

Optimal design of NL-PIDF and SMES as load frequency controller in a hybrid nonlinear power system using krill herds algorithm

Mina Heshmati¹, Saeed Jalilzadeh², Hossein Shayeghi³, Reza Noroozian⁴

1- Master of Electrical Engineering Student, University of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

4- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Abstract:

This paper investigates frequency stability in a three area power system including steam and gas turbines by taking into physical nonlinear constraints due to reheat steam turbine, generation rate constraint (GRC), governor dead band (GDB) and boiler dynamics (BD). A new load frequency controller based on nonlinear PID controller with derivative filter (NL-PIDF) is proposed and optimized. In order to improve dynamic stability, superconducting magnetic energy storage (SMES) is considered in first area and parallel HVDC links are used between some interconnected areas. Krill Herds optimization algorithm with hybrid cost function is used to optimally design integral control (AGC), proportional control and inductor current feedback gain of SMES and NL-PIDF controlling parameters. Simulation results in time domain and Eigen values studies demonstrate fast, stable, robust and also desirable performance of proposed control strategies in damping frequency and active power oscillations in the face with random step and sinusoidal load perturbations, variation in nonlinear GRC and GDB constraints and wide uncertainty in dynamic parameters.

Keywords: LFC, Three area realistic power system, Nonlinear PIDF controller, SMES, HVDC, KH algorithm.

طراحی بهینه کنترل کننده NL-PIDF و SMES برای کنترل بار فرکانس

سیستم قدرت هیبریدی غیرخطی با استفاده از الگوریتم کرپلها

مینا حشمتی^۱، سعید جلیلزاده^۲، حسین شایقی^۳، رضا نوروزیان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

m.heshmati.znu@gmail.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

jalilzadeh@znu.ac.ir

۳- استاد، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه محقق اردبیلی - اردبیل - ایران

hshayeghi@gmail.com

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه زنجان - زنجان - ایران

noroozian@znu.ac.ir

چکیده: در این مقاله مسئله پایداری فرکانس در سیستم قدرت سه ناحیه‌ای با توربین‌های بخاری و گازی با در نظر گرفتن قیود غیرخطی ناشی از واحد بازگرمکن توربین بخار، محدودیت میزان تولید (GRC)، باند مرده گاورنر (GDB) و الگوی دینامیکی دیگ بخار (BD) بررسی شده‌اند. برای کنترل بار فرکانس، سیستم قدرت کنترل کننده جدیدی به صورت تناسبی - انتگرال گیر - مشتق گیر - فیلتر نوزگیر غیرخطی (NL-PIDF) معرفی و بهینه شده است. برای بهبود پایداری دینامیکی، ابرسانای ذخیره‌ساز میدان مغناطیسی (SMES) در ناحیه اول نصب شده و از خط انتقال موازی HVDC بین برخی نواحی استفاده شده است. برای طراحی بهینه مقادیر کنترل خودکار تولید هر ناحیه (AGC)، کنترل کننده تناسبی و بهره فیدبک جریان القاگر SMES و کنترل کننده NL-PIDF از الگوریتم بهینه‌سازی کرپلها (KH) با تابع هدفی ترکیبی استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در حوزه زمان و مطالعات مقادیر ویژه، نشان دهنده عملکرد سریع، پایدار، مقاوم و همچنین برتری استراتژی کنترلی بهینه پیشنهادی در میرایی نوسانات فرکانس و توان اکتیو مبادله شده بین نواحی هنگام مواجهه با تغییرات پله‌ای تصادفی و سینوسی بار، تغییرات GRC، تغییرات GDB و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات گسترده مقادیر دینامیکی است.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم KH، HVDC، ذخیره‌ساز SMES، کنترل بار فرکانس، کنترل کننده غیرخطی NL-PIDF.

۱- مقدمه

تأمین توان مورد نیاز بارهای شبکه به صورت مطمئن، بی‌وقفه و با کیفیتی مطلوب امری ضروریست.

این کنترل باعث تطبیق میزان توان تولیدی با توان تقاضاشده در نقطه کار جدید می‌شود و نتایجی همچون حفظ فرکانس در حد مجاز، تقسیم بار بین ژنراتورها و کنترل برنامه‌های تبادل توان در خطوط ارتباطی بین ناحیه‌ها را به دنبال خواهد داشت [۱، ۲]. از طرفی دیگر، گرایش تازه برای ایجاد بازار رقابت، بهره‌برداری از کنترل بار فرکانس سنتی را دگرگون کرده است؛ به طوری که در محیط رقابتی

پایداری توان اکتیو و فرکانس یا کنترل بار فرکانس^۱ (LFC) برای حفظ پایداری دینامیکی سیستم‌های قدرت و

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۵

نام نویسنده مسئول: سعید جلیلزاده

نشانی نویسنده مسئول: ایران - زنجان - دانشگاه زنجان - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

افزایش پایداری دینامیکی سیستم قدرت امری مطلوب تلقی می‌شود [۱۴، ۱۵].

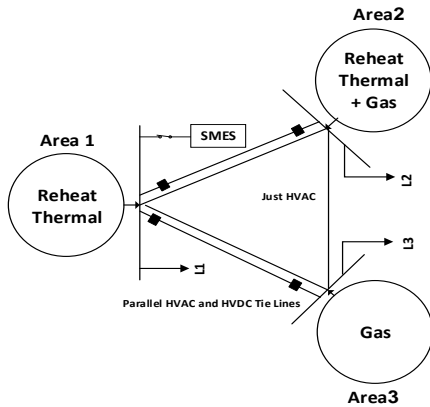
در این مقاله سیستم قدرت سه‌ناحیه‌ای هیبریدی غیرخطی مبتنی بر توربین‌های گازی و بخاری، شبیه‌سازی شده است. برای دستیابی به عملکرد واقعی‌تر، ویژگی‌های غیرخطی ناشی از قیود فیزیکی محدودیت میزان تولید^{۱۲} (GRC)، باند مرده گاورنر^{۱۳} (GDB)، الگوی دینامیکی دیگ بخار^{۱۴} (BD) و واحد بازگرمکن بخار در نظر گرفته شده‌اند. برای بهبود پایداری دینامیکی، ذخیره‌ساز بهینه‌شده SMES در ناحیه اول نصب شده و از خط انتقال موازی HVDC بین نواحی اول و دوم و نواحی اول و سوم استفاده شده است. برای دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم کنترل بار فرکانس، کنترل‌کننده جدیدی به صورت PID غیرخطی با فیلتر نویزگیر معرفی شده است و پارامترهای کنترلی SMES و NL-PIDF^{۱۵} با الگوریتم هوشمند کریل‌ها^{۱۶} (KH) با تابع هدف ترکیبی بهینه شده‌اند. برخلاف تحقیقات قبلی [۳-۱۰] در این مقاله از الگوسازی دقیق SMES در سیستم LFC با در نظر گرفتن قیود غیرخطی GRC، GDB، BD استفاده شده است. همچنین سیگنال خطای کنترل ناحیه^{۱۷} (ACE) برای میرایی نوسانات فرکانس و توان مبادله‌شده بین نواحی به جای سیگنال نوسانات فرکانس تنها [۵، ۹، ۱۰] به‌عنوان ورودی لحاظ شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در حوزه زمان مبتنی بر نمودارها و شاخص‌های کمی فراجهدش^{۱۸} (OS)، فروجهدش^{۱۹} (US)، پیک تا پیک^{۲۰} (PP)، زمان نشست^{۲۱} (Ts)، انتگرال خطا^{۲۲} (IAE)، انتگرال خطا در زمان^{۲۳} (ITAE)، انتگرال مربع خطا^{۲۴} (ISE) و انتگرال مربع خطا در زمان^{۲۵} (ITSE) و مطالعات مقادیر ویژه با معیار کمترین نسبت میرایی^{۲۶} (MDR) بین تمامی مقادیر ویژه نشان‌دهنده عملکرد سریع، پایدار، مقاوم و همچنین برتری استراتژی کنترلی بهینه پیشنهادی در میرایی نوسانات سیستم قدرت هنگام مواجهه با تغییرات پله‌ای تصادفی و سینوسی بار، تغییرات GRC، تغییرات GDB و عدم قطعیت‌های ناشی از تغییرات گسترده مقادیر دینامیکی است.

آزاد، کنترل بار فرکانس هر واحد تولیدکننده به صورت کالایی در آمده است که دادوستد می‌شود؛ بنابراین اهمیت تحلیل آن پررنگ‌تر شده است [۳-۶].

در سال‌های اخیر پژوهش‌های بسیاری مبنی بر بهبود پایداری فرکانس سیستم‌های قدرت با بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی انجام شده است [۵-۱۵]. همچنین استفاده از ادوات ذخیره‌ساز توان از جمله ابررسانای ذخیره‌ساز میدان مغناطیسی^۲ (SMES) راهکاری جدید است که برای کاهش نوسانات فرکانس و توان مبادله‌شده بین نواحی ارائه شده است. این ادوات به همراه ذخیره چرخان سیستم موجب تولید توان بی‌وقفه می‌شوند [۳-۱۰]. در [۳] سیستم قدرت تجدید ساختاریافته‌ای با کنترل مقاوم^۳ و SMES، شبیه‌سازی و برتری عملکرد سیستم کنترلی با حضور SMES گزارش شده است. استفاده از ترستور کنترل‌شده شیفت‌دهنده فاز^۴ (TCPS) در خطوط ارتباطی بین نواحی در سیستم تجدید ساختاریافته خطی چندمنبعی با SMES و کنترل‌کننده^۵ ANFIS [۴] و SMES با الگوی مرتبه یک ساده‌سازی شده به همراه دو جبران‌ساز فاز با کنترل خودکار تولید^۶ (AGC) [۵] نشان‌دهنده بهبود پایداری گذرای سیستم با حضور SMES است. بهینه‌سازی سیستم کنترل خودکار تولید خطی با SMES با استفاده از الگوریتم کلونی زنبور عسل^۷ (ABC) [۶] و الگوریتم فاخته^۸ (CSA) [۷] بر عملکرد مطلوب SMES تأکید دارند. در [۸] سیستم قدرت دو ناحیه‌ای هیبریدی خطی با کنترل خودکار تولید، شبیه‌سازی و برای افزایش پایداری سیستم از SMES و ذخیره‌ساز انرژی خازنی^۹ (CES) استفاده شده است. این مقاله نشان‌دهنده برتری عملکرد SMES در میرایی نوسانات سیستم مطالعه شده است. در [۹] از کنترل فازی و SMES مرتبه یک برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت دو ناحیه‌ای استفاده شده است. در [۱۰] سیستم قدرت هیبریدی شبیه‌سازی شده و کنترل‌کننده فازی هر واحد با الگوریتم کرم شبتاب^{۱۱} (FA) بهینه شده است. همچنین برای بهبود پاسخ‌های دینامیکی سیستم از SMES مرتبه یک و کنترل‌کننده یکپارچه توان^{۱۱} (UPFC) استفاده شده است. علاوه بر ادوات ذخیره‌ساز، استفاده از خطوط انتقال موازی HVDC به علت کاهش حساسیت به تغییرات فرکانس و

در مقاله حاضر BD به صورت شکل (۳) لحاظ شده

است. این الگو گویای دینامیک بلندمدت سوخت، جریان بخار و سیستم کنترل احتراق است [۹،۱۱،۱۳].



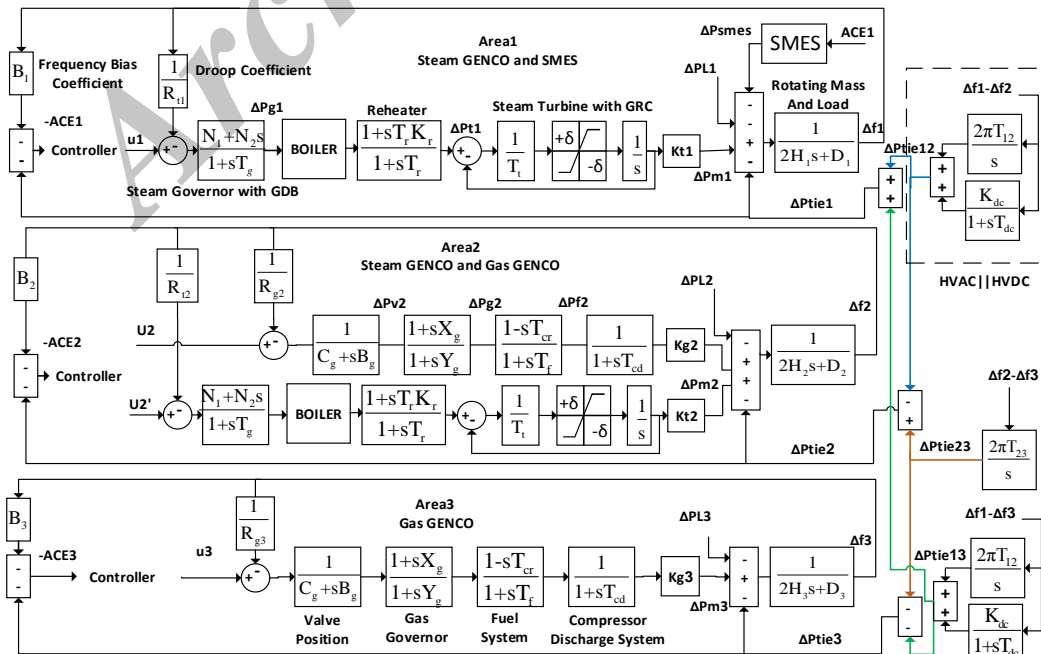
شکل (۱): سیستم قدرت سه ناحیه‌ای هیبریدی متصل به هم با SMES و خطوط انتقال HVAC و HVDC

در شکل (۲)، Δf تغییرات فرکانس، ΔP_L تغییرات بار، ΔP_{Tie} نوسانات توان عبوری بین نواحی، ΔP_m تغییرات توان مکانیکی، R ضریب تنظیم سرعت گاورنر، B ضریب بایاس فرکانس هر ناحیه، D ضریب میرایی، H اینرسی، T_{ij} ضریب سنکرونیسم خط انتقال HVAC، K_{dc} بهره خط انتقال HVDC، T_g ثابت زمانی گاورنر ناحیه بخاری، T_i ثابت

۲- الگوی دینامیکی سیستم قدرت

نمای کلی سیستم قدرت با واحدهای بخاری و گازی، خط انتقال HVDC و ذخیره‌ساز SMES برای بررسی عملکرد استراتژی‌های کنترلی بهینه پیشنهادی و مقایسه آن در شکل (۱) نمایش داده شده‌اند. شکل (۲) بلوک دیاگرام کنترل بار فرکانس سیستم شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد [۷،۱۲،۱۵]. در واحدهای بخاری GRC برابر با ۳ الی ۱۰٪ پریونیت مگاوات در دقیقه مطابق شکل (۲) لحاظ می‌شود [۹-۱۲]. در این مقاله محدودیت میزان تولید واحدهای بخاری برابر با $\delta = \pm 0.0017$ پریونیت مگاوات در ثانیه در نظر گرفته شده است و سپس برای نمایش مقاوم بودن استراتژی‌های کنترلی پیاده‌سازی شده تا ۰/۰۳ پریونیت مگاوات در دقیقه محدودتر شده است. در گاورنرهای بخاری GDB به صورت باند هیستریزس با پهنای ۰/۰۵ یا ۰/۰۶ فرکانس نامی (۰/۳۳ هرتز) لحاظ می‌شود [۱۱]. در مقالات اخیر برای شرکت GDB در مطالعات مقادیر ویژه، از الگوی تابع تبدیل آن به صورت چندجمله‌ای خطی سازی شده با ضرایب سری فوریه $N_1=0.8$ و $N_2=-0.2/\pi$ استفاده شده است [۱۲،۱۳]. معادله (۱) تابع تبدیل گاورنر بخار همراه با باند مرده را نشان می‌دهد.

$$G_g = \frac{N_1 + N_2 s}{1 + s T_g} \quad (1)$$



شکل (۲): بلوک دیاگرام الگوی تابع تبدیل سیستم قدرت سه ناحیه‌ای هیبریدی شبیه‌سازی شده با قیود غیرخطی، SMES و HVDC

Archive of SID

$$\Delta Ptie_i(s) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{2\pi T_{ij}}{s} + \frac{K_{dc}}{1+sT_{dc}} \right) (\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)) \quad (5)$$

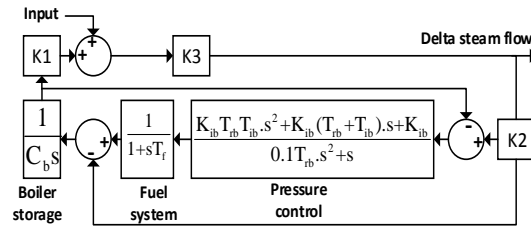
خطای کنترل ناحیه (ACE) به عنوان ورودی کنترل کننده سیستم قدرت برابر با مجموع خطی Δf و ΔP_{tie} بوده و به صورت معادله (۷) تعریف می شود.

$$\Delta f_i(s) = \frac{1}{2H_i s + D_i} (\Delta Pm_i(s) - \Delta PL_i(s) - \Delta Ptie_i(s)) \quad (6)$$

$$e_i = ACE_i = B_i \Delta f_i + \Delta Ptie_i \quad (7)$$

با توجه به معادلات دینامیکی حاکم بر الگوی LFC سیستم قدرت [۱]، الگوی فضای حالت برای هر ناحیه بخاری خطی \dot{X} با طراحی غیرمتمرکز به صورت دسته معادلات (۸) توصیف می شود که در آن بردار متغیرهای حالت، u بردار ورودی، d بردار اغتشاش وارده و Y بردار خروجی های دلخواه است. به طور مشابهی دسته معادلات (۹) درباره الگوی دینامیکی ناحیه گازی صادق اند.

$$\left. \begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu + Ld, \quad Y = Cx, \quad u = [u_i], \quad d = [\Delta PL_i] \\ X &= [\Delta Pg_i \quad \Delta Pt_i \quad \Delta Pm_i \quad \Delta Ptie_{i,AC} \quad \Delta Ptie_{i,DC} \quad \Delta f_i]^T \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RT_g} \\ \frac{1}{T_r} - \frac{K_r}{T_g} & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_r}{RT_g} \\ 0 & \frac{1}{T_i} & -\frac{1}{T_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\pi \sum_{j=1}^3 T_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{dc}} & \frac{2K_{dc}}{T_{dc}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2H} & -\frac{1}{2H} & -\frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{T_g} & \frac{K_r}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2H} \end{bmatrix}^T \\ y &= \begin{bmatrix} ACE_i \\ \Delta Ptie_i \\ \Delta f_i \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & B_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$



شکل (۳): بلوک دیاگرام الگوی دینامیکی دیگ بخار [۱۱]

زمانی توربین بخار، K_r ثابت بازگرمکن توربین بخار، T_r ثابت زمانی بازگرمکن توربین بخار، C_g موقیت دریچه توربین گازی، B_g ثابت موقعیت دریچه گاز، X_g ثابت زمانی پیشفاز گاورنر گازی، Y_g ثابت زمانی پسفاز گاورنر گازی، T_{cr} تأخیر زمانی واکنش سیستم احتراق توربین گازی، T_{cd} ثابت زمانی سوخت توربین گازی و T_{ed} ثابت زمانی دشارژ کمپرسور گازی اند. مقادیر در پیوست آورده شده اند. ضریب شرکت پذیری هر واحد است و برای هر ناحیه داریم $\sum K=1$. ضرایب شرکت پذیری با توجه به نیروگاه های بخاری و گازی مرسوم و موجود با توان تقریبی یکسان ۲۰۰۰ مگاوات به دست آمده اند. ناحیه اول شامل شش واحد بخاری با توان متوسط ۳۳۰ مگاوات، ناحیه دوم شامل چهار توربین بخار ۲۵۰ مگاواتی، سه توربین بخار ۱۰۰ مگاواتی و شش توربین گازی ۱۲۵ مگاواتی و ناحیه سوم نیروگاهی با هشت واحد گازی ۲۵۰ مگاواتی است.

با فرض فواصل زیاد بین نواحی اول و دوم و نواحی اول و سوم از خط انتقال HVDC بین آنها استفاده شده است. نحوه اتصال HVDC در شکل (۲) نشان داده شده است. ΔP_{tie} وجود خطوط انتقال HVDC و HVAC به صورت معادلات (۲-۵) بیان می شود [۱۴].

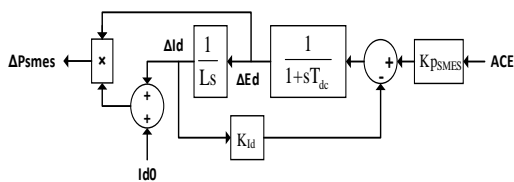
$$\Delta Ptie_{ij,AC}(s) = \frac{2\pi T_{ij}}{s} (\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)) \quad (2)$$

$$\Delta Ptie_{ij,DC}(s) = \left(\frac{K_{dc}}{1+sT_{dc}} \right) (\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)) \quad (3)$$

$$\Delta Ptie_{ij,AC,DC}(s) = \left(\frac{2\pi T_{ij}}{s} + \frac{K_{dc}}{1+sT_{dc}} \right) (\Delta f_i(s) - \Delta f_j(s)) \quad (4)$$

$$\Delta P_{SMES} = \Delta Ed (Id_0 + \Delta Id) \quad (12)$$

پس از تنظیم نقطه کار جدید با اعمال ولتاژ مثبت کوچکی مجدداً جریان اولیه القاگر (Id0)، ایجاد و سپس با شروع هدایت، SMES به سرعت تا توان نامی خود شارژ می شود [4,7]. در این مقاله برای بهبود میرایی ACE علاوه بر بهینه سازی پارامترهای کنترل تکمیلی، مقادیر حلقه های کنترلی SMES یعنی KpSMES و KId نیز بهینه سازی شده اند که در بخش (6) توضیح داده شده اند.



شکل (4): بلوک دیاگرام الگوی تابع تبدیل SMES [4]

3- طراحی کنترل کننده NL-PIDF

کنترل کننده های PID از سه قسمت مجزا به نام تناسبی با ضریب Kp، انتگرال گیر با ضریب Ki و مشتق گیر با ضریب Kd تشکیل شده اند. این کنترل کننده ها به دلیل ساختار ساده و پیاده سازی آسان به طور وسیعی در صنعت به کار گرفته می شوند. به علت حساسیت جمله مشتق گیر نسبت به نویز و حتی تشدید آن، کنترل کننده های PID بیشتر به صورت PI استفاده می شوند. در این مقاله برای رفع این مشکل، کنترل کننده PID با فیلتر نویزگیر پیاده سازی شده است. از طرفی، سیستم های قدرت مانند بیشتر سیستم های صنعتی غیرخطی است و برای پایداری این سیستم ها کنترل کننده های خطی ممکن است در تمامی شرایط پاسخگو نباشند؛ بنابراین در این مقاله برای مقابله با قیود غیرخطی و ایجاد پایداری دینامیکی بلندمدت، از استراتژی کنترلی غیرخطی به صورت NL-PIDF، استفاده و با کنترل خودکار تولید (Ki/s) مقایسه شده است. این کنترل کننده ساختاری جدید با افزودن توابع غیرخطی به ساختار PID کلاسیک را دنبال می کند. شکل (5) بلوک دیاگرام و معادله (13) تابع تبدیل استراتژی کنترلی در حوزه لاپلاس را بیان می کند [16]. u سیگنال کنترل شده خروجی، e خطای کنترل ناحیه، N ضریب فیلتر نویزگیر برای بهبود

$$\begin{aligned} \dot{X} &= Ax + Bu + Ld, \quad Y = Cx, \quad u = [u_1], \quad d = [\Delta PL_i] \\ X &= [\Delta P_{v_i} \quad \Delta P_{g_i} \quad \Delta P_{f_i} \quad \Delta P_{m_i} \quad \Delta P_{tie_{iAC}} \quad \Delta P_{tie_{iDC}} \quad \Delta f_i]^T \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{C_g}{B_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RB_g} \\ \frac{1}{Y_g} - \frac{C_g X_g}{B_g Y_g} & -\frac{1}{Y_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{X_g}{RB_g Y_g} \\ \frac{T_{cr}}{T_f} \left(\frac{1}{Y_g} - \frac{C_g X_g}{B_g Y_g} \right) & \frac{1}{T_f} + \frac{T_{cr}}{Y_g T_f} & -\frac{1}{T_f} & 0 & 0 & 0 & \frac{X_g T_{cr}}{RB_g Y_g T_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{dc}} & -\frac{1}{T_{dc}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\pi \sum_{j=i+1}^3 T_{ij} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{dc}} & \frac{2K_{dc}}{T_{dc}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2H} & -\frac{1}{2H} & -\frac{1}{2H} & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{1}{B_g} & \frac{X_g}{B_g Y_g} & -\frac{X_g T_{cr}}{B_g Y_g T_f} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ L &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2H} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ y &= \begin{bmatrix} ACE_i \\ \Delta P_{tie_i} \\ \Delta f_i \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & B_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

در بحث پایداری سیستم قدرت، ذخیره ساز SMES با هدف تزریق سریع توان در لحظات بروز ناگهانی افزایش بار، کاهش خطای کنترل ناحیه و در نتیجه، کاهش نوسانات و حفظ پایداری نصب می شود. در این مقاله بنا به دلایل اقتصادی، SMES تنها در ناحیه اول نصب شده که وضعیت بحرانی تری در نظر گرفته شده است [5,8]. شکل (4) بلوک دیاگرام دقیق واحد SMES شبیه سازی شده با ورودی ACE را نشان می دهد. تغییرات ولتاژ دو سر القاگر SMES (ΔEd_i) به صورت معادله (10) بیان می شوند.

$$\Delta Ed_i = \frac{1}{1+sT_{dc_i}} [Kp_{SMES} ACE_i - K_{Id_i} \Delta Id_i] \quad (10)$$

که در آن KpSMES ضریب بهره کنترل تناسبی، Tdc زمان تأخیر کانورتور، ΔId تغییرات جریان القاگر و KId بهره فیدبک منفی جریان القاگر برای بازسازی سریع Id پس از تغییرات بار بوده است و مطابق رابطه (11) تعریف می شود:

$$\Delta Id_i = \frac{\Delta Ed_i}{sL} \quad (11)$$

L اندوکتانس سیم پیچ است؛ بنابراین تغییرات توان خروجی SMES به صورت معادله (12) بیان می شود:

که در آن N_i حرکت القایی دیگر کریلها، F_i حرکت برای یافتن غذا و D_i حرکت فیزیکی تصادفی کریل نام است. N_i برای هر کریل به صورت معادله‌های (۱۶) و (۱۷) بیان می‌شود.

$$N_i^{new} = N_i^{max} \alpha_i + \omega_n N_i^{old} \quad (16)$$

$$\alpha_i = \alpha_i^{local} + \alpha_i^{target} \quad (17)$$

N_i^{max} بیشترین سرعت القاشده، ω_n وزن اینرسی حرکت القایی در محدوده [۰ و ۱]، N_i^{old} آخرین حرکت القاشده، α_i^{local} فاکتور تأثیر محلی ایجادشده از همسایه‌ها و α_i^{target} فاکتور تأثیر برای بهترین حرکت فردی هر کریل است. حرکت برای یافتن غذا با توجه به دو پارامتر مؤثر مطابق معادله‌های (۱۸) و (۱۹) فرمول‌بندی می‌شود. پارامتر نخست در ارتباط با موقعیت غذا و پارامتر دوم، تجربه قبلی درباره موقعیت غذا است.

$$F_i = V_f \beta_i + \omega_f F_i^{old} \quad (18)$$

$$\beta_i = \beta_i^{food} + \beta_i^{best} \quad (19)$$

V_f سرعت جستجوی غذا، ω_f وزن اینرسی حرکت القایی برای یافتن غذا در محدوده [۰ و ۱]، F_i^{old} آخرین حرکت برای یافتن غذا، β_i^{food} جذابیت غذا و β_i^{best} فاکتور تأثیر بهترین مقدار تابع هدف کریل نام تا زمان فعلی است. همچنین حرکت تصادفی هر کریل به صورت معادله (۲۰) تعریف می‌شود.

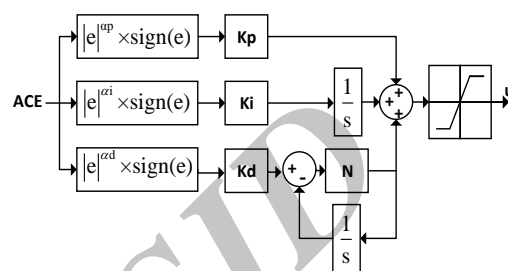
$$D_i = D_i^{max} \left(1 - \frac{iter}{iter_{max}} \right) \delta \quad (20)$$

که در آن D_i^{max} بیشترین سرعت حرکت تصادفی و δ بردار جهت حرکت تصادفی بوده و آرایه‌های آن به صورت تصادفی بین -۱ تا ۱ قرار می‌گیرند. بردار موقعیت هر کریل در بازه t تا $t + \Delta t$ با معادله (۲۱) بیان می‌شود.

$$X_i(t + \Delta t) = X_i(t) + \Delta t \frac{dX_i}{dt} \quad (21)$$

Δt ثابت بسیار مهمی است و باید به‌طور دقیق با توجه به مسئله بهینه‌سازی تعریف شود. همچنین Δt کاملاً به فضای جستجو وابسته است و می‌تواند با معادله (۲۲) به دست آید.

عملکرد جمله مشتق‌گیر و پارامتر α به صورت معادله توانی غیرخطی (۱۴) برای تغییر وزن خطای ورودی و بهبود عملکرد سیستم کنترلی برای هر جمله از کنترل‌کننده NL-PIDF تعریف می‌شود. ضرایب کنترل‌کننده NL-PIDF با استفاده از بهینه‌سازی در رنج مطلوب با الگوریتم KH به دست آمده‌اند (بخش ۶).



شکل (۵): استراتژی کنترلی NL-PIDF

$$G_{NL-PIDF} = K_p \psi(e, \alpha_p) + K_i \frac{1}{s} \psi(e, \alpha_i) + K_d \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \psi(e, \alpha_d) \quad (13)$$

$$\psi(e, \alpha) = |e|^\alpha \cdot \text{sign}(e) \quad (14)$$

۴- الگوریتم کریل‌ها

الگوریتم کریل الگوریتمی الهام‌گرفته از طبیعت است که در سال ۲۰۱۲ ارائه شده است. این الگوریتم براساس نحوه حرکت دسته‌جمعی جانداران آبی سخت‌پوستی به نام کریل برای یافتن غذا است. برتری عملکرد الگوریتم KH در مقایسه با برخی الگوریتم‌های مطرح از جمله GA^{TV} ، ES^{TA} ، BBO^{TQ} ، ACO^{TQ} ، DE^{TQ} ، HDE^{TQ} ، PSO^{TQ} و $APSO^{TQ}$ در [۱۷] گزارش شده است. در الگوریتم KH فاصله بین هر کریل تا غذا و فاصله تا جمعیت متمرکز دسته کریل‌ها به‌عنوان تابع هدف برای حرکت کریل‌ها در نظر گرفته می‌شود. موقعیت وابسته به زمان هر کریل در صفحه مختصات دو بعدی با سه اصل کنترل می‌شود: حرکت القایی دیگر کریل‌ها، حرکت کاوشی برای یافتن غذا و حرکت تصادفی. معادله (۱۵) الگوی لاگرانژ این سه رفتار را نشان می‌دهد.

$$\frac{dX_i}{dt} = N_i + F_i + D_i \quad (15)$$

UB	$\begin{bmatrix} 2.00 & 2.00 & 2.00 \\ 100 & 5.00 & 5.00 \end{bmatrix}$	$200 \ 1.5 \ 100 \ 20$
LB	$\begin{bmatrix} 2.00 & 2.00 & 2.00 \\ 100 & 5.00 & 5.00 \end{bmatrix}$	$200 \ 1.5 \ 100 \ 20$

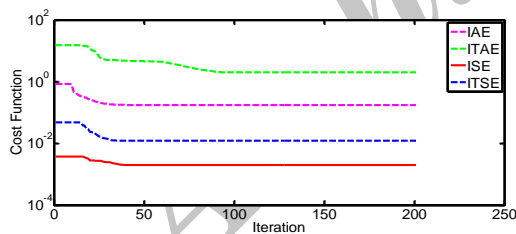
۶- نتایج شبیه سازی

برای برآورد اهداف کنترلی در سیستم کنترل بار فرکانس شکل (۲)، از پنج استراتژی کنترلی بهینه سازی شده به شرح زیر استفاده شده است. پارامترهای کنترلی به ازای تغییرات پله ای بار $1\% \text{pu.MW}$ در $t=2\text{s}$ در ناحیه اول با مقادیر نامی پیوسته شده بهینه شده اند.

۶-۱- استراتژی های کنترلی

- کنترل خودکار تولید با خطوط انتقال HVAC
- کنترل کننده NL-PIDF با HVAC
- کنترل کننده NL-PIDF با HVAC و HVDC
- NL-PIDF با SMES و HVAC
- NL-PIDF با SMES، HVAC و HVDC

در استراتژی اول، ضرایب کنترل انتگرال گیر هر ناحیه با استفاده از توابع هدف J_1 - J_4 بهینه شده اند. در شکل (۶) روند همگرایی و کاهش توابع هدف در ۲۰۰ تکرار نشان داده شده است.



شکل (۶): روند کاهش توابع هدف J_1 - J_4 با الگوریتم KH

با توجه به شکل (۶)، تابع ISE کمترین مقدار خطا دارد. ضرایب کنترل انتگرال گیر هر ناحیه با تابع هدف ISE به صورت جدول (۲) بهینه شده اند. برای بهینه سازی پارامترهای کنترلی NL-PIDF از توابع هدف متداول J_1 - J_4 و تابع هدف پیشنهادی J_5 استفاده شده و برای حصول اطمینان از عملکرد توابع هدف یادشده اغتشاش بار متفاوتی به صورت 0.1 puMW در ناحیه اول، 0.3 puMW در ناحیه دوم و 0.2 puMW در ناحیه سوم اعمال شده است. انحرافات فرکانس ناحیه اول به صورت شکل (۷) حاصل

$$\Delta t = C_t \sum_{j=1}^{NV} (UB_j - LB_j) \quad (22)$$

NV تعداد متغیرهای بهینه سازی، LB_j و UB_j به ترتیب محدوده پایین و بالای متغیر C_t عدد ثابتی در بازه $[2, 10]$ است [۱۷]. نحوه تنظیم پارامترهای این الگوریتم در جدول (۱) آورده شده است.

۵- تابع هدف

در مقاله حاضر از توابع هدف IAE, ITAE, ISE, ITSE و تابع هدف ترکیبی J_5 استفاده شده و سپس تابع J_5 برابر با ترکیبی از ITSE به علت داشتن مزایای هر سه تابع قبلی، T_s و PP به عنوان بهترین تابع هدف برای بهینه سازی پارامترها معرفی شده است. با در نظر گرفتن پارامتر خطا به صورت رابطه (۲۳)، توابع هدف J_1 - J_5 به صورت روابط (۲۴-۲۸) تعریف می شوند.

$$e = ACE_1 + ACE_2 + ACE_3 \quad (23)$$

$$J_1 = IAE = \int_0^t |e| dt \quad (24)$$

$$J_2 = ITAE = \int_0^t t |e| dt \quad (25)$$

$$J_3 = ISE = \int_0^t e^2 dt \quad (26)$$

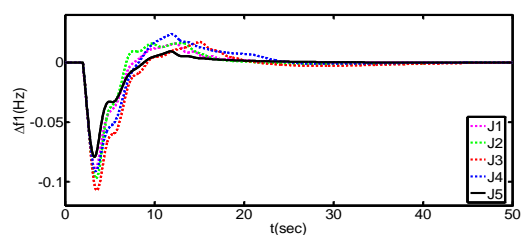
$$J_4 = ITSE = \int_0^t t e^2 dt \quad (27)$$

$$J_5 = ITSE \times w_1 + PP \times w_2 + T_s \times w_3 \quad (28)$$

t برابر با مدت زمان شبیه سازی و w ضریبی برای هم وزن ساختن جمله های تابع هدف ترکیبی پیشنهادی J_5 و ایجاد فرصت رقابتی یکسان است. رنج مقادیر پارامترهای کنترلی مطابق با جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): نحوه تنظیم پارامترها در الگوریتم KH

N_{pop}	10
$iter_{max}$	200
N^{max}	0.01
V_f	0.02
D^{max}	0.05
Variabl e	[Kp Ki Kd N α Kp _{SMES} K _{id}]
LB	[0.01 0.01 0.01 20.0 1.0 80 0.1]



شکل (۷): Δf_1 با کنترل کننده NL-PIDF با توابع هدف J_1 - J_5

۶-۲- سناریوهای بررسی شده

سناریو اول

در این سناریو عملکرد استراتژی‌های کنترلی پیاده‌سازی شده به‌ازای افزایش پله‌ای 0.1 pu.MW بار در ناحیه اول ارزیابی شده است. نمودارهای حاصل از مقایسه پنج استراتژی کنترلی مبنی بر میرایی انحرافات فرکانس و توان اکتیو مبادله شده و شاخص‌های کمی در حوزه زمان و فرکانس در شکل (۸) و جدول (۳) درج شده‌اند. نتایج نشان دهنده تأثیر مطلوب کنترل کننده پیشنهادی NL-PIDF در میراسازی سریع‌تر و نرم‌تر نوسانات به علت کاهش شدید فراجهش، کاهش نزدیک به یک ششم برابر زمان نشست و کاهش تمامی مقادیر معیارهای خطا در مقایسه با کنترل کننده I و در نتیجه، بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت‌اند. همچنین مشاهده می‌شود نبود کنترل کننده تکمیلی در سیستم قدرت مطالعه‌شده (فقط حلقه LFC) سبب ایجاد مقدار نسبتاً زیاد خطای ماندگار می‌شود و برای حفظ انحرافات فرکانس در رنج مجاز ($\pm 0.2 \text{ Hz}$) طراحی کنترل کننده امری ضروریست.

وجود خط انتقال HVDC بین نواحی سیستم قدرت شبیه‌سازی شده، تأثیر چشمگیری در کاهش OS ، US ، Ts و کاهش شاخص‌های ISE و $ITSE$ و افزایش چشمگیر MDR (مقایسه استراتژی‌های دوم و سوم) دارد و بدین‌وسیله پایداری دینامیکی مطلوب‌تری به دست می‌آید. مقایسه نتایج حاصل از اعمال استراتژی‌های دوم و چهارم، عملکرد تقریباً ایدئال سیستم قدرت مجهز به ذخیره‌ساز $SMES$ هنگام مواجهه با اغتشاشات بار به علت تزریق سریع توان لازم و در نتیجه، کاهش نزدیک به صفر نوسانات را نشان می‌دهد.

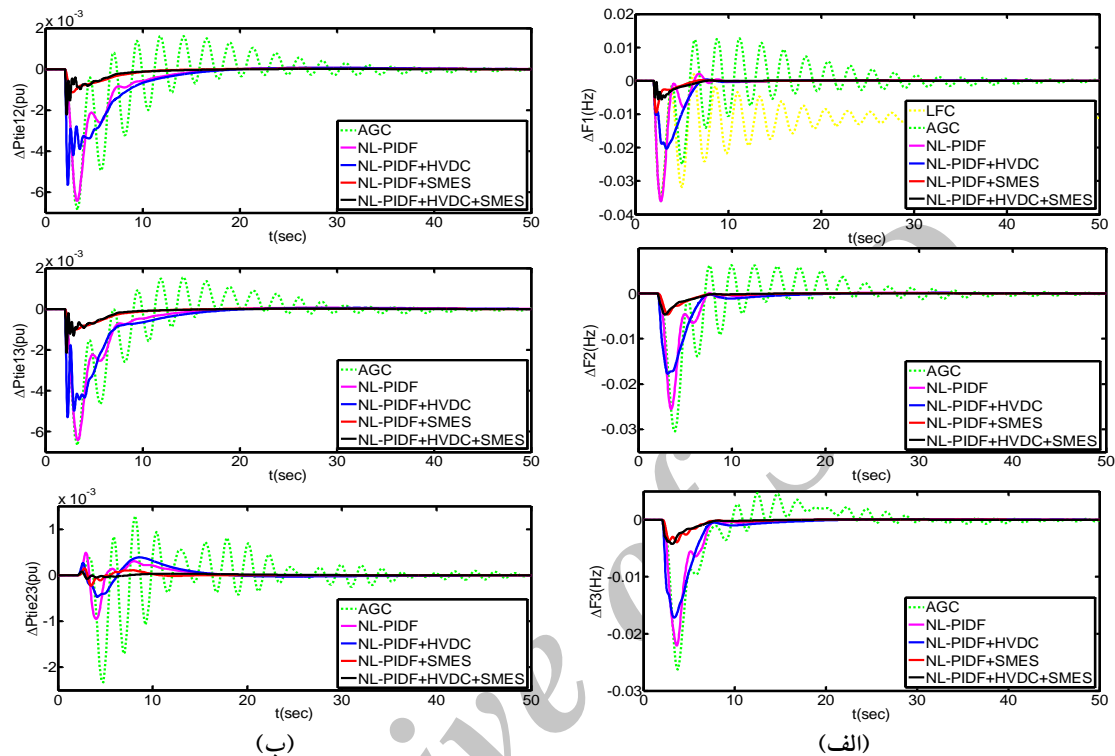
شده است که نشان‌دهنده برتری تابع هدف ترکیبی پیشنهادی J_5 به سبب به دست دادن کمترین ریبیل نوسانات و کوتاه‌ترین زمان نشست است.

جدول (۲): ضرایب بهینه‌شده پنج استراتژی مختلف

AGC			
Ki1	Ki2	Ki3	
0.3559	0.0101	0.0100	
NL-PIDF (J5)			
	واحد بخاری i=1	واحد بخاری i=2	واحد گازی i=3
Kp	1.4663	0.7780	1.7367
Ki	0.7266	0.3289	0.9401
Kd	0.9533	1.1643	1.9994
N	84.733	64.190	97.712
α_p	1.0236	1.0346	1.0162
α_i	1.2136	1.1848	1.0094
α_d	1.1351	1.1825	1.0007
NL-PIDF+HVDC (J5)			
Kp	1.1764	0.7959	1.2549
Ki	0.5172	0.7957	1.3022
Kd	0.7939	1.0427	1.3879
N	145.15	141.40	139.67
α_p	1.0066	1.0736	1.1522
α_i	1.1494	1.0466	1.1289
α_d	1.1145	1.1675	1.1503
NL-PIDF+SMES (J5)			
Kp	14.055	0.7647	0.4138
Ki	3.8043	0.9538	1.6893
Kd	3.1384	0.8853	1.9768
N	107.50	173.04	138.20
α_p	1.1150	1.0765	1.0005
α_i	1.1879	1.0469	1.0004
α_d	1.0163	1.1621	1.0029
K_{pSMES}	93.912	-	-
K_{fd}	10.854	-	-
NL-PIDF+HVDC+SMES (J5)			
Kp	24.259	1.8886	1.8431
Ki	2.1644	1.5070	0.6607
Kd	1.4346	0.8190	0.4438
N	122.58	131.65	135.59
α_p	1.1797	1.0311	1.0002
α_i	1.1021	1.1648	1.1687
α_d	1.1326	1.1522	1.1197
K_{pSMES}	92.446	-	-
K_{fd}	6.9367	-	-

تمامی استراتژی‌های کنترلی بررسی شده برتری دارد و به لحاظ سرعت پاسخ‌های دینامیکی، پایداری و مقاوم‌بودن (سه شاخص مهم عملکرد کنترل‌کننده‌ها) عملکرد مؤثری به دست می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بدیهی است استراتژی کنترلی پیشنهادی NL-PIDF+HVDC+SMES به علت کاهش همزمان تمامی معیارهای مقایسه‌ای کمی در حوزه زمان و افزایش معیار MDR در حوزه فرکانس نسبت به



شکل (۸): الف. نوسانات فرکانس $\Delta f1, \Delta f2, \Delta f3$. ب. توان مبادله‌شده بین نواحی $\Delta P_{tie12}, \Delta P_{tie13}, \Delta P_{tie23}$ به ازای ۱٪ اغتشاش بار در ناحیه اول (سناریو اول)

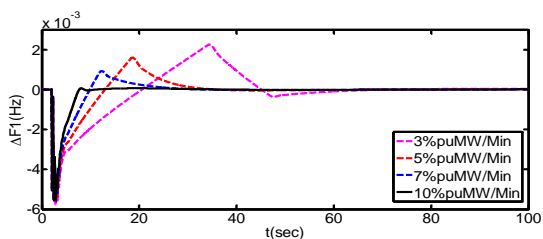
جدول (۳): نتایج کمی حاصل از مقایسه عملکرد استراتژی‌های کنترلی به‌ازای ۱٪ اغتشاش بار در ناحیه اول ($\Delta f1$)

استراتژی کنترلی	OS	US	PP	Ts	IAE	ITAE	ISE	ITSE	MDR
AGC	0.0127	-0.0360	0.0488	41.265	0.1854	2.2132	0.0024	0.0154	0.0171
NL-PIDF	0.0021	-0.0360	0.0382	7.3583	0.0573	0.2781	0.0012	0.0035	0.0175
NL-PIDF+HVDC	0.0003	-0.0203	0.0207	6.9170	0.0578	0.2990	0.0007	0.0029	0.2199
NL-PIDF+SMES	0.0001	-0.0095	0.0097	7.0799	0.0133	0.0741	0.0000	0.0001	0.0205
NL-PIDF+HVDC+SMES	0.0000	-0.0055	0.0056	7.3733	0.0133	0.0745	0.0000	0.0000	0.1238

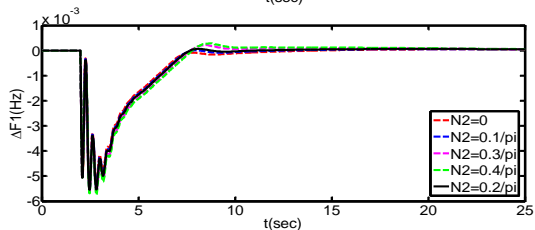
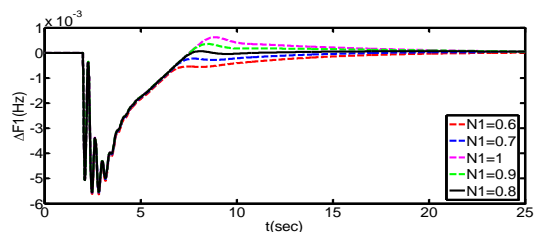
استراتژی‌های کنترلی بهینه مبنی بر NL-PIDF است. همچنین حضور HVDC و به ویژه SMES موجب بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت به لحاظ ایجاد پاسخ زمانی سریع و میرا حتی به‌ازای تغییرات سریع اغتشاش وارد است.

سناریو دوم

اغتشاش بار نامساوی پله‌ای تصادفی، پله‌ای و سینوسی به صورت شکل (۹.الف) به ترتیب در نواحی اول تا سوم اعمال شده‌اند و نتایج مبنی بر نوسانات فرکانس ناحیه اول به صورت شکل (۹.ب) به دست آمده‌اند که نشان‌دهنده عدم‌میرایی سیستم AGC و عملکرد موفقیت‌آمیز



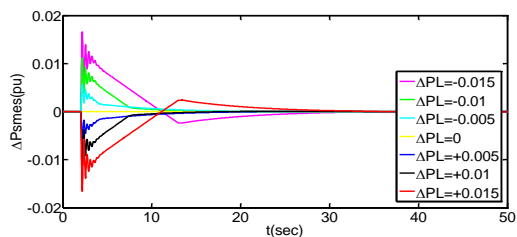
شکل (۱۰): $\Delta f1$ و $\Delta Pm1$ هنگام تغییرات GRC (سناریو سوم)



شکل (۱۱): $\Delta f1$ هنگام تغییرات GDB (سناریو سوم)

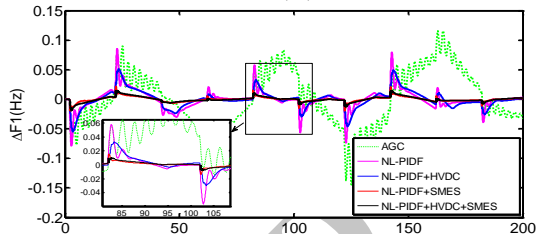
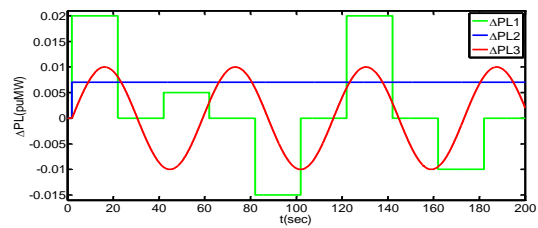
سناریو چهارم

در این سناریو برای نمایش عکس‌العمل سریع ذخیره‌ساز SMES در استراتژی کنترلی پیشنهادی، اغتشاش بار پله‌ای به صورت $pu.MW [-0.015:0.005:0.015]$ در ناحیه اول اعمال شده و توان تزریقی یا جذبی SMES در شکل (۱۲) نمایش داده شده است که ماهیت فیزیکی عملکرد سریع آن هنگام مواجهه با اغتشاشات بار، اعمال استراتژی کنترلی مناسب در راستای تطابق میزان توان خروجی با تغییرات ناگهانی بار در اولین لحظات رخداد و تزریق یا جذب توان معادل را به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل (۱۲): $\Delta Psmes$ هنگام مواجهه با اغتشاشات بار

(سناریو چهارم)



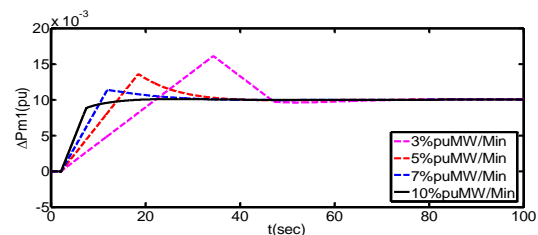
شکل (۹): الف. تغییرات تصادفی پیوسته بار در هر سه ناحیه

ب. $\Delta f1$ (سناریو دوم)

سناریو سوم

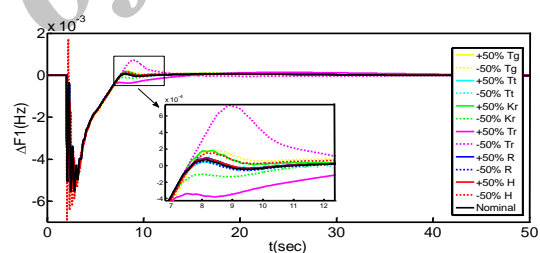
برای نمایش عملکرد موفقیت‌آمیز استراتژی کنترلی پیشنهادی در بدترین شرایط ناشی از قیود غیرخطی، میزان تولید واحدهای بخاری تا کمترین مقدار خود یعنی $\pm 0.005 pu.MW$ در ثابته محدود شده و تغییرات توان مکانیکی تولیدی و تغییرات فرکانس ناحیه اول به‌ازای ۱٪ اغتشاش بار در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. نتایج نشان‌دهنده حفظ پایداری دینامیکی سیستم قدرت مطالعه‌شده و تأمین بی‌وقفه بارند. همچنین مشاهده می‌شود کاهش محدوده GRC سبب افزایش ریبیل نوسانات و به ویژه افزایش زمان نشست می‌شود.

افزایش باند مرده گاورنر موجب افزایش زمان نشست، افزایش ریبیل نوسانات و ایجاد خطای ماندگار در مقادیر وسیع GDB خواهد شد. شکل (۱۱) انحرافات فرکانس ناحیه اول هنگام مواجهه با تغییرات GDB متناسب با تغییر جملات N_1 و N_2 حول نقطه کار را به‌ازای اغتشاش بار ۱٪ در ناحیه اول نشان می‌دهد که گویای مقاوم‌بودن استراتژی کنترلی پیاده‌سازی‌شده در این شرایط است.



۶-۳- آنالیز حساسیت

برای نمایش مقاوم بودن استراتژی کنترلی پیشنهادی، عدم قطعیت گسترده‌ای مطابق با جدول (۴) در مقادیر دینامیکی هر سه ناحیه اعمال شده است. نتایج کمی به‌ازای $1pu.MW$ اغتشاش بار در ناحیه اول درج شده‌اند. مطالعات مقادیر ویژه مبتنی بر کمترین نسبت میرایی و مدهای نوسانی مرتبط نشان‌دهنده حفظ پایداری و مقاوم بودن استراتژی کنترلی پیشنهادی هنگام مواجهه با تغییرات گسترده مقادیر دینامیکی و نیازناشتن به تنظیم مجدد پارامترهای کنترلی است؛ زیرا مقدار MDR تقریباً ثابت باقی مانده است؛ با این حال عملکرد سیستم بیش از سایر پارامترها به تغییرات پارامترهای H و T_{ij} حساس است. همچنین تغییرات فرکانس ناحیه اول به‌ازای $\pm 50\%$ عدم قطعیت در مقادیر دینامیکی ناحیه اول در شکل (۱۳) نشان داده شده اند که بر تغییرات ناچیز پاسخ زمانی و مقاوم بودن استراتژی کنترلی پیشنهادی تأکید دارد.

شکل (۱۳): هنگام مواجهه با $\pm 50\%$ عدم قطعیت

۷- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل‌کننده غیرخطی جدیدی به صورت NL-PIDF برای کنترل بار فرکانس در سیستم قدرت سه‌ناحیه‌ای هیبریدی با واحدهای بخاری بازگرمکن و گازی

با در نظر گرفتن قیود فیزیکی غیرخطی GRC، GDB و BD ارائه شد. از خطوط انتقال موازی HVDC و ذخیره‌ساز SMES برای بهبود پایداری دینامیکی استفاده شد. برای به دست آوردن پارامترهای کنترلی NL-PIDF و ضریب کنترل تناسبی و بهره فیدبک جریان القاگر SMES از الگوریتم بهینه‌سازی KH با تابع هدف هیبریدی وزن‌داری مبتنی بر انتگرال مربع خطا در زمان، زمان نشست و پیک تا پیک نوسانات فرکانس و توان مبادله‌شده بین نواحی استفاده شد. ارزیابی استراتژی کنترلی پیشنهادی و مقایسه عملکرد آن در چند سناریو به صورت مواجهه با اغتشاشات پله‌ای تصادفی و سینوسی بار، تغییرات GRC، GDB و عدم قطعیت گسترده در مقادیر دینامیکی انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته در حوزه زمان و مطالعات مقادیر ویژه نشان دهنده عملکرد برتر و مطلوب‌تر استراتژی کنترلی پیشنهادی به علت کاهش همزمان تمامی معیارهای مقایسه‌ای کمی در حوزه زمان و افزایش معیار MDR نسبت به سایر استراتژی‌های کنترلی بررسی شده‌اند. تأثیر درخور توجه خطوط HVDC در افزایش کمترین نسبت میرایی و عملکرد سریع SMES هنگام مواجهه با اغتشاشات ناگهانی بار و اعمال استراتژی کنترلی مناسب در راستای تطابق توان خروجی با تغییرات بار و در نتیجه، بهبود پایداری دینامیکی و گذرا نیز در نتایج نشان داده شد. آنالیز حساسیت استراتژی کنترلی پیشنهادی بر عملکرد مؤثر و مطلوب آن به لحاظ سرعت پاسخ‌های دینامیکی، پایداری، مقاوم بودن هنگام رویارویی با عدم قطعیت‌ها، نیازناشتن به تنظیم مجدد پارامترهای کنترلی و در نتیجه، بهبود میرایی نوسانات فرکانس و توان اکتیو تأکید دارد.

جدول (۴): آنالیز حساسیت استراتژی کنترلی پیشنهادی

پارامتر دینامیکی تغییر یافته	درصد تغییرات	Ts (s)			PP $\times 10^{-3}$			ITSE $\times 10^{-4}$ (e)	مدهای نوسانی	MDR
		$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$	$\Delta f1$	$\Delta f2$	$\Delta f3$			
نامی	0	7.373	12.09	12.29	5.595	4.685	4.265	1.808	-2.18 \pm 17.5i	0.1238
T _g	+50%	7.374	11.93	12.14	5.648	4.724	4.313	1.820	-2.20 \pm 17.5i	0.1247
	-50%	9.234	10.42	10.74	5.854	4.795	4.373	1.903	-2.16 \pm 17.5i	0.1224
K _r	+50%	8.683	12.01	12.28	5.682	4.637	4.219	1.755	-2.16 \pm 17.5i	0.1227
	-50%	23.04	11.66	23.56	5.679	4.810	4.369	1.917	-2.21 \pm 17.5i	0.1249
T _r	+50%	30.64	31.24	33.31	5.680	4.768	4.349	2.027	-2.18 \pm 17.5i	0.1238

	-50%	12.32	10.39	10.41	6.260	5.107	4.659	1.811	-2.18 ± 17.5i	0.1238
T _t	+50%	7.408	11.80	12.04	5.633	4.740	4.315	1.834	-2.20 ± 17.5i	0.1246
	-50%	7.383	12.07	12.38	5.620	4.672	4.251	1.804	-2.14 ± 17.5i	0.1213
C _g	+50%	20.91	8.481	8.440	5.819	4.805	4.596	2.129	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-48%	23.13	27.66	32.23	5.952	5.086	4.295	3.780	-2.18 ± 17.5i	0.1239
B _g	+50%	7.356	12.04	12.31	5.639	4.772	4.262	1.838	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	7.382	12.11	12.26	5.621	4.586	4.270	1.778	-2.18 ± 17.5i	0.1238
X _g	+50%	7.536	11.87	12.07	5.778	4.627	4.127	1.744	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	8.505	11.89	12.18	5.793	4.933	4.548	2.079	-2.18 ± 17.5i	0.1238
Y _g	+50%	8.668	12.48	12.68	5.785	4.820	4.502	2.064	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	7.704	11.50	11.87	5.934	4.661	4.153	1.826	-2.18 ± 17.5i	0.1238
T _{cr}	+50%	7.370	12.06	12.28	5.607	4.708	4.268	1.816	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	7.376	12.07	12.27	5.608	4.665	4.265	1.802	-2.18 ± 17.5i	0.1238
T _r	+50%	8.193	12.01	12.30	5.715	4.844	4.370	1.911	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	7.416	12.00	12.11	5.769	4.509	4.280	1.738	-2.18 ± 17.5i	0.1237
T _{cd}	+50%	7.325	12.01	12.30	5.712	4.843	4.352	1.899	-2.18 ± 17.5i	0.1238
	-50%	7.411	12.03	12.13	5.750	4.505	4.283	1.742	-2.18 ± 17.5i	0.1237
H	+50%	8.543	12.11	12.21	4.747	4.121	3.900	1.851	-2.23 ± 14.2i	0.1545
	-50%	7.273	10.07	11.03	8.751	5.960	5.036	1.934	-2.10 ± 24.8i	0.0846
D	+50%	7.403	12.44	12.63	5.549	4.604	4.183	1.775	-2.21 ± 17.5i	0.1254
	-50%	7.350	11.63	11.90	5.705	4.770	4.352	1.845	-2.15 ± 17.5i	0.1222
R	+50%	9.909	15.12	15.27	5.548	4.435	3.785	1.750	-2.16 ± 17.5i	0.1227
	-50%	22.10	8.844	8.834	6.022	5.076	4.907	2.276	-2.21 ± 17.5i	0.1250
T _{ij}	+50%	7.353	11.67	11.70	5.630	4.714	4.434	1.841	-2.08 ± 17.7i	0.1168
	-50%	19.73	12.02	12.56	5.645	4.635	4.099	1.798	-2.29 ± 17.3i	0.1311

مراجع

- [1] P. Kundur, Power system stability and control, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar and A. Jalili, "Load frequency control strategies; A state-of-the-art survey for the researcher," *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, No. 2, pp. 344-353, 2009.
- [3] H. Shayeghi, A. Jalili and H.A. Shayanfar, "A robust mixed H2/H_∞ based LFC of a deregulated power system including SMES," *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 10, pp. 2656-2668, 2008.
- [4] A. Pappachen and A. Peer Fathima, "Load frequency control in deregulated power system integrated with SMES-TCPS combination using ANFIS controller," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 82, No. 1, pp. 519-534, 2016.
- [5] P. Bhatta, S.P. Ghoshalb and R. Royc, "Coordinated control of TCPS and SMES for frequency regulation of interconnected restructured power systems with dynamic participation from DFIG based wind farm," *Renewable Energy*, Vol. 40, No. 1, pp. 40-50, 2012.
- [6] S.A. Taher, S.M. Nosratabadi and M.R. Shibani, "Optimal Load Frequency Control Method Using Artificial Bee Colony Algorithm in Deregulated Power Systems Including SMES," *Computational*

ضمایم

مقادیر سیستم قدرت [۷, ۱۲, ۱۵]

F=60Hz, Pbase_{1,2,3}=2000MW, 2H₁=0.1247 puMW.s, 2H₂=0.2017 puMW.s, 2H₃=0.1667 puMW.s, D₁=0.015 pu.MW/Hz, D₂=0.016 pu.MW/Hz, D₃=0.015 pu.MW/Hz, T₁₂=T₂₁=T₁₃=T₃₁=0.0433 pu, T₂₃=T₃₂=0.0866 pu

مقادیر واحد بخاری [۱۲, ۱۵]

Tg=0.08s, Tt=0.4s, Kr=0.3, Tr=10s, Rt1=2.82 Hz/pu.MW, Rt2=2.73 Hz/pu.MW

مقادیر دیگ بخار [۱۱]

K1=0.85, K2=0.095, K3=0.92, Cb=200, Tf=10, Kib=0.03, Tib=26, Trb=69

مقادیر واحد گازی [۱۵]

Cg=1, Bg=0.05, Xg=0.6s, Yg=1s, Tcr=0.01s, Tf=0.23s, Tcd=0.2s, Rg2=2.73 Hz/pu.MW, Rg3=3 Hz/pu.MW

مقادیر SMES [۴]

L=2.65H, Tdc=0.03s, Id0=4.5KA, Pbase=2000MW, Ppu=0.05MW

مقادیر HVDC [۱۴]

Kdc= 1, Tdc=0.2s

Electrical and Electronics Engineers, Israel, 2010.

- [17] A. H. Gandomi and A. H. Alavi, "Krill herd: A new bio-inspired optimization algorithm," *Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 17, No. 12, pp. 4831-4845, 2012.

Intelligence in Electrical Engineering, Vol. 1, No. 1, pp. 23-42, 2011.

- [7] S. Chaine and M. Tripathy, "Design of an optimal SMES for automatic generation control of two-area thermal power system using Cuckoo search algorithm," *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-13, 2015.
- [8] J. Gholinzhad, M. Reza Safari Tirtashi and R. Noroozian, "SMES and CES Controllers Design for Load Frequency Stabilization in two-area Interconnected System," in *Iranian Conference on Electrical Engineering*, 2011.
- [9] K.R. Sudha and R. Vijaya Santhi, "Load Frequency Control of an Interconnected Reheat Thermal system using Type-2 fuzzy system including SMES units," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43, No. 1 pp. 1383-1392, 2012.
- [10] P. Chandra Pradhan, R. Kumar Sahu and S. Panda, "Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES," *Engineering Science and Technology*, Vol. 19, No. 1, pp. 338-354, 2015.
- [11] M. Elsis, M. Soliman, M.A.S. Aboelela and W. Mansour, "Bat inspired algorithm based optimal design of model predictive load frequency control," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 83, No. 1, pp. 426-433, 2016.
- [12] R. Kumar Sahu, S. Panda and P. Chandra Pradhan, "Design and analysis of hybrid firefly algorithm-pattern search based fuzzy PID controller for LFC of multi area power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 69, No. 1, pp. 200-212, 2015.
- [13] B. Mohanty, S. Panda and P.K. Hota, "Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity," *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 53, No. 3, pp. 537-552, 2014.
- [14] G. Shankar and V. Mukherjee, "Quasi oppositional harmony search algorithm based controller tuning for load frequency control of multi-source multi-area power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 75, No. 1, pp. 289-302, 2016.
- [15] B. Kumar Sahu, T. Kumar Pati, J. Ranjan Nayak, S. Panda and S. Kumar Kar, "A novel hybrid LUS-TLBO optimized fuzzy-PID controller for load frequency control of multi-source power system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 74, No. 1, pp. 58-69, 2016.
- [16] G. Zaidner, S. Korotkin, E. Shteimberg, A. Ellenbogen, M. Arad and Y. Cohen, "Non Linear PID and its application in Process Control," in *IEEE 26-th Convention of*
-
- ¹ Load Frequency Control
² Superconducting Magnetic Energy Storage
³ Robust Control
⁴ Thyristor Controlled Phase Shifter
⁵ Adaptive Neuro Fuzzy Interface System
⁶ Automatic Generation Control
⁷ Artificial Bee Colony
⁸ Cuckoo Search Algorithm
⁹ Capacitive Energy Storage
¹⁰ Firefly Algorithm
¹¹ Unified Power Flow Controller
¹² Generation Rate Constraint
¹³ Governor Dead band
¹⁴ Boiler Dynamics
¹⁵ Nonlinear PID Controller with Derivative Filter
¹⁶ Krill Herd Algorithm
¹⁷ Area Control Error
¹⁸ Over Shoot
¹⁹ Under Shoot
²⁰ Peak to Peak
²¹ Settling Time
²² Integral of the Absolute Error
²³ Integral of Time Multiplied by Absolute Error
²⁴ Integral of the Squared Error
²⁵ Integral of Time Multiplied by Squared Error
²⁶ Minimum Damping Ratio
²⁷ Genetic Algorithm
²⁸ Evolutionary Strategy
²⁹ Biogeography-Based Optimization
³⁰ Ant Colony Optimization
³¹ Differential Evolution
³² Hybrid DE With Eagle Strategy
³³ Particle Swarm Optimization
³⁴ Accelerated PSO