



Semnan University



Research Article

Modeling by order reducing the load angle of a three-phase synchronous generator and designing an AOA-PID controller to control the load angle

Morteza Abdolhosseini ^{a,*}, Rohollah Abdollahi ^a

^a Electrical Engineering Department, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 29 June 2022

Revised: 18 January 2023

Accepted: 10 June 2023

Keywords:

Synchronous generator load angle,
Proportional, derivative, and integral controller,
Reduce the order of models,
Arithmetic optimization algorithm.

ABSTRACT

One of the important factors that are always discussed in the study of power systems is the issue of power system stability. In this paper, the load angle control of a three-phase synchronous steam power plant generator is presented by overcoming the load angle fluctuations in both transient and permanent system conditions and expanding the range of stable generator performance. First, the equations of the linear state space of the steam power plant around the operating point are extracted. Then, based on Hankel single values, the model is approximated to the 6th order, and based on that, a proportional, derivative, and integral controller for the load angle is presented. Then, using the arithmetic optimization algorithm, the controller coefficients are adjusted with two approaches reducing the settling time and reducing the overshoot of the step response. The stability of the proposed controller output power was also used using the stability criteria Bode and Nyquist examined. The simulation results show that the arithmetic optimization algorithm has a better performance in controlling the load angle of the three-phase synchronous generator than the fuzzy controller and genetic and harris hawks algorithms. For example, in comparison with the genetic algorithm, the output power has good stability, and the rise time, setting time and the amount of overshoot in the step response of the proposed algorithm are reduced by 82.97, 82, and 40.18%, respectively.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27635.2296>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: mabdolhosseini@tvu.ac.ir

How to cite this article:

Abdolhosseini, M., & Abdollahi, R. (2023). Modeling by order reducing the load angle of a three-phase synchronous generator and designing an AOA-PID controller to control the load angle. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(75), 83-99. doi: 10.22075/jme.2023.27635.2296

مقاله پژوهشی

مدل سازی با کاهش مرتبه زاویه بار ژنراتور سنکرون سه فاز و طراحی کنترل کننده AOA-PID جهت کنترل زاویه بار

مرتضی عبدالحسینی^{۱*} و روحاله عبداللهی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸	<p>از جمله عوامل مهمی که همواره در مطالعات سیستم قدرت مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، مسئله پایداری سیستم قدرت است. در این مقاله کنترل زاویه بار یک ژنراتور سه فاز سنکرون نیروگاه بخار با غلبه بر نوسانات زاویه بار در هر دو شرایط گذرا و ماندگار سیستم و گسترش حیطه عملکرد پایدار ژنراتور ارائه شده است. ابتدا معادلات فضای حالت خطی نیروگاه بخار حول نقطه کار استخراج شده است. سپس بر اساس مقادیر منفرد هانکل، مدل به مرتبه ۶ تقریب زده شده و بر مبنای آن کنترلر تناسبی، مشتقی و انتگرال گیر زاویه بار ارائه شده است. در ادامه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی حسابی، ضرایب کنترلر با دو رویکرد کاهش زمان نشست و کاهش میزان فراجش پاسخ پله تنظیم شده است. پایداری توان خروجی کنترل کننده پیشنهادی نیز با استفاده از معیارهای پایداری بود و نایکوئیست مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه سازی حسابی در کنترل زاویه بار ژنراتور سنکرون سه فاز نسبت به کنترلر فازی و الگوریتم‌های ژنتیک و شاهین هریس، از عملکرد مناسب تری برخوردار است. به عنوان نمونه، در مقایسه با الگوریتم ژنتیک توان خروجی دارای پایداری مناسب بوده و زمان خیز، زمان نشست و میزان فراجش در پاسخ پله الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۸۲/۹۷، ۸۲ و ۴۰/۱۸ درصد کاهش یافته است.</p>
بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۲۸	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰	
<p>واژگان کلیدی: زاویه بار، ژنراتور سه فاز سنکرون، کنترل کننده تناسبی، مشتقی و انتگرالی، کاهش مرتبه مدل، الگوریتم بهینه سازی حسابی.</p>	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.27635.2296>

© 2023 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

بیش از حد ژنراتور می‌تواند باعث آسیب بلبرینگ‌ها شده و ممکن است روتور از جا کنده شود. هرچند سیستم حفاظتی مورد استفاده در توربین و ژنراتور سه فاز نیروگاه از اطمینان بالایی برخوردار می‌باشد اما وجود یک سیستم کنترلی کارآمد به منظور میرا نمودن اغتشاشات و حفظ پایداری سیستم قدرت ضروری می‌باشد [۲]. اصلی ترین متغیر در محاسبات مربوط به مسئله پایداری

یکی از مهم ترین مشخصه‌ها و ملزومات سیستم‌های دینامیکی مسئله پایداری است [۱]. وقوع یک اتصال کوتاه سه فاز در یک شبکه قدرت بدون عملکرد سیستم حفاظتی، باعث می‌شود ژنراتورها سنکرونیزم خود را از دست بدهند. حذف محدودیت‌های فیزیکی می‌تواند باعث افزایش بسیار زیاد سرعت مکانیکی ژنراتور گردد. در عمل افزایش سرعت

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mabdolhosseini@tvu.ac.ir

۱. مربی، دپارتمان مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران

ولتاژ میدان به‌عنوان ورودی و زاویه روتور و توان فعال به‌عنوان خروجی، مدل فضای حالت غیرخطی مرتبه ۳ ژنراتور هم‌زمان شناسایی شده [۸] و پارامترهای ناشناخته مبتنی بر روش حداقل مربعات خطا برآورده شده است [۹]. در [۱۰]، یک ابزار جهت اندازه‌گیری زاویه بار با استفاده از پردازش سیگنال دیجیتال (DSP^4) به‌صورت بلادرنگ برای ژنراتورهای هم‌زمان ارائه شده است. مقایسه تکنیک‌های تعریف زاویه بار ماشین هم‌زمان در [۱۱] بیان شده است. در [۱۲] یک کنترل‌کننده زاویه بار در سیستم کنترل تحریک ژنراتور هم‌زمان تعبیه شده است. وظیفه یک کنترل‌کننده زاویه بار، بازگرداندن ژنراتور به منطقه عملیاتی پایدار است که در صورت ایجاد اختلال، ژنراتور را به سمت پایداری سوق می‌دهد.

همچنین یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی برای دستیابی به طراحی بهینه سیستم کروز کنترل خودرو با استفاده از یک کنترل‌کننده مشتق انتگرال متناسب در [۱۷] پیشنهاد شده است. در [۱۸]، الگوریتم بهینه‌سازی ارشمیدس برای تنظیم دقیق پارامترهای کنترلر مشتق‌گیر-انتگرالی به‌منظور کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت چندمنبعی به‌هم‌پیوسته چند ناحیه‌ای پیشنهاد شده است.

این مقاله توسعه یک الگوریتم فراابتکاری ترکیبی جدید را در نظر می‌گیرد که برای دستیابی به یک طراحی بهینه برای سیستم کروز کنترل خودرو (ACC) با استفاده از یک کنترل‌کننده مشتق انتگرال متناسب (PID) بر اساس تابع انتقال ایده‌آل Bode پیشنهاد شده است. الگوریتم توسعه‌یافته (AOA-NM) یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری اخیراً منتشر شده به نام الگوریتم بهینه‌سازی حسابی (AOA) را برای انجام کار اکتشافی اتخاذ می‌کند، درحالی‌که یکی دیگر از روش‌های جستجوی محلی معروف به جستجوی ساده نلد-مید (NM) برای انجام کار بهره‌برداری است.

یک ساختار اصلاح‌شده از کنترل‌کننده مشتق انتگرال کج (TID)، یعنی یک کنترل‌کننده مشتق‌شده انتگرال (ID-T)، برای مسئله کنترل فرکانس بار یک سیستم قدرت چندمنبعی به‌هم‌پیوسته چند ناحیه‌ای توسعه داده شده است. علاوه بر این، یک روش برای حل مسائل بهینه‌سازی این است که تمامی جواب‌های امکان‌پذیر در نظر گرفته شده و توابع هدف مربوط به آن محاسبه شود و درنهایت، بهترین

ژنراتور، زاویه بار است. زاویه بار عبارت از اختلاف زاویه بین ولتاژ القاء شده از طرف روتور روی سیم‌پیچی استاتور و ولتاژ خروجی ژنراتور می‌باشد. تعریف دیگر زاویه بار، اختلاف زاویه مکانیکی بین میدان مغناطیسی روتور و شار مغناطیسی آرمیچر ژنراتور سنکرون است [۳].

با افزایش بیش‌ازحد زاویه بار، خطر تجاوز از محدوده عملکرد پایدار، ژنراتور را تهدید می‌کند. برای رفع این مشکل می‌بایست با استفاده از روش‌های کنترلی زاویه توان را کاهش داد، اما با کاهش بیش‌ازحد زاویه توان، توان اکتیو تحویلی ژنراتور از حد مجاز کمتر می‌شود. پس برای بهبود کارکرد پایدار ژنراتور لازم است زاویه توان ژنراتور به‌گونه‌ای کنترل گردد که اولاً قیود و حدود پایداری رعایت شود و ثانیاً توان اکتیو تحویلی ژنراتور به‌صورت بهینه تنظیم گردد [۳]. افزایش بارگذاری روی یک ژنراتور منجر به افزایش زاویه توان می‌شود و افزایش بیش‌ازحد مجاز زاویه توان، نقطه کار ژنراتور را وارد ناحیه کار ناپایدار خواهد کرد. در بسیاری از سیستم‌های قدرت هیچ المانی به‌طور مستقل وظیفه کنترل زاویه توان را بر عهده ندارد. با این وجود در نقاط کاری که به‌اندازه کافی از حدود پایداری دور است، نوسانات زاویه بار میرا می‌شود. مشکل زمانی به وجود می‌آید که یک اغتشاش به‌اندازه کافی بزرگ به سیستم اعمال شود و با افزایش بیش‌ازحد زاویه بار، سیستم را وارد ناحیه ناپایدار کند. این امر درنهایت منجر به ازدست‌رفتن سنکرونیزم خواهد شد. تحت چنین شرایطی وجود یک کنترل‌کننده زاویه بار مجزا که زاویه بار را تا مقدار مجاز کاهش دهد می‌تواند سیستم را از ناپایدار شدن و خروج از سنکرونیزم نجات دهد. از این رو محققان همواره به دنبال راه‌حل‌هایی برای کنترل زاویه بار ژنراتور و در نتیجه کارکرد ایمن‌تر سیستم قدرت بوده‌اند [۴].

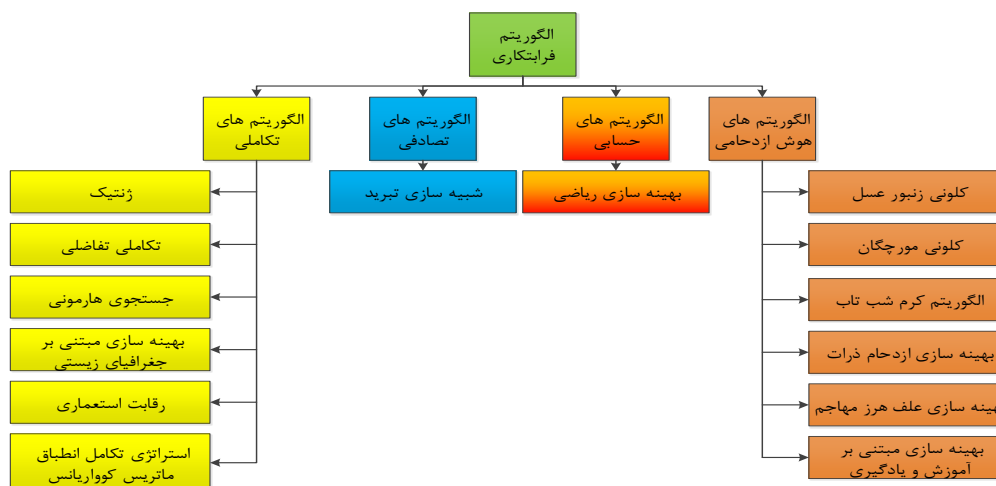
در [۵]، به‌منظور تعیین زاویه بار ژنراتور سه فاز سنکرون هم‌زمان قطب برجسته از رمزگذار نوری برای تشخیص موقعیت روتور و برآورد زاویه بار بر اساس مقادیر الکتریکی اندازه‌گیری شده، استفاده شده است. تخمین زاویه بار بر اساس دیگرام برداری ولتاژ - جریان و پارامترهای ژنراتور، ترانسفورماتور و خطوط انتقال در [۶] و [۷] مبتنی بر ترمینال ژنراتور و اندازه‌گیری زاویه فاز ترمینال نسبت به شین بی‌نهایت بر اساس واحد اندازه‌گیری فاز (PMU^3) برای ژنراتورهای هم‌زمان ارائه شده است. با در نظر گرفتن

⁴ Digital Signal Processor

³ Phasor Measurement Unit

جستجوی ابتکاری، روش‌هایی هستند که می‌توانند جوابی خوب (نزدیک به بهینه) در زمانی محدود برای یک مسئله ارائه کنند. روش‌های جستجوی ابتکاری عمدتاً بر مبنای روش‌های شمارشی هستند، با این تفاوت که از یکسری اطلاعات بیشتر برای هدایت جستجو استفاده می‌کنند. این روش‌ها از نظر حوزه کاربرد، کاملاً عمومی هستند و می‌توانند مسائل خیلی پیچیده را حل کنند. عمده این روش‌ها، تصادفی بوده و از طبیعت الهام گرفته شده‌اند.

جواب انتخاب گردد. روشن است که شیوه شمارش کامل، نهایتاً به جواب دقیق مسئله منتهی می‌شود؛ اما در عمل به دلیل زیاد بودن تعداد جواب‌های امکان‌پذیر، استفاده از آن غیرممکن است. با توجه به مشکلات مربوط به روش شمارش کامل، همواره بر ایجاد روش‌های مؤثرتر و کارآتر مانند روش‌های ابتکاری (Heuristic) یا فراابتکاری (Metaheuristic) یا جستجوی تصادفی (Random Method) تأکید شده است. روش‌های



شکل ۱: دسته‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری

دسته‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم‌های فراابتکاری بر مبنای هوش جمعی، تصادفی، تکاملی و حسابی دسته‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های ژنتیک، تکاملی تفاضلی، جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی مبتنی بر جغرافیای زیستی، رقابت استعماری در دسته الگوریتم‌های تکاملی، شبیه‌سازی تبرید در دسته الگوریتم‌های تصادفی، الگوریتم‌های کلونی زنبور عسل، کلونی مورچگان، کرم شب تاب، بهینه‌سازی ازدحام ذرات، بهینه‌سازی علف هرز مهاجم در دسته الگوریتم‌های هوش ازدحامی و بهینه‌سازی ریاضی در دسته الگوریتم‌های حسابی قرار می‌گیرند.

به‌منظور پایداری زاویه بار ژنراتور سنکرون نیروگاه، در [۱۶]، با استفاده از یک مدل مرتبه ۱۱ زاویه بار ژنراتور، شامل ۹ متغیر الکتریکی و ۲ متغیر مکانیکی، کنترل‌کننده GA-PID را جهت کنترل زاویه بار مورد استفاده قرار داده است. استفاده از مدل زاویه بار مرتبه ۱۴ و طراحی کننده

اهداف اصلی این مقاله عبارت‌اند از:

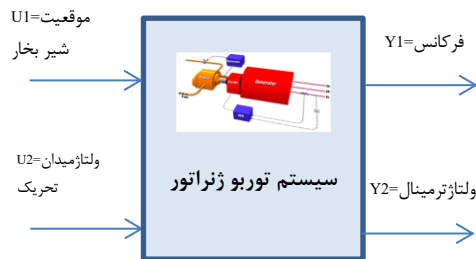
- تحقق یک مدل فضای حالت جامع با مرتبه ۱۴، با رویکرد در نظر گرفتن هم‌زمان پارامترهای الکتریکی و مکانیکی ژنراتور سنکرون نیروگاه و تقریب مدل زاویه بار به مرتبه ۶ با استفاده از مقادیر منفرد هانکل
- طراحی کنترل‌کننده PID^5 به‌منظور اطمینان از پایداری زاویه بار نیروگاه و بهینه‌سازی ضرایب کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم AOA^6 پیشنهادی

به‌منظور پایداری زاویه بار ژنراتور سنکرون نیروگاه، در [۱۶]، با استفاده از یک مدل مرتبه ۱۱ زاویه بار ژنراتور، شامل ۹ متغیر الکتریکی و ۲ متغیر مکانیکی، کنترل‌کننده GA-PID را جهت کنترل زاویه بار مورد استفاده قرار داده است. استفاده از مدل زاویه بار مرتبه ۱۴ و طراحی کننده

⁶ Arithmetic Optimization Algorithm

⁵ Proportional Integral Derivative

گذرا توانایی محدودی دارند. به همین دلیل به یک حلقه کنترل دیگر جهت کنترل کننده تکمیلی نیاز است.



شکل ۲: نمایش یک توربوژنراتور به صورت یک سیستم دو ورودی - دو خروجی

۳- معادلات فضای حالت ژنراتور سه فاز سنکرون نیروگاه

در این قسمت یک مدل کامل نیروگاهی که در بسیاری از مطالعات دینامیکی سیستم‌های قدرت استفاده شده، بررسی می‌شود. این سیستم از طریق یک ترانسفورماتور، خطوط انتقال به یک شین بی‌نهایت متصل گردیده است. کلمات اختصار شامل متغیرها و تعاریف آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. معادلات دیفرانسیل مربوط به حرکت و مدار موتور این مدل فضای حالت در رابطه ۱ بیان شده است:

$$\dot{\delta} = \Delta\omega \quad (1)$$

$$\Delta\dot{\omega} = w_0(T_m - T_e - K_d\Delta\omega)/2H$$

$$\dot{\psi}_{fd} = w_0(V_{fd} - R_{fd}I_{fd})$$

$$\dot{\psi}_d = w_0(V_{bd} + \psi_q - I_d(R_a + R_e)) + \psi_q\Delta\omega$$

$$\dot{\psi}_{kd} = -w_0R_{kd}I_{kd}$$

$$\dot{\psi}_q = w_0(V_{bq} - \psi_d - I_q(R_a + R_e)) - \psi_d\Delta\omega$$

$$\dot{\psi}_{kq} = -w_0R_{kq}I_{kq}$$

مدل سیستم تحریک این ژنراتور یک سیستم مرتبه اول که مبین یک تحریک کننده استاتیکی است، در نظر گرفته شده که ویژگی بارز آن ثابت زمانی کوچک و محدود شدن خروجی تحریک کننده به دو حد مثبت و منفی است. معادله حاکم بر سیستم تحریک (اکسایتر) استاتیکی نیز، به صورت یک معادله درجه اول، به صورت رابطه (۲) در نظر گرفته شده است:

$$\dot{V}_{fd} = (V_R - V_{fd})/Z_{ex} \quad (2)$$

در ادامه و در بخش دوم، سیستم کنترلی متعارف ژنراتور سه فاز سنکرون نیروگاه ذکر شده است. در بخش سوم معادلات حالت ژنراتور سنکرون نیروگاه بیان شده و در بخش چهارم و پنجم کنترل کننده PID و الگوریتم پیشنهادی AOA معرفی شده‌اند. در بخش ششم نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- سیستم‌های کنترلی متعارف ژنراتور سه فاز سنکرون نیروگاه

سیستم‌های کنترلی موجود در یک نیروگاه به نوع نیروگاه (بخار/ آب/ گاز) بستگی دارد؛ ولی بعضی از حلقه‌های کنترلی (مستقل از نوع نیروگاه) در تمام نیروگاه‌ها وجود دارند. حلقه‌های کنترلی متفاوتی در یک نیروگاه بخار وجود دارند. کنترل سطح درام، با باز و بسته شدن شیر آب ورودی و کنترل فشار بخار ورودی به توربین با کم‌وزیاد کردن سوخت به بویلر از جمله این حلقه‌های کنترل هستند. ولی حلقه‌های کنترل دور روتور (گاورنر) و کنترل خودکار ولتاژ (AVR) از همه مهم‌تر هستند. توجه به این دو حلقه مهم پایداری سیستم را تضمین می‌کند. حال این حلقه‌های کنترلی معرفی می‌شوند:

۱-۲- کنترل دور روتور توربین و ماشین سنکرون با گاورنر

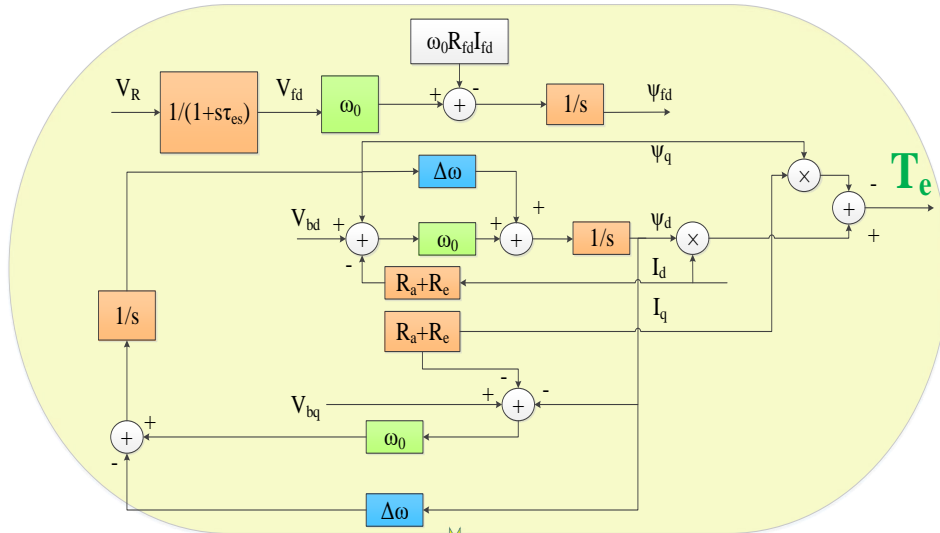
گاورنر که روی روتور سوار می‌شود، با اندازه‌گیری دور روتور و مقایسه آن با مقدار دلخواه، شیر ورودی به توربین فشار بالا (HP) را باز و یا بسته می‌کند تا بخار بیشتر و یا کمتر وارد توربین شود و به این صورت دور روتور بیشتر و یا کمتر شود. به این ترتیب دور روتور و در نتیجه فرکانس برق تولید شده همواره در مقدار مشخص و ثابتی باقی می‌ماند.

۲-۲- کنترل ولتاژ ترمینال ژنراتور با کنترل خودکار ولتاژ

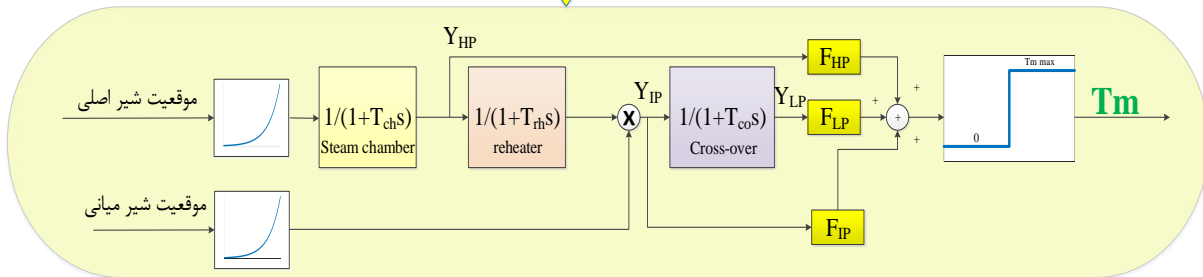
در سیستم کنترل ولتاژ، ولتاژ ترمینال ابتدا توسط یک ترانسفورماتور کم، سپس یک سو و با مقدار دلخواهی مقایسه می‌شود. با توجه به مقدار خطا ولتاژ میدان تحریک ژنراتور طوری کم‌وزیاد می‌شود که ولتاژ برابر مقدار دلخواه شود. سیستم توربوژنراتور در یک نیروگاه دارای یک سیستم دو ورودی و دو خروجی به صورت شکل (۲) است:

پس حلقه‌های کنترلی گاورنر و AVR نقش اساسی در کنترل سیستم‌های قدرت دارند. لازم به ذکر است سیستم‌های کنترلی متعارف برای از بین بردن نوسانات حالت

تولید گشتاور الکتریکی



تقابل گشتاور مکانیکی و الکتریکی



شکل ۳: مدل غیرخطی ژنراتور سنکرون

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{HP} &= (G_{VM}P_0 - Y_{HP})/\mathcal{L}_{HP} \\ \dot{Y}_{RH} &= (Y_{HP} - Y_{RH})/\mathcal{L}_{RH} \\ \dot{Y}_{IP} &= (G_{VI}Y_{RH} - Y_{IP})/\mathcal{L}_{IP} \\ \dot{Y}_{LP} &= (Y_{IP} - Y_{LP})/\mathcal{L}_{LP} \\ \dot{G}_{VM} &= (U_{GM} - G_{VM})/\mathcal{L}_{GVM} \\ \dot{G}_{VI} &= (U_{GI} - G_{VI})/\mathcal{L}_{GVI} \end{aligned} \quad (3)$$

لازم به ذکر است که امیدانس کل، امیدانس ترانسفورماتور و امیدانس خط انتقال متصل به آن به صورت مقادیر ثابت مطابق روابط ۴ است:

$$\begin{aligned} R_e &= R_{tr} + R_L \\ x_e &= x_{tr} + x_L \end{aligned} \quad (4)$$

ولتاژ شین بی نهایت نیز مقدار ثابت یک پریونیت منظور می شود. برای گشتاور الکتریکی T_e و گشتاور مکانیکی T_m نیز، رابطه ۵ بکار می روند.

$$\begin{aligned} T_e &= \psi_d I_q - \psi_q I_d \\ T_m &= F_{HP} Y_{HP} + F_{IP} Y_{IP} + F_{LP} Y_{LP} \end{aligned} \quad (5)$$

شکل (۳) براساس روابط ۱-۵ ترسیم شده است. گشتاور مکانیکی کل (T_m) با ترکیبی از گشتاورهای تولیدی در توربین فشار بالا، متوسط و ضعیف به دست می آید که ضرایب FHP، FIP و FLP در مدل شکل (۳)، مربوط به این مسئله است. وقتی متغیرها در مبنای پریونیت محاسبه می گردند، جمع این ضرایب یک است. شکل (۳) یک مدل غیرخطی از توربین که برای مطالعات دینامیکی گذرا مناسب است، را نشان می دهد. اما در سیستم مولد توان مکانیکی، ابتدا بخار لازم با بویلر تولید و سپس با شیر اصلی وارد طبقه فشار بالای (H.P) توربین می شود. بخار خروجی از طبقه فشار بالا به باز گرم کن و سپس به طبقه فشار متوسط (I.P) توربین وارد می شود که میزان بخار منتقل شده بین این دو طبقه نیز با شیر قطع کننده کنترل می شود. نهایتاً توربین توان خود را به صورت مجموع نسبت هایی از توان های هریک از سه طبقه فشار بالا، فشار متوسط و فشار ضعیف تأمین خواهد نمود. معادلات دیفرانسیل مربوط به قسمت های مختلف توربین و باز گرم کن نیز به صورت رابطه ۳ ارائه می گردد:

$$y_{3q}x_7)) - x_2x_3$$

$$\dot{x}_7 = -w_0R_{kq}(y_{3q}x_6 + y_{2q}x_7)$$

$$\dot{x}_8 = (u_2 - x_8)/\mathcal{L}_{ex}$$

$$\dot{x}_9 = (P_0x_{13} - x_9)/\mathcal{L}_{HP}$$

$$\dot{x}_{10} = (x_9 - x_{10})/\mathcal{L}_{RH}$$

$$\dot{x}_{11} = (x_{10}x_{14} - x_{11})/\mathcal{L}_{IP}$$

$$\dot{x}_{12} = (x_{11} - x_{12})/\mathcal{L}_{LP}$$

$$\dot{x}_{13} = (u_1 - x_{13})/\mathcal{L}_{GVM}$$

$$\dot{x}_{14} = (u_1 - x_{14})/\mathcal{L}_{GVI}$$

روابط ۸ را می‌توان به فرم بسته معادلات حالت غیرخطی رابطه ۹ نمایش داد. در این رابطه بردار تابعی f شامل همان عبارات سمت راست تساوی‌های معادلات روابط ۸، به‌عنوان سطرهای خود، است:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (9)$$

برای خطی کردن این مدل حول نقطه کار معین (x_0, u_0) در فضای $n + m$ بعدی، ابعاد ماتریس A و B به ترتیب عبارت خواهند بود از $n \times n$ و $n \times m$. حال برای درآوردن عبارت به‌صورت فضای حالت خطی باید شرط $f(x_0, u_0) = 0$ برآورده گردد. به‌عبارت‌دیگر بردار x_0 همان بردار حالت دائمی سیستم است که نشان‌دهنده رسیدن سیستم به حالت ماندگار خود و تحقق شرط سکون $\dot{x} = 0$ در نقطه تعادل است. پس برای تعیین هر (x_0, u_0) نقطه تعادل سیستم مطلوب به‌صورت رابطه ۱۰ است:

$$f(x_0, u_0) = 0 \quad (10)$$

برای خطی‌سازی مدل ماشین سنکرون ابتدا بایستی به محاسبه زاویه بار، i_d ، i_q و v_d و v_q مطابق رابطه ۱۱ پرداخت:

$$R_t \triangleq R_a + R_e \quad (11)$$

$$x_t \triangleq x_q + x_e$$

$$I \triangleq \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{V_b}$$

$$\varphi \triangleq \tan^{-1}\left(\frac{Q_t}{P_t}\right)$$

$$x_1^0 = \tan^{-1}\left(\frac{x_t I \cos \varphi - R_t I \sin \varphi}{V_b + R_t I \cos \varphi + x_t I \sin \varphi}\right)$$

$$v_{bd} = V_b \sin(x_1^0)$$

$$v_{bq} = V_b \cos(x_1^0)$$

$$I_d = I \sin(x_1^0 + \varphi)$$

$$I_q = I \cos(x_1^0 + \varphi)$$

در بلوک دیاگرام شکل (۳) مطابق رابطه ۱ ابتدا ψ_d و ψ_q را به دست آورده و سپس با استفاده از رابطه ۵، گشتاور الکتریکی و مکانیکی محاسبه می‌شود.

اینک با پرداختن به جزئیات این مدل، استخراج برخی روابط دیگر و ترکیب آن‌ها در قالب یک دستگاه معادلات دیفرانسیل مرتبه اول شکل کلی معادلات حالت غیرخطی، برای سیستم تحت بررسی، به دست می‌آید. نخستین گام تعیین متغیرهای حالت یا به عبارت بهتر، تعیین بردار حالت سیستم مذکور و نیز بردار ورودی‌های سیستم است. در این ژنراتور سنکرون درجه ۱۴، دو درجه آن مربوط به مودهای مکانیکی و حرکت روتور، پنج درجه دیگر مربوط به فلوی سیم‌پیچی‌های استاتور، دمپر و تحریک‌کننده در مختصات، یک درجه مربوط به سیستم تحریک ژنراتور و شش درجه آن مربوط به سیستم مولد توان مکانیکی است. لذا بردار زیر نشان‌دهنده بردار متغیرهای حالت سیستم با ابعاد 14×1 است:

$$X = [\delta, \Delta\omega, \psi_{fd}, \psi_d, \psi_{kd}, \psi_q, \psi_{kq}, V_{fd}, Y_{HP}, Y_{RH}, Y_{IP}, Y_{LP}, G_{VM}, G_{VI}] \quad (6)$$

و بردار زیر نیز نشان‌دهنده بردار ورودی‌های سیستم با ابعاد 2×1 است:

$$U = (U_g V_R)^T \quad \text{و} \quad U_g = U_{GM} = U_{GI} \quad (7)$$

گام بعدی تعیین عبارت‌های I_{fd} و I_{kq} ، I_{kd} ، I_q ، I_d و I_{kq} برحسب متغیرهای حالت تعریف‌شده رابطه ۶ است تا بتوان دستگاه معادلات دیفرانسیل حاکم بر متغیرهای حالت مذکور را به شکل کلی معادلات حالت درآورد. حال، با توجه به تعریف متغیرهای حالت و ورودی‌های سیستم مطلوب، می‌توان شکل کلی معادلات حالت غیرخطی برای این ژنراتور سنکرون را به دست آورد که پس از ساده‌سازی و مرتب نمودن به شرح رابطه ۸ است:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (8)$$

$$\dot{x}_2 = w_0(F_{HP}x_9 + F_{IP}x_{11} + F_{LP}x_{12} - x_6(y_{1d}x_4 + y_{4d}x_3 + y_{5d}x_5) + x_4(y_{1q}x_6 + y_{3q}x_7)) - K_d x_2 / 2H$$

$$\dot{x}_3 = w_0(x_8 - R_{fd}(y_{4d}x_4 + y_{2d}x_3 + y_{6d}x_5))$$

$$\dot{x}_4 = w_0(V_b \sin x_1 + x_6 - (R_a + R_e)(y_{1d}x_4 + y_{4d}x_3 + y_{5d}x_5)) + x_2 x_6$$

$$\dot{x}_5 = -w_0 R_{kd}(y_{5d}x_4 + y_{6d}x_3 + y_{3d}x_5)$$

$$\dot{x}_6 = w_0(V_b \cos x_1 - x_4 - (R_a + R_e)(y_{1q}x_6 +$$

در مجموعه روابط ۱۱، P_t ، Q_t و V_b به ترتیب بیانگر مقادیر پیرونیته توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ شین بی‌نهایت هستند که به‌عنوان عوامل معلوم، برای تعیین نقطه کار حالت دائمی سیستم به کار می‌روند. پس به ازای مقادیر معین این عوامل می‌توان به کمک روابط ۱۲ مقادیر حالت دائمی برای متغیرهای حالت x_2 تا x_8 را که به ترتیب با نمادهای x_2^0 تا x_8^0 نمایش داده شده‌اند، در نقطه تعادل سیستم محاسبه و تعیین نمود.

در مجموعه روابط ۱۱، P_t ، Q_t و V_b به ترتیب بیانگر مقادیر پیرونیته توان اکتیو، توان راکتیو و ولتاژ شین بی‌نهایت هستند که به‌عنوان عوامل معلوم، برای تعیین نقطه کار حالت دائمی سیستم به کار می‌روند. پس به ازای مقادیر معین این عوامل می‌توان به کمک روابط ۱۲ مقادیر حالت دائمی برای متغیرهای حالت x_2 تا x_8 را که به ترتیب با نمادهای x_2^0 تا x_8^0 نمایش داده شده‌اند، در نقطه تعادل سیستم محاسبه و تعیین نمود.

$$x_i^0 = [0.7802, 0.15562, 0.7696, 1.3645, -0.8071, -0.6053, 0.0026, 1.0430, 1.0430, 1.0879, 1.0879, 1.0430, 1.0430] \quad (15)$$

با خطی‌سازی حول نقطه کار تابع تبدیل سیستم به‌صورت رابطه ۱۶ به دست می‌آید:

$$G(s) = (19.41s^{10} + 2372s^9 + 4.513e04s^8 + 2.07e05s^7 + 3.301e05s^6 + 2.666e05s^5 + 2.882e05s^4 + 6.198e04s^3 + 3177s^2 + 37.2s + 0.06977)/(s^{14} + 218.2s^{13} + 1.375e04s^{12} + 2.036e05s^{11} + 1.103e06s^{10} + 2.624e06s^9 + 3.106e06s^8 + 2.889e06s^7 + 2.178e06s^6 + 4.897e05s^5 + 1.62e05s^4 + 2.144e04s^3 + 923.4s^2 + 10.29s + 0.01911) \quad (16)$$

پایاده‌سازی کنترل‌کننده برای این سیستم مرتبه ۱۴ دارای پیچیدگی بالایی است [۱۳] لذا به‌منظور طراحی با ساختار ساده‌تر کنترل‌کننده، تقریب مرتبه کاهش‌یافته مدل را با برش دادن حالت‌ها در یک فاکتورسازی کوپرایم مدل مرتبه کامل در رابطه ۱۷ نشان داده شده است. در این روش مقادیر منفرد هانکل که بیانگر سهم انرژی نسبی هر حالت در فاکتورسازی هم‌زمان است محاسبه می‌شود. این روش مربوط به روش برش متوازن بالرد است، اما به‌ویژه برای کاهش مرتبه کنترل‌کننده مناسب است. شکل (۴) نمودار مقادیر منفرد هانکل را نشان می‌دهد، که به ترتیب کاهشی برحسب انرژی مرتب شده‌اند. با توجه به این نمودار می‌توانید مدل را به مرتبه ششم کاهش داد.

۴- معرفی کنترل‌کننده PID

کنترل‌کننده PID از سه قسمت مجزا به نام‌های تناسبی (Proportional)، انتگرال‌گیر (Integral) و مشتق‌گیر (Derivative) تشکیل شده که هر کدام از آن‌ها سیگنال خطا را به‌عنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام می‌دهند و در نهایت خروجی‌شان باهم جمع می‌شود. خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترل‌کننده PID است برای اصلاح خطا (error) به سیستم فرستاده می‌شود.

$$x_2^0 = 0 \quad (12)$$

$$x_4^0 = V_{bq} + I_q \times R_t$$

$$I_{fd} = (x_4^0 + I_d(X_d + X_e))/X_{ad}$$

$$x_3^0 = X_{fd} \times I_{fd} - X_{ad} \times I_d I_{fd}$$

$$x_5^0 = X_{ad} \times I_{fd} - X_{ad} \times I_d$$

$$x_6^0 = -(V_{bd} + I_d \times R_t)$$

$$x_7^0 = -X_{aq} \times I_q$$

$$x_8^0 = R_{fd} \times I_{fd}$$

از آنجاکه در مدل گاورنر ضرب دو متغیر حالت وجود دارد، برای محاسبه مقدار ورودی گاورنر در حالت مانا یک معادله درجه ۲ به شرح رابطه ۱۳ به دست می‌آید:

$$(P_0 F_{LP} + P_0 F_{IP})u_1^2 + P_0 F_{HP}u_1^0 + (x_4^0 y_{1q} x_6^0 + x_4^0 y_{3q} x_7^0 - x_3^0 y_{4d} x_6^0 - x_5^0 y_{5d} y_6^0 - x_4^0 y_{1d} x_6^0) = 0 \quad (13)$$

که یک معادله جبری درجه ۲ برحسب متغیر مجهول u_1^0 است و با آن می‌توان مقدار حالت مانای ورودی u_1 در نقطه تعادل سیستم را تعیین نمود. (یکی از ریشه‌ها قابل قبول است). علاوه بر این، نتایج رابطه ۱۴ نیز قابل محاسبه هستند:

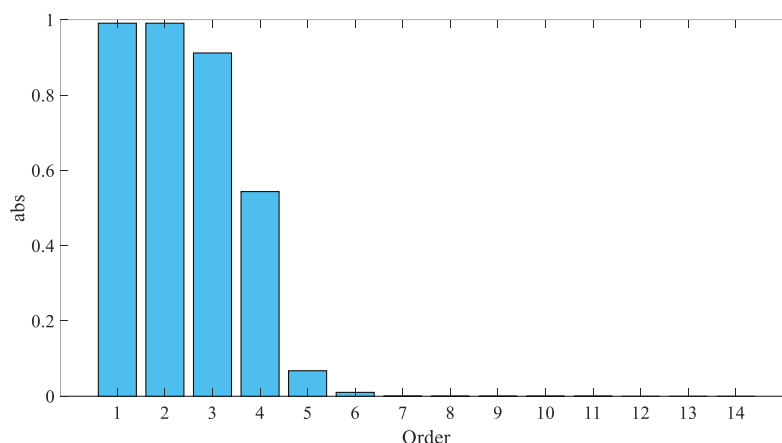
$$u_2^0 = x_8^0 \quad (14)$$

$$x_9^0 = x_{10}^0 = P_0 u_1^0$$

$$x_{11}^0 = x_{12}^0 = P_0 u_1^2$$

$$x_{13}^0 = x_{14}^0 = u_1^0$$

در نهایت مدل خطی شده به‌صورت $\dot{x}_{n \times 1} = Ax + Bu_{m \times 1}$ خواهد بود. همان‌طور که در معادلات فوق مشخص است، به ازای هر زوج معین (P_t, Q_t) با پیش‌فرض اولیه $V_b =$

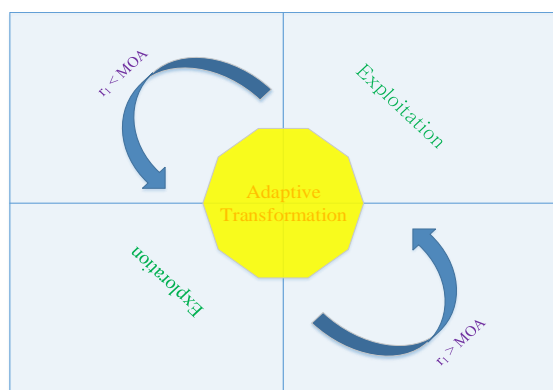


شکل ۴: نمودار مقادیر منفرد هانکل

$$G(s)_{reduced\ order} = \frac{-0.0009 s^5 + 0.0006 s^4 + 0.2498 s^3 + 0.0480 s^2 + 0.2507 s + 0.0474}{s^6 + 1.7614 s^5 + 1.2525 s^4 + 1.8976 s^3 + 0.2556 s^2 + 0.1360 s + 0.0130} \quad (17)$$

افزایش می‌یابد.

فرایند بهینه‌سازی الگوریتم‌های فراابتکاری در حوزه روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت، از دو مرحله اصلی تشکیل شده است: اکتشاف و بهره‌برداری (شکل ۵). اکتشاف به پوشش گسترده فضای جستجو با استفاده از عوامل جستجوی یک الگوریتم برای اجتناب از راه‌حل‌های محلی اشاره دارد. مرحله بهره‌برداری در واقع افزایش دقت در جهت بهبود راه‌حل‌های به دست آمده در مرحله اکتشاف است.



شکل ۵: اکتشاف و بهره‌برداری

در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی حسابی (AOA) استفاده شده است که از رفتار توزیع عملگرهای حسابی اصلی شامل ضرب (M)، تقسیم (D)، تفریق (S) و جمع (A) استفاده می‌کند. از این عملگرهای ساده به عنوان یک روش بهینه‌سازی ریاضی به منظور تعیین بهترین راه‌حل از میان مجموعه‌ای از گزینه‌های نامزد تحت معیار مدنظر استفاده شده است. نتایج

فرمول استاندارد کنترل کننده PID به فرم رابطه ۱۸ است:

$$PID_{output}(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt}) \quad (18)$$

بنابراین تابع تبدیل یک کنترل کننده PID به صورت رابطه ۱۹ درمی‌آید:

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (19)$$

سیگنال خروجی PID بر اساس نسبتی از خطای کنونی سیستم (عملکرد حاضر)، به اضافه مجموع خطاهای سیستم (رفتار گذشته)، به اضافه مشتق خطای کنونی (تخمین خطی رفتار آینده) محاسبه می‌شود و برای اصلاح خطا به سیستم اعمال می‌گردد. ضرایب K_p ، K_i و K_d نیز می‌توانند با روش‌های سعی و خطا یا بهینه‌سازی تعیین گردند.

۵- آشنایی با الگوریتم بهینه‌سازی AOA

به طور کلی، الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، فرایندهای بهینه‌سازی را با مجموعه‌ای از راه‌حل‌های نامزد تولید شده به طور تصادفی آغاز می‌کنند. این مجموعه از راه‌حل‌های تولید شده توسط مجموعه‌ای از قوانین بهینه‌سازی به صورت تدریجی بهبود می‌یابد و توسط یک تابع هدف خاص به صورت تکراری ارزیابی می‌شود. از آنجایی که الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت به دنبال یافتن راه‌حل بهینه مسائل بهینه‌سازی به صورت تصادفی هستند، دریافت یک راه‌حل در یک اجرا تضمین شدنی نیست. با این وجود، احتمال دستیابی به راه‌حل بهینه کلی، برای مسئله داده شده با تعداد کافی راه‌حل تصادفی و تکرارهای بهینه‌سازی

در این بخش رفتار اکتشافی روش AOA معرفی می شود. با توجه به عملگرهای حسابی، محاسبات ریاضی با استفاده از عملگر تقسیم یا حتی عملگر ضرب مقادیر یا تصمیمات با توزیع بالا را دریافت کردند که منجر به مکانیسم جستجوی اکتشاف می شوند. اما این عملگرها (D و M) به دلیل پراکندگی زیاد برخلاف سایر عملگرها (S و A) نمی توانند به راحتی به هدف نزدیک شوند. از این رو، جستجوی اکتشافی راه حل تقریباً بهینه را که ممکن است پس از چندین تکرار استنتاج شود، شناسایی می کند. علاوه بر این، اپراتورهای اکتشاف (D و M) در این مرحله از بهینه سازی برای پشتیبانی از مرحله بهره برداری در فرآیند جستجو، استفاده می شوند.

اپراتورهای اکتشاف AOA منطقه جستجو را به طور تصادفی در چندین منطقه و با رویکردی برای یافتن راه حل بهتر بر اساس دو استراتژی جستجوی اصلی کاوش می کنند که در رابطه (۲۱) مدل سازی شده اند و در این رابطه r_1 و r_2 اعداد تصادفی هستند. این فاز از جستجو توسط تابع MOA با شرط $r_1 > MOA$ بیان می شود. عملگر اول (D)، در این فاز (بخش اول در رابطه (۲۱))، با $r_2 < 0.5$ شرطی می شود و عملگر دیگر (M) تا زمانی که این عملگر وظیفه فعلی خود را تمام کند نادیده گرفته می شود. در غیر این صورت، عملگر دوم (M) برای انجام وظیفه فعلی به جای D درگیر می شود. توجه داشته باشید، یک ضریب تصادفی برای تولید دوره های متنوع بیشتر و کاوش در مناطق مختلف فضای جستجو در نظر گرفته شده است. در این مقاله از ساده ترین قانون که می تواند رفتار عملگرهای حسابی را شبیه سازی کند، استفاده شده است. معادلات به روزرسانی موقعیت رابطه ۲۲ برای قطعات اکتشافی پیشنهاد شده است:

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = \begin{cases} best(x_j) \div (MOP + \epsilon) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_2 < 0.5 \\ best(x_j) \times (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & otherwise \end{cases} \quad (22)$$

که در آن $x_i(C_{Iter} + 1)$ نشان دهنده i امین راه حل در تکرار بعدی، $x_{i,j}(C_{Iter} + 1)$ نشان دهنده موقعیت j امین در بهترین i امین تکرار فعلی و $best(x_j)$ موقعیت j امین در بهترین راه حل است که تا به حال به دست آمده است. پارامتر ϵ یک عدد صحیح کوچک است، UB_j و LB_j به ترتیب به مقدار کران بالا و مقدار کران پایین موقعیت j امین را نشان می دهند، μ یک پارامتر کنترلی برای تنظیم فرآیند جستجو است که با توجه به آزمایش های این مقاله برابر با 0.5 ثابت شده است.

۵-۳- فاز بهره برداری

در این بخش، استراتژی بهره برداری الگوریتم AOA معرفی می شود. با توجه به عملگرهای حسابی، محاسبات ریاضی با

آزمایش ها نشان می دهند که AOA نتایج بسیار نویدبخشی در حل مسائل بهینه سازی چالش برانگیز در مقایسه با سایر الگوریتم بهینه سازی دیگر دارد. مراحل الگوریتم AOA شامل فاز آماده سازی، فاز اکتشاف و فاز بهره برداری که در ادامه بیان شده است.

۵-۱- فاز آماده سازی

در روش AOA، فرایند بهینه سازی با مجموعه ای از راه حل های نامزد X که در ماتریس رابطه ۲۰ نشان داده شده که به طور تصادفی تولید می شود و بهترین راه حل کاندید در هر تکرار به عنوان بهترین راه حل به دست آمده یا تقریباً بهینه در نظر گرفته می شود.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & \dots & x_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N,1} & \dots & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (20)$$

قبل از اینکه AOA شروع به کار کند، بایستی فاز جستجو (به عنوان مثال، اکتشاف یا بهره برداری) را انتخاب کند؛ بنابراین، تابع شتاب بهینه ساز ریاضی (MOA) یک ضریب است که با رابطه ۲۱ محاسبه و در فازهای جستجو استفاده می شود.

$$MOA(C_{Iter}) = Min + C_{Iter} \times \left(\frac{Max - Min}{M_{Iter}} \right) \quad (21)$$

که در آن $MOA(C_{Iter})$ مقدار تابع در تکرار t را نشان می دهد که با رابطه ۲۱ محاسبه می شود. C_{Iter} بیانگر تکرار جاری بین ۱ و حداکثر تعداد تکرارها (M_{Iter}) است. Min و Max به ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر تابع شتاب را نشان می دهند.

۵-۲- فاز اکتشاف

که در آن $x_i(C_{Iter} + 1)$ نشان دهنده i امین راه حل در تکرار بعدی، $x_{i,j}(C_{Iter} + 1)$ نشان دهنده موقعیت j امین در بهترین i امین تکرار فعلی و $best(x_j)$ موقعیت j امین در بهترین راه حل است که تا به حال به دست آمده است. پارامتر ϵ یک عدد صحیح کوچک است، UB_j و LB_j به ترتیب به مقدار کران بالا و مقدار کران پایین موقعیت j امین را نشان می دهند، μ یک پارامتر کنترلی برای تنظیم فرآیند جستجو است که با توجه به آزمایش های این مقاله برابر با 0.5 ثابت شده است.

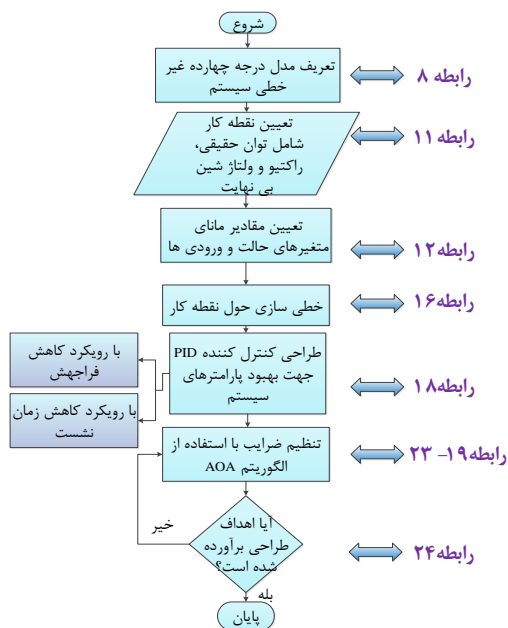
رابطه ۲۳ نحوه محاسبه ضریب احتمال بهینه ساز ریاضی MOP را نشان می دهد.

این مرحله از جستجو مشروط به $MOA < \tau_1$ است که از مقدار فعلی $MOA(C_{Iter})$ بیشتر نباشد. در فاز بهره‌برداری، عملگرهای تفریق و جمع منطقه جستجو را بررسی کرده و راه‌حل بهتر بر اساس دو استراتژی جستجوی اصلی انجام‌شده که در رابطه ۲۴ مدل‌سازی شده‌اند.

$$x_{i,j}(C_{Iter} + 1) = \begin{cases} best(x_j) - (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & r_3 < 0.5 \\ best(x_j) + (MOP) \times ((UB_j - LB_j) \times \mu + LB_j), & otherwise \end{cases} \quad (24)$$

ورودی‌ها را تعیین کرد. سپس، با استفاده از مقادیر متغیرهای حالت، عوامل مدل خطی تعیین می‌شوند. حال با استفاده از مدل خطی شده که خروجی مدنظر زاویه بار است بایستی کنترل‌کننده مناسبی طراحی کرد که مشخصات زاویه بار را بهبود دهد.

باتوجه به کارایی کنترل‌کننده PID در کنترل زاویه بار ژنراتور سنکرون نیروگاه، در این مقاله نیز از این کنترل‌کننده استفاده شده است. ضرایب کنترلر PID با الگوریتم بهینه‌سازی AOA بهینه و تنظیم شده است.



شکل ۶: فلوجارت شبیه‌سازی

ساختار حلقه کنترلی مورد استفاده مطابق شکل (۷) است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است کنترل‌کننده PID قبل از سیستم ژنراتور درجه ۱۴ قرار گرفته و ضرایب K_P ، K_I و K_D کنترل‌کننده توسط الگوریتم AOA تنظیم و بهینه‌شده است. تابع هدفی که الگوریتم AOA حداقل‌سازی آن را انجام می‌دهد مطابق رابطه ۲۵ است:

$$Z = w_1 \times OS + w_2 \times ST + w_3 \times RT + w_4 \times SI \quad (25)$$

استفاده از تفریق (S) یا جمع (A) نتایجی با تراکم بالا دریافت کردند که به مکانیسم جستجوی بهره‌برداری اشاره دارد. با این حال، این عملگرها به دلیل پراکندگی کم، برخلاف سایر عملگرها، می‌توانند به راحتی به هدف نزدیک شوند. از این رو، فاز جستجوی بهره‌برداری راه‌حل تقریباً بهینه را که ممکن است پس از چندین تکرار استنتاج شود، شناسایی می‌کند.

این فاز با انجام جستجوی عمیق از فضای جستجو بهره‌برداری انجام می‌شود. عملگر اول (S)، در این فاز (قاعده اول در رابطه (۲۴))، با $r_3 < 0.5$ شرطی می‌شود و عملگر دیگر (A) تا زمانی که این عملگر وظیفه فعلی خود را به پایان برساند نادیده گرفته می‌شود. در غیر این صورت، اپراتور دوم (A) برای انجام وظیفه فعلی به جای S درگیر می‌شود. این مراحل در این فاز مشابه پارتیشن‌های فاز قبل است. با این حال، اپراتورهای جستجوی بهره‌برداری (S و A) اغلب سعی می‌کنند از گیرافتادن در ناحیه جستجوی محلی جلوگیری کنند. این روش به استراتژی‌های جستجوی اکتشافی دریافتن راه‌حل بهینه و حفظ تنوع راه‌حل‌های نامزد کمک می‌کند. به‌دقت پارامترهای μ را برای تولید یک مقدار تصادفی در هر تکرار طراحی شده تا کاوش را نه تنها در اولین تکرار، بلکه در آخرین تکرار نیز حفظ شود. این بخش از جستجو در موقعیت محلی به‌ویژه در تکرارهای آخر بسیار مفید است.

مشاهده می‌شود که موقعیت نهایی به‌دست آمده می‌تواند در یک موقعیت تصادفی در محدوده‌ای باشد که با موقعیت‌های M ، D ، S و A در محدوده جستجو تعیین می‌شود. در واقع، S ، M ، D و A موقعیت راه‌حل نزدیک به بهینه را تخمین می‌زنند و راه‌حل‌های دیگر موقعیت خود را به‌طور تصادفی در اطراف ناحیه راه‌حل نزدیک به بهینه به‌روز می‌کنند [۱۴].

۶- نتایج شبیه‌سازی

شکل (۶) فلوجارت الگوریتم AOA-PID پیشنهادی مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. قدم اول در تعریف مدل، معرفی عوامل آن است. در بخش اول این برنامه عوامل مدل سیستم درجه چهارده تعریف گردیده‌اند. در بخش دوم برنامه نقطه کار تعیین می‌شود. پس از اجرای برنامه، نقطه کار شامل توان حقیقی، توان راکتیو و ولتاژ شین بی‌نهایت تعریف می‌گردند. با فرض این مقادیر به‌صورت پریونیت به ترتیب ۱، ۰/۵ و ۱/۰۵ در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن نقطه کار سیستم، می‌توان مقادیر متغیرهای حالت و همچنین

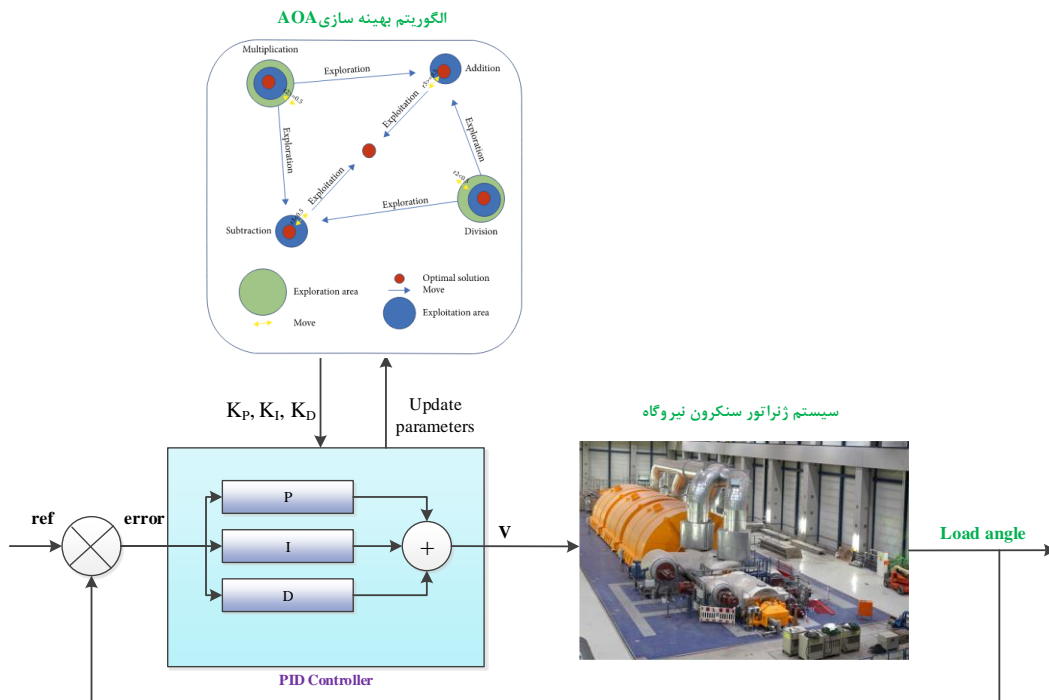
ابتدا بزرگ ترین مقدار حقیقی ریشه ها محاسبه و با مقدار صفر مقایسه می شود. اگر ریشه بزرگ تر از صفر باشد، شاخص SI بی نهایت می شود. در غیر این صورت، شاخص یک مقدار نزدیک به صفر می تواند داشته باشد.

پارامترهای مدل ژنراتور سه فاز سنکرون مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۲ ذکر شده است. هم چنین پارامترهای الگوریتم AOA شامل حدود بالا و پایین متغیرها، تعداد متغیرهای تصمیم گیری و هم چنین تعداد تکرارها در جدول ۳ ذکر شده است.

که در آن w_1 تا w_4 ضرایب تابع هدف، OS فراجهش، ST زمان نشست، RT زمان خیز و SI شاخص پایداری است که به صورت رابطه ۲۶ تعریف می شود:

$$SI = \frac{-1}{\min [\max[\text{real}(\text{pole}(T))], 0]} \quad (26)$$

در رابطه ۲۵، T تابع تبدیل حلقه بسته می باشد. برای پایدار بودن سیستم، قسمت حقیقی همه ریشه های تابع تبدیل حلقه بسته باید کوچک تر از صفر باشد. در رابطه ۲۵،



شکل ۷: ساختار حلقه کنترلی

جدول ۲: پارامترهای مدل [۲]

عوامل ژنراتور			عوامل توربین و گاورنر				
H	۳/۲۵ پریونیت	R_{kd}	۰/۰۰۷۸ پریونیت	P_0	۱	F_{LP}	۰/۳۴
R_a	۰/۰۰۵ پریونیت	x_{kd}	۱/۹۴ پریونیت	F_{HP}	۰/۲۴	\mathcal{Z}_{LP}	۰/۳ ثانیه
K_d	۰/۰۲۵	R_{kq}	۰/۰۰۸۴ پریونیت	\mathcal{Z}_{HP}	۰/۳ ثانیه	\mathcal{Z}_{GVI}	۰/۱ ثانیه
R_{fd}	۰/۰۰۱۵ پریونیت	x_{kq}	۱/۸۶ پریونیت	\mathcal{Z}_{RH}	۱۰ ثانیه	عوامل سیستم تحریک	
x_{fd}	۱/۹۷ پریونیت	x_d	۲ پریونیت	F_{IP}	۰/۳۴	\mathcal{Z}_{ex}	۰/۰۱ ثانیه
x_{ad}	۱/۸۶ پریونیت	x_q	۱/۹۱ پریونیت	\mathcal{Z}_{IP}	۰/۳ ثانیه	پارامترهای ترانسفورماتور و خط انتقال	
x_{aq}	۱/۷۷ پریونیت	$w_0 = 2\pi f_0$	۱۰۰ π رادیان بر ثانیه	\mathcal{Z}_{GVM}	۰/۱ ثانیه	R_{tr}	۰/۰۳۸ پریونیت
						x_{tr}	۰/۱ پریونیت
						R_L	۰/۰۲۵ پریونیت
						x_l	۰/۳۵ پریونیت

جدول ۴ مقایسه پارامترهای پاسخ پله برای هر دو رویکرد کاهش زمان نشست و کاهش فراجهش را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۴، در رویکرد کاهش میزان فراجهش، میزان فراجهش ۹۷ درصد کاهش و زمان نشست ۹۹ درصد کاهش و در رویکرد کاهش زمان نشست، میزان فراجهش ۹۰ درصد کاهش و زمان نشست ۹۹/۵ درصد کاهش یافته است.

جدول ۴: مشخصات پاسخ پله زاویه بار با اعمال کنترل‌کننده

AOA-PID

رویکرد طراحی	زمان پیک (ثانیه)	زمان فراجهش (درصد)	زمان نشست (ثانیه)	خیز (ثانیه)	رویکرد کاهش فراجهش (I)
رویکرد کاهش زمان نشست (II)	۱/۵۹۵	۱/۲۱	۵۹/۵	۸/۷۸	۰/۶۶۵
رویکرد کاهش فراجهش (I)	۱/۳۲۹	۲/۵	۳۲/۹	۹	۰/۶۸۱

هم‌چنین با اعمال الگوریتم AOA ضرایب بهینه و مورد استفاده PID در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: ضرایب تنظیم‌شده کنترل‌کننده PID

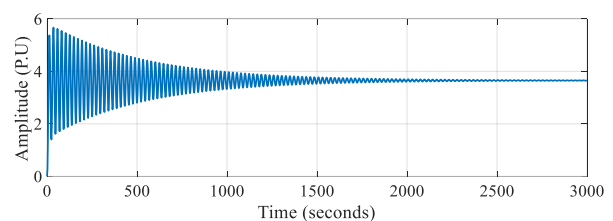
رویکرد طراحی	ضرایب کنترل‌کننده PID		
	K_P	K_I	K_D
رویکرد کاهش فراجهش (I)	۱/۰۱	۱	۱۶/۷۸۳۵
رویکرد کاهش زمان نشست (II)	۷/۶۵۶	۱/۰۳۴۶	۱۴/۱۶۳۷

در ادامه به منظور بررسی پایداری کنترل‌کننده پیشنهادی با رویکرد کاهش زمان نشست، نمودار نایکوئیست و نمودار بود زاویه بار در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) رسم شده است. همان‌طور در شکل ۱۰ نشان داده شده است، این نمودار -۱ را دور نزده است و از آنجایی که تابع تبدیل حلقه باز نیز قطب ناپایداری ندارد لذا خروجی زاویه بار پایدار است. با استفاده از شکل (۱۱) نیز از آنجایی که حاشیه بهره (در رویکرد I، ۰/۰۷۶۵ و در رویکرد II، ۷۷/۴۵) و حاشیه فاز (در رویکرد I، ۱۲/۹۶ و در رویکرد II، ۷۷/۴۵) مقداری مثبت است لذا کنترل‌کننده AOA-PID موجب پایداری زاویه بار خواهد شد.

جدول ۳: پارامترهای الگوریتم AOA

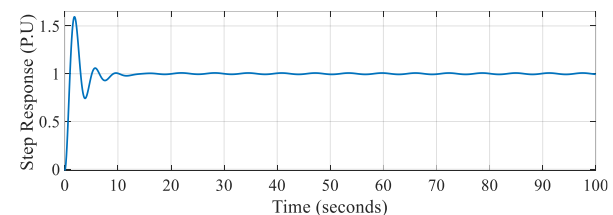
حد بالای پارامتر	حد پایین پارامترها	تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری	حداکثر تعداد عوامل جستجو
[۳۰ و ۱ و ۱۰]	[۰/۰۱ و ۱/۰۱ و ۱/۰۱]	۳	۵۰

لذا با اعمال پله واحد به عنوان ورودی U_g به سیستم ژنراتور سنکرون، مشخصه زاویه بار آن مطابق شکل (۸) به دست می‌آید. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است مشخصه زاویه بار بسیار نوسانی بوده و فراجهش و زمان نشست بالایی دارد و بعد از گذشت ۳۰۰۰ ثانیه هم‌چنان دارای نوسان است که مطلوب نمی‌باشد.

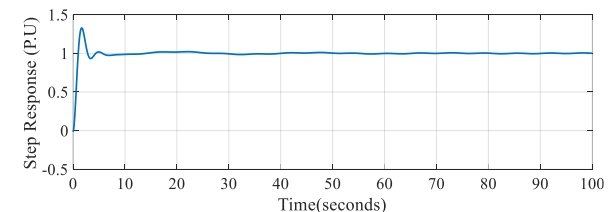


شکل ۸: مشخصه زاویه بار به‌ازای ورودی پله

حال در الگوریتم AOA-PID با در نظر گرفتن $1 < K_P < 10$ ، $0 < K_I < 1$ و $1 < K_D < 30$ و با در نظر گرفتن دو رویکرد کاهش زمان نشست شکل (۹-الف) و کاهش فراجهش شکل (۹-ب) عملکرد کنترل‌کننده مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول وزن‌های تابع هدف W_1, W_2, W_3, W_4 به ترتیب برابر ۰/۲، ۰/۱، ۰/۱ و ۰/۱ و در رویکرد دوم وزن‌های W_1, W_2, W_3, W_4 به ترتیب برابر ۰/۶، ۰/۲، ۰/۱ و ۰/۱ در نظر گرفته شده است.



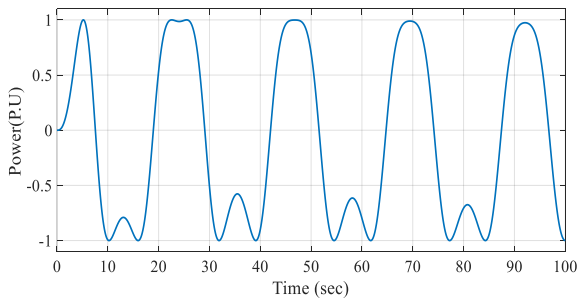
الف



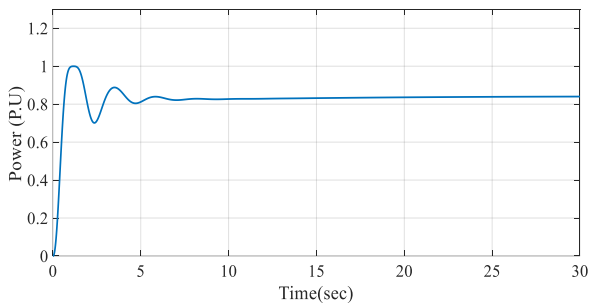
ب

شکل ۹: مشخصه زاویه بار به‌ازای ورودی پله با اعمال کنترل‌کننده AOA-PID (الف) رویکرد کاهش زمان نشست (ب) کاهش میزان فراجهش

تغییرات جزئی در شرایط نرمال بوده و توان خروجی غیرنوسانی و پایدار است. هدف در این مقاله ارائه کنترلر AOA-PID به منظور حفظ پایداری ژنراتور سه فاز سنکرون در شرایط بحرانی و تغییرات ناگهانی شدید توان دریافتی است. لذا به منظور مدل‌سازی شرایط بحرانی و تغییرات ناگهانی شدید از ورودی پله استفاده می‌شود. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توان خروجی به ترتیب بدون اعمال کنترل‌کننده و با اعمال کنترل‌کننده نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود نیروگاه بدون داشتن کنترلر توانمند قادر به پاسخگویی به این تغییرات نمی‌باشد و توان خروجی نوسانی می‌شود. بنابراین با نصب کنترلر AOA-PID، همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود ژنراتور سنکرون سه فاز نیروگاه قادر به پاسخگویی و پایدار نمودن سیستم قدرت و میرا نمودن نوسانات توان خروجی در زمان کمتر از ۱۰ ثانیه به صفر می‌باشد.



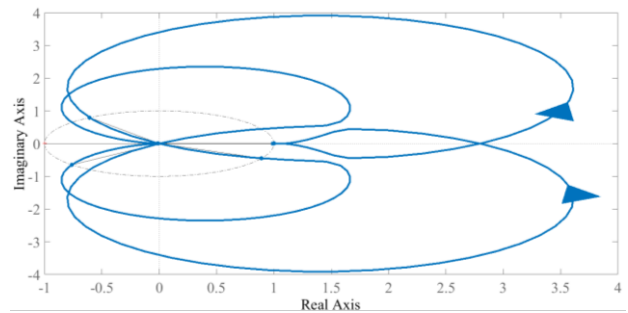
شکل ۱۲: توان خروجی قبل از اعمال کنترل‌کننده



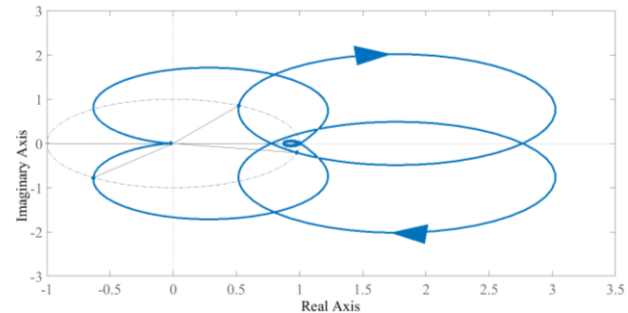
شکل ۱۳: توان خروجی بعد از اعمال کنترل‌کننده

به منظور ارزیابی عملکرد کنترلر پیشنهادی، می‌بایست با الگوریتم‌های متداول موجود در شرایط یکسان مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد. به همین منظور جهت بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی از لحاظ زمان نشست، زمان پیک، میزان فراجهش و زمان خیز پاسخ پله از ۵ کنترلر ارائه شده در جدول ۶، که از متداول‌ترین روش‌های کنترلی در سیستم‌های قدرت به شمار می‌آید، استفاده شده است.

کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از ویژگی‌های خوب استراتژی اکتشاف و بهره‌برداری الگوریتم فراابتکاری AOA ضرایب کنترل‌کننده PID را به گونه‌ای تنظیم می‌کند که این

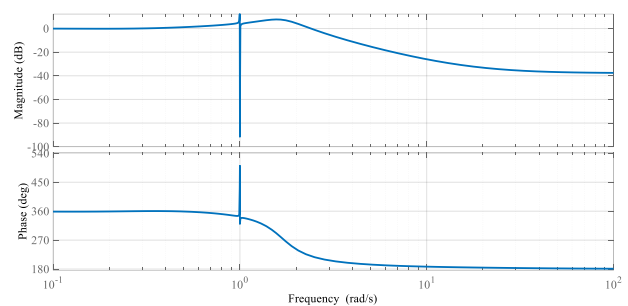


(الف)

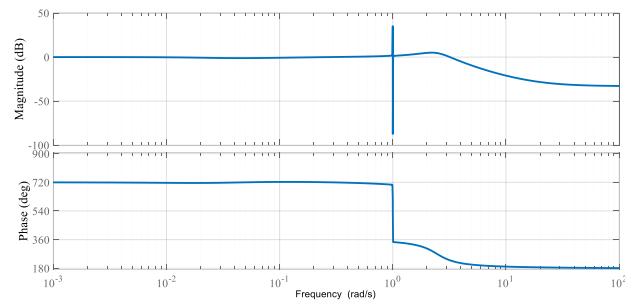


(ب)

شکل ۱۰: نمودار نایکوئیست زاویه بار الف) رویکرد کاهش زمان نشست ب) رویکرد کاهش میزان فراجهش



(الف)



(ب)

شکل ۱۱: نمودار بود زاویه بار الف) رویکرد کاهش زمان نشست ب) رویکرد کاهش میزان فراجهش

رابطه توان خروجی با زاویه بار در رابطه ۲۶ بیان شده است [۱۵]:

$$P = P_{max} \sin \delta \quad (26)$$

تغییرات توان دریافتی شبکه قدرت از ژنراتور سه فاز نیروگاه در شرایط نرمال، جزئی و در حد چند درصد توان نامی نیروگاه است. لذا ژنراتور سنکرون سه فاز نیروگاه قادر به پاسخگویی به

جدول ۱: متغیرها و تعاریف آن‌ها

متغیر	تعریف	متغیر	تعریف
δ	زاویه بار ($^\circ$)	V_{fd}	ولتاژ میدان (V)
ω	سرعت روتور (rad/sec)	V_R	ولتاژ خروجی رگولاتور (V)
w_0	سرعت زاویه‌ای پایه (rad/sec)	I_{fd}	جریان میدان (A)
Q_t	توان راکتیو تولیدشده برحسب پریونیت (VAR)	I_d	جریان میدان روی محور d (A)
P_t	توان اکتیو تولیدشده (W)	I_q	جریان میدان روی محور q (A)
K_d	ضریب میرایی	I_{kd}	جریان دمپر روی محور d (A)
H	ثابت اینرسی (MW.s/MVA)	I_{kq}	جریان دمپر روی محور q (A)
ψ_{fd}	شار ناشی میدان (Wb.N)	R_a	مقاومت آرمیچر در هر فاز (Ω)
ψ_d	شار ناشی استاتور (Wb.N)	R_{kd}	مقاومت دمپر روی محور d (Ω)
ψ_q	شار ناشی روتور (Wb.N)	R_{fd}	مقاومت سیم‌پیچ میدان (Ω)
ψ_{kd}	شار ناشی دمپر روی محور d (Wb.N)	R_{kq}	مقاومت دمپر روی محور q (Ω)
ψ_{kq}	شار ناشی دمپر روی محور q (Wb.N)	Y_{HP}	خروجی فشار بالا (Pa)
\mathcal{Z}_{ex}	ثابت زمانی تحریک (Sec)	Y_{RH}	خروجی بازگرم‌کن (Pa)
\mathcal{Z}_{HP}	ثابت زمانی فشار بالا (Sec)	Y_{IP}	خروجی فشار متوسط (Pa)
\mathcal{Z}_{RH}	ثابت زمانی بازگرم‌کن (Sec)	Y_{LP}	خروجی فشار پایین (Pa)
\mathcal{Z}_{IP}	ثابت زمانی فشار متوسط (Sec)	G_{VM}	نرخ باز شدن شیر اصلی (Pu/sec)
\mathcal{Z}_{LP}	ثابت زمانی فشار کم (Sec)	G_{VI}	نرخ باز شدن شیر میانی (Pu/sec)
\mathcal{Z}_{GVM}	ثابت زمانی نرخ باز شدن شیر اصلی (Sec)	U_{GI}	میزان بازشدگی دریچه آب (Pu)
\mathcal{Z}_{GVI}	ثابت زمانی نرخ باز شدن شیر میانی (Sec)	R_{tr}	مقاومت سیم‌پیچ ترانسفورماتور (Ω)
P_0	توان توربین (W)	R_l	مقاومت خط انتقال (Ω)
x_{tr}	راکتانس ترانسفورماتور (Ω)	U_g	سرعت آب (m/s)
x_l	راکتانس خط انتقال (Ω)	y_{id}	ادمیتانس محور d (Ω^{-1})
T_e	گشتاور الکتریکی (Nm)	y_{iq}	ادمیتانس محور q (Ω^{-1})
T_m	گشتاور مکانیکی (Nm)	x_e	مجموع راکتانس ترانسفورماتور و خط انتقال (Ω)
F_{HP}	کسری از کل انرژی توربین تولیدشده توسط HP	x_i	متغیرهای فضای حالت
F_{IP}	کسری از کل انرژی توربین تولیدشده توسط IP	x_i^0	شرایط اولیه متغیرهای حالت
F_{LP}	کسری از کل انرژی توربین تولیدشده توسط LP	v_{bd}	ولتاژ متقابل محور d (V)
R_e	مجموع مقاومت ترانسفورماتور و خط انتقال (Ω)	V_{bq}	ولتاژ متقابل محور q (V)
u_1	ورودی اول (V_R)	X_d	راکتانس استاتور (Ω)
u_2	ورودی دوم (U_g)	X_{fd}	راکتانس میدان (Ω)
X_{ad}	اندوکتانس متقابل محور d (H)	X_{aq}	اندوکتانس متقابل محور q (H)

- [1] Abdolhosseini, Morteza, Rohollah Abdollahi, and Meraj Rajaei. "Designing of PI λ D δ controller for PMBLDC motor using metaheuristic algorithms." *Karafan Quarterly Scientific Journal* 17, no. 4 (2021): 149-165.
- [2] M. karrari. *power systems dynamics and control*. Amir Kabir University Publishing. 2015.(inPersian)
- [3] S. Korram and H. R. ezadfar, "A method for calculating accurate the reference value of synchronous generator load angle" *The National Conference of New Idea On Electrical Engineering*, Esfahan, Iran, November 2015.(inPersian)
- [4] P. Kundur. *Power System Stability and Control*. 1th ed, McGraw-Hill. 1994.
- [5] Sumina, D., A. Sala, and R. Malaric. "Determination of load angle for salient-pole synchronous machine." *Measurement science review* 10, no. 3 (2010): 89.
- [6] Čuček, Hrvoje, Damir Sumina, and Nikola Švigir. "Synchronous generator load angle estimation." In *Melecon 2010-2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pp. 18-22. IEEE, 2010.
- [7] M.R. Aghamohammadi, E. Kazemi and M. shivaei, "Provide a method for estimating the rotor angle of a synchronous generator using parameters that can be measured with PMU" *International Conference on Electricity, Power Research Institute*, Tehran, Iran, November 2013, pp. 1-6. (inPersian)
- [8] Dehghani, M., and S. K. Y. Nikravesh. "Nonlinear state space model identification of synchronous generators." *Electric Power Systems Research* 78, no. 5 (2008): 926-940.
- [9] Gallehdari, Z., M. Dehghani, and S. K. Y. Nikravesh. "Online state space model parameter estimation in synchronous machines." *Iranian J. Electrical & Electronic Engineering* 10 (2014): 124-132.
- [10] Hosseini, Seyed Mehdi, Rohollah Abdollahi, and Mehdi Karrari. "Inclusive design and implementation of online load angle measurement for real-time transient stability improvement of a synchronous generator in a smart grid." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65, no. 11 (2018): 8966-8972.
- [11] Kovalenko, P. Y., and A. N. Moiseichenkov. "Comparing the techniques of defining the synchronous machine load angle." In *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 870, no. 1, p. 012013. IOP Publishing, 2017.
- [12] Sumina, Damir, Bulić, Neven and Vražić, Mario. "Load Angle Control of a Synchronous Generator." *Przegląd Elektrotechniczny* 88, 3a (2012): 225-231.
- [13] Abdolhosseini, Morteza, and Rohollah Abdollahi. "Design of HHO-PID Controllers for Load Angle of Power Plant Synchronous Generators." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 2022 (2022).
- [14] Abualigah, Laith, Ali Diabat, Seyedali Mirjalili, Mohamed Abd Elaziz, and Amir H. Gandomi. "The arithmetic optimization algorithm." *Computer methods in applied mechanics and engineering* 376 (2021): 113609.
- [15] K. R. Padiar. *Power system dynamics stability and control*. New Delhi : BS Publications. 2008.
- [16] S. Korram and H. R. ezadfar, "Use of genetic algorithm in optimal control of real power and load angle of synchronous generator" *International conference on recent trends in engineering and materials science*, Dubai, UAE, December 2016, pp. 1-15. (inPersian)
- [17] Izci, Davut, Serdar Ekinci, Murat Kayri, and Erdal Eker. "A novel improved arithmetic optimization algorithm for optimal design of PID controlled and Bode's ideal transfer function based automobile cruise control system." *Evolving Systems* 13, no. 3 (2022): 453-468.
- [18] Ahmed, Mohamed, Gaber Magdy, Mohamed Khamies, and Salah Kamel. "Modified TID controller for load frequency control of a two-area interconnected diverse-unit power system." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 135 (2022): 107528.