نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی
سال ششم / شماره بیست و سوم / زمستان ۹۸

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
6th Year / No. 23 / March 2020

تنظیم بهینه‌ی کنترل‌کننده سه‌ترمی و جبران‌کننده دوترمی در سیستم‌های قدرت آبی برای کنترل فرکانس-بار

مسعود غلامی[۱]
غضنفر شاهقلیان[۲*]
خوشنام شجاعی[۳]

چکیده

در نیروگاه‌های آبی، پارامتر زمان راه‌اندازی آب توربین وابسته به شرایط بار حقیقی بوده و نیازمند یک جبران‌سازی افتی گذرا برای کمینه‌سازی مشخصه‌ی پاسخ معکوس است. نسبت میرایی بار براساس مقدار بار تغییر کرده و منجر به نوسان بار و ماشین می‌شود، لذا کنترل فرکانس-بار برای نیروگاه‌های آبی از اهمیت بیشتری برخوردار است. در این مقاله در راستای برطرف ساختن نقاط ضعف روش‌های موجود، چند روش برای تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی تناسبی، انتگرالی، مشتقی و جبران‌ساز جبران‌سازی افتی گذرا در کنترل فرکانس-بار ارائه شده است. روش اول مبتنی بر مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب برای خروجی جبران‌سازی افتی گذرا است. در روش مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب، تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده سه-ترمی و جبران‌سازی افتی گذرا به دو زیر مسئله‌ی جداگانه تقسیم‌بندی شده و در دو مرحله حل می‌شود. روش دوم، بهینه‌سازی همزمان پارامترهای کنترل‌کننده و جبران‌ساز با بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات است. برای ارزیابی روش مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب و بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات، عملکرد این دو روش با روش ماکزیمم پیک حداکثری[۶] مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در بیشتر شرایط و با درنظر گرفتن معیارهای مختلف مانند میزان انحراف فرکانس و توان خروجی توربین آبی عملکرد روش مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب بهتر از روش‌های دیگر است.

واژگان کلیدی:

کنترل فرکانس-بار، سیستم برق آبی، جبران‌کننده افتی گذرا

---

[۱]. دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
[۲]. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران (نویسنده مسئول)
[۳]. دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت:۱۳۹۷/۱۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲

مقدمه

ثبات فرکانس یک سیستم قدرت به تعادل توان اکتیو بین تولید و مصرف بستگی دارد و فرکانس عامل مشترکی در تمام سیستم است، لذا هر تغییری در تولید یا تقاضای توان اکتیو در نقطه‌ای از سیستم قدرت به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می‌شود (شاهقلیان و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به اینکه توان مورد نیاز یک سیستم قدرت بزرگ توسط تعداد زیادی ژنراتور تأمین می‌شود، تغییرات توان مورد تقاضا بین واحدها باید تقسیم شود. تقسیم بار بین ژنراتورها با کنترل اولیه سرعت توسط گاورنرهای نصب‌شده بر روی ژنراتورها صورت می‌پذیرد، بنابراین جهت تنظیم دقیق فرکانس در مقدار نامی، نیاز به یک کنترل تکمیلی است که باید در یک مرکز کنترل اصلی انجام شود. این عمل توسط واحد کنترل فرکانس-بار[۱] در سیستم‌های قدرت انجام می‌شود. از هدف‌های اصلی کنترل فرکانس بار می‌توان به حفظ فرکانس به‌صورت یکنواخت، تقسیم اقتصادی بار سیستم بین ژنراتورها و تنظیم توان مبادله‌شده از طریق خطوط ارتباطی در مقادیر برنامه‌ریزی شده اشاره کرد. تغییر ایجادشده در فرکانس سیستم و توان اکتیو خطوط ارتباطی باید توسط تغییر در توان تولیدی ژنراتورها جبران شود. طراحی یک LFC بهینه در سیستم‌های قدرت، یکی از مهم-ترین مسائل روز در زمینه‌ی بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های قدرت است. در بیشتر مطالعات سعی شده تا این مسئله با تنظیم‌کننده‌ی کنترل تولید خودکار، طراحی کنترل‌کننده برای سیستم تحریک و بهبود عملکرد کنترل‌کننده‌ها با در نظر گرفتن تغییرات و عدم قطعیت پارامترها و مشخصه‌های مختلف بار حل شود. از روش‌های پیشنهادی تاکنون می‌توان به روش‌های کنترل پیشرفته مانند کنترل بهینه، کنترل ساختار متغیر، کنترل تطبیق‌پذیر، کنترل خودتنظیم، کنترل هوشمند و کنترل مقاوم اشاره کرد. در مطالعات جدید در این زمینه از روش‌های مختلف محاسبات هوشمند مانند شبکه‌ی عصبی مصنوعی، کنترل منطق فازی و ترکیبی از آن‌ها مانند فازی-عصبی استفاده شده تا بر پیچیدگی بالای طراحی، که ناشی از غیرخطی بودن المان‌های مختلف کنترل‌کننده است، غلبه شود. مطالعاتی که اخیراً بر روی LFC انجام شده است، بیشتر بر روی تاخیر ارتباطی (سونمز[۲] و همکاران، ۲۰۱۶، پنگ[۳] و ژانگ[۴]، ۲۰۱۶، یانگ[۵] و همکاران، ۲۰۱۸)، کنترل رویداد-راه‌انداز (وِن[۶] و همکاران، ۲۰۱۶)، روش‌های کنترل مدرن مانند کنترل پیش‌بین مدل (ارسدال[۷] و همکاران، ۲۰۱۶، ما[۸] و همکاران، ۲۰۱۷، لیو[۹] و همکاران، ۲۰۱۷) و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی جدید (سخار[۱۰] و همکاران، ۲۰۱۷، گوها[۱۱] و همکاران، ۲۰۱۶) تمرکز شده است. برخی از پژوهش‌های جدید نیز به سمت ریزشبکه‌ها و تولیدات پراکنده سوق پیدا کرده است. به عنوان مثال در مراجع (غلامرضایی و همکاران، ۲۰۱۸، خوبان و همکاران، ۲۰۱۸) کنترل فرکانس-بار در یک ریزشبکه جزیره‌ای و یا در حضور تولیدات پراکنده مطالعه شده است. یکی از موضوعاتی که به تازگی مورد توجه طراحان و بهره‌برداران سیستم‌های قدرت قرار گرفته است، مفهوم تاب‌آوری است که جنبه‌های مختلف مانند پایداری، اقتصادی بودن و مقاوم بودن را شامل شده و فراتر از آن‌ها است. در مطالعات جدید این مفهوم به مطالعه کنترل فرکانس-بار نیز وارد شده (پنگ[۱۲] و همکاران، ۲۰۱۷) که در تعدادی از مقاله‌ها تمرکز بر روی نیروگاه‌های آبی است. در مرجع (جاگاتیسان[۱۳] و همکاران، ۲۰۱۸) کنترل تولید خودکار در یک سیستم قدرت آبی دو ناحیه‌ای مطالعه شده است. سیستم کنترلی ارائه شده در این کار ترکیبی از کنترل‌کننده معمولی تناسبی-انتگرالی (PI) و کنترل‌کننده منطق فازی است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی LFC نقش کلیدی در عملکرد آن دارد، بنابراین لازم است با استفاده از

---

[۱] Load Frequency Control
[۲] Sönmez
[۳] Peng
[۴] Zhang
[۵] Yang
[۶] Wen
[۷] Ersdal
[۸] Ma
[۹] Liu
[۱۰] Sekhar
[۱۱] Guha
[۱۲] Peng
[۱۳] Jagatheesan

روش‌های مناسب بهینه‌سازی، به‌صورت دقیق و بهینه تنظیم شوند. در این زمینه الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری مختلف نظیر الگوریتم ژنتیک (گلپیرا[۱] و بورانی، ۲۰۱۱)، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۲] (PSO) (همتی[۳] و همکاران، ۲۰۱۱) و کلونی زنبور عسل مصنوعی (گزده[۴] و همکاران، ۲۰۱۲) مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به غیرخطی بودن معادله‌های سیستم قدرت و همچنین عدم قطعیت در پارامترهای سیستم، عملکرد این سیستم‌ها با مدل‌های واقعی متفاوت است، بنابراین برای محقق ساختن تنظیم فرکانس در محدود نامی با انحراف مجاز، سیستم کنترلی باید به صورت مقاوم طراحی شود. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهند که طراحی یک LFC با عملکرد مناسب نیازمند تنظیم دقیق پارامترهای کنترلی است به‌صورتی که فرکانس سیستم حتی با وجود تغییر در شرایط کاری، ثابت بماند. این موضوع برای نیروگاه‌های آبی اهمیت بیشتری دارد، زیرا در این سیستم‌ها، پارامتر زمان راه‌اندازی آب توربین آبی (T_W) وابسته به شرایط بار بوده و همچنین نیازمند یک جبران‌سازی افتی گذرا[۵] (TDC) برای کمینه‌سازی مشخصه پاسخ معکوس است. تابع مشخصه توربین‌های هیدورلیکی دارای یک صفر مثبت است و مشخصه پاسخ پله این سیستم‌ها غیر مینیمم فازی بوده و منجر به پاسخ معکوس توربین می‌شود که این موضوع می‌تواند سبب ناپایداری سیستم گردد. بنابراین از یک TDC استفاده می‌شود تا باعث بهبود پایداری سیستم شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در هیچ یک از مطالعات قبلی، تغییرات پارامترهای TDC به صورت همزمان و به همراه شرایط کاری بار درنظر گرفته نشده و همچنین پارامترهای کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتقی[۶] (PID) و پارامتر-های TDC به صورت جداگانه تنظیم شده است.

در این مقاله دو روش متفاوت برای تنظیم ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی کنترل‌کننده PID و جبران‌کننده‌ی افتی گذرا در کنترل فرکانس-بار توربین آبی ارائه شده و نتایج با ماکزیمم پیک حداکثری[۷] (MPRS) مقایسه گردیده‌است. هدف اصلی تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌کننده‌ی افتی، افزایش سرعت و دقت کنترل فرکانس-بار است. روش اول مبتنی بر مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب[۸] (DTRS) برای سرووموتور شیر ورودی است که شامل محدودکننده‌ی متعارف و ضریب اشباع در نیروگاه‌های قدرت است. مسئله شامل تنظیم همزمان پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز افتی گذرا خواهد بود، به‌صورتی که پاسخ زمانی مطلوب برای انحراف فرکانس در ادامه یک تغییر پله‌ای در بار حاصل شود. همچنین روش کار DTRS شامل دو مرحله است. در ابتدا، با استفاده از منحنی مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب، ضرایب تابع تبدیل کلی کنترل‌کننده‌یPID و جبران‌ساز TDC با حل یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی خطی تخمین زده می‌شود. در ادامه نیز یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی برای تعیین پارامترهای بهینه‌ی کنترل‌کننده و جبران‌ساز فرمول‌بندی و حل شده است. روش دوم نیز مبتنی بر تنظیم پارامترها با استفاده از الگوریتم PSO با هدف بهبود مشخصه‌های پاسخ پله‌ی کنترل فرکانس-بار است. در این روش، الگوریتم با تعدادی پاسخ اولیه شروع به‌کار می‌کند و طی تکرارهای متوالی، بهترین جواب عمومی و بهترین جواب هر ذره را براساس شایستگی ذرات مشخص می‌کند. سرانجام، با یافتن مقادیر فوق در هر مرحله، سرعت حرکت ذرات و مکان بعدی هر ذره نیز براساس روابط بهینه‌سازی مبتنی بر ازدحام ذرات به‌دست می‌آید.

طراحی کنترل فرکانس-بار در سیستم قدرت آبی

شکل (۱) بلوک دیاگرام کنترل فرکانس-بار در یک سیستم قدرت آبی را نشان می‌دهد که دارای کنترل‌کننده‌ی PID و TDC است. خروجی جبران‌ساز گذرا یا ورودی سرو موتور دریچه ΔT_C و ΔG_V دریچه سرعت گاورنر (pu-Mw.Hz) هستند.

---

[۱] Golpira

[۲] Particle Swarm Optimization

[۳] Hemmati

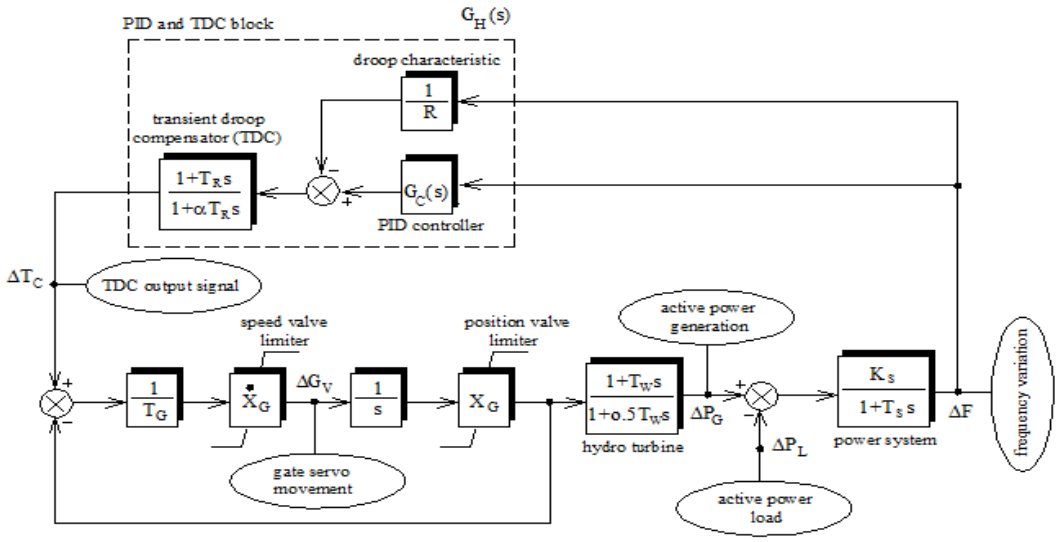
[۴] Gozde

[۵] Transient Droop Compensator

[۶] Proportional-Integral-Deviation

[۷] Maximum Peak Resonance Specification

[۸] Desired Time Response Specification



شکل (۱): بلوک دیاگرام کنترل فرکانس-بار در سیستم قدرت آبی

اغتشاش توان راکتیو بار با ΔP_L و تغییر تولید توان اکتیو با ΔP_G بر حسب pu-MW نشان داده شده و تغییرات فرکانس بر حسب هرتز با ΔF_R درنظر گرفته شده است. ثابت‌های زمانی ریست، گاورنر سرعت و سیستم قدرت به ترتیب T_R، T_G و T_S هستند. زمان راه‌اندازی آب T_W بر حسب ثانیه، مشخصه افتی 1/R بر حسب pu-MW/Hz و ضریب سیستم قدرت K_S هستند. تابع انتقال $G_H(s)$ بیان‌کننده‌ی ترکیب مشخصه افتی، کنترل‌کننده PID و TDC است. نسبت شیب موقتی افتی[۱] (R_T) به شیب دائمی افتی[۲] (R_P) در بلوک TDC با α در نظر گرفته شده است. محدودهٔ تغییرات R_T بین ۰/۰۱ تا ۱/۲ و R_P معمولاً برابر ۰/۰۵ است (شاهقلیان، ۱۳۹۴). همچنین بلوک دیاگرام دارای دو محدودکننده دریچه کنترل موقعیت و دریچه کنترل سرعت است که محدودکننده باز و بسته بودن دریچه را نشان می‌دهد. برای حفظ فرکانس در مقدار نامی آن نیاز به یک کنترل‌کننده کمکی است که در این مدل از کنترل‌کننده PID استفاده شده است. برای کاهش اثر نویز، تابع تبدیل PID به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1+T_D s} \qquad (۱)$$

که در آن K_P، K_I و K_D به ترتیب ضرایب تناسبی، انتگرالی و مشتقی کنترل‌کننده هستند. ثابت زمانی فیلتر مشتق‌گیر (T_D) برای جلوگیری از اثر نویز در نظر گرفته می‌شود. اگر J_M ثابت اینرسی سیستم باشد، پارامترهای جبران‌سازی افتی گذرا برابرند با (اولیویرا[۳] و همکاران، ۲۰۱۵، کندور[۴]، ۱۹۹۴):

$$R_T = \frac{T_W}{J_M}[2.3 - 0.15(T_W - 1)] \qquad (۲)$$

$$T_R = T_W[5 - 0.5(T_W - 1)] \qquad (۳)$$

روش مبتنی بر مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب

کنترل فرکانس-بار در یک توربین آبی دارای پنج متغیر شامل سه ضریب کنترل‌کننده‌ی PID و دو ضریب TDC است که باید به‌صورت همزمان تعیین شوند. ثابت زمانی فیلتر مشتق‌گیر برابر با ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. تابع انتقال $G_H(s)$ که شامل مشخصه افتی، PID و TDC است را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$G_H(s) = \frac{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \qquad (۴)$$

کنترل فرکانس-بار دارای یک بلوک مرتبه سوم است که پس از ساده کردن، ضرایب به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند:

$$\begin{cases} b_0 = 0 \\ b_1 = 1 \\ b_2 = T_D + \alpha T_R \\ b_3 = \alpha T_D T_R \end{cases} \qquad (۵)$$

---

[۱] Temporary Droop

[۲] Permanent Droop

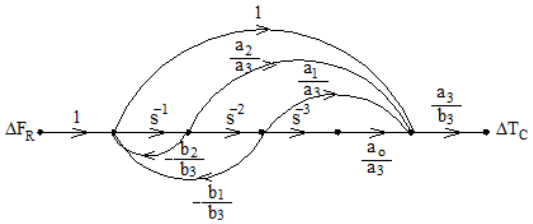
[۳] Oliveira

[۴] Kundur

$$\begin{cases} a_0 = K_I \\ a_1 = T_D K_I + T_R K_I + K_P + \frac{1}{R} \\ a_2 = K_D + T_D(K_P + \frac{1}{R}) + T_R(K_P + \frac{1}{R}) + T_R T_D K_I \\ a_3 = K_D T_R + T_D T_R (K_P + \frac{1}{R}) \end{cases} \quad (۶)$$

وقوع یک اغتشاش در سیستم، نظیر افزایش بار توان اکتیو، خروجی جبران‌ساز گذرا در جهت بازیابی مجدد تعادل بین بار مصرفی و توان تولیدی تغییر می‌کند. برای جلوگیری از اشباع در حرکت سرو موتور دریچه‌ی گاورنر سرعت، لازم است تغییرات ΔT_C به‌صورت آرام و نرم باشد. بنابراین روش اول مبتنی بر رفتار مشخصه پاسخ ΔT_C در حوزه‌ی زمان است. در این روش از منحنی مشخصه ΔT_C یک نیروگاه استفاده می‌شود که بر اساس داده‌های پایه‌ی نیروگاه به‌دست می‌آید. منحنی به‌دست آمده برای یک نیروگاه آبی، برای تنظیم پارامترهای PID و TDC نیروگاه‌های دیگر نیز قابل استفاده است. لازم به ذکر است که با استفاده از یک منحنی ΔT_C مشخص، انحراف فرکانس ΔF با استفاده از انتگرال‌گیری عددی برای نیروگاه آبی قابل محاسبه است.

همان‌طور که در بلوک دیاگرام کنترل فرکانس-بار در سیستم قدرت آبی نشان داده شده، برای بلوک PID و TDC سیگنال ورودی ΔF_R و سیگنال خروجی ΔT_C هستند. بنابراین مسئلهٔ بهینه‌سازی کنترل فرکانس-بار شامل تعیین پارامترهای بلوک مرتبه‌ی سوم است که تعیین‌کننده ΔT_C بر اساس ΔF_R است. نمودار حالت بلوک PID، TDC و مشخصه افتی با پیاده‌سازی تابع انتقال $G_H(s)$ به‌روش مستقیم در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): نمودار حالت بلوک کنترل‌کننده PID و TDC در پیاده‌سازی به روش مستقیم

لازم به ذکر است که همه‌ی بردارهای ΔT_C و ΔF_R در دارای تعداد المان‌های یکسان هستند (اولیویرا[۱] و همکاران، ۲۰۱۵). بعد از به‌دست آوردن همه‌ی بردارها، پارامترهای a_0، a_1، a_2، a_3، b_2 و b_3 را می‌توان با حل یک برنامه‌ریزی خطی[۲] (LP) به‌صورت بهینه تعیین کرد. این کار باید با هدف تنظیم سیگنال‌های ورودی و خروجی انجام شود. تابع هدف بهینه‌سازی مذکور به‌صورت رابطه‌ی زیر است:

$$\min T_{e1} = \sum_{k=1}^{m} (R_{LK} + R_{RK}) \quad (۷)$$

تابع هدف فوق باید با درنظر گرفتن قیود مسئله کمینه‌سازی شود. این قیود به‌صورت روابط تساوی و نامساوی زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} &\Delta F_K a_3 + \Delta F_{1K} a_2 + \Delta F_{2K} a_1 + \Delta F_{3K} a_0 \\ &\quad - \Delta F_{C2K} - \Delta F_{C1K} b_2 - \Delta F_{C3K} b_3 \\ &\quad - R_{LK} + R_{RK} = 0 \end{aligned} \quad (۸)$$

$$\begin{cases} al_i \le a_i \le au_i \quad i = 0,1,2,3 \\ bl_j \le b_j \le bu_j \quad j = 0,1,2,3 \\ R_{LK} \ge 0 \\ R_{RK} \ge 0 \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن T_{e1} خطای کل یا مقدار هزینه برنامه‌نویسی خطی و m تعداد قیدهای معادله است که برابر با طول ΔT_C هستند. R_R بردار باقی‌مانده‌ها در سمت راست و R_L بردار باقی‌مانده‌ها در سمت چپ و در زیرفضای R^m هستند، al_i حد پایین پارامترهای a_i بوده و au_i حد بالای این پارامترها است. همچنین bl_j حد پایین پارامترهای b_j و bu_j نیز حد بالای این پارامترها است. مقدار حداقلی تابع هدف مطابق با بهترین پاسخ a_i و b_j است. با توجه به اینکه این مسئله یک برنامه‌ریزی خطی است، برای حل به حجم محاسبات بالایی نیاز ندارد. بعد از مشخص شدن مقادیر بهینه بردارهای a_i و b_j، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID (K_P، K_I و K_D) و جبران‌ساز (R_t و T_R) قابل محاسبه هستند. با این وجود، با توجه به اینکه پارامترهای a_i و b_j تقریبی هستند، این امکان وجود دارد که پاسخ تحلیلی برای این سیستم در محدوده‌ی مجاز متغیرها قرار نداشته باشد. بنابراین، برای تعیین مقادیر نهایی متغیرهای PID و TDC یک مسئله‌ی برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP) فرمول‌بندی شده است. با توجه به اینکه این مسئله یک برنامه‌ریزی غیرخطی با پنج متغیر بهینه‌سازی (K_P، K_I، K_D، R_t، T_R) و بدون قیدهای معادله‌ای

[۱] Oliveira

[۲] Linear Programing

است، حل آن به حجم محاسباتی بالایی نیاز نخواهد داشت. در این کار برای حل بهینه‌سازی مذکور از جعبه‌ابزار بهینه‌سازی متلب و الگوریتم میان‌یابی غیرخطی استفاده شده است (چانگ[۱]، ۲۰۰۳). پاسخ این مسئله بهینه‌سازی پارامترهای بهینه‌ی PID و TDC هستند که برای بهره‌برداری از نیروگاه آبی در شرایط تعریف شده، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهند. بررسی‌ها نشان داده‌است که زمان راه‌اندازی آب توربین آبی (T_W) و میرایی بار (D) وابسته به بار اکتیو بوده و بر اساس آن تغییر می‌کنند. بنابراین لازم است پارامترهای PID و TDC به‌گونه‌ای تنظیم شوند که عملکرد مناسب سیستم در شرایط بهره‌برداری مختلف تضمین شود. در روش DTRS این عمل در سه مرحله و به صورت زیر انجام شده است:

الف- حل مسئله‌ی بهینه‌سازی خطی بر اساس روابط بیان‌شده به منظور یافتن پارامترهای a_i^{oc} و b_j^{oc} برای هریک از شرایط بهره‌برداری. در این مرحله از یک مشخصه پاسخ زمانی مخصوص (ΔT_C) و پاسخ فرکانسی متناسب با آن (ΔF_{FOC}) برای هر یک از شرایط بهره‌برداری استفاده می‌شود.

ب- برای هر جفت (a_i^{oc},b_j^{oc})، سیستم با استفاده از انتگرال‌گیری‌های عددی شبیه‌سازی شده و سیگنال‌های ورودی (ΔF^{oc}) و خروجی (ΔT_C^{oc}) جدید برای همه‌ی نقاط بهره‌برداری به‌دست می‌آید.

ج- حل برنامه‌ریزی خطی توسعه‌یافته (ELP) ارائه شده برای تعیین مقادیر بهینه a_i و b_j که قابلیت تطبیق تمام سیگنال‌های ورودی و خروجی را داشته‌باشد. لازم به ذکر است که برای مسئله مذکور نیازی به محاسبه‌ی تمام سیگنال‌های نقاط ورودی ($\Delta T_{C,OC}$) و خروجی ($\Delta T_{F,OC}$) نیست، بلکه درنظر گرفتن تنها دو سوم نقاط مربوط به منحنی مورد نظر کافی است.

$$\min Te_3 = \sum_{oc=1}^{n_{oc}} \sum_{k=1}^{m} (R_{LK}^{oc} + R_{RK}^{oc}) \qquad (۱۰)$$

که در آن n_{oc} نشان‌دهنده‌ی تعداد شرایط بهره‌برداری است. لازم به ذکر است که با استفاده از مقادیر a_i و b_j حاصل از حل مسأله مقادیر نهایی پارامترهای PID و TDC با حل معادلات برنامه‌ریزی غیرخطی مطابق با معادلات مرجع به‌دست می‌آیند (چانگ، ۲۰۰۳) و می‌توان اطمینان حاصل کرد که این مقادیر برای بهره‌برداری از نیروگاه‌های آبی در بسیاری از شرایط بار تنظیم شده است.

کارآیی روش DTRS در این مقاله با اعمال آن به یک سیستم قدرت نمونه ارزیابی می‌شود. به منظور ارزیابی روش DTRS، عملکرد آن با روش مشخصه رزونانسی پیک حداکثری[۲] (MPRS) و روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) مقایسه می‌شود. روش MPRS در مرجع (خدابخشیان و هوشمند، ۲۰۱۰) ارائه شده است. در روش مبتنی بر PSO نیز پارامترهای کنترل‌کننده PID و جبران‌سازی افتی گذرا (TDC) به‌صورت همزمان با استفاده از الگوریتم PSO بهینه‌سازی می‌شود که روند انجام این بهینه‌سازی در بخش بعدی توضیح داده شده است.

بهینه‌سازی پارامترها با روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری

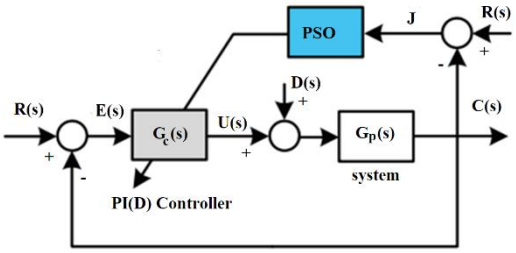
کنترل‌کننده‌ی PID با وجود داشتن ساختار ساده، معمولا عملکرد خوبی در کنترل سیستم‌های خطی و غیرخطی از خود نشان می‌دهد. به همین دلیل این کنترل‌کننده به صورت گسترده در کابردهای عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین چالش‌های استفاده از کنترل‌کننده PID، تنظیم پارامترهای این کنترل‌کننده است. یکی از روش‌های کارآمد برای تنظیم بهینه‌ی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID، استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری است که کارآیی خوبی داشته ولی یک فرآیند زمان‌بر است.

در شکل (۳) مدار حلقه بسته‌ی کنترل‌کننده‌ی PID به‌همراه روش بهینه‌سازی پارامترها با الگوریتم PSO برای یک سیستم نمونه نشان داده شده است. در این شکل تابع تبدیل سیستم تحت کنترل با $G_P(s)$ و تابع تبدیل کنترل‌کننده با $G_C(s)$ نشان داده شده است. ورودی کنترل‌کننده PID سیگنال خطا E(s) است که نشان‌دهنده‌ی اختلاف مقدار مرجع R(s) و مقدار خروجی سیستم C(s) است. همان‌طور که در بلوک دیاگرام LFC در سیستم قدرت نشان داده شده

[۱] Chang

[۲] Maximum Peak Resonance Specification

در کنترل فرکانس-بار، ورودی کنترل‌کننده‌ی PID مقدار انحراف فرکانس است.



شکل (۳): شکل حلقه بسته‌ی کنترل‌کننده PI(D)

در این مقاله برای ارزیابی عملکرد روش DTRS از الگوریتم PSO برای طراحی بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC استفاده شده است تا با محاسبه ضرایب بهینه برای این پارامترها، پاسخ سیستم بهینه شود. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از الگوریتم‌های شناخته شده در این زمینه است که به‌دلیل داشتن سرعت بالا و حجم محاسبات پایین در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بهینه‌سازی بر اساس توابع هزینه‌ای که در ادامه توضیح داده می‌شود انجام شده است. مشابه روش پیشنهادی، متغیرهای بهینه‌سازی شامل ضرایب کنترل‌کننده‌ی سه‌ترمی (K_P,K_I,K_D) و پارامترهای جبران‌ساز (T_R,R_t) هستند. بنابراین برای یک سیستم تک‌ناحیه‌ای، تعداد متغیرهای بهینه‌سازی برابر پنج عدد است. تابع هزینه بهینه‌سازی به‌صورت زیر تعریف شده است.

$$f(IAE)=\int_0^T|\Delta f|dt \qquad (۱۱)$$

تابع هدف ارائه شده در این رابطه انتگرال خطای مطلق[۱] (IAE) نامیده می‌شود و در کابردهای مختلفی برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع هدف دیگری که می‌توان برای بهینه‌سازی متغیرهای مذکور در نظر گرفت، مشخصه‌های پاسخ پله انحراف فرکانس است. مهمترین مشخصه‌های پاسخ پله عبارتند از: مقدار فراجهش، زمان نشست و خطای حالت ماندگار. بنابراین، تابع هزینه دوم به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$C=\alpha.(SE)+\beta.(OS)+\gamma.(ST) \qquad (۱۲)$$

که در آن پارامترهای SE، OS و ST به ترتیب خطای حالت ماندگار، فراجهش و زمان نشست پاسخ زمانی انحراف فرکانس سیستم مورد نظر هستند. همچنین α، β و γ ضرایب وزنی هستند که میزان اهمیت هر یک از مشخصه‌ها را تعیین می‌کنند. برای تضمین بهینه‌تر بودن متغیرهای بهینه‌سازی، می‌توان توابع هزینه f و C را با هم ترکیب کرده و مجموع آن‌ها به را به‌صورت زیر به‌عنوان تابع هزینه کلی در نظر گرفت:

$$C_{total}=f+10*C \qquad (۱۳)$$

بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات بر خلاف روش‌های تکاملی دیگر مانند الگوریتم ژنتیک، PSO می‌تواند تنها با یک برنامه‌ی کوچک پیاده‌سازی شود که این ویژگی استفاده از آن را ساده می‌کند. این قابلیت PSO یکی از مزیت‌های آن در مقایسه با دیگر تکنیک‌های بهینه‌سازی است. در الگوریتم PSO، موقعیت هر عامل با x و سرعت آن با V نمایش داده می‌شود. تغییر موقعیت عامل نیز با استفاده از اطلاعات موقعیت و سرعت عامل انجام می‌گیرد. هر عامل بهترین مقدار خود $(P_{best}t)$ و موقعیت فعلی خود (x_i) را می‌داند. این اطلاعات قیاس از تجربیات شخصی هر عامل است. علاوه بر این هر عامل بهترین مقداری را که تاکنون در گروه به‌دست آمده (Gbest) را نیز می‌داند. این اطلاعات قیاس از دانشی است که چگونه عوامل دیگر اطرافِ آن‌ها عمل کرده‌اند. در ادامه، هر عامل تلاش می‌کند تا موقعیت خود را با استفاده از اطلاعات مذکور بهبود دهد. در الگوریتم PSO سرعت هر عامل بر اساس رابطه زیر بروزرسانی می‌شود (فاضلی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۹).

$$V_i^{i+1}=WV_i^i+C_1r_1(Pbest_i-x_i^t)+C_2r_2(Gbest_i-x_i^t) \qquad (۱۴)$$

در این رابطه مقادیر r_1 و r_2 عددی تصادفی بین صفر و یک هستند، C_1 و C_2 ضرایب یادگیری نامیده می‌شوند. W نیز تابع وزنی است. طرف راست معادله فوق دارای سه جمله است. اولین جمله سرعت قبلی عامل بوده و جملات دوم و سوم برای تغییر سرعت عامل هستند. بدون جملات دوم و سوم عامل حرکت را در جهت قبلی خود ادامه خواهد داد تا به مرز برخورد کند. عامل سعی می‌کند ناحیه‌های جدید را

[۱] Integral of Absolute Error

جستجو کند و بنابراین اولین جمله با تنوع در روند جستجو متناظر است. به‌عبارت دیگر، بدون جمله اول سرعت حرکت عامل تنها با استفاده از موقعیت فعلی و بهترین موقعیت آن در گذشته تعیین می‌شود. ذرات سعی خواهند کرد به‌سمت P_{best}ها و یا G_{best} همگرا شوند. بر اساس سرعت ذره، موقعیت جدید نقطه جستجو در فضای جواب را می‌توان به‌صورت معادله زیر بیان کرد (ابرهارت و شی، ۲۰۰۱):

$$x_i^{t+1} = x_i^t + V_i^{t+1} \qquad (۱۵)$$

الگوریتم PSO با تعدادی پاسخ اولیه (ذرات) شروع به‌کار می‌کند و با حرکت‌دادن این پاسخ‌ها در طی تکرارهای متوالی، به دنبال یافتن جواب بهینه برای مسئله است. در هر تکرار دو مقدار بهترین جواب عمومی (G_{best}) و بهترین جواب هر ذره (P_{best}) بر اساس مقدار شایستگی ذرات مشخص می‌شوند. پس از یافتن این مقادیر، سرعت حرکت ذرات از مکان بعدی هر ذره نیز محاسبه می‌شود. به‌علت وجود مزایایی همچون مفهوم ساده، پیاده‌سازی آسان و همگرایی سریع نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امروزه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات توجه زیادی را به خود جلب کرده است و کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف دارد. با توجه به مزایای فراوانی که الگوریتم PSO نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی دارا است، در این مقاله برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل فرکانس-بار مورد استفاده قرار گرفته است.

نتایج شبیه‌سازی

هدف این مقاله مطالعه‌ی کنترل فرکانس-بار در نیروگاه‌های آبی است. پارامترهای نیروگاه آبی مورد مطالعه در مرجع (کندور[۱]، ۱۹۹۴) مطابق جدول (۱) در توان پایه MW ۱۰۰۰ آمده است و مقدار بار آن نیز برابر توان پایه در نظر گرفته شده است. پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID به‌دست آمده در مرجع (خدابخشیان[۲] و همکاران، ۲۰۱۰) برای ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای الگوریتم PSO، حداکثر جمعیت ۳۰ و تعداد تکرار نیز ۵۰ تنظیم شده است.

جدول (۱): پارامترهای نیروگاه هیدرولیکی مورد مطالعه

پارامتر	مقدار
T_G	۰/۲
T_W	۴
X_{GV}^{close}	۰/۱
Δ_{PL}	۰/۰۲
$\dot{X}_{GV}^{open}$	۰/۱۶
X_{GV}^{open}	۰/۱
D (%)	۱
$\dot{X}_{GV}^{close}$	۰/۱۶
R_P	۰/۰۵
H	۳
T_D	۰/۱
K_D	۱/۵
K_I	۰/۱۲۲
KP_{Design}	۰/۹۸۳

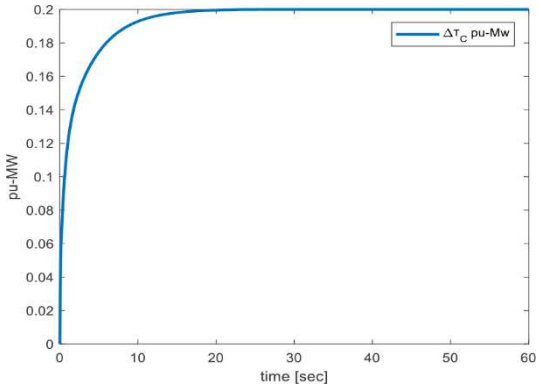
مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب

در ابتدا لازم است یک مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب برای ΔT_C در نظر گرفته شود. این منحنی برای هر توربین آبی منحصر به فرد بوده و با استفاده از آزمایش تجربی قابل استخراج است. برای محاسبه‌ی ΔF_R از روش انتگرال‌گیری عددی مبتنی بر تقریب ذوزنقه‌ای استفاده شده است که در آن پله h شبیه‌سازی برای ۰/۰۵ و زمان شبیه‌سازی نیز برابر ۶۰ ثانیه درنظر گرفته شده است. بنابراین بردار ΔT_C دارای ۱۲۰۰ المان خواهد بود. در شکل (۴) مشخصه پاسخ زمانی درنظر گرفته شده برای ΔT_C نشان داده شده که این منحنی برای تنظیم پارامترهای نیروگاه آبی استفاده می‌شود.

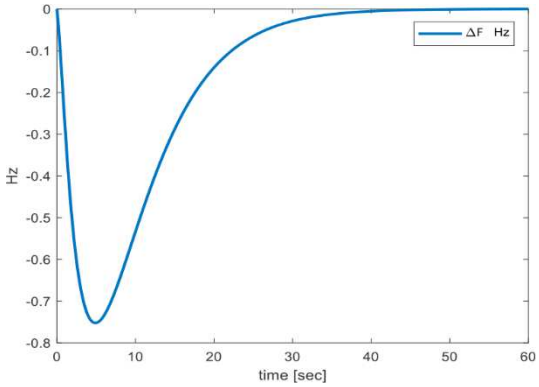
شکل (۵) مشخصه پاسخ زمانی انحراف فرکانس (ΔF_R) بر اساس ΔT_C را نشان می‌دهد که در آن تغییر بار اکتبو ۰/۰۲ پریونیت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در روش پیشنهادی، تنها منحنی ΔT_C مشخص بوده و برای این منحنی، مشخصه پاسخ زمانی انحراف فرکانس هر نیروگاه با نیروگاه‌های دیگر متفاوت خواهد بود. منحنی ΔT_C را می‌توان برای زمان شبیه‌سازی و دامنه بار اکتیو متفاوت تنظیم کرد. زمان افزایش مقدار ΔT_C از صفر تا مقدار پیک، مشخص‌کننده‌ی زمان پاسخ سیستم به اغتشاشات وارد بر آن است.

[۱] Kundor

[۲] Khodabakhshian



شکل (۴): مشخصه‌ی پاسخ زمانی درنظر گرفته شده برای ΔT_C برای زمان ۶۰ ثانیه



شکل (۵): مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب انحراف فرکانس برای زمان ۶۰ ثانیه

طراحی مبتنی بر مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب

در بخش قبل منحنی ΔF_R بر اساس ΔT_C استخراج شد. مقادیر بهینه ضراب a_i و b_i در جدول (۲) آمده است. این مقادیر قادر به تطبیق بهینه‌ی بردارهای ΔF_R و ΔT_C هستند زیرا همان‌طور از جدول مقادیر بهینه ضرایب مشخص است، مقدار خطای کلی (Te_1) تقریبا برابر صفر به‌دست آمده است. با استفاده از مقادیر بهینه a_i و b_j، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی قابل حل است که خروجی آن مقدار پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC است. این مقادیر با حل مسئله NLP در جدول (۳) آمده است. مطابق این جدول مقدار خطای کلی برنامه‌نویسی غیرخطی (Te_2) برابر $۴/۹\times۱۰^{-۶}$ به‌دست آمده که بسیار نزدیک به صفر است. بنابراین تطبیق مورد نظر در مرحله‌ی دوم نیز به‌صورت کامل محقق گردیده‌است.

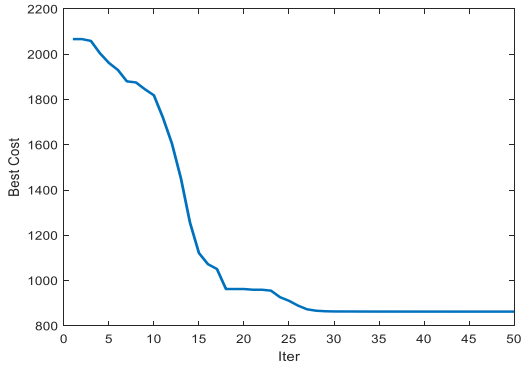
جدول (۲): پاسخ برنامه‌نویسی خطی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
Te_1	۰/۰۰۰۱	a_0	۰/۳۰۴۶
a_3	۰/۱۲۲	b_2	۰/۲۳۲۷
a_2	۱/۰۰۱۶	b_3	۰
a_1	۱/۶۹۹۸		

جدول (۳): پاسخ برنامه‌نویسی غیرخطی

پارامتر	مقدار
Te_2	$۴/۹\times۱۰^{-۶}$
K_I	۰/۱۲۲
KP_{design}	۰/۹۲۵۶۳
K_D	۱/۴۹۱۹
$R_{t\,(\%)}$	۵۴/۸۸
T_R	۰/۲۰۲

در ادامه پارامترهای PID و TDC با استفاده از الگوریتم PSO به‌صورت بهینه انتخاب شده است. تابع هدف این بهینه‌سازی شامل کمینه‌سازی انتگرال خطای مطلق (IAE)، زمان نشست، خطای حالت ماندگار و فراجهش تعریف شده است. منحنی همگرایی الگوریتم PSO در طول فرآیند بهینه‌سازی در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که دیده‌می‌شود تابع هزینه به مرور کاهش یافته و در نهایت ثابت شده است که نشان دهنده‌ی همگرایی الگوریتم است. پارامترهای بهینه PID و TDC به‌دست آمده از بهینه‌سازی در جدول (۴) آمده است.



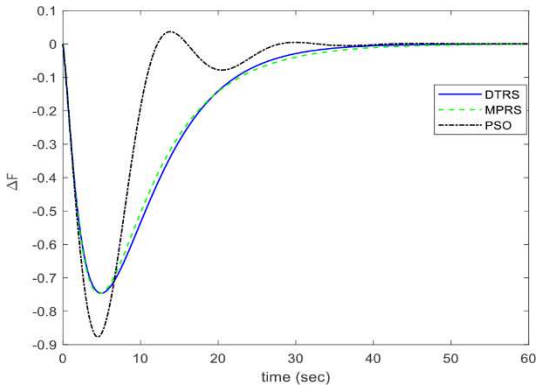
شکل (۶): منحنی همگرایی بهینه‌سازی پارامترهای PID و TDC

جدول (۴): پارامترهای بهینه‌ی PID و TDC بر اساس بهینه‌سازی PSO

پارامتر	مقدار
K_I	۰/۱۹۰۶
KP_{design}	۴/۸۳
K_D	۵
$R_{t\,(\%)}$	۱۹/۳
T_R	۶/۶۰۵

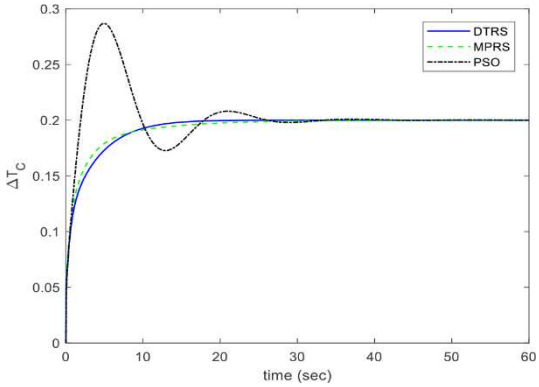
در شکل (۷) انحراف فرکانس سیستم برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در توان مصرفی بار برای هر سه روش مذکور نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین

پاسخ مربوط به روش DTRS بوده‌است. همچنین مشخص است که پاسخ مربوط به روش PSO با وجود داشتن سرعت بالاتر در جبران‌سازی افت فرکانس، فراجهش بیشتری داشته و در نهایت نیز رفتار نوسانی داشته‌است. بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد روش DTRS از هر دو روش دیگر بهتر است.



شکل (۷): انحراف فرکانس سیستم برای تغییر بار ۰/۰۲

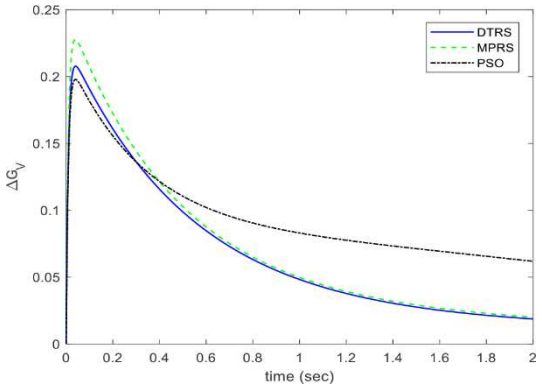
در شکل (۸) پاسخ به‌دست آمده برای ΔT_C برای هر سه روش نشان داده شده است. در این شکل نیز مشاهده می‌شود که عملکرد روش DTRS بهتر از دو روش دیگر بوده‌است.



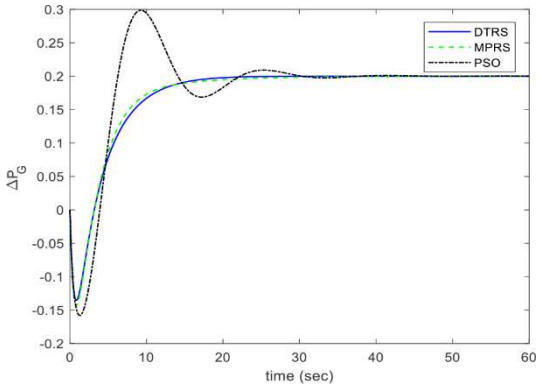
شکل (۸): پاسخ ΔT_C برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در بار مصرفی

رفتار اولیه‌ی دریچه‌ی گاورنر سرعت برای هر سه روش در شکل (۹) نشان داده شده است. بر اساس این شکل مشخص است که عملکرد روش PSO بهتر از دو روش دیگر بوده است زیرا موجب کاهش عملکرد اولیه‌ی دریچه‌ی گاورنر سرعت شده است که موجب کاهش فشار بر روی آن می‌شود. با این وجود، زمان عملکرد گاورنر سرعت برای روش PSO بسیار بیشتر از دو روش دیگر بوده‌است که از این نظر عملکرد روش PSO ضعیف‌تر از دو روش دیگر است. با درنظر گرفتن رفتار اولیه و زمان عملکرد گاورنر، باز هم روش DTRS عملکرد بهتری ارائه کرده است.

در شکل (۱۰) نیز تغییرات توان خروجی توربین آبی (ΔP_G) نشان داده شده است. بر اساس این شکل نیز مشاهده می‌شود که روش DTRS عملکرد بهتری ارائه کرده است زیرا موجب کاهش مقدار پاسخ معکوس توربین آبی شده است.



شکل (۹): تغییرات دریچه‌ی گاورنر سرعت برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در بار مصرفی



شکل (۱۰): نوسان‌های ΔP_G کلی برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در بار مصرفی

بر اساس نتایج شبیه‌سازی، استفاده از روش DTRS موجب کاهش دو مگاواتی در پاسخ معکوس توربین آبی می‌شود. این دو مگاوات معادل با ۱۴ درصد صرفه‌جویی انرژی در روش DTRS نسبت به روش MPRS است. به‌طور کلی بر اساس بررسی انجام شده در این بخش مشخص است که روش DTRS یک ساختار بسیار مناسب برای محاسبه‌ی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC فراهم می‌سازد که عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با روش‌های مقایسه شده ارائه می‌کند.

سیستم مطالعاتی دوم

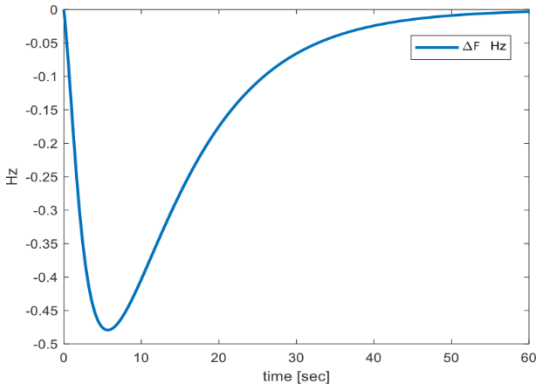
در این بخش روش DTRS بر روی یک نیروگاه آبی دیگر با توان پایه‌ی ۳۵۰ MW اعمال شده است. پارامترهای این سیستم در جدول (۵) ارائه شده و بار این سیستم ۷۵ درصد بار نامی در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): داده‌های نیروگاه آبی ۳۵۰ MW مگاواتی

پارامتر	مقدار
T_G	۰/۵
T_W	۳
H	۵
D (%)	۱
$\dot{X}_{GV}^{close}$	۰/۱۶
X_{GV}^{close}	۰/۱
R_P	۰/۰۵
1/R	۲۰
ΔP_L	۰/۰۲
$\dot{X}_{GV}^{open}$	۰/۱۶
X_{GV}^{open}	۰/۱
P_L (MW)	۰/۷۵×۳۵۰

توان پایه و مشخصات سیستم مطالعاتی دوم با سیستم اول بسیار متفاوت است، با این وجود برای طراحی پارامترهای PID و TDC این نیروگاه نیز از منحنی ΔT_C ارائه شده در شکل (۴) استفاده می‌شود. با استفاده از منحنی ΔT_C مذکور، منحنی ΔF به‌دست آمده برای این سیستم در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از ΔT_C و ΔF به‌عنوان بردارهای ورودی، مسئله برنامه‌ریزی خطی قابل حل بوده و با استفاده از نتایج LP، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی حل شده و پارامترهای PID و TC به‌دست می‌آید. نتایج این بهینه‌سازی در جدول (۶) ارائه شده است. مشخص است که همانند سیستم قبلی، مقدار T_{e2} به‌شدت کوچک است که نشان‌دهنده‌ی تطبیق دقیق داده‌ها است. علاوه بر این مشخص است که با تغییر سیستم مورد مطالعه، تمام پارامترهای به‌دست آمده نیز تغییر کرده است. این موضوع ناشی از تفاوت پارامترهای نیروگاه قبلی و نیروگاه فعلی است، در حالی که منحنی ورودی ΔT_C برای هر دو سیستم یکسان است، پارامترها برای هر دو سیستم متفاوت و بهینه به‌دست می‌آید. برای این سیستم، پارامترهای مرجع (خدابخشیان و همکاران، ۲۰۱۰) بر اساس نسبت توان‌های پایه به مبنای MW منتقل شده است.

در شکل (۱۲) نیز منحنی همگرایی برای بهینه‌سازی PSO نشان داده شده است. در جدول (۷) پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌سازی TDC به‌دست آمده از بهینه‌سازی PSO برای نیروگاه ۳۵۰ MW ارائه شده است.



شکل (۱۱): مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب انحراف فرکانس برای سیستم ۳۵۰ مگاوات

جدول (۶): تنظیم پارامترهای PID و TDC برای سیستم ۳۵۰ MW با روش DTRS

پارامتر	مقدار
T_{e2}	۹×۱۰^{-۶}
K_I	۰/۱۴۲۹
T_R	۰/۲۶۹
$R_{t\,(\%)}$	۳۰/۲۴
K_D	۱/۶۱۳۴
KP_{design}	۱/۵۶

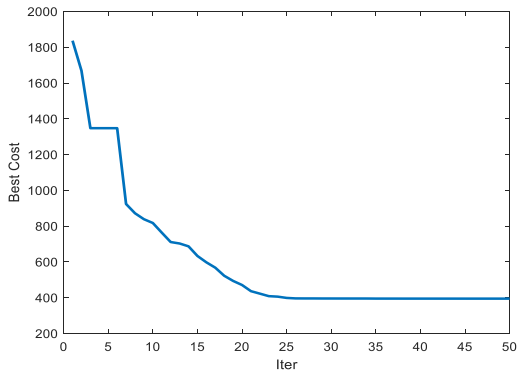
در شکل (۱۳) پاسخ‌های انحراف فرکانس هر سه روش برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در توان بار نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که پاسخ روش‌های MPRS و PSO از نظر سرعت پاسخ‌گویی به تغییرات بار بیشتر بوده‌است. با این وجود برای هر دو روش مذکور مقدار فراجهش بیشتر از فراجهش روش DTRS می‌باشد. علاوه بر این، همانند حالت قبل، پاسخ روش DTRS بدون نوسان بوده ولی برای دو روش دیگر پاسخ انحراف فرکانس با مقداری نوسان همراه بوده‌است. برای هر سه روش، پاسخ به‌دست آمده برای ΔT_C، ΔG_V و ΔP_G به ترتیب در شکل‌های (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) نشان داده شده است.

بر اساس نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد که عملکرد روش DTRS بسیار بهتر از دو روش دیگر است. بر اساس این نتایج، مزایای روش DTRS به‌صورت زیر قابل بیان است:

الف- بهبود پاسخ زمانی انحراف فرکانس، به‌صورتی که موجب صفر شدن مقدار فراجهش شده و انحراف فرکانس نیز بدون هیچ‌گونه نوسانی میرا می‌شود.

ب- کاهش خروجی TDC و حذف نوسانات آن

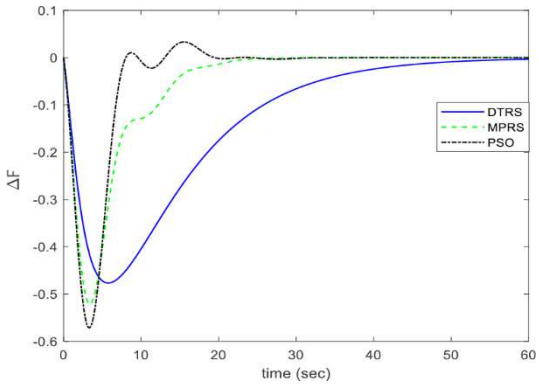
ج- کاهش عملکرد اولیه‌ی شیر گاورنر سرعت، که موجب کاهش فشار وارد بر آن خواهدشد.



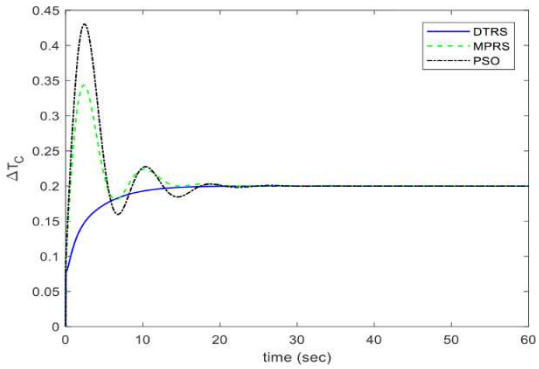
شکل (۱۲): منحنی همگرایی بهینه‌سازی پارامترهای PID و TDC برای سیستم ۳۵۰ مگاوات

جدول (۷): پارامترهای بهینه PID و TDC بر اساس بهینه‌سازی PSO برای سیستم ۳۵۰ MW

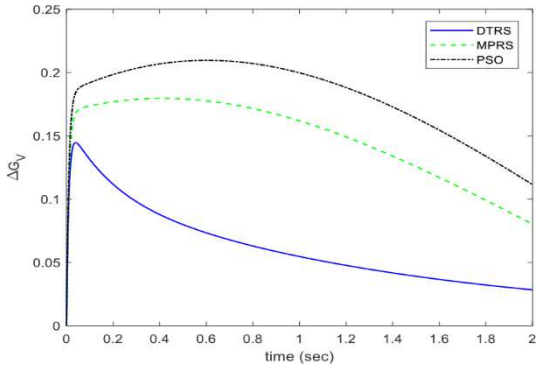
پارامتر	مقدار
T_R	۷/۰۵۷
$R_{t\,(\%)}$	۴/۵
K_D	۴/۲۱۲۸
KP_{design}	۲/۸۲
K_I	۰/۵۱۰۸



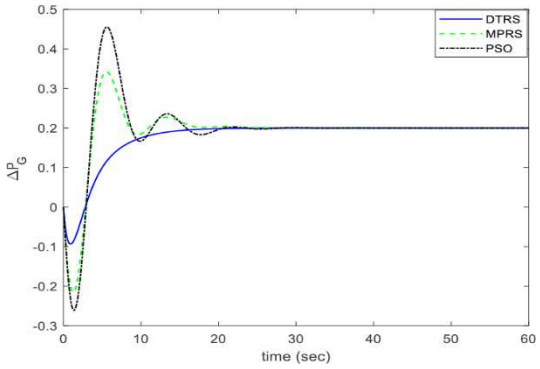
شکل (۱۳): انحراف فرکانس سیستم برای تغییر بار ۰/۰۲ پریونیت در نیروگاه ۳۵۰ مگاوات



شکل (۱۴): رفتار اولیه دریچه گاورنر سرعت برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در سیستم ۳۵۰ مگاوات



شکل (۱۵): رفتار اولیه دریچه گاورنر سرعت برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در سیستم ۳۵۰ مگاوات



شکل (۱۶): نوسان‌های ΔP_G کلی برای تغییر پله‌ای ۰/۰۲ پریونیت در سیستم ۳۵۰ مگاوات

د- کاهش پاسخ معکوس توربین آبی، که موجب کاهش استرس بر توربین و صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی می‌شود. علاوه بر مزایای بیان شده، همان‌طور که قبلا نیز بیان شد، ورودی مورد نیاز برای روش DTRS تنها یک مشخصه‌ی مطلوب برای منحنی ΔT_C است. با این وجود لزومی ندارد که این منحنی مربوط به نیروگاه مورد مطالعه باشد. زیرا نشان داده‌شد که استفاده از یک منحنی ΔT_C برای دو نیروگاه کاملا متفاوت، تاثیری در کارایی روش DTRS ندارد. در جدول (۸) عملکرد روش‌های مذکور در جبران‌سازی انحراف فرکانس از نظر معیارهای مختلف بررسی شده است. از نظر زمان برای تنظیم پارامترها، روش DTRS به حل یک مسئله خطی و یک مسئله غیرخطی نیاز دارد ولی حل این مسائل کمتر از یک ثانیه زمان لازم دارد. با این وجود برای بهینه‌سازی با استفاده از PSO حدود یک دقیقه زمان لازم است که البته زمان قابل قبولی است. از نظر فراجهش روش DTRS بهترین عملکرد و روش PSO بدترین عملکرد را داشته است. این موضوع برای زمان نشست عکس بوده و بهترین عملکرد مربوط به روش PSO است. به‌طور کلی می

توان گفت که هر یک از روش‌ها مزایا و معایت خاص داشته و هیچ کدام برتری کامل نسب به روش دیگر ندارند.

تحلیل حساسیت

بررسی‌ها نشان می‌دهند که زمان راه‌اندازی آب (T_w) و میرایی بار وابسته به توان اکتیو بار بوده و با تغییر بار این ضرایب تغییر می‌کنند. تغییر پارامترهای مذکور می‌تواند منجر به افت عملکرد نیروگاه آبی شود. تغییرات پارامتر D ضریب سیستم قدرت (K_{ps}) را تحت تاثیر قرار می‌دهد که می‌تواند موجب تضعیف پاسخ فضای حالت شود. همچنین تغییرات پارامتر T_W نیز موجب تغییر موقعیت صفر مثبت سیستم شده و عملکرد دینامیکی آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. برای جلوگیری از اثرات منفی بیان شده، پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC باید با درنظر گرفتن نقاط و شرایط بهره‌برداری متفاوت تنظیم شوند. بنابراین در ادامه‌ی شبیه‌سازی با در نظر گرفتن تغییرات بار سیستم از ۹۰ تا ۶۵ درصد ظرفیت نامی سیستم ۳۵۰ مگاوات انجام شده است. این نقاط بهره‌برداری نشان‌دهنده‌ی بار سنگین تا متوسط هستند. به‌منظور تحلیل حساسیت روش DTRS به نقاط کار سیستم، تغییرات بار و پارامترهای مربوط به آن به‌صورت جدول (۹) در نظر گرفته شده است که در آن مقادیر D، K_{ps} و T_{ps} مربوط به هر یک از نقاط بهره‌برداری نیز ارائه شده است. مشخص است که هم T_W و هم D با کاهش PL کاهش می‌یابند. با استفاده از روش DTRS، لازم است مسئله برای هر یک از نقاط کاری جدول (۹) حل شود. نتایج برای هر نقطه کاری در جدول (۱۰) ارائه شده است. بر اساس جدول (۱۰) مشخص است که پارامترهای PID و TDC برای هر نقطه کار متفاوت است. با وجود اینکه این پارامترها برای هر یک از شرایط کاری مربوط بهترین پاسخ را دارا هستند، ولی لازم است یک پارامتر مشخص برای تمام محدوده کاری سیستم انتخاب شود. این کار با استفاده از روابط موجود در مرجع قابل انجام است (چانگ، ۲۰۰۳). با استفاده از این روش و در نظر گرفتن تمام شرایط ارائه شده در جدول (۹)، پارامترهای نهایی سیستم در جدول (۱۱) ارائه شده است. این پارامترها باید عملکرد سیستم در ضعیف‌ترین و شدیدترین شرایط بار را تضمین کنند. پاسخ سیستم با پارامترهای جدول (۱۱) در شکل (۱۷) نشان داده شده است. در شکل (۱۸) نیز عملکرد روش PSO برای ضعیف‌ترین و شدیدترین شرایط بار نشان داده شده است. بر اساس شکل (۱۷) و (۱۸) مشخص است که پارامترهای کلی به‌دست آمده عملکرد قابل قبولی داشته‌اند به صورتی که هم برای ضعیف‌ترین شرایط بار و هم برای شدیدترین شرایط بارگذاری، پاسخ زمانی انحراف فرکانس برای هر دو روش به‌صورت مطلوب جبران‌سازی شده است. بنابراین مشخص است که روش DTRS قادر به طراحی پارامترهای PID و TDC به‌صورت مقاوم و با در نظر گرفتن تمام شرایط بهره‌برداری است. این ویژگی سبب بهبود قابلیت اطمینان کنترل‌کننده شده و عملکرد مناسب آن در شرایط مختلف شبکه را تضمین می‌کند.

جدول (۸): مقایسه عملکرد سه روش در جبران‌سازی انحراف فرکانس سیستم

معیار	روش		
	DTRS	MPRS	PSO
زمان لازم برای تنظیم پارامترها	پایین	پایین	متوسط
میزان فراجهش	عالی	متوسط	ضعیف
زمان نشست	ضعیف	متوسط	عالی
خطای ماندگار	خوب	خوب	خوب

جدول (۹): شرایط و نقاط بهره‌برداری درنظر گرفته‌شده برای تحلیل حساسیت روش DTRS

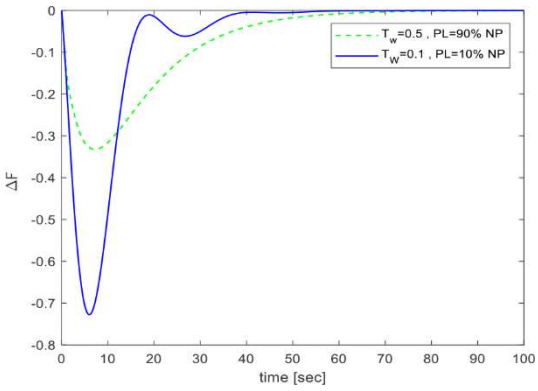
نقطه کار (OC)	PL (=%NP)	T_W	D (pu-MW/Hz)	K_{ps}=1/D	T_{ps}
۱	۹۰	۵	۰/۰۵۲۵	۱۹/۰۴۷۶	۱۱/۱۱۱۱
۲	۸۰	۴	۰/۰۴۷۶	۲۱/۴۲۸۶	۱۲/۵
۳	۷۵	۳	۰/۰۴۳۷	۲۲/۸۸۳۳	۱۳/۳۳۳۳
۴	۷۰	۲	۰/۰۴۰۸	۲۴/۹۸/۴۸	۱۴/۲۸۵۷
۵	۶۵	۱	۰/۰۳۷۹	۲۶/۳۷۳۶	۱۵/۳۸۴۶

جدول (۱۰): مقادیر پارامترهای PID و جبران‌ساز TDC برای نقاط کاری مختلف

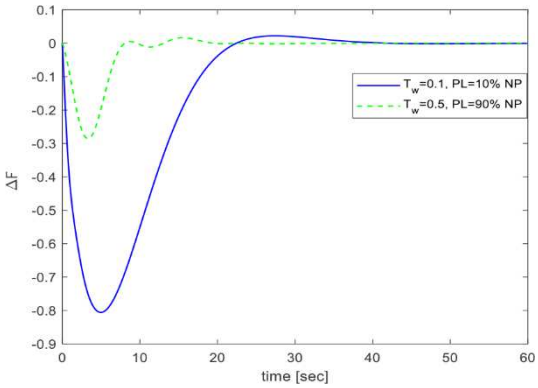
OC	K_D	K_I	KP_{design}	Rt (%)	T_R
۱	۲/۳۸	۰/۱	۰/۱۷۶	۷۶/۰۳	۰/۹۰۱۵
۲	۲/۳۱۴۱	۰/۱۱۷۸	۰/۳۵۵	۷۳/۷	۰/۸۰۲
۳	۲/۳۹۷۷	۰/۱۴۲۸	۰/۶۵۱۹	۶۰/۶	۰/۲۶۹۷
۴	۱/۴۸	۰/۱۸۱۸	۰/۹۰۸	۶۰/۰۰	۰/۵۸۴۲
۵	۱/۵۲۹۸	۰/۲۵۰۲	۱/۵۸۷	۶۹/۳	۲/۰۶۳

جدول (۱۱): جدول (۱۱) : پارامترهای نهایی PID و TDC برای سیستم ۳۵۰ MW

پارامتر	مقدار
K_I	۰/۱۵۸۵
KP_{design}	۰/۷۳۵۶
K_D	۲/۰۲
$R_{t\,(\%)}$	۶۷/۹
T_R	۱/۱۲



شکل (۱۷): پاسخ زمانی انحراف فرکانس برای ضعیف‌ترین و شدیدترین شرایط بهره‌برداری برای روش DTRS



شکل (۱۸): پاسخ زمانی انحراف فرکانس برای ضعیف‌ترین و شدیدترین شرایط بهره‌برداری برای روش PSO

نتیجه‌گیری

در این مقاله در راستای برطرف ساختن ضعف‌های روش‌های قبلی، دو روش جدید برای تنظیم ضرایب کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC در کنترل فرکانس-بار توربین‌های هیدرولیکی ارائه شده و با هم مقایسه گردیده‌است. روش اول مبتنی بر مشخصه‌ی پاسخ زمانی مطلوب (DTRS) و روش دوم مبتنی بر بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PID و جبران‌ساز TDC به‌صورت همزمان و با استفاده از الگوریتم PSO بود. کنترل فرکانس-بار یک نیروگاه آبی با استفاده از روش‌های مذکور و روش مشخصه‌ی رزونانسی پیک حداکثری شبیه‌سازی و نتایج این روش‌ها با هم مقایسه شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که در تمام شرایط مختلف و با در نظر گرفتن معیارهای گوناگون، عملکرد روش DTRS از دو روش دیگر بهتر است. مزیت‌های این روش شامل بهبود پاسخ زمانی انحراف فرکانس، کاهش خروجی TDC و حذف نوسانات آن، کاهش عملکرد اولیه‌ی شیر گاورنر سرعت و در نتیجه‌ی آن کاهش فشار وارد به دریچه‌ی گاورنر و کاهش پاسخ معکوس توربین آبی که موجب کاهش استرس بر توربین و همچنین صرفه‌جویی قابل توجه در انرژی می‌شود. علاوه بر این، تنها ورودی مورد نیاز برای روش DTRS یک مشخصه‌ی مطلوب برای منحنی ΔT_C است که لزومی ندارد این منحنی مربوط به نیروگاه مورد مطالعه باشد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی نشان داده شد که استفاده از یک منحنی ΔT_C برای دو نیروگاه کاملا متفاوت، تاثیری در کارآیی روش DTRS نداشته و در هر دو حالت یک کنترل‌کننده بهینه طراحی شده است. با این وجود، نتایج شبیه‌سازی نشان داد که عملکرد روش PSO از نظر زمان نشست بهتر از روش DTRS است. به‌منظور تحلیل حساسیت روش DTRS به نقاط کار سیستم، تغییرات بار و پارامترهای مربوط به آن برای چند نقطه کار متفاوت درنظر گرفته شد و با استفاده از روش DTRS، مسئله برای هر یک از نقاط کاری حل شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که پارامترهای PID و TDC برای هر نقطه از شرایط کاری سیستم متفاوت می‌باشد. با وجود اینکه این پارامترها برای هر یک از شرایط کاری مربوط بهترین پاسخ را دارا هستند، ولی لازم است یک پارامتر مشخص برای تمام رنج کاری سیستم انتخاب شود. بنابراین با استفاده از روش DTRS و درنظر گرفتن تمام شرایط

بهره‌برداری، پارامترهای نهایی سیستم محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی اثبات کرد که این پارامترها در ضعیف‌ترین و شدیدترین شرایط بار عملکرد مناسب سیستم را تضمین می‌کنند. این وضعیت برای پارامترهای به‌دست آمده از روش PSO نیز صادق بود که نشان‌دهنده‌ی عملکرد مقاوم این روش می‌باشد. بنابراین مشخص شد که روش‌های DTRS و PSO قادر به طراحی پارامترهای PID و TDC به‌صورت مقاوم و با درنظر گرفتن تمام شرایط بهره‌برداری می‌باشد. این ویژگی یک مزیت منحصر به فرد بوده و سبب بهبود قابلیت اطمینان کنترل‌کننده می‌شود به‌صورتی که عملکرد مناسب آن در شرایط مختلف شبکه را تضمین می‌کند. در راستای ادامه‌ی کار انجام شده در این پژوهش می‌توان عملکرد روش DTRS را با یک روش قوی‌تر نظیر کنترل پیش‌بین و ادوات FACTS مقایسه کرد.

مراجع

۱- **شاهقلیان غضنفر، خانی خسرو، معظمی مجید، (۱۳۹۳)، "تاثیر حضور توربین باد مجهز به مولد القایی تغذیه دوسویه در کنترل بسامد-بار سامانه قدرت با توربین آبی"، نشریه سد و نیروگاه برق آبی ایران، ۱(۳):۵۱-۳۸.**

۲- **شاهقلیان غضنفر، (۱۳۹۴)، "طراحی کنترل کننده PID برای کنترل بار-فرکانس در سیستم قدرت با توربین آبی دارای جبران کننده افتی گذرا" ، نشریه سد و نیروگاه آبی ایران، ۲(۵):۶۴-۵۰.**

3- Chang J. L., (2003), "Robust sliding-mode control with disturbance attenuation using only output feedback", JSME International Journal Series C, 46(1):239-244.

4- Ersdal A. M., Imsland L., Uhlen K., (2016), "Model Predictive Load-Frequency Control", IEEE Trans. on Power Systems, 31(1):777-85.

5- Fazeli-Nejad S., Shahgholian G., Moazzami M., (2019), "Artificial Bee Colony Algorithm Based Approach For Power System Oscillation Damping With PSS and STATCOM", International Journal of Research Studies in Electrical and Electronics Engineering, 5(2):27-39.

6- Gholamrezaie V., Dozein M. G., Monsef H., Wu B. (2018), "An Optimal Frequency Control Method Through A Dynamic Load Frequency Control (LFC) Model Incorporating Wind Farm", IEEE Systems Journal, 12(1):39401.

7- Golpira H., Bevrani H., (2011), "Application of GA Optimization for Automatic Generation Control Design in an Interconnected Power System", Energy Conversion and Management, 52(5), 2247-2255.

8- Gozde, H., Taplamacioglu, M. C., Kocaarslan, İ. (2012), "Comparative Performance Analysis of Artificial Bee Colony Algorithm in Automatic Generation Control for Interconnected Reheat Thermal Power System", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 42(1):167-178.

9- Guha D., Roy P. K., Banerjee S., (2016), "Load Frequency Control Of Interconnected Power System Using Grey Wolf Optimization", Swarm And Evolutionary Computation, 1(27): 97-115.

10- Hemmati R., Shirvani-Boroujeni S. M., Delafkar H., Boroujeni A. S., (2011), "PID Controller Adjustment using PSO for Multi Area Load Frequency Control", Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(3):295-302.

11- Jagatheesan K., Anand B., Dey N., Ashour A. S., Balas V. E., (2018), "Load Frequency Control of Hydro-Hydro System with Fuzzy Logic Controller Considering Non-Linearity", Recent Developments and the New Direction in Soft-Computing Foundatio ns and Applications, pp. 307-318.

12- Khodabakhshian A., Hooshmand R., (2010), "A New PID Controller Design For Automatic Generation Control of Hydro Power Systems", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 32(5):375–82.

13- Khooban M. H., Niknam T, Shasadeghi M, Dragicevic T., Blaabjerg F., (2018), "Load Frequency Control in Microgrids Based on a Stochastic Noninteger Controller", IEEE Trans. on Sustainable Energy, 9(2):853-861.

14- Kundur P., "Power system stability and control." McGraw-Hill Inc; 1994.

15- Liu X., Zhang Y., Lee K. Y., (2017), "Coordinated Distributed MPC for Load Frequency Control Of Power System with Wind Farms", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 64(6):5140-50.

16- Ma M., Zhang C., Liu X., Chen H., (2017), "Distributed Model Predictive Load Frequency Control of the Multi-Area Power System after Deregulation", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 64(6):5129-5139.

17- Peng C., Li J., Fei M., (2017), "Resilient Event-Triggering Load Frequency Control for Multi-Area Power Systems with Energy-Limited DOS Attacks", IEEE Trans. on Power Systems, 32(5):4110-4118.

18- Peng C., Zhang J., (2016), "Delay-Distribution-Dependent "Load Frequency Control of Power Systems with Probabilistic Interval Delays", IEEE Trans. on Power Systems, 31(4):3309-17.

19- Sekhar G. C., Sahu R. K., Baliarsingh A. K., Panda S., (2016), "Load Frequency Control of Power System Under Deregulated Environment Using Optimal Firefly Algorithm", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 74:195-211.

20- Sönmez Ş., Ayasun S., Nwankpa C.O., (2016), "An Exact Method For Computing Delay Margin for Stability of Load Frequency Control Systems with Constant Communication Delays", IEEE Trans. on Power Systems, 31(1):370-377., "Event-Triggering Load Frequency Control for Multi Area Power Systems with Communication Delays", IEEE Trans. on Industrial Electronics, 63(2):1308-17.

21- Yang F., He J., Wang D., (2018), "New stability criteria of delayed load frequency control systems via infinite-series-based inequality", IEEE Trans. on Industrial Informatics, 14(1):2340.