کنترل بار-فرکانس یک سیستم قدرت به کمک کنترل کننده مد لغزشی بهینه شده با PSO

سید کمال منتظری[۱]، شاهرخ شجاعیان*[۲]، مهری لطفی[۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی‌مهندسی، دانشگاه آزاداسلامی، واحد خمینی شهر،Kamal.Montazeri@iaukhsh.ac.ir

*۲- استادیار، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، Shojaeian@iaukhsh.ac.ir

۳- مربی، گروه برق، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد خمینی شهر، Lotfi@iaukhsh.ac.ir

چکیده: دراین مقاله روشی برای کنترل مد لغزشی(SMC) بار فرکانس یک سیستم قدرت سه ناحیه‌ای شامل توربین بدون بازگرمایش، توربین بازگرمایش و توربین هیدورلیکی مبتنی بر مد لغزشی (با پارامترهای بهینه شده) ارائه میگردد. در فرآیند مدلسازی، باند مرده گاورنر و محدودیت نرخ تولید نیز در نظر می‌شود. هدف اصلی، تنظیم خطای فرکانس، خطای توان خطوط ارتباطی و خطای کنترل هر ناحیه در حضور اغتشاشات بار و عدم قطعیت‌های سیستم می‌باشد. بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده است. با شبیه‌سازی درمحیط متلب کنترل کنندهٔ پیشنهادی با کنترل کنندهٔ PI سنتی (که پارامترهای آن نیز بهینه شده) مقایسه گردیده و مقاوم بودن کنترل‌کنندهٔ مد لغزشی در برابر اغتشاشات بار و تغییرات پارامترهای سیستم آزموده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: کنترل بار فرکانس ، کنترل مد لغزشی سیستم به هم متصل سه ناحیه‌ای ، بهینه‌سازی ازدحام ذرات.

۱- مقدمه

به طور معمول و رایج، طراحی و کنترل سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن معیارهای کلیدی پایداری، قابلیت اطمینان و امنیت انجام می‌شود. به همین دلیل، سیستم‌های قدرت می‌توانند با وجود خطرات شناخته شده و مشخص در یک دوره طولانی، سرویس‌دهی را با کیفیت و گاهی با کمی تاخیر قابل قبول به مصرف‌کنندگان ارائه دهند. این موضوع باعث بوجود آمدن یکی از قابل اطمینان‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین زیرساخت‌های قرن اخیر یعنی سیستم‌های قدرت شده است. با وجود مطالب بیان شده، روز به روز بیشتر و بیشتر مشخص می‌شود که باید ملاحظات بیشتری نسبت به افزایش پایداری و همچنین بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان این سیستم‌ها در نظر گرفته شود تا بتواند سیستم‌های قدرت را همیشه در حال سرویس‌دهی با کیفیت بالا نگاه دارد.

یکی از متغیرهای بسیار مهم سیستم‌های قدرت، فرکانس می‌باشد. به منظور عملکرد رضایت‌بخش یک سیستم قدرت ثبات فرکانس امری الزامی است، چراکه کنترل نسبتا دقیق فرکانس ثبات سرعت موتورهای سنکرون و القایی را به دنبال دارد و تثبیت سرعت بارهای موتوری، به طور ویژه در عملکرد رضایت‌بخش واحدهای تولیدی اهمیت زیادی دارد. زیرا این واحدها به شدت به عملکرد دقیق تمامی محرک‌ها که غالبا با انرژی برق کار می‌کنند نیاز دارند.

علاوه بر این، در یک شبکه ممکن است افت زیاد فرکانس منجر به ایجاد جریان‌های شدید مغناطیسی در موتورهای القایی و ترانسفورماتورها شود و صدمات جبران ناپذیری به سیستم قدرت وارد نماید. ثبات فرکانس یک سیستم قدرت بستگی به تعادل توان حقیقی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

دارد و از آنجا که فرکانس عامل مشترکی در سرتاسر سیستم است، هر تغییری در تقاضای توان حقیقی یک نقطه به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می‌شود. در این شرایط، با توجه به اینکه توان مورد نیاز یک سیستم قدرت بزرگ توسط تعداد زیادی ژنراتور تامین می‌شود باید تغییرات توان مورد تقاضا بین واحدها تقسیم شود. تقسیم بار بین ژنراتورها و با کنترل اولیه سرعت توسط گاورنرهای نصب شده بر روی ژنراتورها صورت می‌پذیرد، بنابراین جهت تنظیم دقیق فرکانس در مقدار نامی، نیاز به یک کنترل تکمیلی می‌باشد که باید در یک مرکز کنترل اصلی انجام شود. این کار توسط مراکز مدرن کنترل انرژی (ECC)[۱] انجام می‌شود که با شبکه‌های رایانه‌ای به روز تجهیز بوده و وظیفه پردازش اطلاعات و کنترل را بر عهده دارد.

روش‌های ارائه شده برای کنترل ژنراتورهای مجزا و نهایتا کنترل سیستم‌های به هم پیوسته بزرگ نقش حیاتی در مراکز مدرن کنترل انرژی ایفا می‌نمایند. در همین راستا تاکنون تحقیقات زیادی در این خصوص صورت گرفته است. در یک سیستم قدرت به‌هم پیوسته تجهیزات کنترل بار-فرکانس (LFC)[۲] و کنترل خودکار ولتاژ (AVR)[۳] بر روی هر یک از ژنراتورهای سیستم قدرت نصب می‌شوند. این کنترل‌کننده‌ها برای کار تحت شرایط مشخصی تنظیم می‌شوند و در مقابل تغییرات کوچک بار، ولتاژ و فرکانس سیستم را کنترل می‌نمایند. تغییرات کوچک در توان حقیقی عمدتا وابسته به تغییر در زاویه روتورها و به تبع آن فرکانس می‌باشد. توان راکتیو نیز وابسته به اندازه ولتاژ (یا به عبارتی تحریک ژنراتور) است. با توجه به اینکه تزویج بین حلقه AVR و LFC ناچیز است و همچنین با توجه به اینکه ثابت زمانی سیستم تحریک بسیار کوچک‌تر از ثابت زمانی محرک ژنراتور (عمدتا توربین‌ها) است، حالت گذرای سیستم تحریک بسیار سریع‌تر ازآن است که بر روی دینامیک LFC تاثیر بگذارد. به همین دلیل عموما کنترل بار فرکانس و کنترل ولتاژ به صورت جداگانه مطالعه و بررسی می‌شوند.

اهداف اصلی کنترل بار فرکانس حفظ فرکانس به صورت یکنواخت، تقسیم بار سیستم بین ژنراتورها به نحو مطلوب و ترجیحا اقتصادی وتنظیم توان مبادله شده از خطوط ارتباطی در مقادیر برنامه‌ریزی شده می‌باشد. در واقع تغییر ایجاد شده در فرکانس سیستم و توان حقیقی خطوط ارتباطی باید توسط تغییر در توان تولیدی ژنراتورها جبران‌سازی شود[۱]و[۲]. در روش‌های کلاسیک کنترل خودکار بار فرکانس به کار برده می‌شدند از گاورنرهای مکانیکی برای حداقل کردن انحرافات فرکانس استفاده می‌شود و انتگرال سیگنال خطا که باید جبران‌سازی شود به عنوان ورودی کنترل‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. درواقع انتگرال مربع خطا (ISE)[۴] به عنوان تابع هزینه مورد استفاده قرار می گیرد. ازمعایب این شیوه معمولا فراجهش‌ها و زمان نشست نسبتا بزرگی است که مشاهده می‌شود[۳] و [۴].

ادامه تلاش محققین در زمینه بهبود عملکرد LFC منجر به معرفی روش‌هایی مبتنی بر تئوری کنترل بهینه نظیر کنترل تطبیقی شد که اولین بار در [۵-۷] بحث و بررسی شده است. در [۸] نشان داده شئه که با وجود تغییرات پارامترها و اغتشاشات بار، کنترل کننده تطبیقی مقاوم بوده است. در [۹] یک کنترل‌کننده خودتنظیم بر اساس مشاهده‌گر پیک طراحی شده است. در این کنترل‌کننده، ضریب مقیاس کنترل‌کننده PID فازی، بر اساس مقدار پیک مطلق تنظیم شده است. روش ساختار متغیر روشی شناخته شده در زمینه کنترل مقاوم است که در [۱۰] با کنترل منطق فازی ترکیب شده است. این روش با اعمال آن به یک سیستم قدرت بزرگ و با در نظر گرفتن اغتشاشات بار مورد بررسی قرار گرفته است. با وجود مزایای روش‌های ساختار متغیر، یکی از ضعف‌های اصلی این روش مسئله چترینگ یا نوسانات ناخواسته آن می‌باشد.

از روش های دیگر کنترل بار-فرکانس، کنترل مقاوم می باشد. از جملهٔ آنها روش H_∞ است که به طور گسترده برای حل مسئله کنترل بار فرکانس مورد استفاده قرار گرفته است. مزیت اصلی این روش در مقایسه با روش‌های کنترلی مرسوم، حل موثرتر مسائل پیچیده با چندین متغیر می‌باشد. در[۱۱] روش H_∞ در طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده شده تا میرایی اغتشاشات و پایداری مقاوم سیستم را محقق کند.

در میان کنترل کننده های غیرخطی،کنترل‌کننده مد لغزشی (SMC)[۵] یک روش کنترل مقاوم است که برای اغلب سیستم‌های دارای عدم قطعیت بالا بسیار موثر می‌باشد. کنترل‌کننده مدل لغزشی در بسیاری از مقالات اخیر برای کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت استفاده شده است[۱۲-۱۷]. در بیشتر این کارها، کنترل بار-فرکانس مد لغزشی با خطی در نظر گرفتن سیستم‌های قدرت مطالعه شده است. در [۱۲] یک SMC گسسته برای سیستم قدرت زمان گسسته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های سیستم ارائه شده است. در [۱۳] یک کنترل بار-فرکانس مبتنی بر مد لغزشی برای سیستم‌های قدرت به‌هم پیوسته سه ناحیه‌ای با توربین‌های بدون بازگرمایش ارائه شده است. این کار با در نظر گرفتن محدودیت نرخ تولید انجام شده است ولی در آ باند مرده گاورنر در نظر گرفته نشده است. در [۱۴] سیستم قدرت در نظر گرفته شده تنها شامل توربین بدون گرمایش مجدد می‌باشد. در [۱۵] کنترل ترکیبی SMC و H_∞ برای سیستم‌های قدرت آبی ارائه شده است که سیستم کنترلی برای یک سیستم قدرت خطی یک ناحیه‌ای با توربین آبی طراحی شده است. در [۱۶] یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای خطی با گرمایش مجدد در نظر گفته شده است. در [۱۷] نیز یک (SMC) برای یک سیستم قدرت تک ناحیه‌ای بدون گرمایش مجدد شبیه‌سازی شده است.

با توجه به توضیحات بیان شده، کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت یکی از مهمترین مسائل روز در زمینه بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های قدرت است که توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. با وجود تحقیقات فراوانی که در این زمینه انجام شده است

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

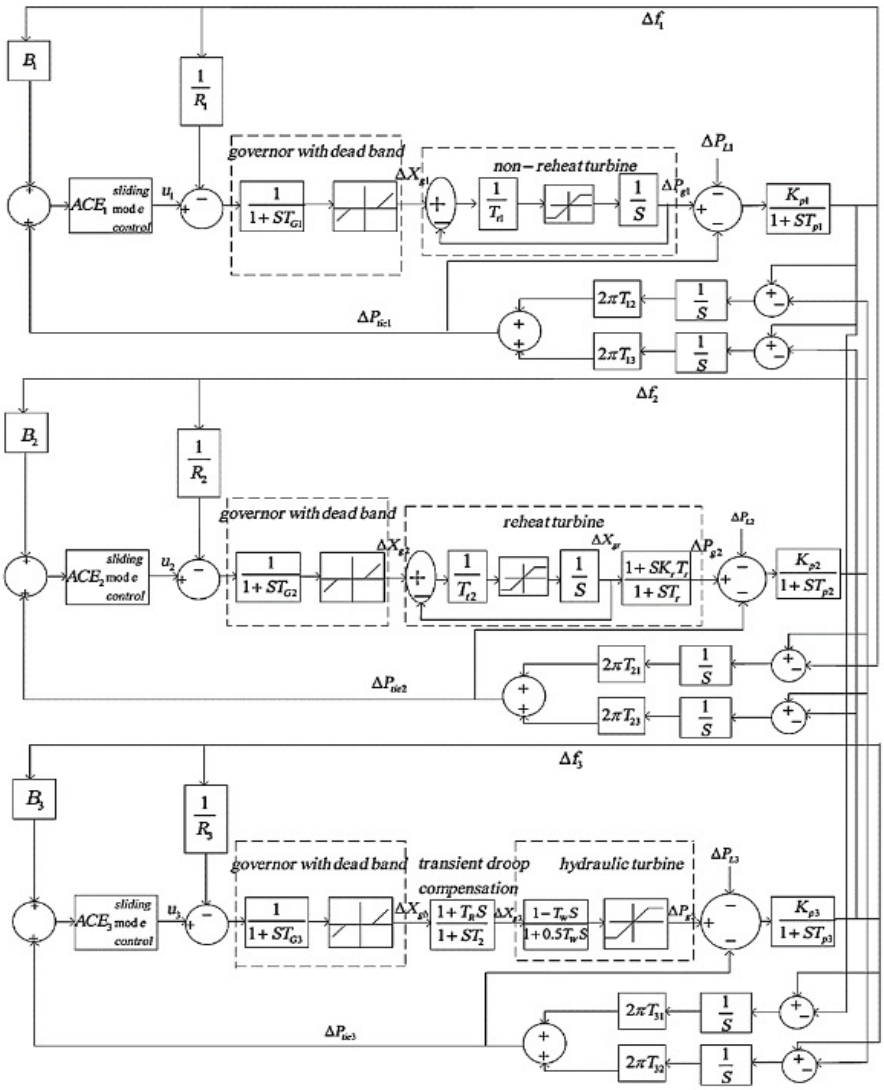
ولی این مسئله هنوز به صورت کامل حل نشده است. به همین دلیل در این پژوهش به این موضوع پرداخته شده است.

کنترل‌کننده مد لغزشی یکی از روش‌های کنترلی قدرتمند است که مطالعات قبلی، عملکرد مناسب آن در کنترل بار-فرکانس سیستم‌های قدرت را نشان داده‌اند. این روش یک تکنیک کنترل مقاوم است و یکی از مزایای مهم و اصلی آن این است که مبتنی بر مدل دقیق سیستم نمی‌باشد. به همین دلیل عملکرد بسیار خوبی در کنترل سیستم‌هایی با اغتشاشات خارجی و دارای عدم قطعیت، داشته است.

با توجه مزایای SMC، در این مقاله یک روش کنترل بار-فرکانس مبتنی بر کنترل مد لغزشی ارائه خواهد شد. در روش ارائه شده، کنترل فرکانس در هر قسمت از سیستم بصورتی مستقل از سایر قسمت‌ها و بصورت محلی انجام خواهد شد. با توجه به اینکه انتخاب مناسب‌ترین ضرایب مورد استفاده در کنترل‌کننده مد لغزشی می‌تواند مستلزم یک بهینه‌سازی باشد، در این کار برای بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده مد لغزشی از معیار عملکرد انتگرالی[۶] استفاده خواهد شد. در نهایت نشان داده خواهد شد که روش کنترلی ارائه شده در حد مطلوبی مقاوم و دقیق است. عملکرد روش پیشنهادی روی یک شبکه قدرت سه ناحیه‌ای تست خواهد شد.

۲- مدل‌سازی سیستم قدرت سه ناحیه‌ای

مدل غیرخطی یک سیستم قدرت حرارتی به‌هم پیوستهٔ سه‌ناحیه‌ای در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم قدرت سه ناحیه‌ای به‌هم پیوستهٔ غیرخطی با کنترل‌کننده مد لغزشی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

در این سیستم هر ناحیه شامل یک ژنراتور، یک گاورنر، یک توربین و یک کنترل‌کننده بار فرکانس مبتنی بر مد لغزشی می‌باشد. ولی نوع توربین هر یک از سه ناحیه با هم متفاوت است. توربین ناحیه اول بدون بازگرمایش است ولی توربین ناحیه دوم دارای بازگرمایش می‌باشد. توربین ناحیه سوم نیز از نوع توربین هیدرولیکی است. دو متغیر اصلی غیر خطی یعنی باند مرده گاورنر (GDB) و محدودیت نرخ تولید (GRC) برای هر سه ناحیه در نظر گرفته شده است. در شکل (۲)، ΔP_{Li} تغییرات بار در ناحیهٔ i، Δf_i خطای فرکانس در ناحیهٔ i و ΔP_{tiei} تغییر توان خط ارتباطی بین ناحیهٔ i و نواحی دیگر می‌باشد. ACE_i خطای کنترل ناحیه، u_i ورودی کنترل، B_i ضریب پاسخ فرکانس و R_i ضریب کاهش سرعت در ناحیهٔ i می‌باشد. T_{12} ضریب خط ارتباطی بین دو ناحیهٔ ۱ و ۲ می‌باشد و ضرایب دیگر T نیز به همین صورت تعریف می‌شوند. ΔX_{gi} تغییر وضعیت شیر بخار برای سیستم قدرت ناحیهٔ i بوده و ΔP_{gi} تغییرات توان مکانیکی ناحیهٔ i می‌باشد. گاورنر معمولا برای بهبود پاسخ فرکانسی در حدود ۲۰ ثانیهٔ پس از اغتشاشات (نظیر از دست دادن ناگهانی ژنراتور) طراحی میشود. تابع تبدیل متداول برای یک گاورنر بصورت زیر است [۲]:

$$G_H(s)=\frac{\Delta X_g(s)}{\Delta P_v(s)}=\frac{1}{1+sT_G} \qquad (۱)$$

در این رابطه T_G ثابت زمانی گاورنر ($80ms \le T_G \le 100ms$) و $\Delta P_v(s)$ ورودی گاورنر سرعت می‌باشد و برابر است با :

$$\Delta P_v(s)=u_i-\Delta f_i / R_i \qquad (i=1,2,3)$$

$\Delta X_g(s)$ نیز تغییر وضعیت شیر بخار است. در شکل (۱)، T_{G1}، T_{G2} و T_{G3} به ترتیب نشان‌دهندهٔ ثابت‌های زمانی گاورنرها در ناحیهٔ ۱، ۲ و ۳ می‌باشند. معادله (۱) در واقع مدل خطی گاورنر را بدون در نظر گرفتن باند مرده نشان می‌دهد.

برای تبدیل انرژی گرمایی بخار فشرده شده که به ژنراتورها وارد می‌شود به توان مکانیکی (ΔP_g) یک توربین حرارتی استفاده می‌شود. تابع تبدیل یک توربین بدون بازگرمایش ($G_T(s)$) به صورت معادله (۲) نشان داده می‌شود[۲].

$$G_T(s)=\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta X_g(s)}=\frac{1}{1+sT_t} \qquad (۲)$$

در این معادله T_t ثابت زمانی مخزن بخار می‌باشد که به طور معمول مقدار آن در محدودهٔ $100ms \le T_t \le 500ms$ قرار دارد. معادله (۲) نشان‌دهندهٔ مدل خطی توربین بدون در نظر گرفتن محدودیت نرخ تولید (GRC) می‌باشد. تابع تبدیل یک توربین دارای بازگرمایش $G_{TRH}(s)$ در رابطه (۳) آورده شده است[۳].

$$G_{TRH}(s)=\frac{\Delta P_g(s)}{\Delta X_g(s)}=\frac{1+sK_rT_r}{(1+sT_t)(1+sT_r)} \qquad (۳)$$

در این رابطه K_r ضریب بازگرمایش و T_r ثابت زمانی بازگرمایش می‌باشد. معادله (۳) نشان‌دهندهٔ مدل خطی توربین بازگرمایش بدون در نظر گرفتن GRC است. ژنراتور توان مکانیکی دریافت شده از توربین را به توان الکتریکی تبدیل می‌کند. تابع تبدیل ژتراتور با $G_p(s)$ نشان داده می‌شود و به صورت معادله (۴) است :

$$G_p(s)=\frac{\Delta f(s)}{\Delta P_g(s)-\Delta P_L(s)-\Delta P_{tie}(s)}=\frac{K_p}{1+sT_p} \qquad (۴)$$

در اینجا K_p ثابت ضریب سیستم قدرت، ΔP_L تغییرات بار سیستم، ΔP_{tie} تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ناحیه و T_p ثابت زمانی سیستم قدرت می‌باشند. معادلهٔ (۲-۴) مدل خطی ژنراتور را نشان می‌دهد. در شکل (۱) از K_{p1} و T_{p1} به منظور نشان دادن ضریب و ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیهٔ ۱، از K_{p2} و T_{p2} برای نشان دادن ضریب و ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیهٔ ۲ و از K_{p3} و T_{p3} برای نشان دادن ضریب و ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیهٔ ۳ استفاده شده است. خطای توان خط ارتباطی و خطای ناحیه کنترل (یا ACE) به صورت معادلات زیر تعریف می‌شود[۳] :

$$\Delta P_{tiei}=\frac{2\pi T_{ij}}{S}(\Delta f_i-\Delta f_j) \qquad (۵)$$

$$ACE_i=\sum_{j(j\neq i)}\Delta P_{ij}+B_i\Delta f_i \qquad (۶)$$

در شرایط واقعی، گاورنر غیرخطی است و همانطور که در شکل (۲) نشان داده شد شامل یک باند مرده می‌باشد. بر اساس توصیهٔ [۳]، "با تغییر سیگنال ورودی، تا زمانی که ورودی به یک مقدار مشخص نرسیده است، ممکن است گاورنر واکنش نشان ندهد. GDB به عنوان دامنه کل تغییرات سرعت تعریف می‌شود که در این رنج از تغییرات سرعت، هیچ تغییری در وضعیت شیر ایجاد نمی‌شود." مقدار باند مرده برای سیستم قدرت با فرکانس عملکرد ۶۰ هرتز، بر اساس استاندارد NERC[۷]، باید ۰/۰۳۶ هرتز باشد. برای این مقدار، چنانچه رنج تغییرات فرکانس ورودی گاورنر در محدودهٔ 0/036 ± هرتز باشد، خروجی گاورنر تغییری نخواند داشت[۳].

در کابردهای واقعی، نرخ تغییرات تولید توان دارای محدودیت حداکثری و حداقلی می‌باشد[۱۸]. به این امر در اصطلاح محدودیت نرخ تولید (GRC) گفته می‌شود. در شکل (۲) مدل توربین غیرخطی با در نظر گرفتن GRC نشان داده شده است. در این شکل، GRC با استفاده از یک بلوک اشباع مشخص شده است. مقدار رایج GRC در واحدهای حرارتی $^{\%}/_{\min}$ ۳ می‌باشد که به منظور جلوگیری از کنترل بیش از حد، برای AGC[۸] در بازه $^{pu.MW}/_{s}$ ۰/۰۰۰۵محدود شده است[۲].

درنهایت توان های خطوط ارتباطی ناحیه اول ، دوم و سوم به ترتیب به صورت روابط دیفرانسیلی معمولی زیرتعریف می گردند:

$$\Delta\dot{P}_{tie1}=2\pi T_{12}(\Delta f_1-\Delta f_2)+2\pi T_{13}(\Delta f_1-\Delta f_3) \qquad (۷)$$

$$\Delta\dot{P}_{tie2}=2\pi T_{21}(\Delta f_2-\Delta f_1)+2\pi T_{23}(\Delta f_2-\Delta f_3) \qquad (۸)$$

$$\Delta\dot{P}_{tie3}=2\pi T_{31}(\Delta f_3-\Delta f_1)+2\pi T_{32}(\Delta f_3-\Delta f_2) \qquad (۹)$$

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

۳-طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی

کنترل‌کننده مد لغزشی شامل سه بخش است : صفحه لغزش، کنترل کلیدزنی و کنترل معادل. صفحه لغزش مسیرهای حالت مطلوب را مشخص می‌کند. کنترل کلیدزنی، یک قانون کنترل ناپیوسته است که حالت‌های سیستم را به صفحه لغزشی همگرا می‌کند. کنترل معادل نیز یک قانون کنترل پیوسته است که حالت‌های سیستم را مجبور به باقی ماندن بر روی صفحه لغزشی می‌کند[۱۹] و [۲۰].

هدف کنترل‌کننده مد لغزشی، هدایت مسیر سیستم به سمت صفحه لغزش و در ادامه نگهداری مسیر بر روی این صفحه می‌باشد. انتخاب صفحهٔ لغزش اولین مرحله طراحی کنترل‌کننده‌های مود لغزشی می‌باشد. زمانی که مسیر سیستم بالا یا پایین صفحهٔ لغزش باشد، ضریب کنترل‌کننده کلیدزنی باید به گونه‌ای تغییر کند که مسیر را به حالت قبل بازگرداند.

سطح لغزش $s(x,t)$ به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$s(x,t) = (\frac{d}{dt} + \delta)^{(n-1)} \tilde{x}(t) \qquad (۱۰)$$

در معادله (۳-۲۴)، δ یک ثابت مثبت بوده و $\tilde{x}(t)$ خطای بین خروجی واقعی $x(t)$ و خروجی مورد انتظار $x_d(t)$ می‌باشد. بعد از مشخص شدن صفحه لغزش، قانون کنترل کلیدزنی به منظور مجبور کردن حالات سیستم به قرارگیری بر روی سطح لغزش استفاده می‌شود (حتی اگر اغتشاشی وجود داشته باشد). قانون کنترل کلیدزنی به صورت زیر تعریف می‌شود :

$$u_s = k \,.\, \mathrm{sgn}\,(s(x,t)) \qquad (۱۱)$$

در این رابطه u_s قانون کنترل کلیدزنی، k یک ضریب مثبت و $sgn(s(t))$ تابع علامت برای سطح لغزش $s(t)$ می‌باشد. کنترل کلیدزنی بر اساس علامت سطح لغزش تعیین شده و می‌تواند دو مقدار متفاوت داشته باشد. اگر علامت صفحه لغزشی مثبت باشد، قانون کنترل کلیدزنی نیز مثبت است و بالعکس[۲۱].

پایداری SMC با استفاده از روش مستقیم لیاپانوف بررسی می‌شود. در این روش، یک تابع لیاپانوف مثبت معین V به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \geq 0 \qquad (۱۲)$$

در این معادله، s صفحه لغزش است. اگر مشتق رابطهٔ (۱۲) منفی معین باشد، سیستم دارای پایداری مجانبی خواهد بود. قانون کنترل مد لغزشی (یا قانون کنترل حقیقی u_{real}) یک ترکیب خطی از قانون کنترل کلیدزنی و قانون کنترل معادل می‌باشد به فرم زیر:

$$ACE_i = \sum_{j(j\neq i)} \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i \qquad (۱۳)$$

در ادامه فرآیند طراحی کنترل‌کننده مد لغزشی برای سیستم قدرت سه ناحیهٔ به هم پیوسته، با توربین بدون بازگرمایشی و توربین دارای بازگرمایشی و توربین هیدرولیکی توضیح داده می‌شود. طراحی برای هر ناحیه به صورت مستقل انجام می‌شود و هدف نهایی طراحی، صفر کردن خطای فرکانس، خطای توان خطوط ارتباطی و ACE در هر سه ناحیهٔ سیستم قدرت می‌باشد.

۳-۱ طراحی SMC برای توربین غیربازگرمایش

در این بخش طراحی SMC در ناحیه ۱ با توربین بدون بازگرمایش توضیح داده می‌شود. در فرآیند طراحی، $\Delta x_1 = \Delta f_1$ تعریف شده است که خطای فرکانس در ناحیه ۱ می‌باشد. بر اساس معادله (۴)، و روابط کنترلی بدست آمده از بلوک های شکل (۱) و مدل دیفرانسیلی معمولی قانون کنترل SMC را می‌توان به صورت ترکیب خطی یک قانون کنترل معادل و قانون کنترل کلیدزنی انتخاب کرد، که یک تابع علامت می‌باشد. بنابراین SMC برای ناحیه ۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$u_1(t) = \hat{u}_1(t) - k_1 \,\mathrm{sgn}(s(t)) \qquad (۱۴)$$

در این رابطه، k_1 یک ضریب بهرهٔ مثبت برای کنترل‌کنندهٔ کلیدزنی می‌باشد.

۳-۲ طراحی SMC برای توربین بازگرمایش

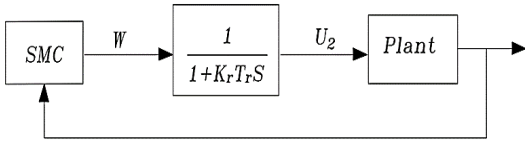
در فرآیند طراحی، $\Delta x_2 = \Delta f_2$ تعریف شده است که خطای فرکانس در ناحیه ۲ می‌باشد. بر اساس معادله (۴)، و روابط کنترلی بدست آمده از بلوک های شکل (۱) و مدل دیفرانسیلی معمولی، قانون کنترل SMC را می‌توان به صورت ترکیب خطی یک قانون کنترل معادل و قانون کنترل کلیدزنی انتخاب کرد، که یک تابع علامت می‌باشد. بنابراین SMC برای ناحیه ۱ به صورت زیر خواهد بود:

$$w(t) = \hat{w}(t) - K_2 \,\mathrm{sgn}(s(t)) \qquad (۱۵)$$

در این معادله، K_2 یک ضریب کنترلی مثبت برای کنترل‌کنندهٔ کلیدزنی می‌باشد. شکل (۲)، سیستم کنترل ناحیه ۲ با یک توربین دارای بازگرمایش را نشان می‌دهد.

۳-۳ طراحی SMC برای توربین هیدرولیکی

در فرآیند طراحی، $\Delta f_3 = \Delta x_3$ تعریف شده است که خطای فرکانس در ناحیه ۳ می‌باشد. بر اساس معادله (۴)، و روابط کنترلی بدست آمده از بلوک های شکل (۱) و مدل دیفرانسیلی معمولی، قانون کنترل SMC را می‌توان به صورت ترکیب خطی یک قانون کنترل معادل و



شکل (۲): سیستم کنترل مد لغزشی برای توربین دارای بازگرمایش (کنترل ناحیه ۲)

قانون کنترل کلیدزنی انتخاب کرد، که یک تابع علامت می‌باشد. بنابراین SMC برای ناحیه ۱ به صورت زیر خواهد بود:

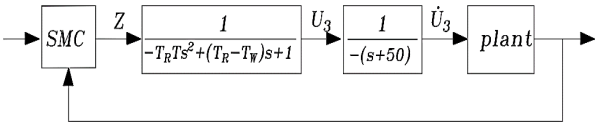
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

$$z(t) = \hat{z}(t) - K_3 \operatorname{sgn}(s(\Delta x_3, t)) \quad (۱۶)$$

شکل (۳) مدل کنترلی سیستم قدرت با توربین هیدرولیکی را نشان می‌دهد. در این شکل، سیستم مورد نظر ناحیه ۳ می‌باشد و u'_3 خروجی تابع جبران‌ساز است.



شکل (۳) : سیستم کنترلی برای ناحیه دارای توربین هیدرولیکی

۴-۳ بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده مد لغزشی

عملکرد SMC هر سه ناحیه به سطح لغزش و ضرایب مثبت کنترلی یعنی k_1، k_2 و k_3 وابسته است. سطح لغزش بر اساس پارامتر δ تنظیم می‌شود بنابراین با تغییر δ می‌توان سطح لغزش را به صورت دلخواه تنظیم کرد. متغیرهای بهینه‌سازی δ_1، δ_2، δ_3، k_1، k_2 و k_3 می‌باشند. تابع هزینه بهینه‌سازی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f\ (IAE) = \int_0^T \left| (\Delta P_{tie-i} + B_i \Delta f\ ) \right| dT \quad (۱۷)$$

این تابع هدف، انتگرال خطای مطلق نامیده می‌شود و در کاربردهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. تابع هدف دیگری که می‌توان برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده در نظر گرفت، مشخصه‌های پاسخ پله فرکانس ناحیه‌ها می‌باشد. مهمترین مشخصه‌های پاسخ پله عبارتند از: مقدار فراجهش، زمان نشست و خطای ماندگار. بنابراین، تابع هزینه بهینه‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$C = \alpha.(SE) + \beta.(OS) + \gamma.(ST) \quad (۱۸)$$

پارامترهای SE، OS و ST به ترتیب خطای ماندگار، فراجهش و زمان نشست پاسخ فرکانس هر ناحیه می‌باشند. همچنین α، β و γ ضرایب وزنی هستند که میزان اهمیت هر یک از مشخصه‌ها را نشان می‌دهند. برای تضمین بهینه بودن ضرایب پارامترهای کنترلی، می‌توان توابع هزینه f و C را با هم ترکیب کرده و مجموع آنها به را به عنوان تابع هزینه در نظر گرفت. در این مقاله بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب و الگوریتم ازدحام ذرات انجام خواهد شد.

۴- شبیه سازی

برای مقایسه نتایج بدست آمده برای کنترل‌کننده SMC، یک کنترل‌کننده PI معمولی نیز در نظر گرفته شده است که پارامترهای آن مانند کنترل‌کننده SMC بهینه‌سازی می‌شود. براساس توابع هزینه، پارامترهای کنترل‌کننده PI و کنترل‌کننده مد لغزشی بهینه‌سازی شده است. در فرآیند بهینه‌سازی انجام شده، ترکیب دو تابع هزینه ارائه شده در رابطه‌های (۱۶) و (۱۷)، به صورت تابع هزینه کلی زیر در نظر گرفته شده است:

$$C_{total} = f + 10 * C \quad (۱۹)$$

برای بهینه‌سازی از الگوریتم ازدحام ذرات که یک الگوریتم قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی می‌باشد استفاده شده است. در جدول (۱) نیز پارامترهای سیستم قدرت سه ناحیه‌ای آورده شده است که برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌های مورد نظر شبیه‌سازی شده است.

۴-۱ PSO وپارامترهای مرتبط با آن

بطور خلاصه در الگوریتم *PSO*، موقعیت هر ذره با x و سرعت آن با V نمایش داده می‌شود. تغییر موقعیت با استفاده از اطلاعات موقعیت و سرعت همهٔ ذرات انجام می‌گیرد. هر ذره بهترین مقدار خود (*Pbest*) و موقعیت فعلی خود (x_i) را می‌داند. این اطلاعات قیاسی از تجربیات شخصی هر ذره است. علاوه بر این، هر ذره بهترین مقداری را که تاکنون در گروه به دست آمده (*Gbest*) را نیز می‌داند. این اطلاعات قیاس از دانشی است که چگونه ذرات دیگر اطرافِ آن‌ها عمل کرده‌اند. در ادامه، هر ذره تلاش می‌کند تا موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات مذکور بهبود دهد. در الگوریتم *PSO* ، سرعت هر ذره بر اساس رابطه زیر محاسبه میشود:

$$V_i^{t+1} = W.V_i^t + C_1.r_1.(Pbest_i - x_i^t) + C_2.r_2.(Gbest_i - x_i^t) \quad (۲۰)$$

در این رابطه r_1 و r_2 اعدادی تصادفی بین صفر و یک هستند، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری نامیده می‌شوند و W نیز تابع وزن است.[۲۲].

جدول (۱): اطلاعات سیستم قدرت سه ناحیه‌ای

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
T_{g1}[s]	۰/۰۸	T_{g2}[s]	۰/۰۸	T_{g3}[s]	۰/۰۸
T_{t1}[s]	۰/۰۳	T_{t2}[s]	۰/۰۳	T_2[s]	۰/۵۱۳
T_r[s]	۱۰	K_r	۰/۵	T_R[s]	۵
K_{p1}	۱۲۰	K_{p2}	۱۲۰	K_{p3}	۱۲۰
T_{p1}[s]	۲۰	T_{p2}[s]	۲۰	T_{p3}[s]	۲۰
R_1	۲/۴	R_2	۲/۴	R_3	۲/۴
B_1	۰/۴۲۵	B_2	۰/۴۲۵	B_3	۰/۴۲۵
T_w[s]	۱				

۴-۲ بهینه‌سازی پارامترها

در بهینه‌سازی انجام شده، بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PI حدود ۳۶ دقیقه و بهینه‌سازی پارامترهای کنترل مد لغزشی حدود ۵۴ دقیقه طول کشیده است. در شکل (۴) روند همگرایی تابع هزینه برای پارامترهای کنترل‌کننده PI و کنترل‌کننده مد لغزشی، به بهترین پاسخ سراسری (G_{best}) نشان داده شده است. مشخص است که در بهینه‌سازی انجام شده، هزینه پاسخ نهایی SMC کمتر از کنترل‌کننده PI بوده است که نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر کنترل SMC می‌باشد. در جدول (۲) پارامترهای بهینه بدست آمده برای کنترل‌کننده PI و SMC نشان داده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

۴-۳ مقایسه عملکرد کنترل‌کننده SMC و PI

بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی با در نظر گرفتن اغتشاشات مختلف برای هر یک از ناحیه‌ها انجام شده است. سناریو اول در نظر گرفته شده برای بهینه‌سازی هر دو کنترل‌کننده به صورت زیر می‌باشد:

۱-افزایش بار ناحیه اول در ثانیه ۴ به میزان ۰/۰۲ پریونیت.

۲-افزایش بار ناحیه دوم در ثانیه ۱۰ به میزان ۰/۰۵ پریونیت.

۳-کاهش بار ناحیه سوم در ثانیه ۷ به میزان ۰/۰۳ پریونیت.

بار سیستم به صورت دینامیکی و وابسته به فرکانس در نظر گرفته شده است. بار در نظر گرفته شده برای ناحیه i-ام به صورت زیر است:

$$\Delta P_{Li}^{*} = \lambda \Delta f_i + \Delta P_{Li} \qquad (۲۱)$$

بر اساس شکل‌های (۵) الی (۱۳) مشخص است که از نظر فراجهش و زمان نشست، کنترل‌کننده SMC عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده PI داشته است.

در سناریو دوم فرض شده است که بار هر سه ناحیه به اندازه۰/۰۱ پریونیت تغییر کند. این تغییرها برای نواحی اول تا سوم به ترتیب در ثانیه ۲، ۴ و ۱ اعمال شده است. برای این سناریو، خطای فرکانس ناحیه ۱، ۲ و ۳ به ترتیب در شکل‌ها (۱۴) الی (۱۶) نشان داده شده است.

جدول (۲): پارامترها بهینه شدهٔ کنترل‌کننده PI و SMC

پارامترهای کنترل‌کننده SMC		پارامترهای کنترل‌کننده PI	
۳۰۵/۷	k_1	-۰/۸۲	K_1
۰/۸۹	δ_1	-۰/۰۱۳۴	K_{I1}
۴۳۸/۶	k_2	-۰/۵۹۲۲	K_2
۲	δ_2	-۰/۰۰۱۹	K_{I2}
۳۵۰/۶	K_3	-۰/۶۲۳	K_3
۲۳/۴۹	δ_3	-۰/۴۰۱۷	K_{I3}

۵- نتیجه گیری

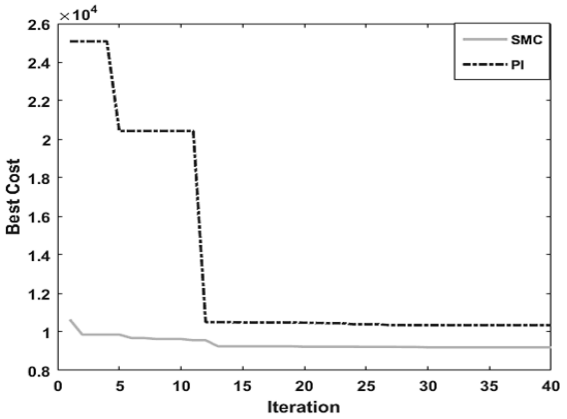
دراین مقاله یک سیستم قدرت سه ناحیه‌ای در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد ودرمرحله اول پارامترهای کنترل‌کننده SMC و کنترل‌کننده PI با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی و در ادامه با در نظر گرفتن دو سناریو، عملکرد کنترل‌کننده SMC و کنترل‌کننده PI با در نظر گرفتن شرایط کاری که کنترل‌کننده‌ها در آن شرایط بهینه‌سازی شدند مورد بررسی قرارگرفت. از شبیه سازی روش پیشنهادی این نتیجه حاصل گردید که خطای فرکانس ناحیه‌ها برای کنترل‌کننده SMC فراجهش کمتری در مقایسه با کنترل‌کننده PI دارد ضمن آنکه تغییر نقطه کار تاثیری بر روی عملکرد کنترل‌کننده SMC ندارد و این کنترل‌کننده قادر است برای نقاط کاری مختلف، عملکرد مناسبی ارائه دهد. این موضوع نشان دهندهٔ عملکرد مقاوم کنترل‌کننده SMC می‌باشد. بعنوان پیشنهادهایی جهت توسعهٔ این پژوهش میتوان به موارد زیر اشاره نمود :

۱-از مشکلاتی که بسیاری از کنترل‌کننده‌ها با آن روبه‌رو می‌باشند نوسانات کوچکی است که در شرایط ماندگار سیستم وجود دارد. یکی از اهداف پروهش‌های بعدی می‌تواند تلاش برای کاهش نوسانات حالت ماندگار با بهبود بیشتر کنترل‌کننده مد لغزشی باشد

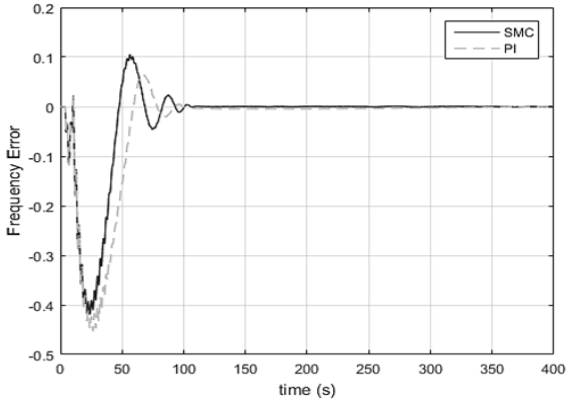
۲- در نظر گرفتن مدل‌های استاتیک و دینامیک پیچیده‌تر برای بار

۳- در نظر گرفتن مدل‌های احتمالاتی برای بار و پیشنهاد روش‌های کنترل احتمالاتی

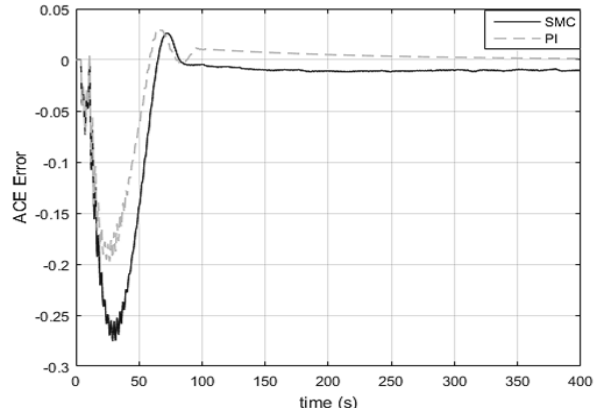
۴- استفاده از کنترل‌کننده‌های مد لغزشی مرتبه بالاتر



شکل (۴) : تابع هزینه بهینه‌سازی برای هر دو نوع کنترل کننده



شکل (۵): خطای فرکانس ناحیه اول برای سناریو ۱

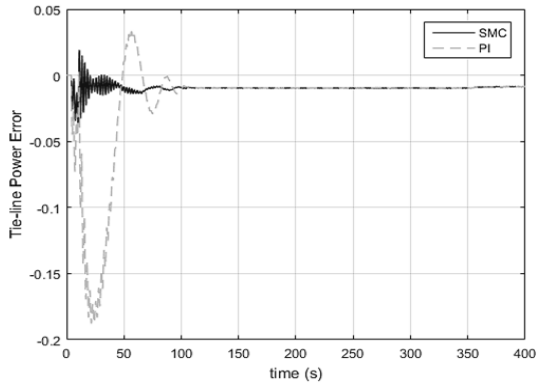


شکل (۶): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه اول برای سناریو ۱

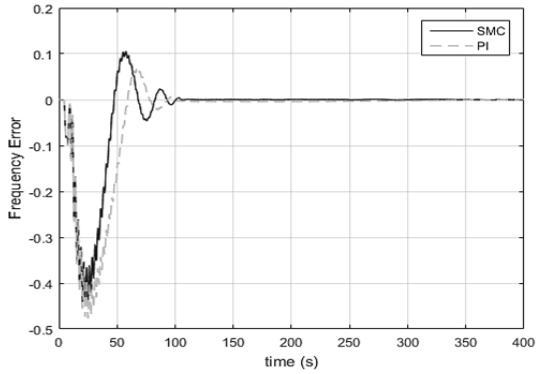
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

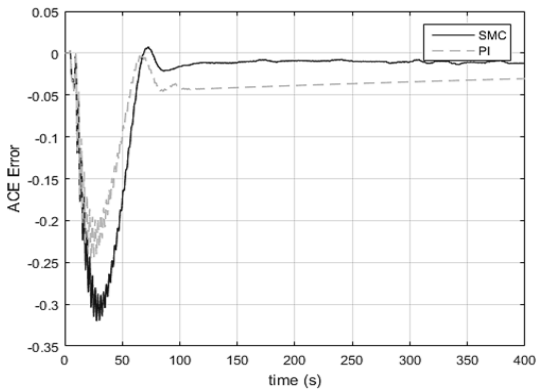
[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]



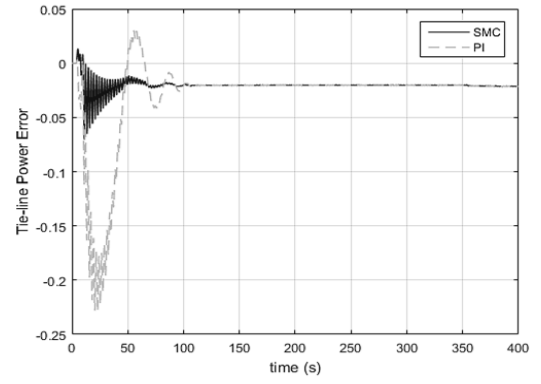
شکل (۷): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه اول برای سناریو ۱



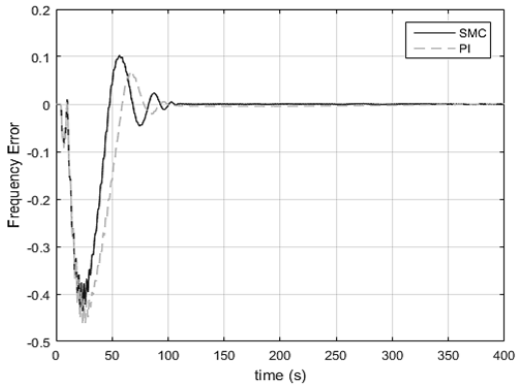
شکل (۸): خطای فرکانس ناحیه دوم برای سناریو ۱



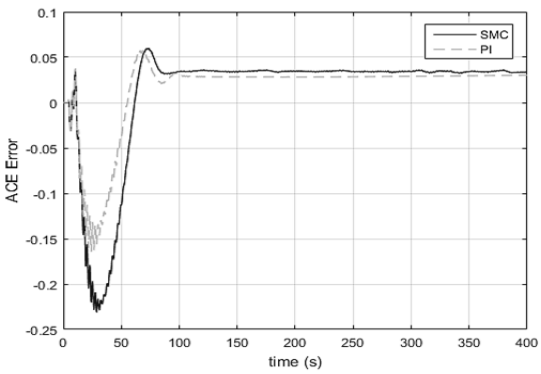
شکل (۹): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه دوم برای سناریو ۱



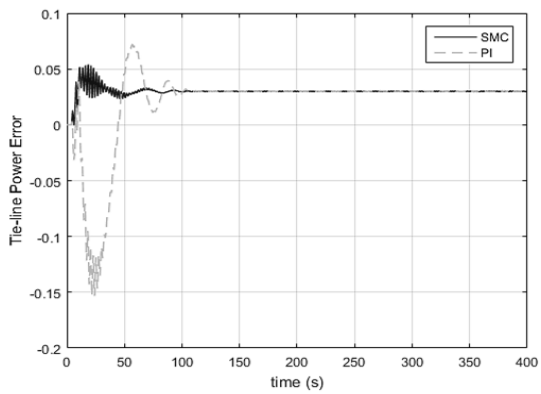
شکل (۱۰): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه دوم برای سناریو ۱



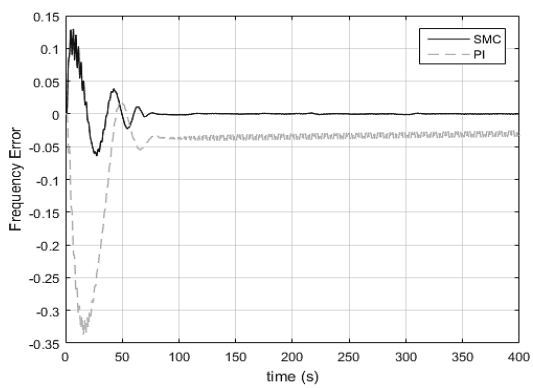
شکل (۱۱): خطای فرکانس ناحیه سوم برای سناریو ۱



شکل (۱۲): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه سوم برای سناریو ۱



شکل (۱۳): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه سوم برای سناریو ۱

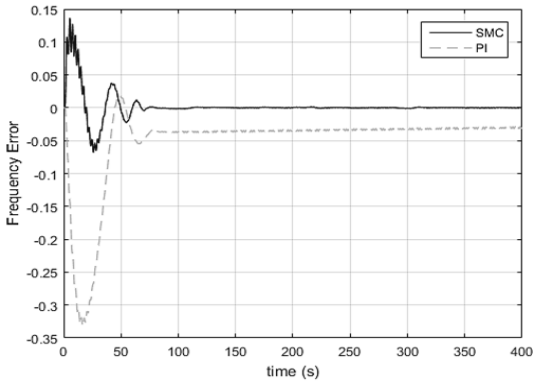


شکل (۱۴): خطای فرکانس ناحیه اول برای سناریو ۲

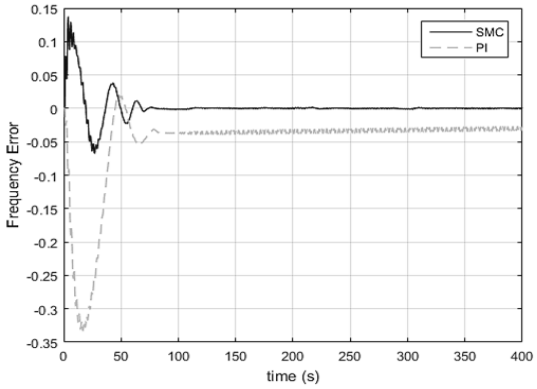
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]



شکل (۱۵): خطای فرکانس ناحیه دوم برای سناریو ۲



شکل (۱۶): خطای فرکانس ناحیه سوم برای سناریو۲

۷- فهرست مراجع و ماخذ:

[1] Saadat H.', *"Power System Analysis"*, Kevin Kane, Mc-Graw Hill Co, New Delh., 2002.

[2] Guo J., *"Sliding Mode Based Load Frequency Control for an Interconnected Power System with Nonlinearities"*, Cleveland State University,2015.

[3] Elgerd, O. I., & Fosha, C. E. "*Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy systems*", *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, Vol 89, 1970, pp.556-563.

[4] Nanda, J., Kothari, M., & Satsang, P., "*Automatic generation control of an interconnected hydrothermal system in continuous & discrete modes considering generation rate constraints*", *IEE Proceedings D - Control Theory & Applications*, Vol 130, 1983, pp17-27.

[5] Aldeen, M., & Trinh, H., "Combined modal & singular perturbation approach to decentralized control". *International journal of systems science*, Vol 23, No 5, 1992, pp 741-764.

[6] Rubaai, A., & Udo, V., "An adaptive control scheme for load-frequency control of multiarea power systems Part I. Identification & functional design", *Electric Power Systems Research*, Vol 24,No 3, 1992,pp 183-188.

[7] Velusami, S., & Romar, K., "Design of observer-based decentralized load-frequency controllers for interconnected power systems", *International journal of power & energy systems*, Vol 17, No 2, 1997, pp 152-160.

[8] Zribi, M., Al-Rashed, M., & Alrifai, M. (2005). "Adaptive decentralized load frequency control of multi-area power systems". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 27, No 8, 2005,pp 575-583.

[9] Yeşil, E., Güzelkaya, M., & Eksin, I. , "Self tuning fuzzy PID type load & frequency controller". *Energy Conversion & Management*, Vol 45, No 3, 2004, pp 377-390.

[10] Ha, Q., & Trinh, H. , "A variable structure-based controller with fuzzy tuning for load-frequency control", *International Journal of power & energy systems*, Vol 20, No 3, 2000, pp 146-154.

[11] Chang, J.-L., "Robust Sliding-Mode Control with Disturbance Attenuation Using Only Output Feedback", *JSME International Journal Series C*, Vol 46, No 1, 2003, pp239-244.

[12] Anand, B., and Ebenezer Jeyakumar, A., "Fuzzy logic based load frequency control of hydro-thermal system with nonlinearities," International *Journal of Electrical & Power Engineering*, Vol. 3, No 2, 2009, pp112-118.

[13] Ismail, M. M. and Hassan, M. M., "Load frequency control adaptation using artificial intelligent techniques for one & two different areas power system," *International Journal of Control, Automation & System*, vol. 1, No 1, 2012, pp 12-23.

[14] Dong, L., Zhang, Y. & Gao, Z., "A robust decentralized load frequency controller for interconnected power system," ISA *Transactions*, Vol. 51, No 3, 2012, pp 410-419.

[15] Han,J., "From PID to active disturbance rejection control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol 56, No 3, 2009, pp 900-906.

[16] Zhao, C., & Huang, Y., "ADRC based input disturbance rejection for minimum-phase plants with unknown orders &/or uncertain relative degrees," Journal of System Science & Complexity, Vol 25, No 4, 2012, pp 625-640.

[17] Vrdoljak, K., Peric, N. & Petrovic,I., "Sliding mode based load-frequency control in power systems," *Electric Power Systems Research*, Vol 80, No 5, 2010, pp 514-527.

[18] Kothari,D., & Nagrath,I., *"Power System Engineering"*, *2nd edition, New York: McGRAW-Hill*, 2008.

[19] Utkin, V. *,"Variable structure systems with sliding modes."*, IEEE Transactions on Automatical Control, Vol 22, No 2, 1977, pp 212–222.

[20] Zhao, Y., "*Applications of sliding mode controller & linear active disturbance rejection controller to a PMSM Speed System" ,2013 . ETD Archive. 411*

[21] Golpira, H., & Bevrani, H. , *"Application of GA optimization for automatic generation control design in an interconnected power system",* Energy Conversion & Management,Vol 52,No 5,2011,pp 2247-2255.

[22] Kenndy, J., & Eberhart, R. ,"*Particle swarm optimization*", Paper presented at the Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Nagoya, Japan,1995.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

رزومه



سید کمال منتظری درکرمانشاه متولد شده است(۱۳۵۴). او کارشناسی مهندسی برق- قدرت ازدانشگاه آزاد نجف آباد (۱۳۸۱)، و کارشناسی- ارشد مهندسی برق-قدرت ازدانشگاه آزاد خمینی شهر (۱۳۹۶) دریافت کرده است. علاقه مندی های پژوهشی ایشان پایداری و روش های کنترل بار- فرکانس در سیستم های قدرت و سیستم ها و تجهیزات ابزاردقیق در صنعت نفت می باشد. وی درحال حاضر مسئول مهندسی ابزار دقیق شرکت پالایش نفت اصفهان می باشد.



شاهرخ شجاعیان متولد ۱۳۵۴ در اصفهان است. وی مدارج کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۷۶ و ۱۳۸۰)، و دکتری مهندسی برق-قدرت را از دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران(۱۳۹۱) دریافت کرده است. فعالیت های پژوهشی و علاقه‌مندی های وی
در زمینه ادوات FACTS، سیستمهای توزیع، پایداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت است. او در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر می‌باشد.



مهری لطفی متولد ۱۳۵۷ در اصفهان است. وی مدارج کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت را از دانشگاه صنعتی اصفهان (۱۳۸۰ و ۱۳۸۴) دریافت کرده و در حال حاضر دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه اصفهان و مربی گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی در واحد خمینی شهر میباشد.

زیرنویس‌ها

[1] Energy Control Center
[2] Load Frequency Control
[3] Automatic Voltage Regulator
[4] Integral Squared Error
[5] Sliding Mode Controller
[6] Criterion Performance Integral
[7] North America Electric Reliability Corporation
[8] Automatic Generation Control

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]

LOAD-FREQUENCY CONTROL OF A POWER SYSTEM USING AN OPTIMIZED SLIDING MODE CONTROLLER

Seyed Kamal Montazeri, Shahrokh Shojaeian,Mehri Lotfi

Load frequency control (LFC) in power systems is one of the most important issues in the field of optimizing power system performance that attracted the attention of many researchers. In this work, a sliding mode based load frequency control is developed on a three-area interconnected power system. The power system contains non-reheat, reheat, and hydraulic turbines which are distributed in these three areas respectively. Both governor dead band and generation rate constraint are included in the model of this power system. Our control goal is to regulate the frequency error, tie-line power error and area control error despite the presences of external load disturbance and system uncertainties. Additionally, an optimization process is proposed for optimal adjustment of the sliding mode control parameters of each of the three areas, aimed at improving integral performance and step response characteristics such as amount of overshoot, steady state error, and sitting time. The optimization was performed using the particle swarm optimization (PSO) algorithm, which is one of the most powerful algorithms for nonlinear problems solving. The sliding mode based load frequency controller is simulated on this three-area interconnected nonlinear power system. The simulation results verify the effectiveness of the sliding mode controller. In addition, compared with an optimized the performance of SMC is comparison study shows the PI controller. The superiority of the SMC to the PI controller in term of control performance. They also demonstrate the robustness of the sliding mode controller against parameter variations and external disturbances.

Keywords: Load Frequency Control, Sliding Mode Control, Three-Area Interconnected Power System, Particle Swarm Optimization

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 4 -No. 1- autumn 2015 & winter 2016

[DOR: 20.1001.1.23222468.1394.4.2.5.0]