

بهبود رفتار غیر خطی سیستم توربین گازی V94.2 با کنترلر

هوشمند

مسعود مرادی^۱، سعید سید طبایی

دانشکده فنی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

چکیده

تثبیت دور توربین گازی مولد برق در مقابل تغییرات بار از موضوعات مورد علاقه محققین است. در این رابطه عملکرد کنترلر پایه PID بعنوان مرجع مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد آن با کنترلر PID بهینه شده توسط الگوریتم های بهینه سازی ازدحام ذرات، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات شتاب دهنده، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات شتاب دهنده بهبود یافته، و کنترلر فازی بهینه شده با الگوریتم ازدحام ذرات، و سیستم استنتاج فازی مبتنی بر شبکه های تطبیقی (ANFIS) با بهینه سازی ازدحام ذرات مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می دهند که در کنترلر با فیدفوروارد ناشی از اختلال بار، کنترلر PID طراحی شده توسط بهینه سازی ازدحام ذرات و کنترلر فازی، و در کنترلر بدون فیدفوروارد ناشی از اختلال بار کنترلر فازی طراحی شده دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترلرها می باشند، لذا این کنترلرها برای کنترلر سرعت توربین گازی مناسب تر هستند.

کلمات کلیدی: توربین گازی V94.2، سیکل ترکیبی، کنترلر هوشمند، بهینه سازی

۱. مقدمه

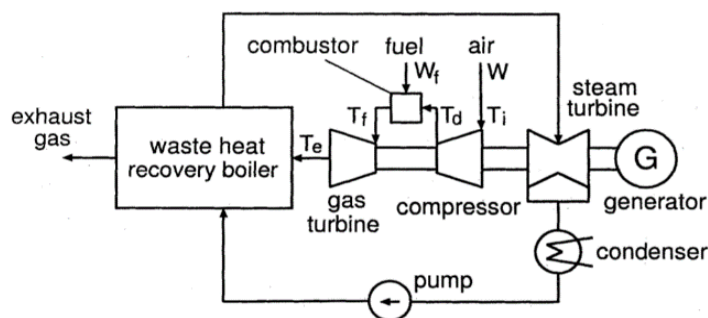
در توربین های گازی ابتدا هوا در بخشی به نام کمپرسور فشرده می شود تا وارد محفظه احتراق گردد. در محفظه احتراق با سوزاندن سوخت های فسیلی، هوای فشرده تزریقی گرم می شود و تولید سیال با انرژی جنبشی بالا می نماید. این سیال به سمت پره های توربین هدایت می شود تا به کمک آن کار مکانیکی تولید نماید. کار تولید شده صرف چرخاندن کمپرسور هوا و دستگاه های دیگر مانند ژنراتور می گردد. به طور کلی توربین های گازی از سه بخش اصلی کمپرسور، محفظه احتراق، و توربین تشکیل شده است. هدف اصلی در یک توربین گاز، تبدیل انرژی نهفته در سوخت های فسیلی به انرژی مکانیکی و کار می باشد. این تبدیل در قسمتی از توربین گاز به نام توربین اتفاق می افتد. در این قسمت بخش اعظمی از انرژی گازهای حاصل از احتراق گرفته می شود و این انرژی به محور توربین گاز انتقال داده می شود. در واقع، توربین قسمتی است که بعد از محفظه احتراق قرار گرفته و وظیفه تبدیل انرژی گرمایی گازهای خروجی از محفظه احتراق را به انرژی مکانیکی و کار برعهده دارد. دو نوع متداول از این نوع توربین ها وجود دارند: توربین های با جریان گردشی و

^۱ دانشکده فنی، دانشگاه شاهد، تهران
masoud.moradi94shahed@yahoo.com

توربین‌های جریان محوری^۱ که تفاوت اصلی آنها در جهت عبور سیال از آنها می‌باشد. در واقع در توربین‌های با جریان گردشی، جهت حرکت در توربین‌های با جریان گردشی، جهت حرکت گازهای خروجی عمود بر امتداد ورود گازهای داغ و در توربین‌های با جریان محوری، این جهت، موازی گازهای داغ ورودی است. به عبارت دیگر در توربین‌های با جریان گردشی، جریان گازها به سمت درون و شعاعی می‌باشد که باعث حرکت و چرخش توربین می‌شود. در حالی که در توربین‌های با جریان محوری، گازها در موازات محور مرکزی توربین وارد می‌شوند و با برخورد به پره‌ها باعث چرخش آنها شده و سپس بدون تغییر مسیر از توربین خارج می‌شوند [۱].

۲. مدل توربین با سیکل ترکیبی

روون در سال ۱۹۸۲ مدل ساده‌ای از توربین گازی را معرفی نمود. این مدل شامل سه حلقه کنترلی سرعت، دما و شتاب می‌باشد. روون در سال ۱۹۹۲ مدل توسعه یافته خود را با افزودن کنترل پره هدایت ورودی^۲ کمپرسوری جریان محوری کامل نمود. نیروگاه سیکل ترکیبی که شامل یک توربین گازی و یک توربین بخار است، می‌تواند باعث افزایش راندمان گردد. شکل ۱ سیکل ترکیبی تک-محور را نشان می‌دهد، و شامل یک کمپرسور، محفظه احتراق، توربین گازی، بویلر بازیافت حرارتی^۳، توربین بخار و یک ژنراتور می‌باشد. کمپرسور هوا را فشرده می‌کند و آن را به محفظه احتراق می‌فرستد، محفظه احتراق هوا و سوخت را سوزانده، و باعث بالا رفتن دما و بالا رفتن فشار گاز داخل آن می‌گردد. این گاز توربین گازی را به حرکت درمی‌آورد [۲]، و [۳]. بویلر بازیافت حرارتی مقدار انرژی را از اگزوز توربین جمع کرده، و توربین بخار را به حرکت درمی‌آورد. توان خروجی نیروگاه، مجموع توان‌های خروجی توربین گازی و توربین بخار می‌باشد که حدود دو سوم آن را توربین گازی و بقیه آن را توربین بخار تشکیل می‌دهند [۲].

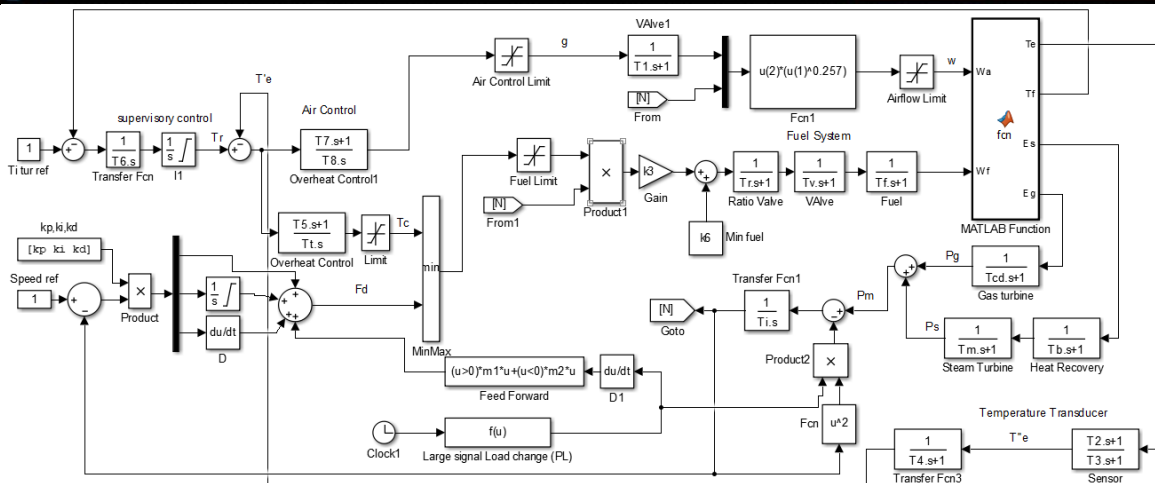


شکل ۲ - شکل سیکل ترکیبی [۲]

¹ Axial Flow

² Inlet Guide Vane

³ Heat Recovery Boiler



شکل ۲- مدل سیکل ترکیبی توربین گازی

از آنجا که هوا فشرده می‌شود، دمای خروجی کمپرسور (T_d)، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_d = T_i \left(1 + \frac{x-1}{\eta_c} \right) \quad (1)$$

$$x = (P_{r0} W)^{\frac{Y-1}{Y}} \quad (2)$$

به گونه‌ای T_i دمای ورودی به کمپرسور یا دمای محیط، η_c بازده کمپرسور، x نرخ دمای کمپرسور، P_{r0} نرخ فشار کمپرسور، W نرخ جریان هوا و Y نسبت گرمای ویژه می‌باشد. جریان هوا W به دمای محیط T_i و فشار اتمسفر P_a به صورت زیر وابسته است:

$$W = W_a \frac{P}{P_{a0}} \frac{T_{i0}}{T_i} \quad (3)$$

در رابطه (3)، "۰" نشان دهنده مقدار نسبی می‌باشد، و $P_a = P_{a0}$ فرض شده است.

رابطه زیر دمای ورودی توربین گازی را نشان می‌دهد:

$$T_f = T_d + (T_{f0} - T_{d0}) \frac{W_f}{W} \quad (4)$$

که در رابطه فوق W_f جریان سوخت، و T_{f0} دمای داخلی توربین گازی، و T_{d0} دمای تخلیه کمپرسور، و مقدار جریان سوخت در مقایسه با جریان هوا ناچیز است.

رابطه زیر دمای آگروز توربین گازی را بیان می‌نماید:

$$T_e = T_f \left[1 - \left(1 - \frac{1}{x} \right) \eta_t \right] \quad (5)$$

که در آن η_t بازده توربین است، و جریان گاز آگروز با جریان هوا برابر می‌باشد، و متغیرهای دمای خروجی به صورت ذیل نرمالیزه می‌گردند:

$$T_e = \frac{T_e - 273}{T_{e0}}, T_f = \frac{T_f - 273}{T_{f0}} \quad (6)$$

شکل ۲، مدل سیکل ترکیبی را (به همراه کنترلر فیدفوروارد ناشی از اختلال بار + کنترلر ساده PID) نمایش می‌دهد

که شامل چهار بلوک کنترل سرعت/توان، کنترل دما، کنترل سوخت و کنترل هوا می‌باشد. بقیه بلوک‌ها، توربین گازی،

25 mm

توربین بخار، بویلر بازیافت حرارتی، محور رتور و مبدل دما را معرفی می‌کنند. متغیرهای ورودی و خروجی هر یک از بلوک‌ها در نشان داده شده‌اند. بلوک کنترل سرعت/ توان، سیگنال سوخت F_d را مطابق بار اعمالی و انحراف سرعت رتور $(I-N)$ تعیین می‌نماید. بلوک کنترل دما، دمای T_e را محدود می‌کند تا آسیبی به توربین گازی نرسد. دمای اندازه‌گیری شده T_e با دمای مرجع T_r مقایسه شده است، خروجی آن سیگنال کنترل دمای T_c می‌باشد. سیگنال سوخت F_d در بلوک کنترل سوخت با سیگنال کنترل دمای T_c مقایسه شده است. مقدار کمتر، توسط بلوک انتخاب کمترین مقدار، انتخاب گردیده و خروجی آن جریان سوخت W_f می‌باشد. بلوک کنترل هوا، جریان هوای W را تنظیم می‌نماید تا به مقدار دمای اگزوز مطلوب برسد. جریان هوا توسط پره‌های قابل تنظیم کمپرسور تنظیم می‌گردد [۲].

جریان سوخت W_f ، جریان هوای W ، و دمای ورودی T_i می‌باشد، دماهای T_d, T_f, T_e و جریان هوای W با استفاده از روابط زیر تعیین شده‌اند. بنابراین، انرژی شبکه وارد شده به توربین گازی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$E_g = k_0 \{ (T_f - T_e) - (T_d - T_i) \} W \quad (7)$$

که در آن k_0 یک ثابت است. این انرژی بعد از یک تاخیر زمانی T_{cd} به توان P_g تبدیل می‌گردد.

انرژی جمع‌آوری شده توسط بویلر بازیافت حرارتی و توربین بخار از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_s = k_1 T_e W \quad (8)$$

که k_1 مقدار ثابت است. این انرژی بعد از تاخیر زمانی T_m و T_b به توان P_s تغییر می‌یابد. با مجموع P_g و P_s توان خروجی نیروگاه (P_m) به دست می‌آید. اگر اختلافی بین توان خروجی P_m و توان بار P_L وجود داشته باشد، سرعت رتور تغییر می‌یابد. T_i نیز ثابت زمانی رتور می‌باشد [۲]، و [۳].

۳. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک تکنیک بهینه‌سازی و از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که از طبیعت الهام گرفته شده است. این الگوریتم یک تکنیک بهینه‌سازی مبتنی بر قوانین احتمال است که توسط دکتر ابرهارت و دکتر کندی، در سال ۱۹۹۵ ارائه شد و از رفتار اجتماعی پرندگان یا ماهی‌ها در پیدا کردن غذا، الهام گرفته شده است. الگوریتم PSO با یک گروه از جواب‌های تصادفی شروع به کار می‌کند، سپس برای یافتن جواب بهینه در فضای مسئله با به روز کردن نسل‌ها به جستجو می‌پردازد. هر ذره به صورت چند بعدی با دو مقدار v_{id} و x_{id} که به ترتیب معرف وضعیت مکانی و سرعت مربوط به بعد d از ذره نام هستند، تعریف می‌شود. Error! Reference source not found. شکل ۳، آپدیت موقعیت و سرعت یک ذره را نمایش می‌دهد [۴].

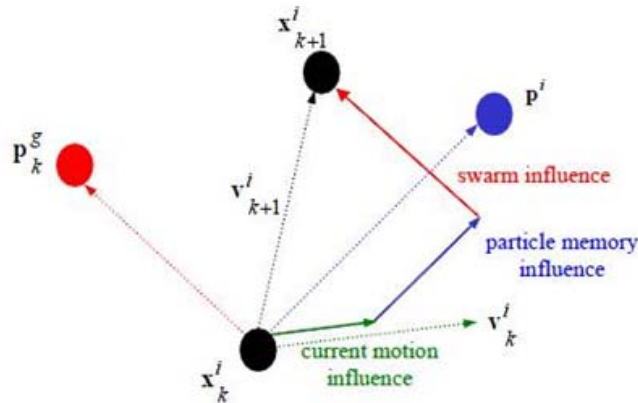
روابط به روز رسانی موقعیت و سرعت الگوریتم PSO به صورت رابطه زیر می‌باشد:

$$v_i^{k+1} = W v_i^k + c_1 \text{rand} \times (pbest - x_i^k) + c_2 \text{rand} \times (gbest - x_i^k) \quad (9)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (10)$$

¹ Particle Swarm Optimization

که در آن، v_i^k سرعت فعلی ذره i ام در تکرار k ام، x_i^k موقعیت فعلی ذره i ام در تکرار k ام، c_1 و c_2 ضرایب یادگیری، $rand_1$ و $rand_2$ اعداد تصادفی بین ۰ و ۱، W وزنه اینرسی، $pbest_i$ بهترین فرد از ذره i ام، $gbest_i$ بهترین جامع، می‌باشند [۵]، [۶]، [۷]



شکل ۳ - آپدیت موقعیت و سرعت ذرات

۴. بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتاب‌دهنده (APSO^۱)

APSO یک نسخه ساده شده از PSO توسعه یافته توسط یانگ می‌باشد. در حالی که PSO از بهترین فرد و بهترین جمع برای آپدیت سرعت استفاده می‌کند، الگوریتم APSO تنها از بهترین جمع، استفاده می‌نماید. این ساده‌سازی با توجه به این واقعیت که بهترین فرد برای افزایش تنوع در راه‌حل‌ها استفاده می‌شود، از این رو می‌تواند با مقدار تصادفی جایگزین شود، در نتیجه، سرعت ذره i ام به صورت رابطه زیر آپدیت می‌گردد:

$$v_i^{k+1} = v_i^k + \alpha \varepsilon + \beta (gbest - x_i^k) \quad (11)$$

که در آن، ε بردار یکنواخت توزیع شده در $[0, 1]$ می‌باشد. موقعیت ذره i ام طبق معادله فوق آپدیت می‌شود. هرچند، به منظور افزایش همگرایی بیشتر، آپدیت موقعیت به شکل زیر می‌باشد:

$$x_i^{k+1} = (1 - \beta)x_i^k + \beta gbest + \alpha \varepsilon \quad (12)$$

همان‌طور که دیده می‌شود، APSO تنها با رابطه ۱۲ معرفی می‌شود، بنابراین نیازی به سرعت نمی‌باشد. بنابراین، یانگ به منظور عملکرد بهتر APSO رابطه زیر را پیشنهاد نمود:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\gamma k} \text{ و } \alpha = \alpha_0 \gamma^k \quad (13)$$

که $\beta = .1 \sim .7$ و $\alpha_0 = .5 \sim .1$ ، $\gamma \in [0, 1]$ [۸].

۵. بهینه‌سازی ازدحام ذرات شتاب‌دهنده (IAPSO^۲)

¹ Accelerated Particle Swarm Optimization

² Improved Accelerated Particle Swarm Optimization

رابطه موقعیت در IAPSO به صورت زیر بیان می گردد:

$$x_i^{k+1} = (1 - \beta(k))p_i^k + \beta(k)gbest + \alpha(k)R_i^k \quad (14)$$

که R بردار یکنواخت توزیع شده می باشد.

$$\alpha(k) = \alpha_{\max} - \left(\frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{k_{\max}} \right) k \quad (15)$$

$$\beta(k) = \beta_{\min} + (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{k}{k_{\max}}\right) \quad (16)$$

و k_{\max} بیشترین تکرار در الگوریتم می باشد [۸].

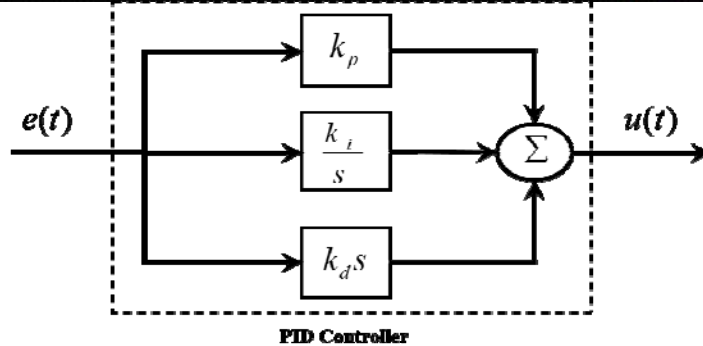
رابطه ۱۷ شاخص عملکرد به کار رفته برای الگوریتم های بهینه سازی است:

$$ITAE = \int_{100}^{200} t |e(t)| dt \quad (17)$$

۵. کنترلر PID

کنترلر PID یکی از استراتژی های اولیه کنترل است. بر طبق بررسی های به عمل آمده در سال ۱۹۸۹ مشاهده شد که بیش از ۹۰ درصد حلقه های کنترل از نوع PID هستند [۹]. با وجود توسعه چشم گیر در زمینه تحلیل و طراحی سیستم های کنترل پیشرفته در چندین دهه گذشته، کنترل کننده های PID هنوز هم تقریباً حرف اول را در کاربردهای صنعتی می زنند. کنترلرهای PID علاوه بر سادگی، هزینه پایین، کارایی و راحتی تعمیر و نگهداری، از مقاومت نسبتاً خوبی در برابر نامعینی ها برخوردارند [۱۰]. در [۱۱] تلاش اولیه به منظور توسعه یک مدل اختلال کوچک^۱ با مطالعه پاسخ فرکانسی از یک نیروگاه توربین گازی سیکل ترکیبی صورت گرفته است. الگوریتم کرم شبتاب برای اولین بار به منظور کنترل فرکانس به منظور بهینه کردن بهره های کنترلی مورد استفاده قرار می گیرد. عملکرد کنترلرهای کلاسیک از جمله کنترلر تناسبی (I)، تناسبی-انتگرال گیر (PI)، تناسبی-انتگرال گیر-مشتق گیر (PID) و انتگرال گیر-مشتق گیر (ID) با هم مقایسه شده است، و کنترلر PID عملکرد بهتری نسبت به دیگر کنترلرها دارد. کنترلرهای PID در کارخانه ها به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند زیرا ساده و مقاوم هستند. در این کار، الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات ضرایب کنترلر PID را برای یک سیستم سرو الکترو-هیدرولیکی تنظیم می نماید [۵]. در [۱۲] کنترلر فرکانس بار مبتنی بر کنترلر PID برای کنترل فرکانس که یکی از مسائل مهم در سیستم توان می باشد، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، کنترل می گردد. [۶]، به کنترل موقعیت دریچه سیستم سیلندر در کاوشگر هیرولیکی می پردازد. برای رسیدن به عملکرد عالی از سیستم غیر خطی، بهینه سازی ازدحام ذرات برای تنظیم ضرایب کنترلر PID مورد استفاده قرار گرفته است.

¹ Small Perturbation



شکل ۴ - ساختار کنترلر PID

شکل ۴، ساختار کنترلر PID را در این مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در کنترل‌کننده PID، ورودی عملیات تناسبی، انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر سیگنال خطای $e(t)$ می‌باشد. در این کنترلر ضرایب k_p ، k_i و k_d با سه الگوریتم بهینه‌سازی PSO، APSO و IAPSO تنظیم می‌گردد.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (18)$$

۶. کنترلر فازی

سیستم‌های فازی، سیستم‌هایی مبتنی بر دانش یا قواعد می‌باشند. قلب یک سیستم فازی یک پایگاه دانش بوده که از قواعد اگر-آنگاه فازی تشکیل شده است. نقطه شروع یک سیستم فازی به‌دست آوردن مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه فازی از دانش افراد خبره یا دانش حوزه مورد بررسی می‌باشد [۱۳].

ساختار کنترلر فازی به‌کار رفته در این مطالعه، در **Error! Reference source not found.** داده شده است. یک کنترلر فازی معمولاً شامل قسمت‌های مختلف فازی‌سازی، موتور استنتاج، پایگاه قانون، و دیفازی‌سازی می‌باشد. قوانین فازی می‌توانند با دانش انسان خبره، و همچنین تجربه توسعه یابند [۱۳].

در [۱۴] یک الگوریتم جدید مبتنی بر $DPSO^1$ به‌منظور نرخ افزایش همگرایی و مینیمم‌سازی تابع هدف ارائه شده است. این الگوریتم عملکرد جدیدی را استفاده می‌کند تا به‌صورت دینامیکی^۲ بهترین ترکیباتی از ضرایب شتاب، وزنه اینرسی و اندازه جمعیت را انتخاب نماید. در این کار، کنترلر Fuzzy-PID مرتبه کسری به‌منظور بهینه‌سازی از بهره‌های کنترلر و بهبود عملکرد نیروگاه سیکل ترکیبی تک-محور ارائه شده است. [۱۵]، یک کنترلر Fuzzy-PID به روش جدول بهره^۳ را معرفی می‌نماید، در این کار بهره‌های تناسبی و مشتق‌گیر نرمالایز شده‌اند. در [۱۶]، کنترلر PSO-Fuzzy_PID به‌منظور کنترل سرعت توربین گازی با استفاده از معیارهایی چون ITSE، ITAE، زمان خیز، زمان نشست و بالازدگی مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۷]، از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تنظیم محدوده گین کنترلر مورد استفاده با به‌کار بردن تکنیک فازی جدول بهره، استفاده شده است. مدل سیگنال بزرگ و سیگنال کوچک توربین گازی مدل روون را مورد بررسی قرار داده است. در این طرح، کنترلر PID توسط روش‌های زیگلر-نیکولز، جدول بهره فازی، و الگوریتم SA^4 تنظیم می‌گردد [۱۸].

¹ Dynamic Particle Swarm Optimization

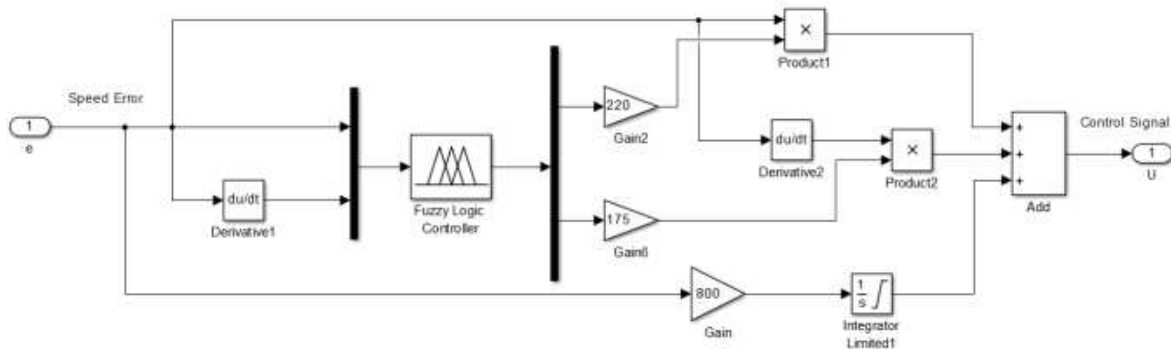
² Dynamically

³ Gain-Scheduling

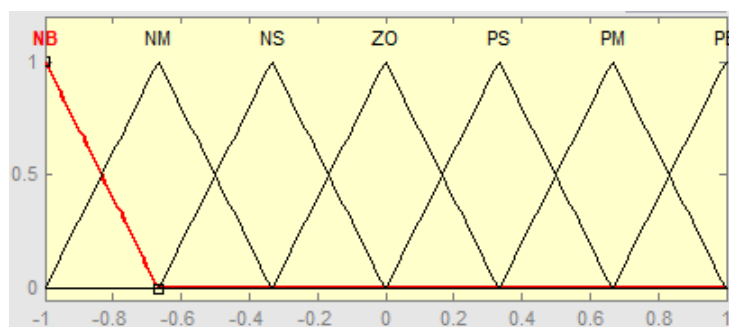
⁴ Simulated Annealing

شکل ۵ کنترلر فازی ، که از دو ورودی و دو خروجی تشکیل شده است را نشان می‌دهد. ورودی‌های این کنترلر خطای سرعت (e) و مشتق خطای سرعت توربین (Δe) ، و خروجی‌های آن بهره‌های تناسبی و مشتق‌گیر می‌باشند. اصطلاحات زبانی برای هر یک از متغیر زبانی به صورت (مثبت بزرگ=PB، مثبت متوسط=PM، مثبت کوچک=PS، منفی کوچک=ZO، منفی متوسط=NM، منفی بزرگ=NB) انتخاب شده است. مکانیزم استنتاج مبتنی بر تکنیک مددانی می‌باشد. برای هر یک از متغیرهای ورودی توابع عضویت به شکل مثلثی، و برای هر یک از متغیرهای خروجی توابع عضویت به شکل گوسی می‌باشد. توابع عضویت برای هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی به ترتیب در شکل ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند [۱۵]، [۱۹]، [۲۰].

کنترلر فازی شامل ۴۹ قانون فازی برای شرایط عملکردی سیستم سیکل ترکیبی می‌باشد. جدول قوانین برای کنترلر سرعت در **Error! Reference source not found.** ۱ و **Error! Reference source not found.** ۲ نشان داده شده است. در این تحقیق پارامترهای فازی از جمله توابع عضویت مثلثی در ورودی و گوسی در خروجی، مقیاس^۱های بهره‌های فازی و ضریب کنترلر انتگرال‌گیر توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات تنظیم می‌گردد. بهره‌های کنترلر فازی در این مقاله، به صورت جدول بهره تنظیم می‌گردند.

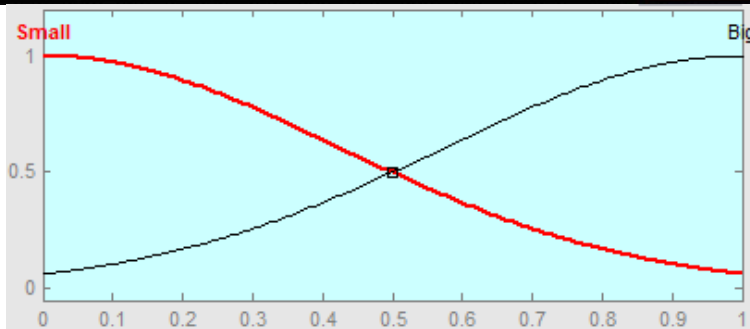


شکل ۶ - کنترلر فازی



شکل ۷ - تابع عضویت برای ورودی‌های کنترلر فازی

^۱ Scaling



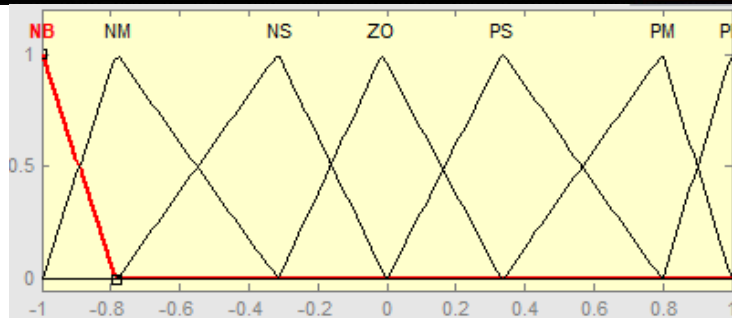
شکل ۸ - تابع عضویت برای خروجی‌های کنترلر فازی

جدول ۱ - قوانین فازی مربوط به بهره تناسبی کنترلر فازی

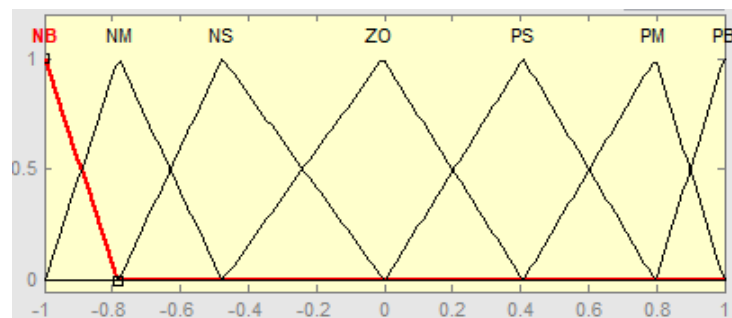
		\dot{e}						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	S	S	S	S	S	S	S
	NM	B	B	S	S	S	B	B
	NS	B	B	B	S	B	B	B
	ZO	B	B	B	B	B	B	B
	PS	B	B	B	S	B	B	B
	PM	B	B	S	S	S	B	B
	PB	S	S	S	S	S	S	S

جدول ۲ - قوانین فازی مربوط به بهره مشتق‌گیر کنترلر فازی

		\dot{e}						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	B	B	B	B	B	B	B
	NM	S	B	B	B	B	B	S
	NS	S	S	B	B	B	S	S
	ZO	S	S	S	B	S	S	S
	PS	S	S	B	B	B	S	S
	PM	S	B	B	B	B	B	S
	PB	B	B	B	B	B	B	B



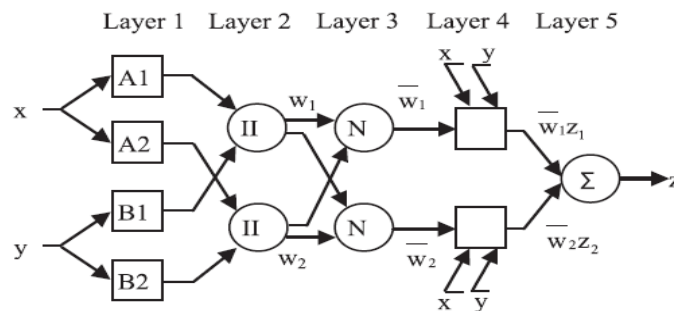
شکل ۸: تابع عضویت کنترلر فازی تنظیم شده با PSO برای انحراف سرعت (e) توربین گازی در شرایط بدون فیدفورارد ناشی از اختلال بار



شکل ۸: تابع عضویت کنترلر فازی تنظیم شده با PSO برای انحراف سرعت (Δe) توربین گازی در شرایط بدون فیدفورارد ناشی از اختلال بار

۷. کنترلر ANFIS

ساختار ANFIS به کار برده شده در این تحقیق، در **Error! Reference source not found.** نشان داده شده است. شبکه ANFIS از پنج لایه تشکیل می‌گردد. O_i^1 معرف خروجی گره نام در لایه زمی باشد.



شکل ۱۰ - ساختار کنترلر ANFIS [۲۱]

O_i^1 درجه عضویت از مجموعه فازی $A (A_1, A_2, B_1, B_2)$ را مشخص می‌نماید.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x), i=1,2 \quad (19)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(x), i=3,4 \quad (20)$$

در لایه دوم داریم:

$$O_i^2 = w_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y), i=1,2 \quad (21)$$

در این لایه هر یک از خروجی گره نشان دهنده قدرت فایرینگ^۱ یک قانون می باشد. در لایه سوم، هر گره N نسبت قدرت فایرینگ قوانین N ام به همه قوانین می باشد.

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i=1,2 \quad (22)$$

خروجی این لایه، مرحله نرمالایز قوانین کردن می باشد.

در لایه چهارم، هر گره سهم قانون N ام به کل خروجی را محاسبه می نماید.

$$O_i^4 = \bar{w}_i z_i = \bar{w}_i (a_i x + b_i y + c_i), i=1,2 \quad (23)$$

به طوری که \bar{w}_i خروجی لایه سوم، و (a_i, b_i, c_i) مجموعه پارامترها می باشند. پارامترهای این لایه به عنوان پارامترهای بخش تالی^۲ شناخته می گردند.

در لایه پنجم، آخرین گره، خروجی نهایی را به عنوان مجموع سیگنال های ورودی محاسبه می کند [۲۱].

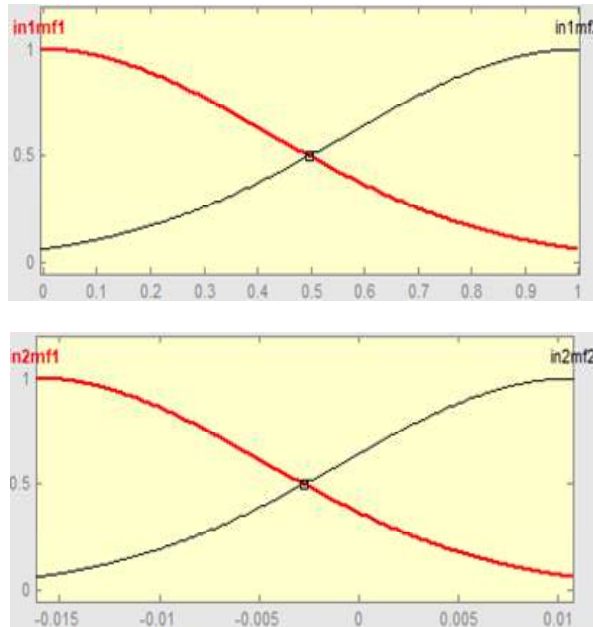
$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i z_i = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (24)$$

[۲۲]، یک کنترلر مبتنی بر ANFIS برای موتور DC بدون جاروبک طراحی کرده است. عملکرد موتور توسط این کنترلر و کنترلرهای دیگر نظیر PI کلاسیک، کنترلر فازی تنظیم کننده ضرایب PID، با شاخص عملکردهایی از جمله پلازدهگی، پایین زدگی، زمان خیزش، و خطای حالت ماندگار را مقایسه می نماید. در [۲۳]، پارامترهای ANFIS برای سیستم های دینامیکی غیر خطی جدید تنظیم شده است. [۲۴]، ترکیب روش های تبدیل موجک، بهینه سازی ازدحام ذرات، و سیستم استنتاج فازی مبتنی بر شبکه های تطبیقی را در رابطه با پیش بینی قیمت های برق کوتاه مدت در یک بازار رقابتی معرفی می نماید. از PSO به منظور بهبود عملکرد ANFIS با تنظیم پارامترهای توابع عضویت آن، استفاده می گردد. امروزه در پرتغال افزایش انرژی بادی در شبکه برق، مشکلات عمده ای به همراه دارد. پیش بینی انرژی باد نقش کلیدی در مقابله با این مشکلات خواهد داشت. روش ارائه شده ترکیبی از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات، و ANFIS برای پیش بینی کوتاه مدت نیروی باد در پرتغال می باشد [۲۱]. [۲۵]، از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات در تنظیم پارامترهای کنترلر ANFIS برای سیستم تعلیق خودرو استفاده می کند. شکل ۱۱، نحوه بسته شدن کنترلر ANFIS را نمایش می دهد.

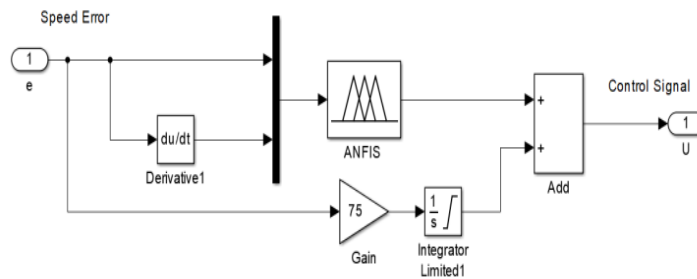
در این کار، کنترلر ANFIS طراحی شده که دارای دو ورودی (خطای سرعت و مشتق خطای سرعت) و یک خروجی می باشد، توسط داده های ورودی/ خروجی از تنظیم پارامترهای کنترلر فازی نوع ممدانی توسط الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به دست می آید. Error! Reference source not found.، توابع به کار رفته در این کنترلر را نشان می دهد. موارد تنظیم شده توسط PSO در این سیستم عبارتند از پارامترهای توابع گوسی (میانگین و واریانس)، مقیاس های ورودی و خروجی، و ضرایب کنترلر انتگرال گیر (دو کنترلر انتگرال گیر در طرح فیدفورواردو یک کنترلر انتگرال گیر در طرح بدون فیدفورواردو در نظر گرفته شده است).

¹ Firing Strength

² Consequent



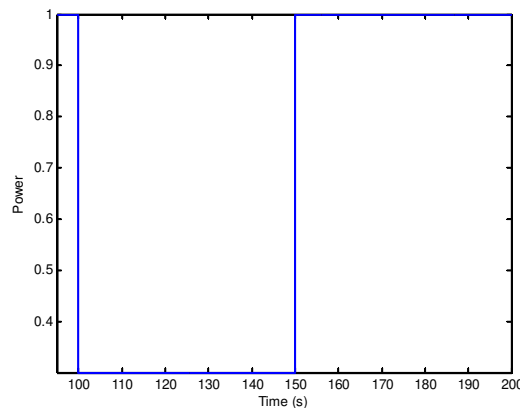
شکل ۱۱ - توابع عضویت به ترتیب برای ورودی‌های (e) و (Δe) برای کنترلر ANFIS



شکل ۱۲ - کنترلر ANFIS

۸. نتایج و شبیه‌سازی

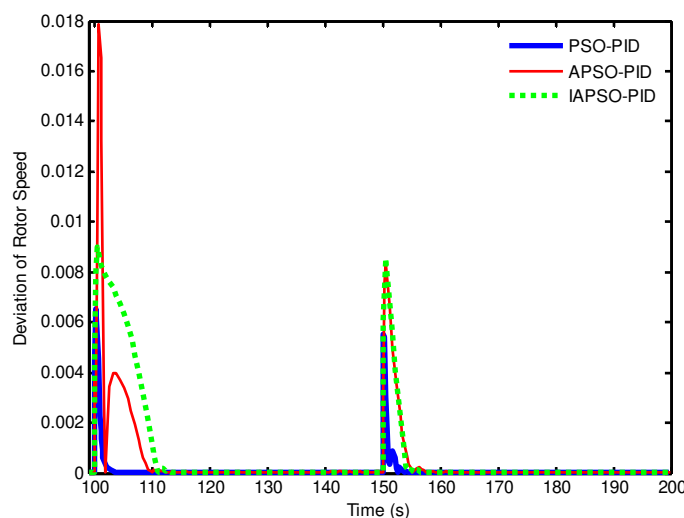
شکل ۱۳، نمودار تغییرات بار را نشان می‌دهد.



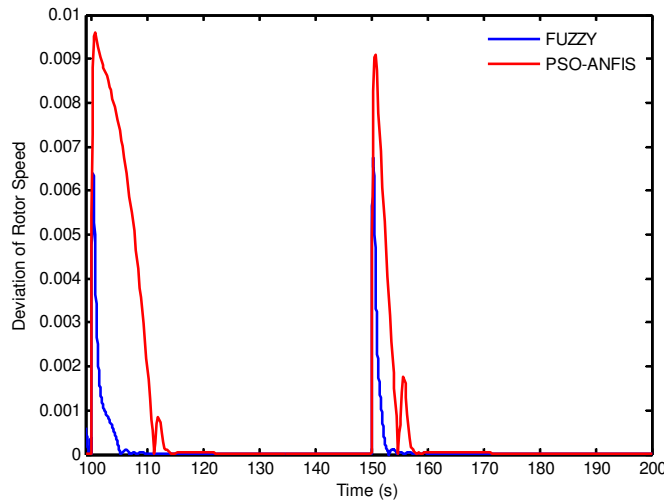
شکل ۱۳ - نمایش تغییرات بار

شکل ۱۴، و شکل ۱۵ نتایج شبیه‌سازی حاصل از انحراف سرعت رتور توربین‌گازی ($I-N$) را به ترتیب برای کنترلرهای PID و کنترلرهای فازی در شرایط فیدفوروارد ناشی از اختلال بار نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود کنترلر PID تنظیم شده توسط PSO و کنترلر فازی در لحظه افت بار کمترین مقدار ماکزیمم انحراف سرعت (0.0065) و در لحظه افزایش بار این مقدار برای کنترلر PID (0.006) و برای کنترلر فازی (0.0065) نسبت به سایر کنترلرها می‌باشد. با این حال می‌توان گفت که چون در لحظه افت بار کنترلر PID طراحی شده توسط PSO دارای مقدار کمتر و تغییرات آرام‌تری نسبت به کنترلر فازی می‌باشد، این کنترلر در لحظه افت بار برای کنترلر سرعت توربین‌گازی مناسب‌تر می‌باشد، ولی در لحظه افزایش بار میزان ماکزیمم انحراف سرعت توربین توسط این دو کنترلر تقریباً با هم برابر است و کنترلر فازی دارای تغییرات انحراف سرعت نرم‌تری نسبت به کنترلر PID می‌باشد، لذا می‌توان گفت که کنترلر فازی در شرایط افزایش بار برای کنترلر سرعت توربین‌گازی مناسب‌تر می‌باشد.

جدول ۳، ضرایب کنترلر PID طراحی شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط فیدفوروارد ناشی از اختلال بار را نشان می‌دهد. در جدول ۳، ضرایب M_1 و M_2 متغیرهای قابل تنظیم بلوک فیدفوروارد ناشی از اختلال بار می‌باشند.



شکل ۱۴ - نمودار انحراف سرعت توربین‌گازی حاصل از کنترلرهای PID طراحی شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط فیدفوروارد ناشی از اختلال بار

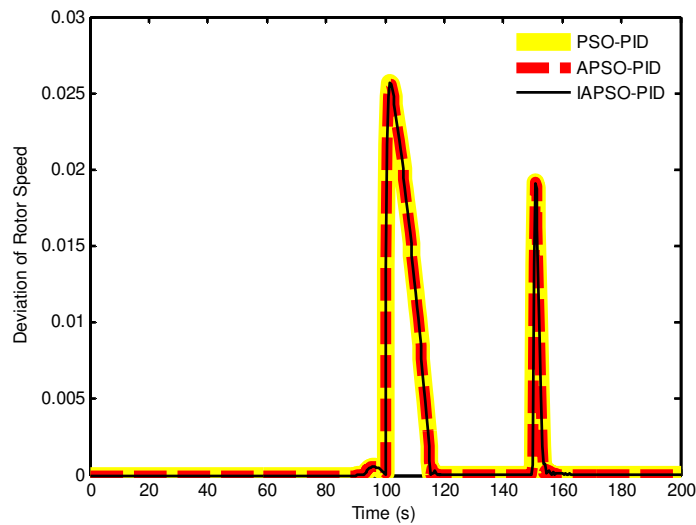


شکل ۱۵ - نمودار انحراف سرعت توربین گازی حاصل از کنترلرهای فازی طراحی شده در شرایط فیدفوروارد ناشی از اختلال بار

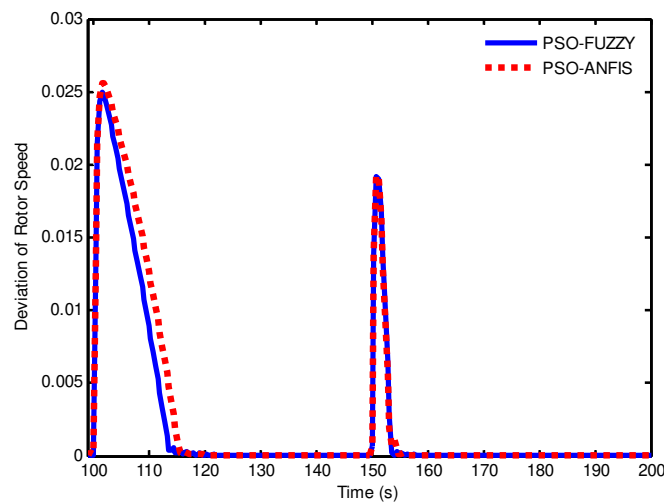
جدول ۳ - ضرایب کنترلر PID در شرایط فیدفوروارد ناشی از اختلال بار

Algorithm	PSO-Tuned PID	APSO-Tuned PID	IAPSO-Tuned PID
PID Coefficient			
K_p	192	136.8	203.9
K_i	373	324.2	326.75
K_d	79.6	148.5	117.29
M_1	.55	1.2	1.2
M_2	.46	1.2	1.2

شکل ۱۶، و شکل ۱۷ نتایج شبیه‌سازی حاصل از انحراف سرعت رتور توربین گازی ($I-N$) را به ترتیب برای کنترلرهای PID و کنترلرهای فازی در شرایط بدون فیدفوروارد ناشی از اختلال بار نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد کمترین مقدار ماکزیمم انحراف سرعت رتور (۰،۰۲۵) در افت بار مربوط به کنترلر فازی طراحی شده توسط PSO، و در افزایش بار این مقدار برای همه کنترلرها تقریباً ۰،۰۲ می‌باشد. از آنجا که انحراف سرعت رتور با طراحی کنترل‌کننده فازی توسط الگوریتم PSO دارای تغییرات نرم‌تر انحراف سرعت، و زمان سریع‌تر برای رسیدن به حالت ماندگار دارد، لذا این کنترلر برای کنترل دور سرعت توربین گاز مناسب‌ترند. جدول ۴، ضرایب کنترلر PID طراحی شده توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط بدون فیدفوروارد ناشی از اختلال بار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶ - نمودار انحراف سرعت توربین گازی حاصل از کنترلرهای طراحی PID توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی در شرایط فیدفورارد بدون اختلال بار



شکل ۱۷ - نمودار انحراف سرعت توربین گازی حاصل از طراحی کنترلرهای فازی توسط الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در شرایط فیدفورارد ناشی از اختلال بار

جدول ۴ - ضرایب کنترلر PID در شرایط بدون فیدفورارد ناشی از اختلال بار

Algorithm	PSO-Tuned PID	APSO-Tuned PID	IAPSO-Tuned PID
K_p	155.9	169.6	210
K_i	60.6	58.4	93.3
K_d	317.8	236.2	227.2

۹. نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترلرهای مختلفی از قبیل کنترلرهای PID، کنترلر فازی، و کنترلر ANFIS توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور بهبود عملکرد سرعت سیستم توربین گازی V94.2 طراحی گردیده است. کنترلر فازی دارای ۴۹ قانون و خروجی آن از دو بهره‌تناسبی و مشتق‌گیر تشکیل شده که به‌صورت جدول بهره‌طراحی گردیده‌اند. کنترلر ANFIS دارای ۴ قانون است که از طریق کنترلر فازی طراحی شده توسط الگوریتم PSO به‌دست می‌آید. از معیار ITAE برای بهینه‌سازی الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده گردیده است. در طراحی کنترلر با فیدفوروارد ناشی از اختلال بار کنترلر PID طراحی شده توسط PSO و کنترلر فازی، و در طراحی کنترلر بدون فیدفوروارد کنترلر فازی عملکرد بهتری نسبت به سایر کنترلرها دارند، لذا برای کنترلر دور توربین گازی مناسب‌تر هستند.

۹. مراجع

- [۱]. گروه مهندسان ایده پردازان شریف. "توربین‌های گازی"، ۱۳۸۳.
- [2]. Kakimoto, N. and K. Baba, *Performance of gas turbine-based plants during frequency drops*. IEEE transactions on power systems, 2003. **18**(3): p. 1110-1115.
- [3]. Mantzaris, J. and C. Vournas, *Modelling and stability of a single-shaft combined cycle power plant*. International Journal of Thermodynamics, 2007. **10**(2): p. 71-78.
- [۴]. دهبان پور، م. مولا، م. صادقی سرچشمه، م. "تنظیم سرعت در توربین‌های گازی با طراحی کنترل‌کننده عصبی-فازی"، خرداد ۹۵.
- [5]. Tandan, N. and A. Kuldeep Kumar Swarnkar, *Tuning of PID Controller using PSO and ITS Performances on Electro-Hydraulic Servo System*. International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER), 2015. **2**(04): p. 233-235.
- [6]. Ye, Y., et al., Position control of nonlinear hydraulic system using an improved PSO based PID controller. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017. **83**: p. 241-259.
- [7]. Rahi, O., A. Chandel, and M. Sharma, *Optimization of hydro power plant design by particle swarm optimization (PSO)*. Procedia Engineering, 2012. **30**: p. 418-425.
- [8]. Guedria, N.B., Improved accelerated PSO algorithm for mechanical engineering optimization problems. Applied Soft Computing, 2016. **40**: p. 455-467.
- [۹]. روشینی‌یان، ج. محسنی، م. "مهندسی کنترلر در محیط MATLAB"، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۹۳.
- [۱۰]. خاکی صدیق، ع. "تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلر چندمتغیره"، انتشارات دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی. تیر ۱۳۹۳.
- [11]. Saikia, L.C. and S.K. Sahu, Automatic generation control of a combined cycle gas turbine plant with classical controllers using firefly algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013. **53**: p. 27-33.

- [12]. Sharma, D. and B. Kumar, *PSO optimized PID controller for load frequency control*. European Journal of Advances in Engineering and Technology, 2015. **2**(11): p. 43-48.
- [۱۳]. تشنه لب، م. صفاریور، ن. افیونی، د. "سیستم‌های فازی و کنترل فازی"، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۹۴.
- [14]. Haji, V.H. and C.A. Monje, Fractional order fuzzy-PID control of a combined cycle power plant using Particle Swarm Optimization algorithm with an improved dynamic parameters selection. *Applied Soft Computing*, 2017. **58**: p. 256-264.
- [15]. Zhao, Z.-Y., M. Tomizuka, and S. Isaka, *Fuzzy gain scheduling of PID controllers*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1993. **23**(5): p. 1392-1398.
- [16]. Mansourabad, A.M., M.T.H. Beheshti, and M. Simab, *A Hybrid PSO Fuzzy PID controller for gas turbine speed control*. International journal of Control and automation, 2013. **6**(2): p. 13-24.
- [17]. Sedghizadeh, S. and S. Beheshti, *Particle swarm optimization based fuzzy gain scheduled subspace predictive control*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018. **67**: p. 331-344.
- [18]. Balamurugan, S., N. Janarthanan, and K.V. Chandrakala, *Small and large signal modeling of heavy duty gas turbine plant for load frequency control*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016. **79**: p. 84-88.
- [19]. Kanagasabai, N. and N. Jaya, *Fuzzy gain scheduling of PID controller for a MIMO process*. International Journal of Computer Applications, 2014. **91**(۱۰)
- [20]. Ferdiansyah, I., E. Purwanto, and N.A. Windarko, Fuzzy Gain Scheduling of PID (FGS-PID) for Speed Control Three Phase Induction Motor Based on Indirect Field Oriented Control (IFOC). *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, 2016. **4**(2): p. 237-258.
- [21]. Pousinho, H.M.I., V.M.F. Mendes, and J.P.d.S. Catalão, *A hybrid PSO-ANFIS approach for short-term wind power prediction in Portugal*. Energy Conversion and Management, 2011. **52**(1): p. 397-402.
- [22]. Premkumar, K. and B. Manikandan, Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. *Neurocomputing*, 2014. **138**: p. 260-270.
- [23]. Al-Dunainawi, Y., M.F. Abbod, and A. Jizany, *A new MIMO ANFIS-PSO based NARMA-L2 controller for nonlinear dynamic systems*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017. **62**: p. 265-275.
- [24]. Catalão, J.P.d.S., H.M.I. Pousinho, and V.M.F. Mendes, *Hybrid wavelet-PSO-ANFIS approach for short-term electricity prices forecasting*. IEEE Transactions on Power Systems, 2011. **26**(1): p. 137-144.
- [25]. Kothandaraman, R. and L. Ponnusamy, *PSO tuned adaptive neuro-fuzzy controller for vehicle suspension systems*. Journal of advances in information technology, 2012. **3**(1): p. 57-63.

پیوست

جدول ۵ - جدول مربوط به پارامترهای مدل سیکل ترکیبی (شکل ۲)

	Parameter	value
T_{i0}	Ambient temperature (k)	303
T_{d0}	Nominal Compressors discharge temperature (c)	390
T_{f0}	Nominal gas turbine inlet temperature (c)	1085
T_{e0}	Nominal exhaust temperature (c)	532
P_{r0}	Nominal compressor pressure ratio	11.5
γ	Ratio of specific heat	1.4
$c\eta$	Compressor efficiency	.85
$t\eta$	Turbine efficiency	.85
K_0	Gas turbine output coefficient (1/k)	.00303
K_1	Steam turbine output coefficient (1/k)	.000428
T_2	Gain of radiation shield	12
T_3	Time constant of radiation shield (s)	15
T_4	Time constant of thermocouple (s)	2.5
T_5	Time constant of temperature control (over heat) (s)	3.3
T_t	Temperature control (over heat) integration rate (s)	.4699
T_{cmax}	Temperature control upper limit	1.2
T_{cmin}	Temperature control lower limit	0
F_{dmax}	Fuel control upper limit	1.5 or 1.4
F_{dmin}	Fuel control lower limit	0
K_3	Ratio of fuel adjustment	.77
K_6	Fuel valve lower limit	.23
T_v	Valve positioner time constant (s)	.05
T_f	Fuel system time constant (s)	.4
T_r	Ratio valve time constant (s)	.05
T_6	Time constant of T_f control (s)	115 or 200 or 247
g_{max}	Air valve upper limit	1
g_{min}	Air valve lower limit	0
T_{cd}	Gas turbine time constant (s)	.2
T_m	Steam turbine time constant (s)	5
T_b	Heat recovery boiler time constant (s)	20
T_I	Turbine rotor Inertia constant (s)	18.5
W_{max}	Upper limit of block (airflow)	2
W_{min}	Lower limit of block (airflow)	.5