

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- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، 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: در این مقاله روشی برای کنترل مد لغزشی (SMC) بار فرکانس یک سیستم قدرت سه ناحیه‌ای شامل توربین بدون بازگرمایش، توربین بازگرمایش و توربین هیدرولیکی 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 در محیط متلب کنترل کننده پیشنهادی با کنترل کننده PI سنتی (که پارامترهای آن نیز بهینه شده) مقایسه گردیده و مقاوم بودن کنترل کننده 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.

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 نسبتاً 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 غالباً 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 جبران‌ناپذیری به سیستم قدرت وارد نماید. ثبات فرکانس یک سیستم قدرت بستگی به تعادل توان حقیقی

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 تأخیر 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

اولین بار در [۵-۷] بحث و بررسی شده است. در [۸] نشان داده شده که با وجود تغییرات پارامترها و اغتشاشات بار، کنترل کننده تطبیقی مقاوم بوده است. در [۹] یک کنترل کننده خودتنظیم بر اساس مشاهده گر پیک طراحی شده است. در این کنترل کننده، ضریب مقیاس کنترل کننده 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 روش های ساختار متغیر، یکی از ضعف های اصلی این روش مسئله چترینگ یا نوسانات ناخواسته آن می باشد.

از روش های دیگر کنترل بار-فرکانس، کنترل مقاوم می باشد. از جمله 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 روش های کنترلی مرسوم، حل موثرتر مسائل پیچیده با چندین متغیر می باشد. در [۱۱] روش H_{∞} در طراحی کنترل کننده مد لغزشی استفاده شده تا میرایی اغتشاشات و پایداری مقاوم سیستم را محقق کند.

در میان کنترل کننده های غیرخطی، کنترل کننده مد لغزشی $(SMC)^5$ یک روش کنترل مقاوم است که برای اغلب سیستم های دارای عدم قطعیت بالا بسیار موثر می باشد. کنترل کننده مدل لغزشی در بسیاری از مقالات اخیر برای کنترل بار-فرکانس سیستم های قدرت استفاده شده است [۱۲-۱۷]. در بیشتر این کارها، کنترل بار-فرکانس مد لغزشی با خطی در نظر گرفتن سیستم های قدرت مطالعه شده است. در [۱۲] یک SMC گسسته برای سیستم قدرت زمان گسسته و با در نظر گرفتن عدم قطعیت های سیستم ارائه شده است. در [۱۳] یک کنترل بار-فرکانس مبتنی بر مد لغزشی برای سیستم های قدرت به هم پیوسته سه ناحیه ای با توربین های 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 می باشد. در [۱۵] کنترل ترکیبی SMC و H_{∞} برای سیستم های قدرت آبی ارائه شده است که سیستم کنترلی برای یک سیستم قدرت خطی یک ناحیه ای با توربین آبی طراحی شده است. در [۱۶] یک سیستم قدرت دو ناحیه ای خطی با گرمایش مجدد در نظر گرفته شده است. در [۱۷] نیز یک (SMC) برای یک سیستم قدرت تک ناحیه ای بدون گرمایش مجدد شبیه سازی شده است.

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

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 می شود. در این شرایط، با توجه به اینکه توان مورد نیاز یک سیستم قدرت بزرگ توسط تعداد زیادی ژنراتور تامین می شود 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 می پذیرد، بنابراین جهت تنظیم دقیق فرکانس در مقدار نامی، نیاز به یک کنترل تکمیلی می باشد که باید در یک مرکز کنترل اصلی انجام شود. این کار توسط مراکز مدرن کنترل انرژی $(ECC)^1$ انجام می شود که با شبکه های رایانه ای به روز تجهیز بوده و وظیفه پردازش اطلاعات و کنترل را بر عهده دارد.

روش های ارائه شده برای کنترل ژنراتورهای مجزا و نهایتاً کنترل سیستم های به هم پیوسته بزرگ نقش حیاتی در مراکز مدرن کنترل انرژی ایفا می نمایند. در همین راستا تاکنون تحقیقات زیادی در این خصوص صورت گرفته است. در یک سیستم قدرت به هم پیوسته تجهیزات کنترل بار-فرکانس $(LFC)^2$ و کنترل خودکار ولتاژ $(AVR)^3$ بر روی هر یک از ژنراتورهای سیستم قدرت نصب می شوند. این کنترل کننده ها برای کار تحت شرایط مشخصی تنظیم می شوند و در مقابل تغییرات کوچک بار، ولتاژ و فرکانس سیستم را کنترل می نمایند. تغییرات کوچک در توان حقیقی عمدتاً وابسته به تغییر در زاویه روتورها و به تبع آن فرکانس می باشد. 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 (عمدتاً توربین ها) است، حالت گذرای سیستم تحریک بسیار سریعتر از آن است که بر روی دینامیک LFC تاثیر بگذارد. به همین دلیل عموماً کنترل بار فرکانس و کنترل ولتاژ به صورت جداگانه مطالعه و بررسی می شوند.

اهداف اصلی کنترل بار فرکانس حفظ فرکانس به صورت یکنواخت، تقسیم بار سیستم بین ژنراتورها به نحو مطلوب و ترجیحاً اقتصادی و تنظیم توان مبادله شده از خطوط ارتباطی در مقادیر برنامه ریزی شده می باشد. در واقع تغییر ایجاد شده در فرکانس سیستم و توان حقیقی خطوط ارتباطی باید توسط تغییر در توان تولیدی ژنراتورها جبران سازی شود [۱] و [۲]. در روش های کلاسیک کنترل خودکار بار فرکانس به کار برده می شدند از گاورنرهای مکانیکی برای حداقل کردن انحرافات فرکانس استفاده می شود و انتگرال سیگنال خطا که باید جبران سازی شود به عنوان ورودی کنترل کننده مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع انتگرال مربع خطا $(ISE)^4$ به عنوان تابع هزینه مورد استفاده قرار می گیرد. از معایب این شیوه معمولاً فراجش ها و زمان نشست نسبتاً بزرگی است که مشاهده می شود [۳] و [۴].

ادامه تلاش محققین در زمینه بهبود عملکرد LFC منجر به معرفی روش هایی مبتنی بر تئوری کنترل بهینه نظیر کنترل تطبیقی شد که

ضرایب مورد استفاده در کنترل کننده مد لغزشی می تواند مستلزم یک بهینه سازی باشد، در این کار برای بهینه سازی ضرایب کنترل کننده 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 ناحیه ای تست خواهد شد.

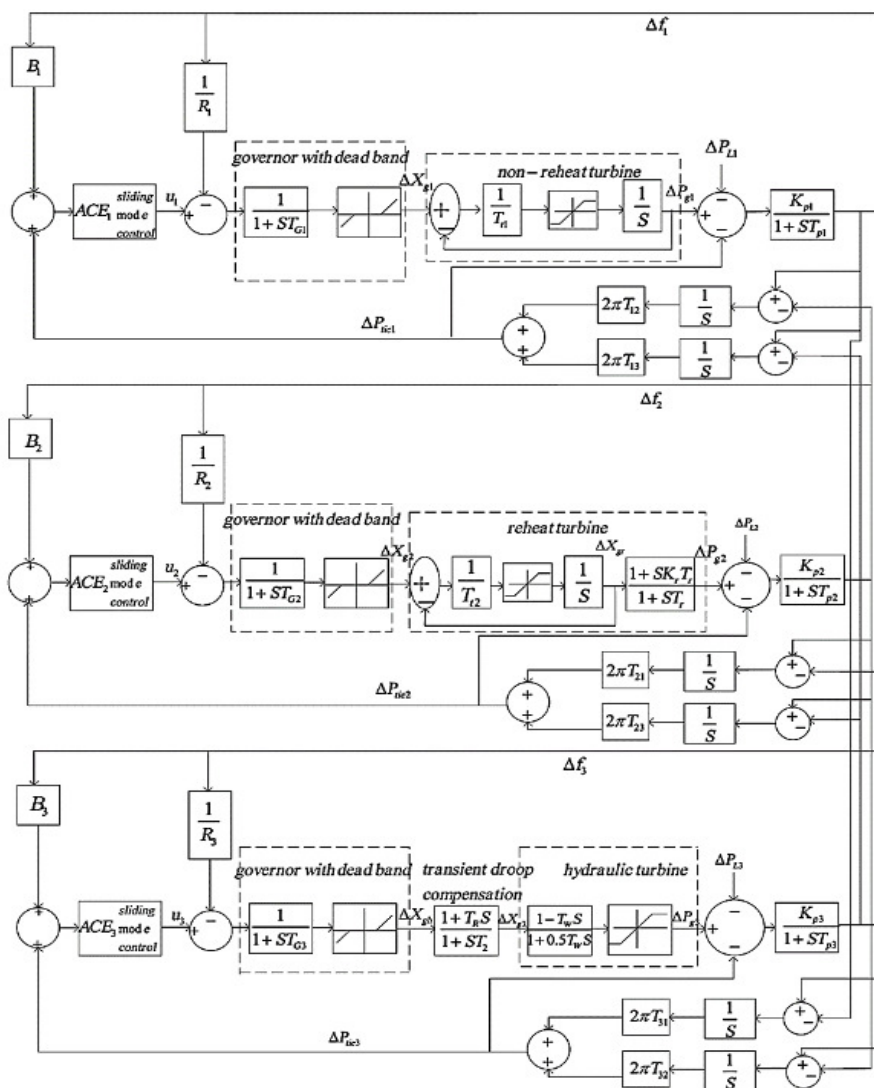
۲- مدل سازی سیستم قدرت سه ناحیه ای

مدل غیرخطی یک سیستم قدرت حرارتی به هم پیوسته سه ناحیه ای در شکل (۱) نشان داده شده است.

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

کنترل کننده مد لغزشی یکی از روش های کنترلی قدرتمند است که مطالعات قبلی، عملکرد مناسب آن در کنترل بار-فرکانس سیستم های قدرت را نشان داده اند. این روش یک تکنیک کنترل مقاوم است و یکی از مزایای مهم و اصلی آن این است که مبتنی بر مدل دقیق سیستم نمی باشد. به همین دلیل عملکرد بسیار خوبی در کنترل سیستم هایی 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 قسمت ها و بصورت محلی انجام خواهد شد. با توجه به اینکه انتخاب مناسب ترین



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم قدرت سه ناحیه ای به هم پیوسته غیرخطی با کنترل کننده مد لغزشی

بازگرمایش می‌باشد. معادله (۳) نشان‌دهنده 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 ژنراتور با $G_p(s)$ نشان داده می‌شود و به صورت معادله (۴) است:

$$G_p(s) = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_g(s) - \Delta P_L(s) - \Delta P_{ie}(s)} = \frac{K_p}{1 + sT_p} \quad (4)$$

در اینجا K_p ثابت ضریب سیستم قدرت، ΔP_L تغییرات بار سیستم، ΔP_{ie} تغییرات توان خط ارتباطی بین دو ناحیه و T_p ثابت زمانی سیستم قدرت می‌باشند. معادله (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 ناحیه ۱، از K_{p2} و T_{p2} برای نشان دادن ضریب و ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیه ۲ و از K_{p3} و T_{p3} برای نشان دادن ضریب و ثابت زمانی سیستم قدرت ناحیه ۳ استفاده شده است. خطای توان خط ارتباطی و خطای ناحیه کنترل (یا ACE) به صورت معادلات زیر تعریف می‌شود [۳]:

$$\Delta P_{iei} = \frac{2\pi T_{ij}}{S} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (5)$$

$$ACE_i = \sum_{j(j \neq i)} \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i \quad (6)$$

در شرایط واقعی، گاورنر غیرخطی است و همانطور که در شکل (۲) نشان داده شد شامل یک باند مرده می‌باشد. بر اساس توصیه [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^y، باید ۰/۰۳۶ باشد. برای این مقدار، چنانچه رنج تغییرات فرکانس ورودی گاورنر در محدوده $0/036 \pm$ هرتز باشد، خروجی گاورنر تغییری نخواند داشت [۳].

در کاربردهای 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 $3\%/min$ می‌باشد که به منظور جلوگیری از کنترل بیش از حد، برای AGC^A در بازه $0/005 \text{ pu.MW/s}$ محدود شده است [۲].

در نهایت توان های خطوط ارتباطی ناحیه اول، دوم و سوم به ترتیب به صورت روابط دیفرانسیلی معمولی زیر تعریف می گردند:

$$\dot{\Delta P}_{ie1} = 2\pi T_{12} (\Delta f_1 - \Delta f_2) + 2\pi T_{13} (\Delta f_1 - \Delta f_3) \quad (7)$$

$$\dot{\Delta P}_{ie2} = 2\pi T_{21} (\Delta f_2 - \Delta f_1) + 2\pi T_{23} (\Delta f_2 - \Delta f_3) \quad (8)$$

$$\dot{\Delta P}_{ie3} = 2\pi T_{31} (\Delta f_3 - \Delta f_1) + 2\pi T_{32} (\Delta f_3 - \Delta f_2) \quad (9)$$

در این سیستم هر ناحیه شامل یک ژنراتور، یک گاورنر، یک توربین و یک کنترل کننده 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 ناحیه i ، Δf_i خطای فرکانس در ناحیه i و ΔP_{iei} تغییر توان خط ارتباطی بین ناحیه 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 ناحیه i می‌باشد. T_{12} ضریب خط ارتباطی بین دو ناحیه ۱ و ۲ می‌باشد و ضرایب دیگر T نیز به همین صورت تعریف می‌شوند. ΔX_{gi} تغییر وضعیت شیر بخار برای سیستم قدرت ناحیه i بوده و ΔP_{gi} تغییرات توان مکانیکی ناحیه i می‌باشد. گاورنر معمولاً برای بهبود پاسخ فرکانسی در حدود ۲۰ ثانیه پس از اغتشاشات (نظیر از دست دادن ناگهانی ژنراتور) طراحی می‌شود. تابع تبدیل متداول برای یک گاورنر بصورت زیر است [۲]:

$$G_n(s) = \frac{\Delta X_g(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + sT_G} \quad (1)$$

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

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

$\Delta X_g(s)$ نیز تغییر وضعیت شیر بخار است. در شکل (۱)، T_{G1} ، T_{G2} و T_{G3} به ترتیب نشان‌دهنده ثابت‌های زمانی گاورنرها در ناحیه 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].

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_g(s)}{\Delta X_g(s)} = \frac{1}{1 + sT_t} \quad (2)$$

در این معادله T_t ثابت زمانی مخزن بخار می‌باشد که به طور معمول مقدار آن در محدوده $100ms \leq T_t \leq 500ms$ قرار دارد. معادله (۲) نشان‌دهنده 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].

$$G_{TRH}(s) = \frac{\Delta P_g(s)}{\Delta X_g(s)} = \frac{1 + sK_r T_r}{(1 + sT_t)(1 + sT_r)} \quad (3)$$

در این رابطه K_r ضریب بازگرمایش و T_r ثابت زمانی

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 ناحیه 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:

$$u_1(t) = \hat{u}_1(t) - k_1 \operatorname{sgn}(s(t)) \quad (14)$$

در این رابطه، k_1 یک ضریب بهره مثبت برای کنترل کننده کلیدزنی می‌باشد.

۳-۲ طراحی SMC برای توربین بازگرمایش

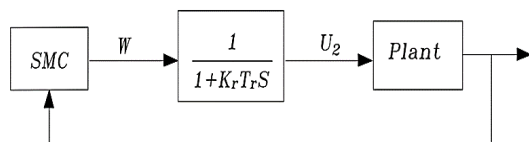
در فرآیند طراحی، $\Delta x_2 = \Delta f_2$ تعریف شده است که خطای فرکانس در ناحیه ۲ می‌باشد. بر اساس معادله (۴)، و روابط کنترلی بدست آمده از بلوک های شکل (۱) و مدل دیفرانسیلی معمولی، قانون کنترل SMC را می‌توان به صورت ترکیب خطی یک قانون کنترل معادل و قانون کنترل کلیدزنی انتخاب کرد، که یک تابع علامت می‌باشد.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

$$w(t) = \hat{w}(t) - K_2 \operatorname{sgn}(s(t)) \quad (15)$$

در این معادله، K_2 یک ضریب کنترلی مثبت برای کنترل کننده 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، $\Delta x_3 = \Delta f_3$ 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:

۳-طراحی کنترل کننده مد لغزشی

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

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

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \delta \right)^{(n-1)} \tilde{x}(t) \quad (10)$$

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:

$$u_s = k \cdot \operatorname{sgn}(s(x, t)) \quad (11)$$

در این رابطه u_s قانون کنترل کلیدزنی، k یک ضریب مثبت و $\operatorname{sgn}(s(t))$ 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:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2 \geq 0 \quad (12)$$

در این معادله، s صفحه لغزش است. اگر مشتق رابطه (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:

$$ACE_i = \sum_{j(j \neq i)} \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i \quad (13)$$

در ادامه فرآیند طراحی کنترل کننده مد لغزشی برای سیستم قدرت سه ناحیه به هم پیوسته، با توربین بدون بازگرمایشی و توربین دارای بازگرمایشی و توربین هیدرولیکی توضیح داده می‌شود. طراحی

$$C_{total} = f + 10 * C \quad (19)$$

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 و پارامترهای 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 همه 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 اطراف 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:

$$V_i^{t+1} = W V_i^t + C_1 r_1 (Pbest_i - x_i^t) + C_2 r_2 (Gbest_i - x_i^t) \quad (20)$$

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

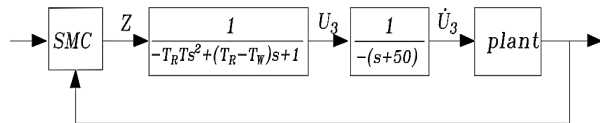
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$T_{g1}[s]$	۰/۰۸	$T_{g2}[s]$	۰/۰۸	$T_{g3}[s]$	۰/۰۸
$T_{t1}[s]$	۰/۰۳	$T_{t2}[s]$	۰/۰۳	$T_2[s]$	۰/۵۱۳
$T_r[s]$	۱۰	K_r	۰/۵	$T_R[s]$	۵
K_{p1}	۱۲۰	K_{p2}	۱۲۰	K_{p3}	۱۲۰
$T_{p1}[s]$	۲۰	$T_{p2}[s]$	۲۰	$T_{p3}[s]$	۲۰
R_1	۲/۴	R_2	۲/۴	R_3	۲/۴
B_1	۰/۴۲۵	B_2	۰/۴۲۵	B_3	۰/۴۲۵
$T_w[s]$	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 نشان‌دهنده عملکرد بهتر کنترل *SMC* می‌باشد. در جدول (۲) پارامترهای بهینه بدست آمده برای کنترل‌کننده *PI* و *SMC* نشان داده شده است.

$$z(t) = \hat{z}(t) - K_3 \operatorname{sgn}(s(\Delta x_3, t)) \quad (16)$$

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 $\delta_1, \delta_2, \delta_3, k_1, k_2$ و k_3 می‌باشند. تابع هزینه بهینه‌سازی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(IAE) = \int_0^T |(\Delta P_{ne-i} + B_i \Delta f)| dt \quad (17)$$

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 فراجش، زمان نشست و خطای ماندگار. بنابراین، تابع هزینه بهینه‌سازی به صورت زیر خواهد بود:

$$C = \alpha.(SE) + \beta.(OS) + \gamma.(ST) \quad (18)$$

پارامترهای *SE*، *OS* و *ST* به ترتیب خطای ماندگار، فراجش و زمان نشست پاسخ فرکانس هر ناحیه می‌باشند. همچنین 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 عنوان تابع هزینه در نظر گرفت. در این مقاله بهینه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار متلب و الگوریتم ازدحام ذرات انجام خواهد شد.

۴-۴ شبیه‌سازی

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:

۳-۴ مقایسه عملکرد کنترل کننده 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 کنترل کننده 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 ۱-م به صورت زیر است:

$$\Delta P_{Li}^* = \lambda \Delta f_i + \Delta P_{Li} \quad (21)$$

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

در سناریو دوم فرض شده است که بار هر سه ناحیه به اندازه ۰/۰۱ 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 شده کنترل کننده PI و SMC

پارامترهای کنترل کننده PI		پارامترهای کنترل کننده SMC	
K_1	-۰/۸۲	k_1	۳۰۵/۷
K_{11}	-۰/۰۱۳۴	δ_1	۰/۸۹
K_2	-۰/۵۹۲۲	k_2	۴۳۸/۶
K_{12}	-۰/۰۰۱۹	δ_2	۲
K_3	-۰/۶۲۳	K_3	۳۵۰/۶
K_{13}	-۰/۴۰۱۷	δ_3	۲۳/۴۹

۵- نتیجه گیری

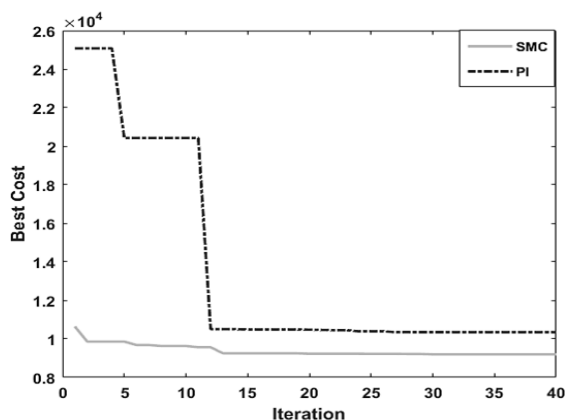
در این مقاله یک سیستم قدرت سه ناحیه‌ای در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد و در مرحله اول پارامترهای کنترل کننده SMC و کنترل کننده PI با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی و در ادامه با در نظر گرفتن دو سناریو، عملکرد کنترل کننده SMC و کنترل کننده PI با در نظر گرفتن شرایط کاری که کنترل کننده‌ها در آن شرایط بهینه‌سازی شدند مورد بررسی قرار گرفت. از شبیه‌سازی روش پیشنهادی این نتیجه حاصل گردید که خطای فرکانس ناحیه‌ها برای کنترل کننده SMC فراجش کمتری در مقایسه با کنترل کننده PI دارد ضمن آنکه تغییر نقطه کار تأثیری بر روی عملکرد کنترل کننده SMC ندارد و این کنترل کننده قادر است برای نقاط کاری مختلف، عملکرد مناسبی ارائه دهد. این موضوع نشان دهنده عملکرد مقاوم کنترل کننده SMC می‌باشد. بعنوان پیشنهادهایی جهت توسعه این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

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

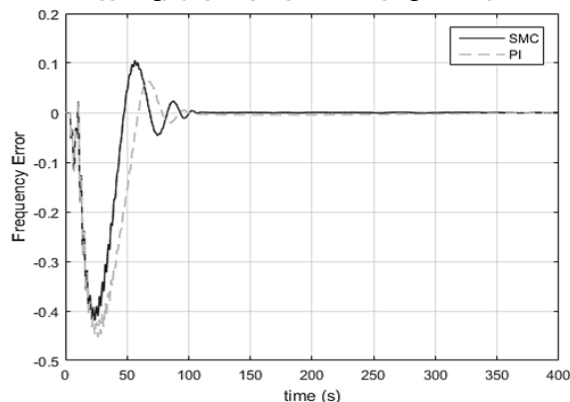
۲- در نظر گرفتن مدل‌های استاتیک و دینامیک پیچیده‌تر برای بار

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

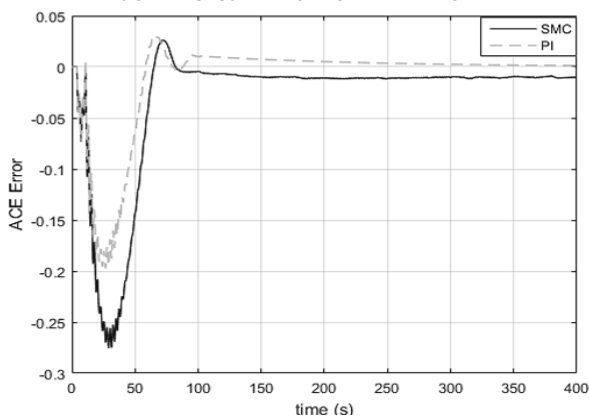
۴- استفاده از کنترل کننده‌های مد لغزشی مرتبه بالاتر



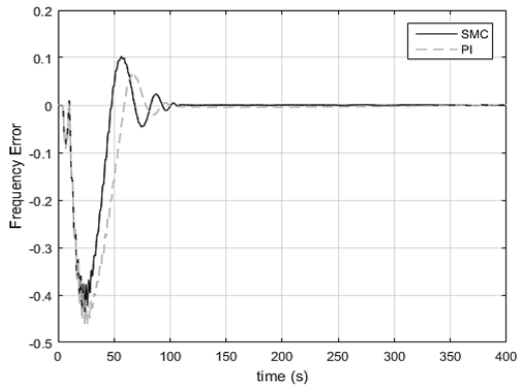
شکل (۴): تابع هزینه بهینه‌سازی برای هر دو نوع کنترل کننده



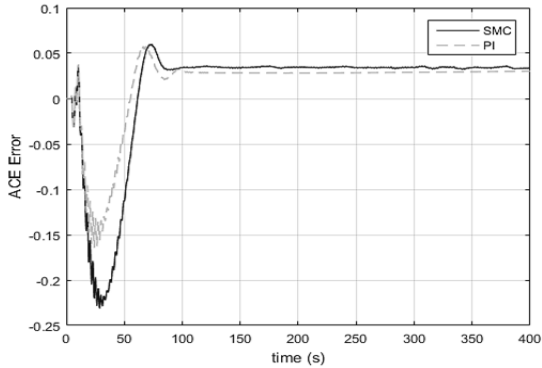
شکل (۵): خطای فرکانس ناحیه اول برای سناریو ۱



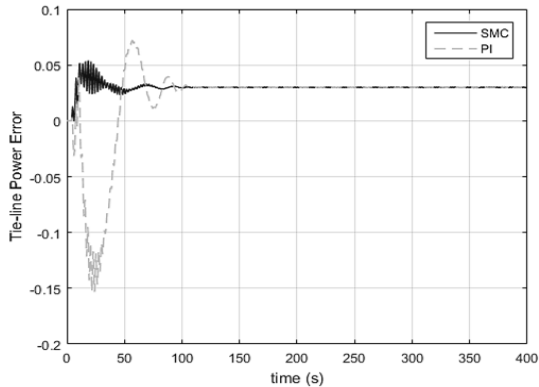
شکل (۶): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه اول برای سناریو ۱



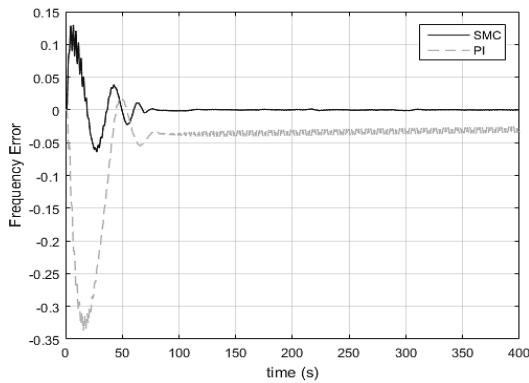
شکل (۱۱): خطای فرکانس ناحیه سوم برای سناریو ۱



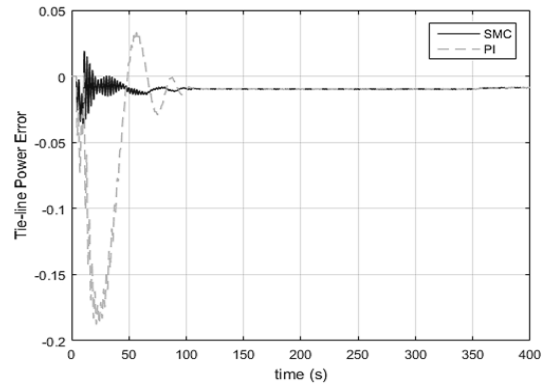
شکل (۱۲): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه سوم برای سناریو ۱



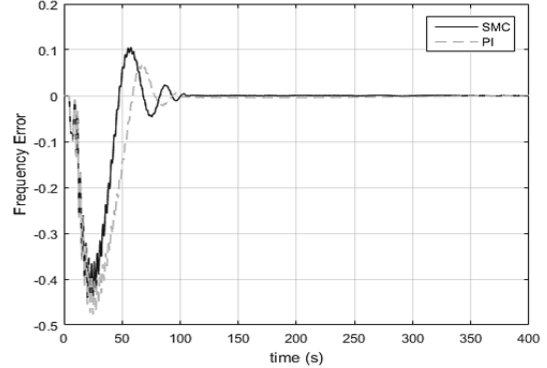
شکل (۱۳): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه سوم برای سناریو ۱



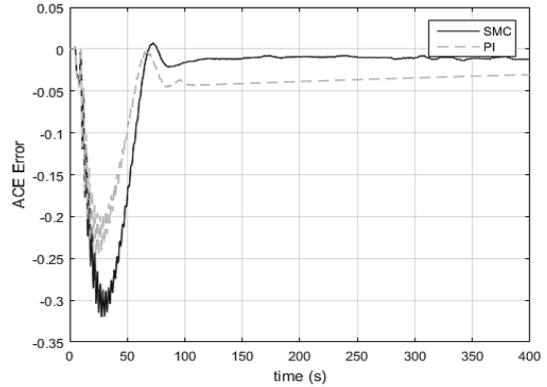
شکل (۱۴): خطای فرکانس ناحیه اول برای سناریو ۲



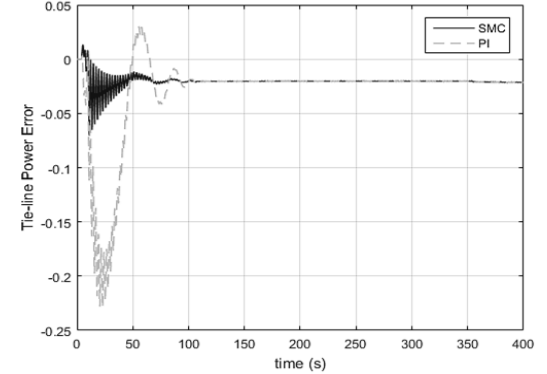
شکل (۷): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه اول برای سناریو ۱



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

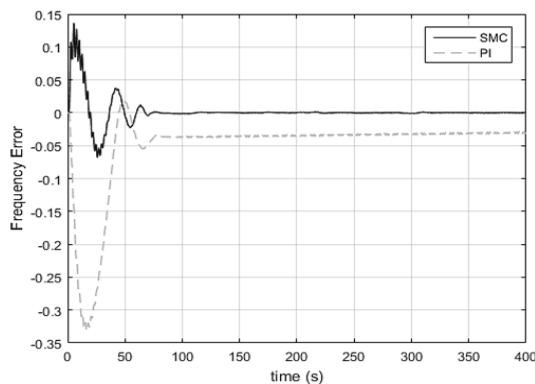


شکل (۹): خطای کنترل ناحیه (ACE) در ناحیه دوم برای سناریو ۱

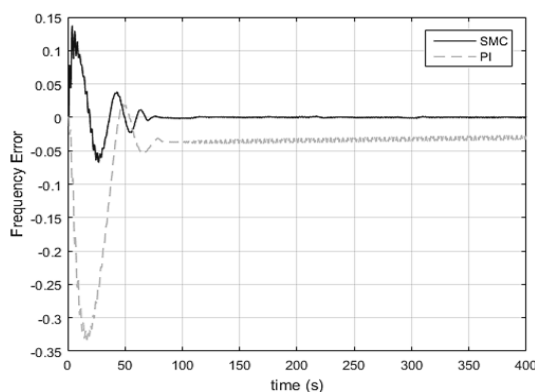


شکل (۱۰): خطای توان خط ارتباطی در ناحیه دوم برای سناریو ۱

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



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



شکل (۱۶): خطای فرکانس ناحیه سوم برای سناریو ۲

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.

رزومه



سید کمال منتظری در کرمانشاه متولد شده است (۱۳۵۴). او کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد نجف آباد (۱۳۸۱)، و کارشناسی- ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه 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 ابزار دقیق در صنعت نفت می باشد. وی در حال حاضر مسئول مهندسی ابزار دقیق شرکت پالایش نفت اصفهان می باشد.

زیرنویس ها

- 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



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 علاقه مندی 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 می باشد.



مهتری 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.

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