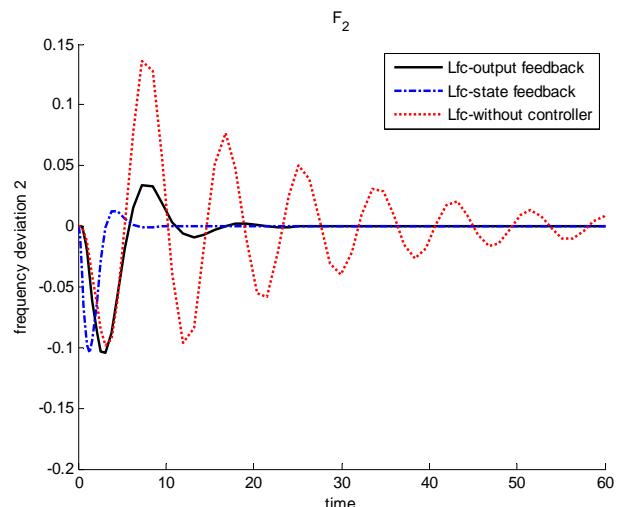
$$apf_3 = 0.5 \quad apf_4 = 1 - apf_3 = 0.5$$

نتایج حاصل از شبیه سازی در این شرایط، در شکل‌های ۹ تا ۱۲ ترسیم شده است. لازم بذکر است میزان تولید قراردادی حالت ماندگار هر تولیدکننده نیز بدین ترتیب محاسبه می‌شود:

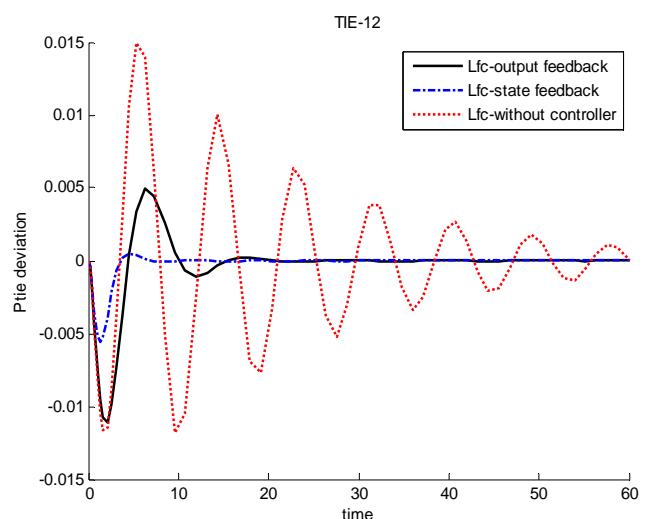
$$\Delta P_{m1} = 0.5 (0.1) + 0.25 (0.1) + 0 + 0.3 (0.1) \\ = 0.105 pu MW$$

$$\Delta P_{m2} = 0.045 pu MW, \Delta P_{m3} = 0.195 pu MW,$$

$$\Delta P_{m4} = 0.055 pu MW$$



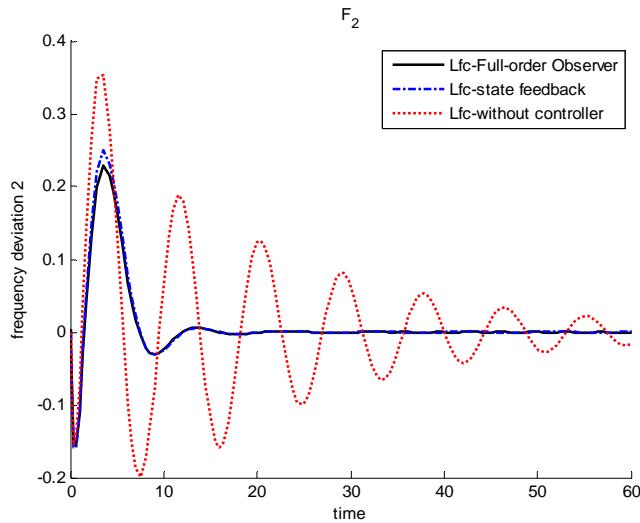
شکل ۷-ب: پاسخ فرکانسی ناحیه ۲ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)



شکل ۸: پاسخ توان انتقالی واقعی سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)

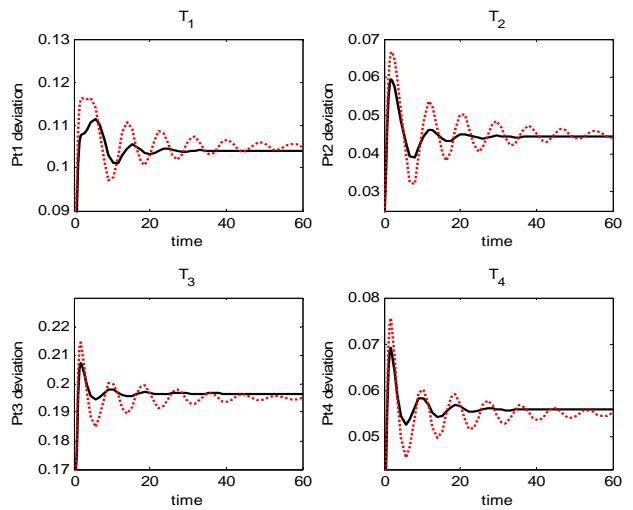
همانطور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، بعلت وجود بارهای تقاضا شده در ناحیه اول، فرکانس ناحیه اول، به نسبت فرکانس ناحیه دوم، دچار افت بیشتر و با دامنه نوسانات بزرگتری شده است. از آنجائی که در روش فیدبک حالت از تمامی متغیرهای سیستم استفاده شده امکان بهبود دینامیکی تا حد بالائی وجود دارد ضمن آنکه مطابق شکل ۷ پاسخ دینامیکی روش فیدبک خروجی نیز با توجه به دسترسی محدود شده به خروجی‌های قابل اندازه گیری، نسبت به فیدبک حالت همچنان مناسب می‌باشد.

بیست و دومین کنفرانس بین المللی برق

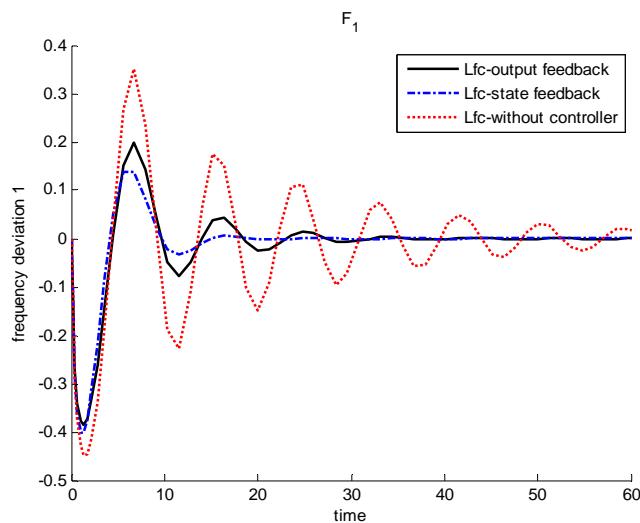


شکل ۱۰-ب: پاسخ فرکانسی ناحیه ۲ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و رویتگر کامل (خط ممتد)

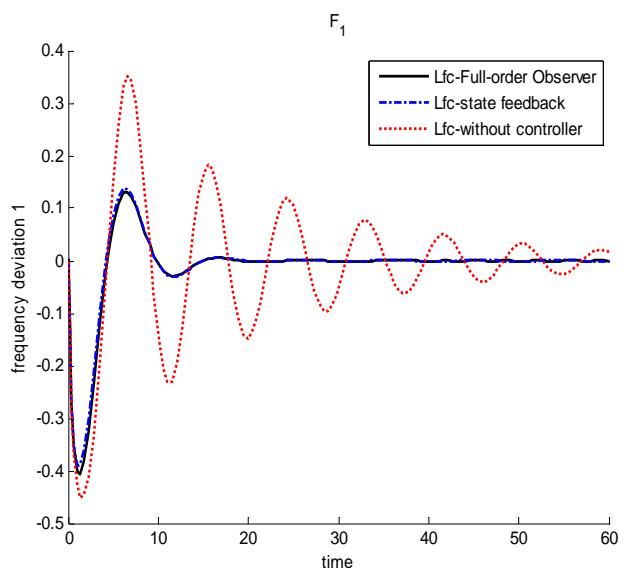
در شکل ۹ مقادیر تولید قراردادی هر واحد تولیدی سیستم را در مقایسه با روش فیدبک خروجی مشاهده می شود.



شکل ۹ : خروجی هر تولید کننده در شبیه سازی دوم در مقایسه با روش فیدبک خروجی (خط ممتد)



شکل ۱۱-الف: پاسخ فرکانسی ناحیه ۱ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتد)



شکل ۱۰-الف: پاسخ فرکانسی ناحیه ۱ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و رویتگر کامل (خط ممتد)

ریزی شده یا $\Delta P_{tie1-2-scheduled}$ همگرا شده تا در نهایت مقدار توان انتقالی $\Delta P_{tie1-2-error}$ در رابطه^(۳) صفر گردد.
يعني:

$$\Delta P_{tie1-2-scheduled} = -0.05 \text{ pu}$$

ج: شبیه سازی سوم:

در این قسمت از شبیه سازی فرض شده که تعدادی از شرکتهای توزیع، مقدار باری خارج از قرارداد مصرفی خود را تقاضا کنند، این تقاضای خارج از قرارداد را که اصطلاحاً تخطی از قرارداد^۱ می نامند، باید به منظور کنترل مستقل ناحیه ای، توسط تولیدکنندگان همان ناحیه ای که در آن تخطی رخداده، پاسخ داده شود. هدف این قسمت از شبیه سازی مشخص کردن دینامیک توان خروجی واحدهای تولیدی و بررسی توانائی روشهای کنترلی ذکر شده در ردیابی تغییرات مربوط به بارهای خارج از قرارداد می باشد. در این قسمت از شبیه سازی میزان تولید هر واحد تولیدی بگونه ای محاسبه می شود که هر افزایش بار و تخطی، در بارهای محلی همان ناحیه منظور شده و توسط تولیدکنندگان همان ناحیه و متناسب با ضریب مشارکت apf آنها جبران شود. لذا، میزان تولید واقعی هر تولید کننده از رابطه (۳۲) محاسبه می شود [۵].

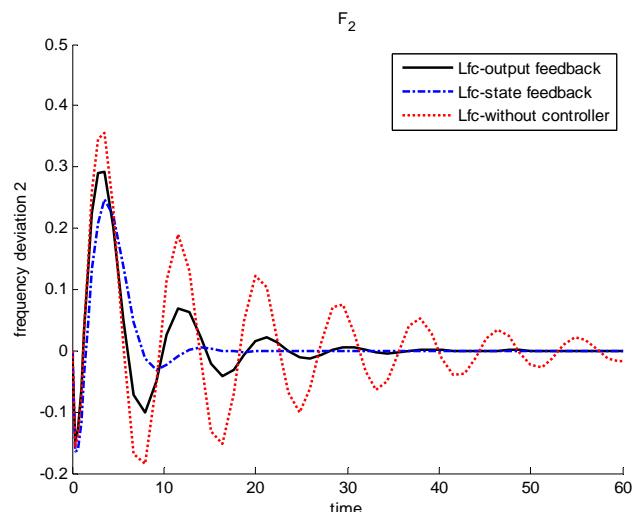
$$\Delta P_{mi} = \sum_j cpf_{ij} \Delta P_{Lj} + apf_i \Delta P_{dn} \quad (32)$$

$$\Delta P_{dn} = \sum_j \Delta P_{dj} \quad (33)$$

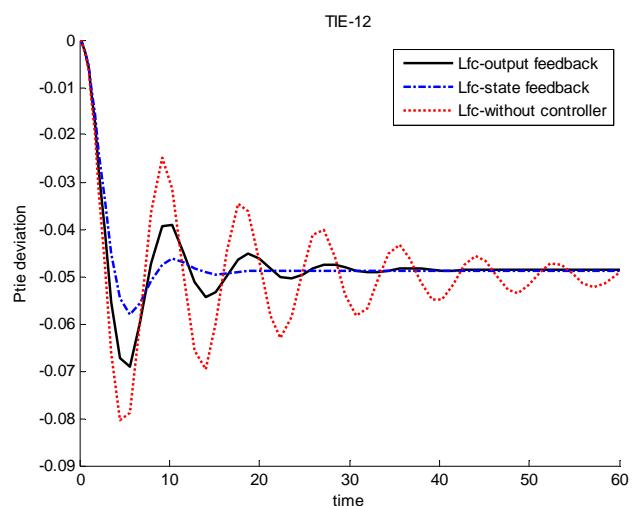
در روابط قبل ΔP_{Lj} تقاضای قراردادی و ΔP_{dj} نیز مربوط به تقاضای خارج از قرارداد شرکت توزیع زام در ناحیه n ام می باشد. این قسمت از شبیه سازی دقیقاً بر اساس فرضیات موجود در شبیه سازی دوم انجام می شود، با این تفاوت که در این قسمت شرکت توزیع ۱ در ناحیه ۱ تغییر بار خارج از قراردادی به اندازه 0.1 pu را به سیستم تحمیل می کند. لذا:

$$\Delta P_{dn} = 0.1 \text{ pu}, \quad n, j = 1$$

لذا به کمک رابطه (۳۲) توان تولیدی محاسبه می گردد(شکل ۱۳):



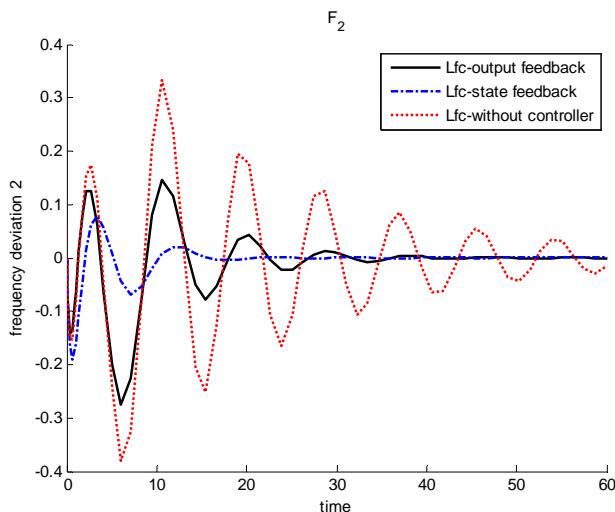
شکل ۱۱-ب: پاسخ فرکانسی ناحیه ۲ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)



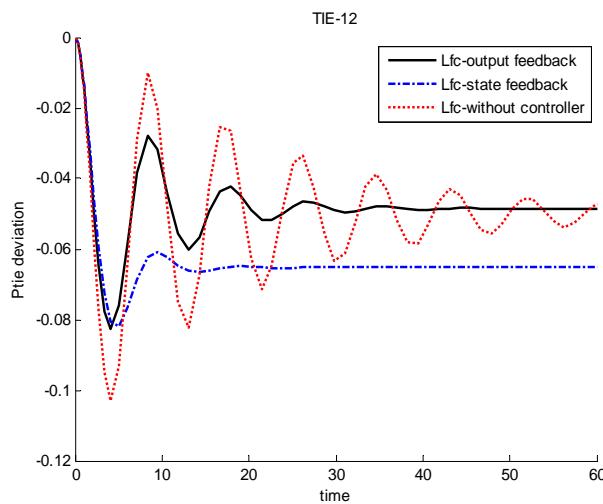
شکل ۱۲: پاسخ توان انتقالی واقعی سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می شود، رفتار سیستم با رویتگر حالت بسیار شبیه رفتار سیستم با فیدبک حالت است. هچمنین بر اساس شکل ۱۱، رفتار دینامیکی مربوط به فیدبک خروجی نیز، هم مدت زمان نشست و هم دامنه نوسانات سیستم بدون کنترلر را کاهش داده است. با توجه به مشاهدات فوق مشاهده می گردد که رفتار دینامیکی روش فیدبک خروجی و روش فیدبک حالت قابل مقایسه می باشند. همچنین با توجه به شکل ۱۲ مشاهده شد که مقدار توان انتقالی واقعی $\Delta P_{tie1-2-actual}$ در حالت ماندگار به مقدار توان انتقالی بین ناحیه ای برنامه

^۱ Contract Violation



شکل ۱۴-ب: پاسخ فرکانسی ناحیه ۲ سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)



شکل ۱۵: پاسخ توان انتقالی واقعی سیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)

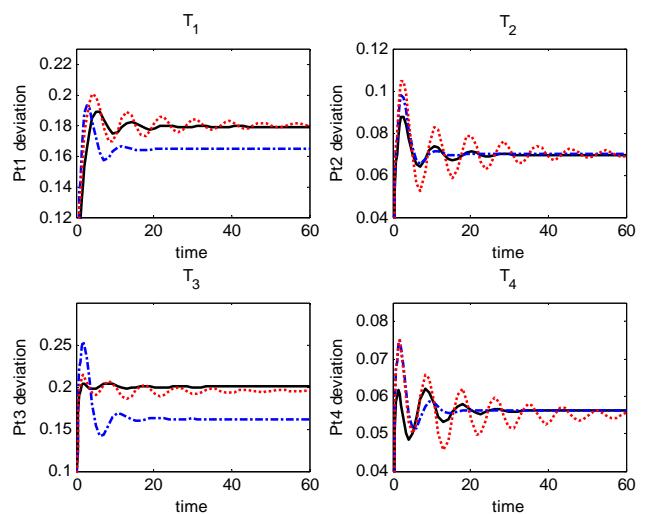
همانطور که در شکل ۱۳ مشخص است با توجه به نمودار مربوط به سیستم بدون کنترلر (نقطه چین)، تولید کنندگان ناحیه ۲ از تغییرات خارج از قرارداد ناحیه ۱ اثری نمی پذیرند و عمل کنترل مستقل ناحیه ای با افزایش تولید کنندگان ۱ و ۲، مطابق رابطه (۳۲) بخوبی انجام می شود.

همچنین با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می شود بعلت وقوع تغییرات بار بیشتر در ناحیه ۱ دامنه نوسانات این ناحیه بیشتر می باشد، ضمن آنکه رفتار دینامیکی روش فیدبک خروجی در مقایسه با روش فیدبک حالت همچنان مناسب و خوب می باشد. نکته مهم در این قسمت از شبیه سازی مربوط به

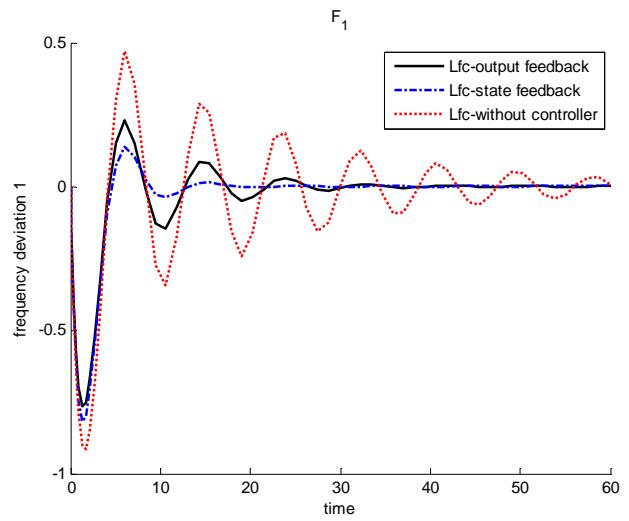
$$\Delta P_{m1} = 0.105 + (0.75 \times 0.1) = 0.18 \text{ pu MW}$$

$$\Delta P_{m2} = 0.045 + (0.25 \times 0.1) = 0.07 \text{ pu MW}$$

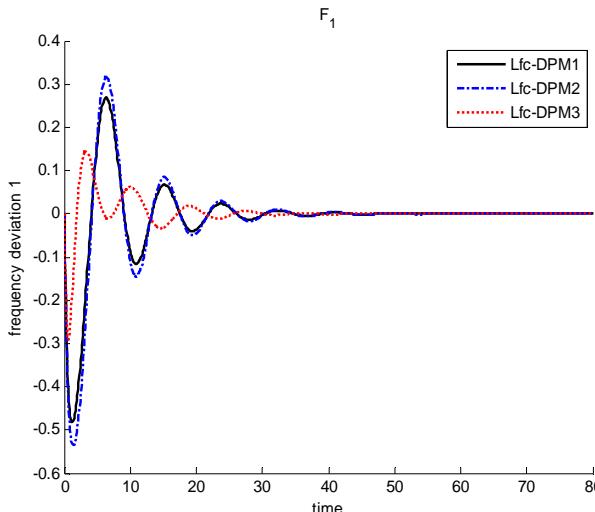
$$\Delta P_{m3} = 0.195 \text{ pu MW}, \Delta P_{m4} = 0.055 \text{ pu MW}$$



شکل ۱۳: خروجی هر تولید کننده در شبیه سازی سوم در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و روش فیدبک خروجی (خط ممتدا)



شکل ۱۴-الف: پاسخ فرکانسی ناحیه اسیستم (نقطه چین) در مقایسه با فیدبک حالت (خط و نقطه) و فیدبک خروجی (خط ممتدا)



شکل ۱۶: پاسخ فرکانسی سیستم به ازای ماتریس های مشارکت متفاوت

با توجه به ماتریس های مشارکت فرض شده و توضیحات بخش ۲، به ازای ماتریس های DPM_1 و DPM_2 توان از ناحیه دو به یک و به ازای ماتریس DPM_3 توان از ناحیه یک به دو منتقل می شود. نتیجه این شبیه سازی به ازای این سه ماتریس مشارکت مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است و مشخص است که تغییرات فرکانس سیستم به ازای ماتریس DPM_3 محسوس تر می باشد، چرا که جهت انتقال توان در این ماتریس نسبت به دو ماتریس دیگر عوض شده است. بر این اساس اثر تغییر ماتریس مشارکت بر روی نوسانات گذرای فرکانس سیستم، تنها در صورتیکه تغییری در جهت انتقال توان از یک ناحیه به ناحیه دیگر صورت نگیرد، ناچیز خواهد بود.

۷- نتیجه گیری:

در این مقاله سعی شد که با دیدگاهی واقع بینانه و عملی به بررسی مساله کنترل بار- فرکانس در فضای تجدید ساختار شده در صنعت برق پرداخته شود. در این مساله، توجه به دو نکته بیشتر حائز اهمیت می باشد. نکته اول در نظر گرفتن عدم دسترسی به برخی از متغیرهای حالت سیستم بوده و نکته دوم به جهت وجود قیود بازار، توجه به قدرت روشهای پیشنهادی در ردیابی تغییرات بارها می باشد. لذا با بکارگیری روش فیدبک خروجی به نحو مطلوبی نیازهای مساله کنترل بار- فرکانس در فضای رقابتی بازار پاسخ داده شده است. در روش فیدبک خروجی از آنجائی

مقاومت خوب روش فیدبک خروجی در برابر تغییرات بارهای غیر قراردادی نسبت به سایر روشهای قبل می باشد. همانطور که در شکلهای ۱۳ و ۱۵ مشاهده می شود، با بروز تغییر باری خارج از قرارداد، تنظیمات مربوط به روشهای فیدبک حالت و رویتگرهای حالت دچار مشکل شده و کار ردیابی تغییرات بار بخوبی انجام نمی شود، در حالیکه به کمک روش فیدبک خروجی، در زمان تخطی از قرارداد و یا تغییرات ناگهانی و پیش بینی نشده بار، نیازی به تنظیم مجدد گین این کنترلر نمی باشد و خطای حالت ماندگار در خروجی ژنراتورها نسبت به مقادیر مطلوب، بسیار ناچیز میباشد و این نشانگر قدرت روش فیدبک خروجی در ردیابی مناسب تغییرات ورودی سیستم می باشد. از آنجائی که هر گونه تغییرات مربوط به بارهای ناحیه ای و خارج از قرارداد توسط تولیدکنندگان همان ناحیه جبران می شود، مطابق شکل ۱۵ میزان توان انتقالی بین ناحیه، حتی بعد از وجود خطا تغییری نداشته و همچنان مشابه مقدار شبیه سازی دوم می باشد.

۶- بررسی اثر تغییر ماتریس مشارکت توزیع بر دینامیک فرکانس سیستم:

در فضای رقابتی بازار، ماتریس مشارکت توزیع بر اساس قراردادهای بازار تعیین می گردد و از آنجائی که با تغییر این قراردادها، ماتریس مشارکت نیز تغییر می کند، شاهد بروز تغییراتی در توان تولیدی واحدها مطابق با این قراردادها خواهیم بود. در این قسمت با انتخاب چند ماتریس مشارکت فرضی به بررسی اثر تغییرات قراردادهای بازار بر روی دینامیک فرکانس سیستم می پردازیم.

$$DPM_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0.25 & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 1 & 0.7 \\ 0.3 & 0.25 & 0 & 0 \end{bmatrix}, DPM_2 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.0 & 0.2 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.3 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0.3 & 0.7 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$DPM_3 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0.4 & 0.2 \\ 0.2 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}$$

- [5] H. Bevrani, Y. Mitani, and K. Tsuji, "Robust Decentralized LFC Design In a Deregulated Environment", IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004) April 2004.
- [6] H. Shayeghi , H. A. Shayanfar and O. P. Malik," Robust Decentralized Neural Networks Based LFC in a Deregulated Power System", Electric Power Systems Research, vol. 77, pp 241–251 , April 2007.
- [7] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar and A. Jalili , "Multi-Stage Fuzzy PID Power System Automatic Generation Controller in Deregulated Environments", Energy Conversion and Management, vol. 47, pp 2829–2845, May 2006.
- [8] A. Khaki Sedigh, " Modern Control Systems ", University of Tehran Press, 2003.
- [9] F.L. Lewis and V.L. Syrmos, "Optimal Control", 1995.
- [10] D . Rerkpreedapong , and A . Feliachi, " Decentralized Load Frequency Control for Load Following Services" , IEEE Digital Object Identifier (10.1109/PESW .2002.985217), vol. 2, pp.1252–1257, Jan. 2002.

ضمیمه :

پارامترها و اطلاعات مربوط به سیستم مورد بررسی مطابق
جداول زیر می باشد:

GenCos Parameter	Area ₁		Area ₂	
	GenCo ₁	GenCo ₂	GenCo ₃	GenC ₀₄
$T_T(s)$	0.32	0.30	0.03	0.32
$T_G(s)$	0.06	0.08	0.06	0.07
R (Hz/pu)	2.4	2.5	2.5	2.7

جدول ۱: پارامترهای واحدهای تولیدی

Control area parameters	Area ₁	Area ₂
K_P (pu/Hz)	102	102
T_P (s)	20	25
B (pu/Hz)	0.425	0.3966
T_{ij} (pu/Hz)		0.245

جدول ۲: پارامترهای مربوط به سیستم قدرت و ناحیه کنترلی

که تنها از حالتهای قابل اندازه گیری در سیستم استفاده شده است دیدگاهی عملی و کاربردی به مساله داده شده، ضمن آنکه بر اساس شبیه سازی های انجام گرفته، برتری و مزیت این روش در بهبود منطقی رفتار دینامیکی سیستم و مقاومت در برابر تغییرات بارهای خارج از قرارداد و پیش بینی نشده و عدم نیاز به تنظیم مجدد در این شرایط مشخص گردید. توجه شود که پاسخ دینامیکی مربوط به روشهای مبتنی بر فیدبک حالت، به جهت دسترسی به تمامی متغیرها همواره بهتر می باشد، اما در ردیابی تغییرات بارها با توجه به ساختار خاص مدل بکار رفته و وجود ورودی اغتشاش ΔP_d ، در روشهای مبتنی بر فیدبک حالت ناکارآئی مشاهده می شود. در واقع بروز تغییرات غیر قابل پیش بینی، امری مهم و غیر قابل اجتناب است و در شرایط قراردادهای بازار، خروجی واحدهای شرکت کننده در بازار باید همواره قراردادها را بر آورده سازند و مطابق با قسمت شبیه سازی سوم، دقت در تنظیم خروجی واحدهای تولیدی و ردیابی مناسب تغییرات بار بکمک روش پیشنهادی در مساله کنترل بار - فرکانس چشم گیر بوده و نیاز به الگوریتمهای تطبیقی رفع می گردد. ضمن آنکه بکارگیری روشهایی که از انواع تخمینگر نیز در آنها استفاده می شود[10]، موجب بالا رفتن درجه سیستم، حجم محاسبات و افزایش هزینه ها خواهد شد.

مراجع:

- [1] H. Saadat, " Power System Analysis ". USA: McGraw- -Hill; 1999.
- [2] J. Kumar, Kah-Hoe Ng and G. Sheble, " AGC Simulator for Price-based Operation Part 1: A Model", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 2, May 1997.
- [3] J. Kumar, Kah-Hoe Ng, G. Sheble, "AGC Simulator for Price-based Operation Part 2: Case Study Results " , IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12, no. 2, May 1997.
- [4] V. Donde, A. Pai and I. A. Hiskens, "Simulation and Optimization in a LFC System after Deregulation", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, no. 3, pp. 481–489, Aug 2001.