

مقایسه روش‌های سنتی و مدرن میراسازی نوسانات توان و فرکانس در سیستم قدرت تجدید ساختار یافته

ناصر مهدوی طباطبائی
مؤسسه آموزش عالی سراج
تبریز - ایران

محمد رضا فیضی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر
دانشگاه تبریز - ایران

نوید تقی‌زادگان
مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی
آذربایجان - ایران

واژه‌های کلیدی: پاسخ دینامیکی، AGC، TCPS، کنترل فازی، تجدید ساختار، مدل‌سازی

چکیده

صنعت برق، انرژی الکتریکی به عنوان یک کالا شناخته شده است. لذا حفظ کیفیت آن نیز اهمیت بسیار پیدا کرده است. نوسانات ممتد ناشی از تغییر بار در شبکه می‌تواند موجب ناپایداری شبکه، کاهش کیفیت توان، رزونانس در شبکه، افزایش تلفات، اختلال در کار دستگاه‌های سنکرون با فرکانس شبکه (مثل کارخانجات نساجی) و غیره شود. لذا مقابله با این نوسانات اهمیت فوق‌العاده‌ای را دارد. بعلاوه در یک محیط تجدیدساختار شده هر گونه کنترل سیستم قدرت از قبیل کنترل فرکانس به عنوان یک سرویس جانبی منظور می‌شود. بنابراین پایداری نوسانات فرکانس در یک سیستم قدرت به هم پیوسته در محیط‌های رقابتی آتی جای کار بسیار دارد.

۱- مقدمه

بررسی منابع نشان می‌دهد که در خصوص استفاده از TCPS برای بهبود پایداری دینامیکی و گذرای سیستم‌های قدرت کارهای زیادی صورت نگرفته است. در خصوص استفاده از TCPS به‌طور سری با خطوط تبادلی برای بهبود پاسخ دینامیکی AGC در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته نیز کارهای بسیار کمی اجرا شده است. شاید Ngamroo [۱] محقق باشد که بیشترین کارها را در زمینه استفاده از TCPS

امروزه مصرف‌کننده‌های متنوع با مصرف توان زیاد، سریع و پالسی از قبیل حمل و نقل تعلیق مغناطیسی، شتاب‌دهنده‌های پرفرمت، آزمایشگاه‌های شکست هسته‌ای و سایر موارد کاربرد و صنعتی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته‌اند. تحت چنین شرایطی اینرسی ژنراتورها به سختی می‌تواند نوسانات فرکانسی را جذب کند. بعلاوه هنگامی که یک کارخانه فولاد با تقاضای مصرف بسیار زیاد در یک سیستم قدرت کوچک تأسیس می‌شود می‌تواند نوسانات فرکانسی جدی به وجود آورد. تحقیقات نشان می‌دهد که به دنبال یک تغییر ناگهانی در توان در یک سیستم قدرت به هم پیوسته، فرکانس نواحی کنترل و توان خطوط تبادلی دچار نوسانات می‌شود که حتی با کنترل انتگرالی گاورنر بهینه‌سازی شده مستهلک شدن آن مدت زمان طولانی ادامه دارد. البته ویژگی‌های غیرخطی سیستم قدرت نیز این مسئله را تشدید می‌کند. قبل از تجدیدساختار، بار هر ناحیه معمولاً توسط نیروگاه‌های همان ناحیه تأمین می‌شد ولی پس از آن تبادل توان بین نواحی کنترل مختلف در اثر معاملات آزاد افزایش یافته و در نتیجه مسأله نوسانات فرکانس و توان تبادلی جدی‌تر شده است. از طرف دیگر، امروزه با تجدیدساختاری

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

بزرگ با خواص غیرخطی گوناگون بوده و در یک محیط تجدیدساختار شده تحت اغتشاشات شدید بار ناشی از معاملات چندجانبه در بازارهای برق قرار داشته باشد. با توجه به سابقه امر در این مقاله استفاده از TCPS پیشنهاد شده و برای بهبود هر چه بیشتر پاسخ دینامیکی آن نیز استفاده از روش کنترل فازی مورد آزمایش قرار داده شده و نتایج قابل قبولی از آن حاصل می‌شود.

۲- مدل‌سازی جزئی توان معاوضه‌ای با در نظر گیری TCPS

شکل ۱ یک سیستم قدرت دوناحیه‌ای و چند ماشینه را نشان می‌دهد که به وسیله یک خط ارتباطی به هم متصل شده‌اند و یک دستگاه TCPS به طور سری با خط ارتباطی و در مجاورت ناحیه کنترل m قرار داده شده است. در اینجا از مقاومت خط ارتباطی صرف نظر می‌شود. ناحیه‌های کنترل m و n می‌توانند از واحدهای غیربازحرارتی، بازحرارتی، و یا آبی تشکیل شده باشند. می‌توان نشان داد جریان توان معاوضه‌ای جزئی، از ناحیه m به ناحیه n می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۶]:

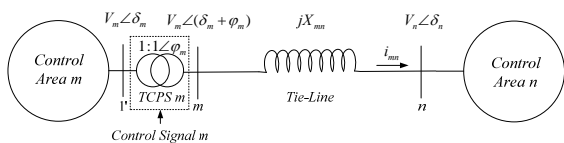
$$\Delta P_{tie-m,n}(s) = \frac{2\pi T_{mn}}{s} [\Delta F_m(s) - \Delta F_n(s)] + T_{mn} \Delta \varphi_m(s) \quad (1)$$

معادله اخیر نشان می‌دهد جریان توان معاوضه‌ای می‌تواند به وسیله زاویه شیفت‌دهنده فاز $\Delta \varphi_m$ کنترل شود. زاویه شیفت‌دهنده فاز $\Delta \varphi_m(s)$ می‌تواند به صورت زیر نمایش داده شود [۷]:

$$\Delta \varphi_m(s) = \frac{K_{\varphi m}}{1 + sT_{PSm}} \Delta Error_m(s), \quad m = 1, \dots, N_{Control Area} \quad (2)$$

که در آن T_{PSm} و $K_{\varphi m}$ به ترتیب بهره و ثابت زمانی TCPS هستند که در مجاورت ناحیه m قرار داده می‌شود و $N_{Control Area}$ تعداد کل نواحی کنترل می‌باشد. بنابراین معادله (۱) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

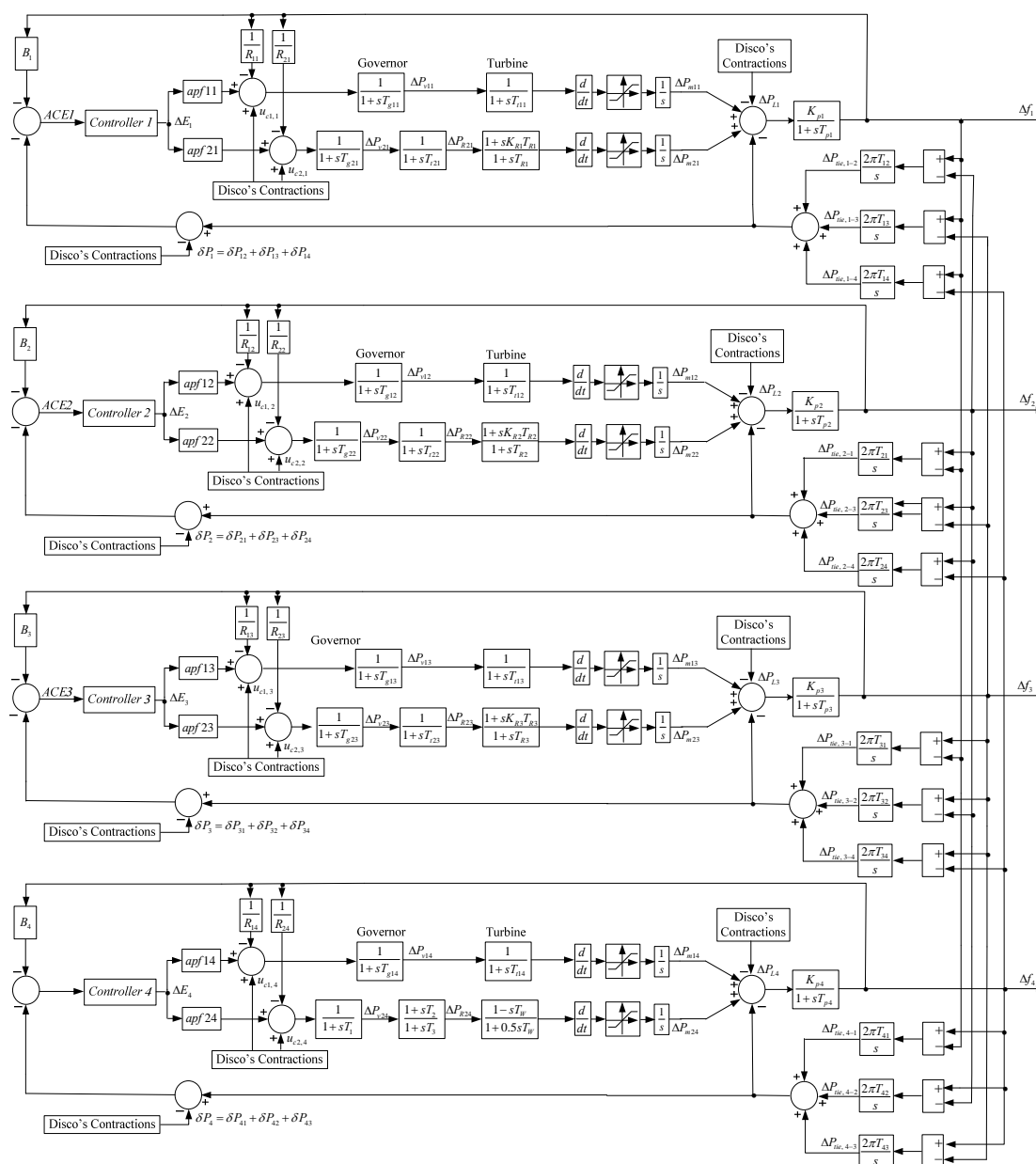
$$\Delta P_{tie-m,n}(s) = \frac{2\pi T_{mn}}{s} [\Delta F_m(s) - \Delta F_n(s)] + T_{mn} \frac{K_{\varphi m}}{1 + sT_{PSm}} \Delta Error_m(s) \quad (3)$$



شکل ۱- یک سیستم قدرت با دو ناحیه و یک دستگاه TCPS در مجاورت ناحیه کنترل m

به منظور بهبود پاسخ دینامیکی AGC ارائه کرده است. Ngamroo ابتدا در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ساده به مدل‌سازی TCPS پرداخته و از یک کنترل کننده H_{∞} با درجه نسبتاً بزرگی استفاده کرده است که در عمل تحقق آن بسیار مشکل است. سپس Ngamroo [۳,۲] پیشنهاد استفاده از سیستم SMES را به منظور بهبود عملکرد دینامیکی AGC ارائه کرده و در کنار آن نیز به سیستم TCPS تنها به عنوان یک وسیله کمکی نگریسته است. از آنجائی که سیستم‌های SMES بسیار گران قیمت هستند و نصب آنها به تعداد زیاد از نظر عملی و اقتصادی میسر نیست لذا این پیشنهاد ایشان نیز به طور گسترده قابل استفاده نخواهد بود. سپس Rasolomampionona [۴] استفاده از TCPS را به تنهایی مجدداً برای کنترل توان و فرکانس در خطوط تبادلی سیستم‌های قدرت به هم پیوسته مطرح کرده و کار جدید دیگری صورت نداده است. در ادامه Abraham با تأکید بر بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌های انتگرالی در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ساده از TCPS به منظور بهبود عملکرد دینامیکی AGC استفاده کرده و کار اضافی دیگری نیز در اینجا ارائه نشده است [۵]. Menniti استفاده از ادوات FACTS را به منظور بهبود عملکرد کنترل بار فرکانس پیشنهاد کرده است. به عقیده او ادوات FACTS می‌توانند پخش توان را در خطوط انتقال کنترل کرده و همچنین پایداری گذرا و دینامیکی را بهبود بخشند. Menniti پیشنهاد استفاده از SSSC را در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای ساده ارائه کرده و آن را به صورت یک منبع ولتاژ به طور سری با خط تبادلی مدل‌سازی و برای کنترل آن نیز از روش کنترل بهینه استفاده کرده است. نکات ضعف روش پیشنهادی ایشان نیاز به اطلاع دقیق از پارامترهای کل سیستم قدرت بوده و با تغییر این پارامترها پاسخ دینامیکی مطلوبی حاصل نمی‌شود. بنابراین اطلاعات در دسترس نشان می‌دهد که تنها در مقالات معدودی استفاده از ادوات FACTS و علی‌الخصوص TCPS به منظور بهبود پاسخ دینامیکی AGC مورد تحقیق و تفحص واقع شده و بر روی استفاده از ویژگی‌های سیستم‌های کنترل فازی نیز تاکنون برای کنترل TCPS کار زیادی نشده است. به ویژه اگر سیستم قدرت مورد نظر چندناحیه‌ای و چندماشینه نسبتاً

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۳- مدل بلوک دیاگرام سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای و چند ماشینه کاملاً به هم پیوسته در یک محیط تجدید ساختار شده

هم پیوسته را در یک محیط تجدید ساختار شده نشان می‌دهد.

در این شکل به ازای $i=1,2$ و $j,k=1,\dots,4$ داریم:

Δf_j : انحراف فرکانسی ناحیه کنترل j بر حسب Hz

ΔP_{mij} : تغییر در توان خروجی توربین i در ناحیه کنترل j

ΔP_{vij} : تغییر در سیگنال خروجی گاورنر i در ناحیه کنترل j

ΔP_{Rij} : توان میانی

$\Delta P_{ie,j-k}$: تغییر در توان معاوضه‌ای بین نواحی کنترل j و k

ΔE_j : تغییر در خروجی کنترل‌کننده در ناحیه کنترل j

۳- سیستم قدرت تحت بررسی

سیستم قدرت تحت بررسی که در شکل ۲ نشان داده شده دارای چهار ناحیه کنترل و به شکل کاملاً به هم پیوسته است. هر ناحیه کنترل دارای دو جنکو و دو دیسکو است. به این ترتیب یک سیستم قدرت که تا حدود زیادی به واقعیت و عمل نزدیک بوده و کاربردی‌تر است ایجاد شده است. شکل ۳ مدل بلوک دیاگرام بر اساس تابع انتقال به ازای تغییرات کوچک برای سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای و چند ماشینه به

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$d(t) = [\Delta P_{L1} \ \Delta P_{L2} \ \Delta P_{L3} \ \Delta P_{L4}]^T \quad (7)$$

که در همه آنها Δ دلالت بر انحراف هر متغیر از مقدار نامی خود را دارد. سیگنال ACE_j سیگنال ورودی کنترل‌کننده در ناحیه کنترل j بوده و می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$ACE_j = B_j \Delta f_j + \sum_{k=1, k \neq j}^4 \Delta P_{tie, j-k} - \delta P_j \text{ and } j=1, \dots, 4 \quad (8)$$

که در آن B_j ثابت بایاس فرکانسی یا تنظیم بایاس برای ناحیه کنترل j بوده و می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$B_j = R_{j,eq}^{-1} + D_j \quad (9)$$

در رابطه اخیر D_j پارامتر وابستگی فرکانسی بارهای ناحیه کنترل j برحسب $pu \text{ MW per Hz}$ بوده و $R_{j,eq}^{-1}$ پارامتر تنظیم سرعت گاورنر بر حسب $Hz \text{ per unit}$ بوده و می‌تواند از رابطه زیر حاصل شود:

$$R_{j,eq}^{-1} = \sum_{i=1}^m R_{ij}^{-1} \quad (10)$$

که در آن m تعداد جنکوها در هر ناحیه کنترل j می‌باشد. از آنجائی که جنکوه‌های زیادی در هر ناحیه کنترل وجود دارد، سیگنال ACE_j بایستی بین آنها متناسب با مشارکتشان در AGC توزیع شود. ضرائبی که ACE_j را بین چندین جنکو توزیع می‌کند تحت عنوان ضرائب مشارکت ACE (apfs) نامیده می‌شوند. توجه کنید که در هر ناحیه کنترل داریم:

$$\sum_{i=1}^m apf_{ij} = 1 \quad (11)$$

که در آن m تعداد جنکوها در هر ناحیه کنترل j می‌باشد.

۵- کنترل‌کننده‌های مختلف

در اینجا اثر استفاده از کنترل‌کننده‌های مختلف سنتی و مدرن به شرح زیر مورد بررسی واقع می‌شود.

۵-۱- کنترل‌کننده انتگرالی بهینه [۸]

استراتژی کنترل سنتی برای مسئله AGC استفاده از انتگرال

ΔP_{Lj} : تغییر در تقاضای بار ناحیه کنترل j

$u_{ci,j}$: سیگنال فرمان گاورنر i در ناحیه کنترل j

R_{ij} : ثابت تنظیم گاورنر i در ناحیه کنترل j بر حسب

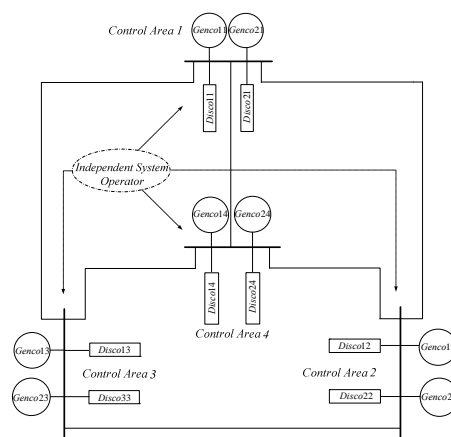
$Hz / pu \text{ MW}$

T_{gij} : ثابت زمانی گاورنر i در ناحیه کنترل j بر حسب ثانیه

T_{tij} : ثابت زمانی توربین i در ناحیه کنترل j بر حسب ثانیه

T_{pj} : ثابت زمانی سیستم قدرت j بر حسب ثانیه

K_{pj} : بهره معادل ناحیه کنترل j



شکل ۲- سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای و چند ماشینه کاملاً به هم پیوسته در یک محیط تجدید ساختار شده

۴- مدل‌سازی سیستم قدرت تحت بررسی [۷]

کل این سیستم قدرت چند ناحیه‌ای و چند ماشینه را می‌توان به صورت یک سیستم چند متغیره به شکل زیر مدل‌سازی کرد:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ld(t) \quad (4)$$

که در آن A ماتریس سیستم، B و L به ترتیب ماتریس‌های ورودی و اغتشاش، $x(t)$ ، $u(t)$ ، و $d(t)$ به ترتیب بردارهای حالت، کنترل، و تغییر بار به شرح زیر هستند:

$$x(t) = [AA_{m11} \ \Delta P_{v11} \ \Delta P_{m21} \ \Delta P_{R21} \ \Delta P_{v21} \ \Delta f_1 \ \Delta P_{m12} \ \Delta P_{v12} \ \Delta P_{m22} \ \Delta P_{R22} \ \Delta P_{v22} \ \Delta f_2 \ \Delta P_{m13} \ \Delta P_{v13} \ \Delta P_{m23} \ \Delta P_{R23} \ \Delta P_{v23} \ \Delta f_3 \ \Delta P_{m14} \ \Delta P_{v14} \ \Delta P_{m24} \ \Delta P_{R24} \ \Delta P_{v24} \ \Delta f_4] \quad (5)$$

$$\Delta P_{tie,1-2} \ \Delta P_{tie,1-3} \ \Delta P_{tie,1-4} \ \Delta P_{tie,2-3} \ \Delta P_{tie,2-4} \ \Delta P_{tie,3-4} \ \Delta E_1 \ \Delta E_2 \ \Delta E_3 \ \Delta E_4]$$

$$u(t) = [u_{c1,1} \ u_{c2,1} \ u_{c1,2} \ u_{c2,2} \ u_{c1,3} \ u_{c2,3} \ u_{c1,4} \ u_{c2,4}]^T \quad (6)$$

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول ۱- بهره‌ی انتگرالی بهینه و تابع هزینه‌ی کمینه‌ی متناظر به ازای شاخص عمل‌کرد ITSE برای کلیه‌ی نواحی کنترل سیستم قدرت اصلی

شماره ناحیه	$J_{\min} = \int t.e^2 dt$	K_{opt}
ناحیه‌ی کنترل ۱	۱/۴۴۹۹	۰/۵۲۵۰
ناحیه‌ی کنترل ۲	۱/۴۲۶۹	۰/۴۴۰۰
ناحیه‌ی کنترل ۳	۰/۱۹۵۴	۰/۲۱۲۵
ناحیه‌ی کنترل ۴	۰/۳۱۱۷	۰/۸۶۰۰

۵-۳- استفاده از TCPS

در اینجا برای نیل به مقصود در دو انتهای هر خط تبدیلی بین نواحی کنترل یک سیستم TCPS قرار داده می‌شود. مشخصات TCPS به کار رفته در شبیه‌سازی‌ها در جدول ۲ داده شده است [۶]. در اینجا در هر لحظه از زمان تنها یکی از TCPSهای متصل شده به دو انتهای خط تبدیلی کار خواهد کرد به طوری که این TCPS فعال بستگی به جهت توان تبدیلی در هر خط انتقال داشته و قانون عمل‌کرد هر کدام از دو TCPS متصل شده به دو انتهای هر خط تبدیلی بر اساس شرط زیر تعیین می‌شود:

$$\text{if } \Delta P_{ie-i,j} > 0 \Rightarrow TCPS_i \text{ works \& } TCPS_j \text{ don't work } i, j = 1, \dots, 4 \text{ \& } i \neq j$$

جدول ۲: مشخصات TCPS بکار برده شده در شبیه‌سازی‌ها

T_{PS}	K_{ϕ}	ϕ_{\max}	ϕ_{\min}
0.1 s	1.5 rad / Hz	10°	-10°

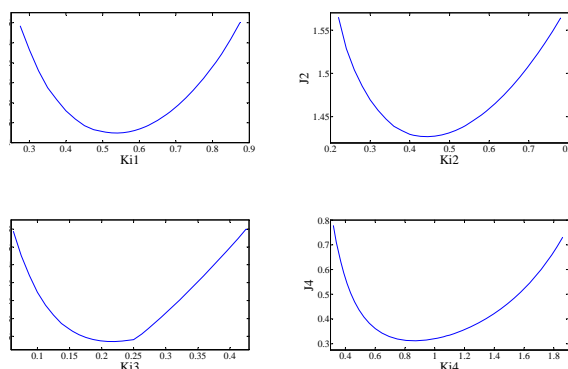
۵-۴- استفاده از TCPS با کنترل فازی [۹، ۱۰]

انحراف فرکانسی هر ناحیه کنترل i (Δf_i) می‌تواند به عنوان سیگنال کنترل برای واحد TCPS مجاور به کار برده شود که زاویه‌ی شیف‌دهنده فاز TCPS را کنترل می‌کند و آن هم به نوبه‌ی خود جریان توان معاوضه‌ای را کنترل می‌نماید. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\Delta \phi_i(s) = \frac{K_{\phi i}}{1 + sT_{PSi}} \Delta f_i(s) \quad , \quad i = 1, \dots, 4 \quad (24)$$

با استفاده از یک کنترل‌کننده‌ی منطق فازی (FLC) مناسب برای کنترل هر واحد TCPS، عملکرد دینامیکی سیستم قدرت به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد. طراحی کنترل‌کننده‌ی منطق فازی مطلوب همانند کنترل‌کننده‌ی انتگرالی فازی است [۴].

خطای کنترل ناحیه (ACE) به عنوان سیگنال کنترل است. یک کنترل‌کننده‌ی انتگرالی انحراف حالت پایدار صفر را فراهم می‌کند اما عمل‌کرد دینامیکی ضعیفی را از خود نشان می‌دهد. عمل‌کرد دینامیکی سیستم AGC بستگی زیادی به بهره‌ی کنترل‌کننده‌ی انتگرالی دارد و بهینه‌سازی آن دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشد. برای بهینه‌سازی بهره‌ی کنترل‌کننده‌ی انتگرالی به ازای ۲٪ از تغییر بار نامی در هر ناحیه و در حالی که سایر نواحی بدون کنترل فرض می‌شوند بهینه‌سازی‌ها اجرا می‌شود. منحنی‌های بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده‌های انتگرالی در شکل ۴ و نتایج عددی حاصل شده برای بهره‌ی بهینه به علاوه تابع هزینه کمینه در جدول ۱ داده شده است.



شکل ۴- بهینه‌سازی بهره‌ی کنترل‌کننده‌ی انتگرالی با استفاده از تابع هزینه‌ی انتگرال حاصل ضرب زمان در مربع خطا (ITSE)

۵-۲- کنترل‌کننده‌ی انتگرالی بهینه با سیگنال کمکی فازی

پیشنهادی [۸]

تحقیقات نشان می‌دهد که سیستم‌های کنترل منطق فازی به خوبی با سیستم‌های غیرخطی کار می‌کنند. عرض مرده‌ی گاورنر، قید نرخ تولید (GRC)، و اثر بویلر از خواص غیرخطی اصلی سیستم‌های قدرت از نقطه نظر کنترل بار فرکانس هستند که طراحی سیستم کنترل را با مشکل مواجه می‌سازند. در این مقاله با استفاده از تکنیک کنترل فازی یک سیگنال کمکی فازی به سیگنال کنترل انتگرالی بهینه افزوده می‌شود به طوری که پایداری سیستم قدرت و مشخصه‌های پاسخ دینامیکی آن بهبودی قابل ملاحظه‌ای را حاصل نماید.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

۶- سناریوهای مختلف کارکرد سیستم قدرت

تبادل توان بین نواحی کنترل مختلف در سیستم‌های قدرت جدید و بازارهای برق نوظهور به منظور خرید و فروش آزادانه انرژی افزایش یافته است. از طرف دیگر، اجرای معاملات دو جانبه بازار برق باید به طور منسجم بوده و از ایجاد آشفتگی اجتناب شود. در این راستا سه ماتریس مبادله و خرید و فروش توان برای معاملات چند جانبه پیشنهاد شده است که در سیستم‌های سنتی روشی برای تبادل توان بوده و نقطه کار سیستم را مشخص می‌نماید و در سیستم‌های قدرت تجدیدساختار شده جدید نیز می‌تواند معامله‌های لازم و رایج را بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان انرژی برق مشخص کند. نخست ماتریس معامله داخلی تعریف شده است که معاملات داخل هر ناحیه را سروسامان می‌دهد و به نام ماتریس معاملات داخلی یا خودی^۱ (SCM) نامیده شده است. معاملات بین ناحیه‌ای به وسیله ماتریس دوم منظم می‌شود که ماتریس معاملات متقابل یا بین‌ناحیه‌ای^۲ (MCM) نامیده شده است. به منظور ایجاد انسجام و هماهنگی بین کلیه معاملات، از ترکیب آنها ماتریس سوم و بزرگتری موسوم به ماتریس معاملات کلی یا فراگیر^۳ (TBCM) به دست آمده است. این ماتریس‌ها به خوبی قادر به اجرا و پیاده‌سازی کلیه معاملات چند جانبه در هر سیستم قدرت هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نیز مؤید این مسئله است. در یک سیستم قدرت بسته به اینکه توان مصرفی هر دیسکو متعلق به یک ناحیه کنترل، توسط جنکوه‌های کدام ناحیه کنترل تأمین می‌گردد و یا اینکه هر جنکو یا دیسکو تا چه حد نسبت به اجرای تعهدات خود پای‌بند است سناریوهای کارکرد مختلفی می‌تواند پیش آید که در زیر به آنها اشاره می‌شود [۱۲، ۱۱].

۶-۱- سناریوی اول: معاملات درون ناحیه‌ای

معاملات درون ناحیه‌ای تنها در داخل نواحی کنترل صورت می‌گیرد. دیسکوها توان را از جنکوهائی می‌خرند که در همان ناحیه کنترل قرار دارند. چنین معاملاتی منجر به

تغییر در توان معاوضه‌ای در حالت پایدار نمی‌شوند. در سیستم قدرت مورد بررسی چهار ماتریس معامله خودی و ۱۲ ماتریس معامله متقابل وجود دارد. بنابراین ماتریس معامله کلی یا TBCM با ۱۶ عضو می‌تواند چنین نوشته شود:

$$TBCM = \begin{bmatrix} SCM_{11} & MCM_{12} & MCM_{13} & MCM_{14} \\ MCM_{21} & SCM_{22} & MCM_{23} & MCM_{24} \\ MCM_{31} & MCM_{32} & SCM_{33} & MCM_{34} \\ MCM_{41} & MCM_{42} & MCM_{43} & SCM_{44} \end{bmatrix}$$

فرض کنید که TBCM به صورت زیر بیان شود که در آن کلیه عناصر برحسب درصد هستند:

$$TBCM = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{21} & D_{12} & D_{22} & D_{13} & D_{23} & D_{14} & D_{24} \\ G_{11} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{21} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{12} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{22} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{13} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{23} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \\ G_{14} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \\ G_{24} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

از آنجائی که کلیه ماتریس‌های غیرقطری صفر هستند می‌توان نتیجه گرفت که معاملات تنها بین دیسکوها و جنکوه‌های واقع در داخل نواحی کنترل صورت می‌گیرد و هیچ‌گونه معامله بین ناحیه‌ای وجود ندارد. همچنین مقادیر عددی ماتریس‌های معامله خودی معرف آن است که هر دیسکو واقع در یک ناحیه کنترل، توان مورد نیاز خود را به طور برابر از کلیه دیسکوه‌های آن ناحیه کنترل خریداری می‌نماید. بعلاوه فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\Delta P_{L-1,1} = \Delta P_{L-2,1} = \Delta P_{L-1,2} = \Delta P_{L-2,2} = \Delta P_{L-1,3} = \Delta P_{L-2,3} = 0.01 MW$$

$$\Delta P_{L-1,4} = \Delta P_{L-2,4} = 0.005 MW$$

با استفاده از ماتریس معامله کلی نتایج زیر حاصل می‌شود:

$$\delta P_1 = \delta P_2 = \delta P_3 = \delta P_4 = 0$$

$$\Delta P_{L1} = \Delta P_{L2} = \Delta P_{L3} = 0.02 \text{ p.u.MW}, \Delta P_{L4} = 0.01 \text{ p.u.MW}$$

$$u_{c1,4} = u_{c2,4} = 0.005$$

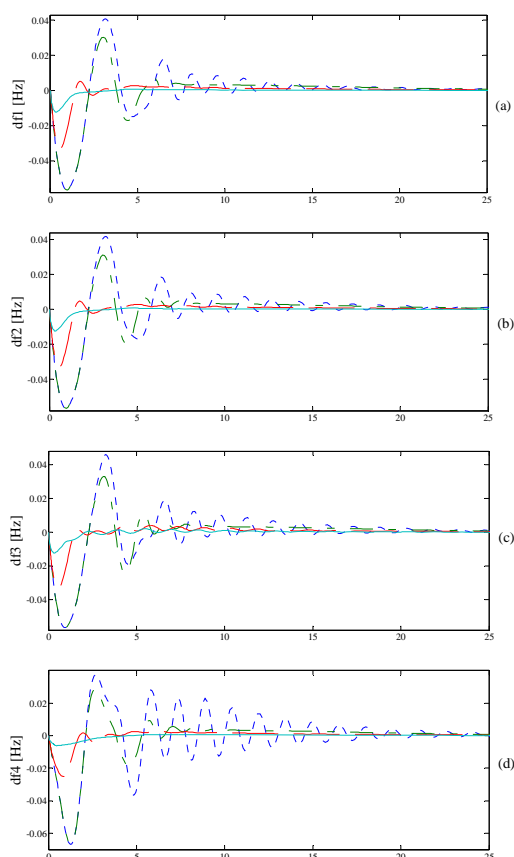
$$u_{c1,1} = u_{c2,1} = u_{c1,2} = u_{c2,2} = u_{c1,3} = u_{c2,3} = 0.01$$

۶-۲- سناریوی دوم: معاملات بین ناحیه‌ای

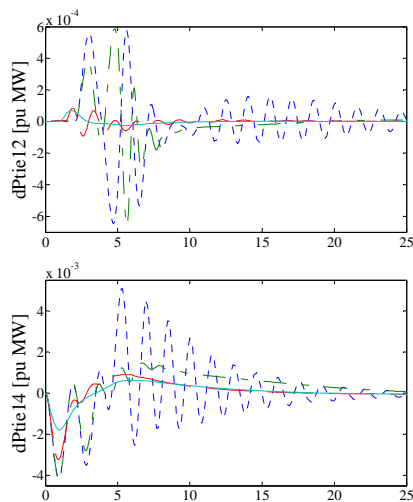
در این حالت معاملات نه تنها در داخل نواحی کنترل بلکه بین نواحی کنترل نیز صورت می‌گیرد. دیسکوها به طور آزادانه

1. Self Contract Matrix
2. Mutual Contract Matrix
3. Total Bilateral Contract Matrix

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۶- شبیه‌سازی‌ها در سناریوی اول برای $\Delta f_1(a)$ ، $\Delta f_2(b)$ ، $\Delta f_3(c)$ و $\Delta f_4(d)$ ، محور افقی زمان برحسب ثانیه است.

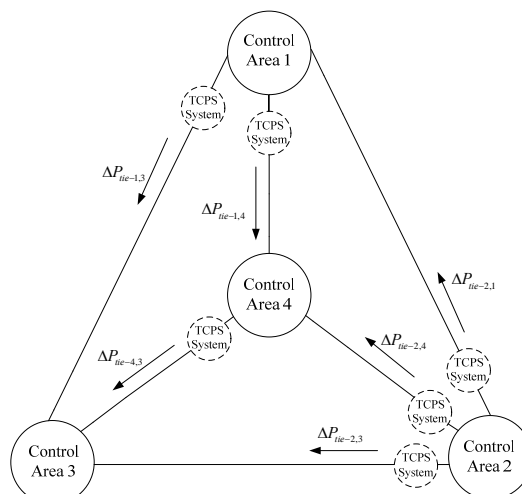


شکل ۷- منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها

در سناریوی اول برای چند توان معاوضه‌ای $\Delta P_{tie-i,j}$

درخصوص توان‌های تبادلی مطابق شکل ۷ در برخی از آنها کاهش و دربرخی دیگر افزایش اولیه مشاهده می‌شود. در هر حال مقادیر نهایی هر یک از آنها صفر است زیرا که هیچگونه معامله بین ناحیه‌ای در این سناریو پیش‌بینی

توان را از جنکوه‌های هر ناحیه کنترل خریداری می‌کنند. در این نوع از معاملات توان معاوضه‌ای می‌تواند تغییر کند.



شکل ۵- سیستم قدرت چهار ناحیه‌ای در حالت سناریوی اول با معاملات درون ناحیه‌ای و مشخص‌سازی TCPS های فعال

۷- شبیه‌سازی‌ها

۷-۱- سناریوی اول

در این حالت فقط معاملات داخل ناحیه‌ای وجود دارد. براساس جهت توان‌های تبادلی تنها یکی از TCPS های متصل شده به یکی از دو انتهای هر خط تبادلی کار خواهد کرد. TCPS هائی که در این سیستم قدرت کار می‌کنند در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. به دلیل افزایش بار در همه نواحی کنترل یک گذرا در فرکانس کلیه نواحی وجود دارد که متناسب با افزایش بار در همان ناحیه است. به هر حال انحراف فرکانسی در هر ناحیه کنترل به دلیل عمل کرد کنترل‌کننده‌های انتگرالی مطابق شکل ۶ در حالت پایدار به سمت صفر میل می‌کند. مقایسه منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها در سناریوی اول به صورت منحنی پیوسته برای TCPS با کنترل فازی، خط - چین برای TCPS ساده، خط - نقطه برای کنترل‌کننده انتگرالی فازی، و نقطه - چین برای کنترل‌کننده انتگرالی بهینه نشان می‌دهد که پاسخ انحراف‌های فرکانسی، توان‌های تبادلی، و توان‌های خروجی توربین‌ها در سیستم قدرت به همان ترتیب فوق دارای زمان استقرار به‌طور قابل ملاحظه کمتری بوده و جهش آن نیز کمتر است.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

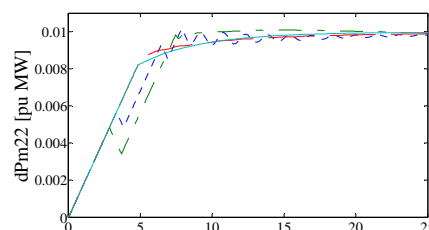
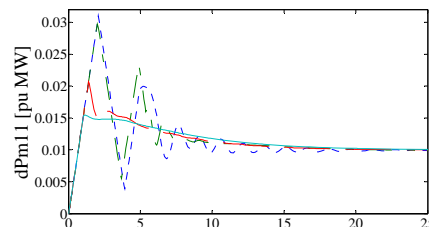
جدول ۳- مقایسه مقادیر عددی شاخص‌های عمل‌کرد مختلف با استفاده از کنترل‌کننده‌های متفاوت در سناریوی اول

عنوان شاخص	کنترل انتگرالی سیستم با بهینه	کنترل انتگرالی سیستم با فازی	کنترل سیستم با TCPS	کنترل سیستم با TCPS فازی
$\int (\sum t ACE_i) dt$	۲/۳۶۶	۱/۸۴۴	۰/۹۴۵۲	۰/۸۷۳۱
$10^3 \int (\sum t ACE_i^2) dt$	۱۹/۷۴	۸/۳۶۴	۲/۲۷۸	۱/۴۰۶
$10^3 \int (\sum t ACE_i^2) dt$	۴/۵۳۷	۳/۴۷۳	۱/۲۲۴	۰/۳۸۱
$10^3 \int (\sum t \Delta f_i^2) dt$	۶۶/۶۶	۳۶/۷۵	۳/۳۰۳	۰/۳۶۷۸
$\int (\sum t \Delta f_i) dt$	۰/۸۷۶۷	۰/۶۰۱۴	۰/۳۲۱۵	۰/۳۰۴۳
$10^3 \int (\sum t \Delta P_{ne-i,j}^2) dt$	۱/۲۸۲	۴/۵۳۵	۰/۱۳۳۴	۰/۱۰۲۴
$10^3 \int (\sum t \Delta f_i^2) dt$	۴/۳۸	۹/۳۶۳	۳/۳۸۶	۲/۹۷۱
$\frac{P_{MAX}}{P_{AVE}}$	۶/۳۹۴	۱۴/۳۸	۲/۵۹۲	۲/۳۰۱
$\int (\sum t \Delta P_{ne-i,j}) dt$	۵۲۶۶	۴۴۷۰	۱۳۲۲	۲۶۵/۹

جدول ۴- مقایسه شاخص‌های عمل‌کرد مختلف به کمک دیاگرام‌های میله‌ای با استفاده از کنترل‌کننده‌های متفاوت در سناریوی اول

عنوان شاخص	کنترل سیستم با کنترل انتگرالی بهینه	کنترل سیستم با کنترل انتگرالی فازی	کنترل سیستم با TCPS	کنترل سیستم با TCPS فازی
$\int (\sum t ACE_i) dt$				
$10^3 \int (\sum t ACE_i^2) dt$				
$10^3 \int (\sum t ACE_i^2) dt$				
$10^3 \int (\sum t \Delta f_i^2) dt$				
$\int (\sum t \Delta f_i) dt$				
$10^3 \int (\sum t \Delta P_{ne-i,j}^2) dt$				
$10^3 \int (\sum t \Delta f_i^2) dt$				
$\frac{P_{MAX}}{P_{AVE}}$				
$\int (\sum t \Delta P_{ne-i,j}) dt$				

نشده‌است. انحراف توان‌های تبدیلی بین نواحی ۱، ۲، ۳، و ۳ و ۲ در چند ثانیه اول وجود ندارد زیرا انحراف‌های فرکانسی در سه ناحیه ۱، ۲ و ۳ در این لحظات تقریباً باهم برابر است.



شکل ۸- منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی‌ها

در سناریوی اول برای چند توان خروجی توربین‌ها

در شکل ۸ قسمت‌های خطی توان خروجی در اثر قید نرخ تولید (GRC) بوده و شیب آن برای توربین غیربازحرارتی بیش از شیب مربوط به توربین بازحرارتی می‌باشد که نشان می‌دهد توربین‌های غیربازحرارتی می‌توانند تغییرات توان بیشتری (یا GRC کمتری) را داشته باشند. در اینجا مشاهده می‌شود که پاسخ توربین غیر باز حرارتی دارای دامنه نوسانات بیشتری نسبت به توربین بازحرارتی می‌باشد. دلیل این امر امکان تغییرات سریع‌تر در خروجی توربین غیر باز حرارتی نسبت به توربین بازحرارتی می‌باشد. هم‌چنین به دلیل این که ثابت‌های زمانی در گاورنر توربین آبی زیاد است مدت زمان طولانی‌تری مورد نیاز می‌باشد تا توان خروجی این توربین به مقدار نهائی خود برسد. به‌رحال توان خروجی کلیه توربین‌ها در حالت پایدار به مقدار ازپیش تعیین شده خود خواهد رسید که توسط سیگنال فرمان گاورنر آنها مشخص می‌شود. از نظر انرژی کنترل برای TCPS با کنترل فازی، ساده، کنترل‌کننده انتگرالی بهینه، و کنترل‌کننده انتگرالی فازی به همان ترتیب انرژی کنترل افزایش می‌یابد. بیشترین انرژی کنترل مصرف‌شده مربوط به کنترل‌کننده فازی است.

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

انرژی افزایش یافته‌است. از طرف دیگر، اجرای معاملات دو جانبه بازار برق باید به‌طور منسجم بوده و از ایجاد آشفتگی اجتناب شود. لذا تبادلات توان در بازارهای برق نوظهور بین نواحی کنترل مختلف در این مقاله به‌طور ریاضی گنجانده شده و توسط سه ماتریس مدل‌سازی شده است.

علی‌رغم بهینه‌سازی کنترل‌کننده انتگرالی در سیستم‌های قدرت، پاسخ دینامیکی آن رضایت‌بخش نبوده و استفاده از سایر روش‌های کنترل پیشرفته و ادوات کمکی ضروری به نظر رسیده‌است. لذا با توجه به مزایای فراوان روش کنترل فازی پیشنهاد استفاده از آن داده شده‌است. این روش بر تجربیات انسان متکی بوده و علی‌رغم سایر روش‌های کنترل، تابع تغییرات پارامترهای سیستم نبوده و در نتیجه نیاز به شناسایی پارامترهای سیستم ندارد و تحقق آن به‌طور نسبی عملی‌تر است. همچنین با توجه به پیشرفت‌های حاصل‌شده در فناوری الکترونیک قدرت و ظهور ادوات جدید FACTS، و به‌دلیل قابلیت‌های فراوانی که دارند استفاده از آنها پیشنهاد شده‌است. در بررسی این ادوات، سه عنصر TCPS، UPFC و SSSC مناسب‌تر از بقیه تشخیص داده شده‌اند. از بین این سه کاندید نیز TCPS به دلایل فنی و اقتصادی ارجحیت داشته و مورد استفاده واقع شده‌است. همچنین روش کنترل فازی نیز بر روی آن اعمال و نتایج بسیار رضایت‌بخشی حاصل شده‌است. به‌منظور تجزیه و تحلیل پاسخ دینامیکی سیستم از چند شاخص عمل‌کرد موجود مثل انتگرال زمان ضرب‌در قدرمطلق خطا (ITAE)، انتگرال زمان ضرب‌در مربع خطا (ITSE)، و عدد ناشایستگی (FD) استفاده شده‌است. به‌منظور ارزیابی انرژی کنترل نیز شاخص‌های جدید پیشنهاد شده‌است. از آن جمله شاخص انرژی مصرف‌شده (E) و شاخص ضریب‌توان (PF) مورد استفاده واقع شده‌است. سرانجام برای بهبود پاسخ دینامیکی AGC و امکان مقایسه، استفاده از کنترل‌کننده سنتی انتگرالی بهینه، کنترل‌کننده انتگرالی بهینه با تزریق سیگنال فازی کمکی، استفاده از یکی از ادوات جدید FACTS به نام TCPS با کنترل معمولی، و TCPS با کنترل فازی پیشنهاد گردید. میرائی نوسانات فرکانس و توان تبادلی در اثر اغتشاشات بارهای مختلف در یک محیط تجدیدساختار شده

به منظور مقایسه کمی و دقیق‌تر پاسخ‌های حاصل شده با استفاده از چهار نوع کنترل‌کننده مختلف، شاخص‌های عددی مختلف برای آنها محاسبه و توأم با دیاگرام‌های میله‌ای نشان دهنده آنها در جدول ۳ و ۴ داده شده‌اند. مقایسه مقادیر عددی این جدول و دیاگرام‌های میله‌ای مربوطه نشان می‌دهد که در کلیه شاخص‌ها به‌جز شاخص انرژی کنترل مصرف‌شده و ضریب توان بهترین عمل‌کرد به ترتیب مربوط به سیستم قدرت با استفاده از TCPS با کنترل فازی، TCPS ساده، کنترل‌کننده انتگرالی فازی، و کنترل‌کننده انتگرالی بهینه بوده است. همچنین در خصوص دو شاخص انرژی کنترل مصرف‌شده و ضریب توان نیز تنها دو کنترل‌کننده انتگرالی فازی و انتگرالی بهینه جای یکدیگر را عوض می‌کنند.

۷-۲- سناریوی دوم

در این سناریو علاوه بر معاملات داخل ناحیه‌ای معاملات بین ناحیه‌ای نیز وجود دارد. در خصوص توان‌های تبادلی، مقادیر نهائی آنها دیگر صفر نخواهد بود زیرا توان تبادلی بین نواحی مختلف در اثر معاملات بین ناحیه‌ای تغییر کرده‌است. البته مقدار و جهت توان‌های تبادلی در هر یک از خطوط انتقال را قوانین مداری حاکم بر شبکه تعیین می‌کنند. بخشی از توان‌های اکتیوی که از یک ناحیه کنترل به سمت ناحیه کنترل دیگر منتقل خواهد شد به‌طور مستقیم و بخش دیگر نیز به دلیل قیود مداری از طریق یک ناحیه کنترل دیگر ترانزیت می‌شود. همچنین توان خروجی کلیه توربین‌ها در حالت پایدار به مقدار از پیش تعیین شده خود خواهد رسید که توسط سیگنال فرمان گاورنر آنها مشخص می‌شود. طور کلی مقادیر عددی شاخص‌ها در حالت معاملات بین ناحیه‌ای نسبت به مقادیر عددی شاخص‌ها در حالت معاملات داخل ناحیه‌ای بزرگتر هستند. زیرا در این حالت متغیرهای مختلف دامنه تغییرات بیشتری را دارند.

۸- نتیجه‌گیری

تبادل توان بین نواحی کنترل مختلف در سیستم‌های قدرت جدید و بازارهای برق نوظهور به‌منظور خرید و فروش آزادانه

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

- [11] Rakhshani, E.; Sadeh, J; 'A reduced- order estimator with prescribed degree of stability for two-area LFC system in a deregulated environment' , Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES Digital Object Identifier: 10.1109/PSCE.2009.4839943 Publication Year: 2009 , Page(s): 1 - 8
- [12] Li, X.; Yamashiro, S.; Wu, L.; Liu, Z.; Ouyang, M.; 'Generation scheduling in deregulated power market taking into account transmission loss allocation' , Generation, Transmission & Distribution, IET Volume: 4 , Issue: 7 Digital Object Identifier: 10.1049/iet-gtd.2009.0295 Publication Year: 2010 , Page(s): 883 – 892

با انجام معاملات چندجانبه با استفاده از شاخص‌های عمل‌کرد گوناگون بایکدیگر مقایسه شد. مناسب‌ترین روش برای بهبود پاسخ دینامیکی استفاده از TCPS با کنترل فازی تشخیص داده شد.

۹- مراجع

- [1] Issarachai Ngamroo, Ysunori Mitani, Kichiro Tsuji, 'Robust load frequency control by solid- state phase shifter based on H_{∞} control design', IEEE Transactions on Power Systems, vol. 3, no. 9, pp. 725-730, 1998.
- [2] Issarachai Ngamroo, Ysunori Mitani, Kichiro Tsuji, 'LFC and stabilization of multi-area interconnected power system by decentralized control of a SMES and solid- state phase shifters', IEEE Transactions on Power System, vol. 7, no. 5, pp. 85-90, May 1998.
- [3] Isarachai Ngamroo, Ysunori Mitani, Kichiro Tsuji, 'Application of SMES coordinated with solid-state phase shifter ti load frequency control', IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 9, no. 2, pp. 322-325, June 1999.
- [4] D.D. Rasolomampionona. 'AGC and FACTS stabilization device coordination in interconnected power system control', IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy, June 23-26 2003.
- [5] Rajesh Joseph Abraham, D. Das, and Amit Patra, 'AGC of a Hydrothermal system with thyristor controlled phase shifter in the tie-line', IEEE Transactions on Power System, vol. 4, no. 2,
- [6] N. Taghizadegan and M. R. Feyzi, 'AGC improvement by fuzzy logic based control of TCPS in a deregulated environment' , International Journal of GESTS, vol. 8, no. 1, pp. 71-84, August 2006.
- [7] N. Taghizadegan and M. R. Feyzi, 'A novel and flexible method for modeling, trading and simulation of an AGC system in a restructured environment' , International Journal of WSEAS, power system transaction, Issue 6, vol. 1, pp. 1095-1100, June 2006.
- [8] Wen Tan; 'Unified Tuning of PID Load Frequency Controller for Power Systems via IMC' , Power Systems, IEEE Transactions on Volume: 25 , Issue: 1 Digital Object Identifier: 10.1109/TPWRS.2009.2036463 Publication Year: 2010 , Page(s): 341 - 350
- [9] N. Taghizadegan and M. R. Feyzi, 'Automatic generation control with auxiliary fuzzy logic controller in a deregulated environment' , International Journal of GESTS, vol. 7, no. 1, pp. 135-147, June 2006
- [10] Mazinan, A.H.; Kazemi, M.F.: 'An efficient solution to load-frequency control using fuzzy-based predictive scheme in a two-area interconnected power system' , Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on Volume: 1 Digital Object Identifier: 10.1109/ICCAE.2010.5451950 Publication Year: 2010 , Page(s): 289 - 293