مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲، صفحه ۸-۱

طراحی کنترل کننده فازی به روش تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی برای سیستم خودکار تنظیم ولتاژ

میثم خطیبی نیا[۱]، علی اکبر قره‌ویسی[۲]

[۱] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید باهنر کرمان، m.khatibinia@yahoo.com

[۲] استادیار، بخش مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید باهنر کرمان، a_gharaveisi@yahoo.com

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۲/۷/۲۰، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۲/۱۰/۲۶)

چکیده: طراحی و بهینه سازی کنترل کننده‌ها را می‌توان با رویکرد چند هدفه انجام داد، به عبارت دیگر مسئله طراحی و بهینه سازی کنترل کننده یک مسئله چند هدفه یا چند شاخصه می‌باشد. در این مقاله، یک روش بهینه سازی به نام تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی ارائه می‌گردد که دو ویژگی مهم دارد؛ روشی است چند هدفه، و همچنین با توجه به رویکرد چند شاخصه سعی در یافتن مجموعه-ای از جواب‌های بهینه مناسب دارد. پس از ارائه روش مذکور، یک کنترل کننده فازی با روش تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی طراحی و بهینه می‌شود. در ادامه، کنترل کننده طراحی شده بر روی سیستم خودکار تنظیم ولتاژ غیرخطی پیاده سازی می‌شود. سیستم مورد بررسی جزء مهم ژنراتورهای نیروگاهی است، زیرا سطح ولتاژ خروجی را در یک سطح ثابت حفظ می‌کند. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان می-دهد که روش پیشنهادی به خوبی توانسته خواسته‌ها را برآورده سازد و کارایی لازم را دارد.

کلمات کلیدی: تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی، آنتروپی، تاپسیس، پَرِتو، سیستم خودکار تنظیم ولتاژ.

Design of fuzzy Controller Using Genetic Multiple Attributed Decision Making for Automatic Voltage Regulator System

Meissam Khatibinia, Ali Akbar Gharaveisi

Abstract: Controller design and optimization can be done with multiobjective approach, in the other hand, controller design and optimization problem is a multiobjective or multiple attributed problem. In this paper, an optimal method is presented and called genetic multiple attributed decision making (GMADM). This method is has two properties; it is a multiobjective method and it try to find a set of appropriate optimal solutions. After presenting the method, a fuzzy controller is designed and optimized by GMADM method. This optimal controller is applied on a nonlinear automatic voltage regulator system (AVR). The studied system is the main part of generator, because, the output voltage level is kept constant by AVR system. The simulation results show that the propose method acts well and it is efficient.

Keywords: Genetic multiple attributed decision making, Entropy, TOPSIS, Pareto, Automatic voltage regulator system.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

۱- مقدمه

در صنعت دستیابی به عملکرد مناسب سیستم‌ها همواره مدنظر بوده است. با توجه به اینکه تغییر پارامترهای یک سیستم آسان نبوده و حتی در اکثر مواقع غیرممکن می‌باشد طراحان و مهندسان، سیستم‌هایی جانبی برای تصحیح عملکرد سیستم اصلی طراحی می‌کنند که کنترل کننده نامیده می‌شوند [۱].

در دهه‌های اخیر انواع روش‌های بهینه سازی معرفی شده‌اند که از این قبیل می‌توان الگوریتم‌های تکاملی، روش فازی و غیره نام برد. در ابتدا در الگوریتم‌های تکاملی به مسئله بهینه سازی به صورت یک مسئله تک هدفه پرداخته شده است اما در سال‌های اخیر به آن به عنوان یک مسئله چند هدفه نیز توجه شده است. در این نوع بهینه سازی، همزمان می‌توان چندین تابع هدف را که حتی در تضاد با یکدیگر هستند (یعنی ورودی‌های الگوریتم باعث کاهش مقدار یک تابع و افزایش مقدار تابع دیگر می‌شود) را بهینه ساخت.

بهینه یابی چند معیاره به دو قسمت چند هدفه و چند شاخصه تقسیم می‌شود. در سال‌های اخیر کنترل کننده هایی با روش الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم ازدحام ذرات و الگوریتم-های چند هدفه طراحی شده‌اند. از جمله این طراحی‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

۱) طراحی کنترل کننده PID به روش الگوریتم ژنتیک چند هدفه و پیاده سازی آن بر روی یک ربات [۲]. ۲) پیاده سازی کنترل کننده عملی چند هدفه بر روی سیستم برف پاک کن خودرو [۳]. ۳) مقایسه مفاهیم طراحی در تصمیم گیری چند شاخصه با استفاده از نمودارهای سطحی [۴]. ۴) طراحی کنترل کننده بهینه برای برج تقطیر به روش NSGA II [۵]. ۵) پیاده سازی کنترل کننده PD+I فازی با استفاده از روش ژنتیک بر روی سیستم غیرخطی [۶].

الگوریتم ژنتیک بر اساس انتخاب جواب‌های بهینه و انتخاب برای تولید نسل بعد دارای روش‌های مختلفی است. عملگر انتخاب را می‌توان با استفاده از روش تصمیم گیری چند شاخصه نیز پیاده سازی کرد.

در روش بهینه یابی چند شاخصه یا تصمیم گیری چند شاخصه با تعریف یک ماتریس تصمیم گیری شامل گزینه‌ها و شاخص‌های انتخابی، جواب (گزینه) بهینه به گونه‌ای انتخاب می‌شود که دارای مناسب ترین شاخص‌ها در بین دیگر گزینه‌هاست. در ادامه یک کنترل فازی به روش تصمیم گیری چند شاخصه طراحی می‌گردد.

در این تحقیق، یک روش بهینه یابی چند هدفه ارائه می‌شود که اساس آن بر الگوریتم ژنتیک بوده ولی در قسمت عملگر انتخاب آن تغییر کلی صورت گرفته است. الگوریتم‌های ژنتیک چند هدفه متنوع هستند اما اگر بخواهیم یک تفاوت بارز بین روش‌های موجود و روش پیشنهادی بیان کنیم، می‌توان گفت که روش مورد مطالعه، جواب‌های بهینه را در قالب یک ماتریس نشان می‌دهد، به عبارت دیگر جواب‌های حاصل از توابع هدف پیوسته به صورت مجزا در درایه‌های یک ماتریس قرار داده می‌شوند. پس از تشکیل ماتریس مورد نظر، عمل انتخاب گزینه مناسب با سنجش جواب‌های توابع هدف و ایجاد ارتباط بین آنها صورت می‌پذیرد. بنابراین، مزیت این الگوریتم در سادگی و بیان ریاضی عملگر انتخاب آن است.

در این مقاله، ابتدا روش‌های بهینه یابی چند هدفه بخصوص روش تصمیم گیری چند شاخصه اعم از وزن دهی و انتخاب گزینه مناسب شرح داده می‌شود و پس از آن روش پیشنهادی ارائه می‌گردد. سیستم مورد بررسی یک سیستم خودکار تنظیم ولتاژ غیرخطی است که در ابتدا توضیح داده خواهد شد و در پایان یک کنترل کننده فازی برای سیستم مذکور طراحی و پیاده سازی می‌شود.

۲- اساس بهینه یابی چند هدفه

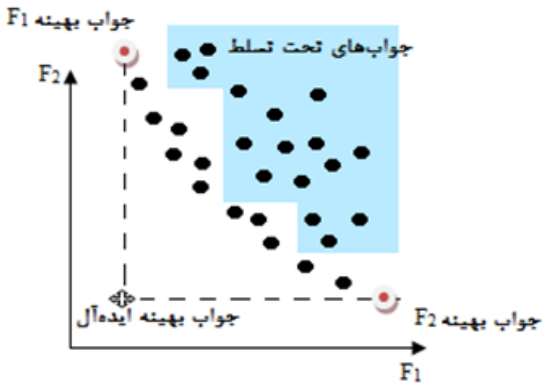
در بهینه یابی چند هدفه، چند معیار (تابع هدف) بهینه می‌شود که حل مسئله، یک مجموعه از جواب‌های بهینه به نام جواب‌های بهینه پرتو می‌دهد. هر یک از جواب‌های پرتو می‌توانند یک جواب بهینه باشند و نمی‌توان یک جواب را به عنوان بهترین جواب انتخاب کرد [۷].

اگر به ازای تمام متغیرهای ورودی تابع هدف v جواب‌های بهتری نسبت به u داشته باشد یا به ازای حداقل یک متغیر ورودی جواب v بهتر از u و به ازای بقیه متغیرهای ورودی جواب‌های دو تابع هدف یکسان باشد آنگاه u تحت تسلط v است که این، تعریف بهینگی پرتو است. تعریف ریاضی این مفهوم بصورت زیر است:

$$\forall i \in \{1,2,...,k\} : u \le v \quad or$$
$$\exists i \in \{1,2,...,k\} : u < v \Rightarrow u \prec v \qquad (۱)$$

که k تعداد ورودی‌های توابع هدف و "$\prec$" علامت تسلط v بر u است.

شکل ۱ جواب‌های بهینه نامغلوب پرتو را نشان می‌دهد. جواب‌های نامغلوب جواب‌هایی هستند که تحت تسلط جواب‌های دیگر نیستند. به متغیرهای ورودی بهینه، مجموعه بهینه پرتو و به مجموعه جواب‌های توابع هدف، حاصل از مجموعه بهینه پرتو مجموعه Pareto Front گویند [۸].



شکل ۱: جواب‌های بهینه نامغلوب پرتو

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

۲-۱- روش تصمیم گیری چند شاخصه

روش تصمیم گیری چند شاخصه به منظور انتخاب مناسب ترین گزینه از بین m گزینه موجود بکار می‌رود. یک مسئله چند شاخصه به صورت ماتریس زیر نشان داده می‌شود (ماتریس تصمیم گیری(D)):

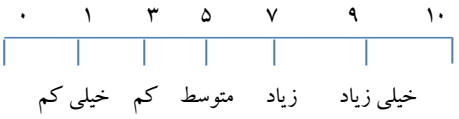
که در آن A_i نشان دهنده گزینه i ام، x_{ij} نشان دهنده شاخص j ام و r_{ij} نشان دهنده ارزش شاخص j ام برای گزینه i ام می‌باشد [۸].

گزینه	شاخص			
	x_1	x_2	..	x_n
A_1	r_{11}	r_{12}	..	r_{1n}
A_2	r_{21}	r_{22}	..	r_{2n}
.	.	.	.	.
A_m	r_{m1}	r_{m2}	..	r_{mn}

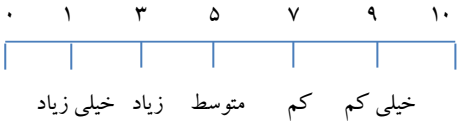
شاخص‌ها اغلب در مدل چند شاخصه از مقیاس‌های مختلف بوده و غالبا در تعارض با یکدیگر، در نتیجه گزینه‌ای که بتواند بهینه بوده و ایده‌آل از هر شاخص را تأمین نماید در اغلب مواقع غیرممکن خواهد بود [۸].

در مدل چند شاخصه، شاخص‌ها می‌توانند کمی و کیفی باشند. شاخص‌های کیفی را می توان با استفاده از فاصله‌ای که میان آنهاست رتبه بندی کرد که روش معمول، مقیاس دوقطبی فاصله‌ای است، مانند زیر [۸].

شاخص‌های مثبت:



شاخص‌های منفی:



شاخص‌های کمی دارای مقیاس‌های متفاوتی هستند پس با توجه به این امر باید قبل از هر عملیات ریاضی ابتدا شاخص‌ها را بی‌مقیاس کرد که متداول‌ترین روش، استفاده از نرم اقلیدسی است [۸]:

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}} \qquad (۲)$$

که n_{ij} عنصر بدون بعد، r_{ij} نشان دهنده هر عنصر و m تعداد سطرهای ماتریس تصمیم گیری است.

در روش تصمیم گیری چند شاخصه معمولا ابتدا بر اساس اهمیت شاخص‌ها، به هر کدام از شاخص‌ها وزن خاصی تعلق می‌گیرد بطوریکه مجموع اوزان برابر واحد شود. سپس با بکارگیری دو مدل ارزیابی که مدل‌های جبرانی و غیرجبرانی می‌باشند گزینه مناسب انتخاب می‌شود.

در مدل غیرجبرانی هیچ مصالحه‌ای در بین شاخص‌ها وجود ندارد یعنی نقطه ضعف یک شاخص را نمی‌توان با مزیت شاخصی دیگر جبران کرد اما در مدل جبرانی می‌توان با تغییر در شاخصی اثر مخالف شاخص دیگر را جبران کرد [۸].

۲-۲- روش تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی

همانگونه که می‌دانیم در الگوریتم ژنتیک برای تولید نسل آینده عمل انتخاب (Selection) انجام می‌شود. بجای استفاده از روش‌های مرسوم انتخاب در ژنتیک، در روشی که در ادامه ارائه می‌شود ابتدا وزن شاخص‌ها محاسبه می‌گردد سپس با استفاده از مدل جبرانی تصمیم گیری چند شاخصه، عمل انتخاب انجام می‌شود و بر اساس معیار معینی که بیان خواهد شد بهترین گزینه در هر مرحله انتخاب می‌شود.

۲-۲-۱- آنتروپی (Entropy)

برای وزن‌دهی به شاخص‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد. روشی که در اینجا مورد استفاده قرار گرفته است روش آنتروپی است.

آنتروپی یک مفهوم اساسی در علوم فیزیکی، علوم اجتماعی و تئوری اطلاعات می‌باشد بطوریکه نشان دهنده مقدار عدم اطمینان موجود از محتوای مورد انتظار اطلاعاتی از یک پیام است. آنتروپی در تئوری اطلاعات، معیاری برای مقدار عدم اطمینان بیان شده توسط یک توزیع احتمال گسسته (P_i) است بنابراین هرچقدر نوسانات در مقادیر شاخصی بیشتر باشد آن شاخص با اهمیت‌تر است و وزن بیشتری خواهد داشت [۸].

ماتریس تصمیم گیری را در نظر بگیرید، در آنتروپی به شرح زیر عمل می‌کنیم:

ابتدا محتوای اطلاعات موجود را می‌یابیم [۸]:

$$P_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}} \qquad (۳)$$

سپس عدم اطمینان را می‌یابیم [۸]:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^{m} \left[P_{ij}.Ln P_{ij} \right]; k = \frac{1}{Ln m} \qquad (۴)$$

$$d_j = 1 - E_j; \forall j \qquad (۵)$$

در نهایت وزن شاخص‌ها از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد [۸]:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j}; \forall j \qquad (۶)$$

که در آن m و n به ترتیب تعداد سطرها وستون‌های ماتریس تصمیم گیری، d_j عدم اطمینان (درجه انحراف) و w_j وزن شاخص موردنظر است.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

۲-۲-۲- تاپسیس (TOPSIS)

در تصمیم گیری چند شاخصه پس از آن که وزن شاخص‌ها مشخص شد با استفاده از مدل‌های جبرانی یا غیر جبرانی گزینه مناسب انتخاب می‌گردد.

تاپسیس یکی از مدل‌های جبرانی تصمیم گیری چند شاخصه است که در این روش گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را با راه‌حل ایده‌آل منفی داشته باشد. روند انتخاب گزینه مناسب به صورت زیر می‌باشد [۸]:

الف) مقیاس‌های موجود در ماتریس تصمیم گیری با بکارگیری رابطه (۲) بدون مقیاس می‌شود [۸].

ب) ماتریس بی‌مقیاس وزین با مفروض بودن بردار اوزان به دست می‌آید [۸]:

$$V = N_D \times W \qquad (۷)$$

که V ماتریس بی‌مقیاس وزین، N_D ماتریس بی‌مقیاس حاصل از ماتریس تصمیم گیری و W ماتریس وزنی قطری n×n که وزن شاخص‌ها بر روی قطر اصلی و درایه‌های دیگر آن صفر است.

ج) برای هر شاخص از ماتریس V راه‌حل ایده‌آل مثبت (v_j^+) و راه‌حل ایده‌آل منفی (v_j^-) مشخص می‌شود (باید توجه داشت که برای شاخص-های مثبت راه‌حل ایده‌آل مثبت مقدار بیشینه و برای شاخص‌های منفی راه‌حل ایده‌آل مثبت مقدار کمینه است) [۸].

د) فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه می‌شود [۸]:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^+)^2}\ ; i = 1, 2, ..., m \qquad (۸)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (v_{ij} - v_j^-)^2}\ ; i = 1, 2, ..., m \qquad (۹)$$

که d_i^-, d_i^+ به ترتیب فاصله از راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی است.

پ) نزدیکی نسبی گزینه A_i به راه‌حل ایده‌آل به دست آورده شود (cl_i^+) [۸]:

$$cl_i^+ = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}\ ; 0 \le cl_i^+ \le 1 \qquad (۱۰)$$

ت) در نهایت گزینه‌ها بر اساس cl_i^+ رتبه بندی می‌شوند بگونه‌ای که گزینه با cl_i^+ بزرگتر گزینه مناسب‌تری است [۸].

۲-۲-۳- روش پیشنهادی

در این روش مانند الگوریتم ژنتیک ابتدا یک جمعیت اولیه به صورت تصادفی تولید می‌شود و پس از ارزیابی توابع هدف، ماتریس تصمیم گیری به گونه‌ای تشکیل می‌گردد که کروموزوم‌ها و مقادیر توابع هدف به ترتیب سطرها و ستون‌های آن را می‌سازند. به عبارت دیگر کروموزوم‌ها گزینه‌های انتخابی هستند و شاخص‌های تصمیم گیری توابع هدف می‌باشند که مقادیر این توابع به ازای هر کروموزوم درایه‌های ماتریس تصمیم گیری را تشکیل می‌دهند. این فرآیند در هر تکرار صورت می‌گیرد.

پس از تشکیل ماتریس، ابتدا به روش آنتروپی شاخص‌های تصمیم، وزن دهی می‌شوند. بعد از آنکه اوزان مشخص شد با استفاده از روش تاپسیس، گزینه‌ها بر اساس مقدار cl_i^+ رتبه بندی می‌شوند. کروموزومی که بیشترین مقدار cl_i^+ را داراست در هر تکرار در مجموعه پرتو ذخیره می‌گردد. پس از پایان تمام تکرارها جواب‌های نامغلوب از مجموعه به عنوان جواب‌های بهینه پرتو بیان می‌شوند. باید توجه داشت که در پایان الگوریتم با یک مجموعه جواب بهینه روبرو هستیم که هر کدام از اعضای مجموعه می‌توانند انتخاب مناسبی باشند و در واقع، انتخاب یک گزینه مناسب به تصمیم گیرنده بستگی دارد. درصدی از جمعیت هر تکرار که بهترین cl_i^+ را دارند (به طور مثال ۳۰ درصد) برای زاد و ولد انتخاب شده و برای جایگزینی جمعیت از دست رفته یک جمعیت تصادفی مجددا تولید می‌شود. این کار یک مزیت دیگر هم دارد که حتی‌الامکان از ایجاد نقطه کمینه محلی جلوگیری می‌کند.

مراحل بعدی روش یعنی تولید مثل و جهش مانند الگوریتم ژنتیک است. این روش با عنوان تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی (GMADM) مطرح می‌شود. شکل ۲ فلوچارت روش جدید را بیان می‌کند که تغییرات در آن نشان داده شده است.

۳- سیستم خودکار تنظیم ولتاژ

سیستم خودکار تنظیم ولتاژ ژنراتور (Automatic Voltage Regulator) جهت کنترل توان راکتیو ژنراتور استفاده می‌شود. وظیفه این سیستم حفظ اندازه ولتاژ پایانه ژنراتور سنکرون در یک سطح مشخص می‌باشد. با توجه به اینکه ناپایداری AVR منجر به ناپایداری کل سیستم قدرت می‌شود بنابراین عملکرد سیستم کنترل کننده آن از حساسیت ویژه ای برخوردار است [۹-۱۰]

شکل ۳ یک سیستم AVR را نشان می‌دهد که از چهار قسمت اساسی تشکیل شده است: تقویت کننده، محرک، ژنراتور و سنسور. تمامی قسمت‌های سیستم AVR در مدل‌های معمول دارای تابع تبدیل مرتبه اول با بهره و ثابت زمانی مشخص می‌باشند.

همانطور که در ابتدای این بخش گفته شد، به دلیل اینکه سطح خروجی ولتاژ ژنراتورهای نیروگاهی باید در یک سطح ثابت نگهداشته شود، کنترل کننده‌ای برای سیستم AVR که این مهم را به عهده دارد، طراحی می‌گردد.

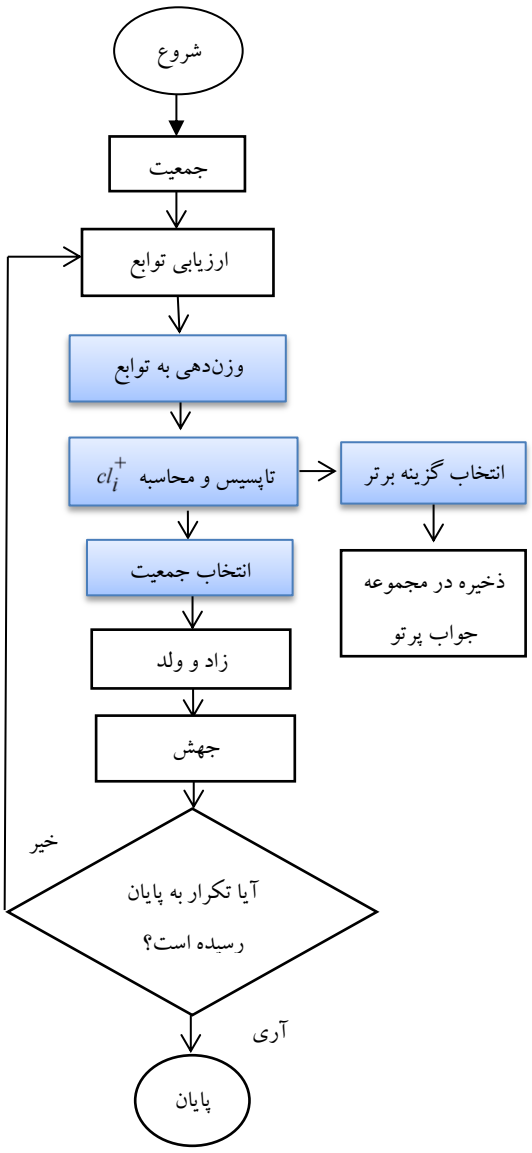
۴- طراحی کنترل کننده فازی

کنترل کننده‌های فازی یکی از پرکاربردترین انواع کنترل کننده‌ها می‌باشند که مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طراحی این نوع از کنترل کننده‌ها، مانند هر سیستم فازی نیاز به ورودی، خروجی، پایگاه قواعد و موتور استنتاج می‌باشد. در کنترل کننده فازی، ورودی‌های سیستم،

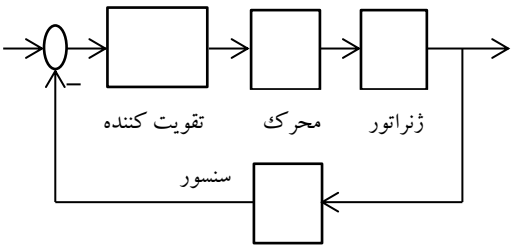
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

سیگنال خطای حالت ماندگار به ورودی پله واحد و مشتق خطای حالت ماندگار بوده و خروجی آن سیگنال کنترلی می‌باشد که در شکل ۴ نشان داده شده است.

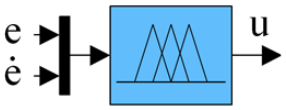
باید توجه داشت که در تعیین توابع ورودی خطای ماندگار، یک تابع مجزا حول نقطه صفر تعریف نمی‌شود تا از کاهش شدید بهره



شکل ۲: فلوچارت روش GMADM



شکل ۳: سیستم خودکار تنظیم ولتاژ



شکل ۴: کنترل کننده فازی

کنترلی هنگامی که خطای ماندگار به صفر نزدیک می‌شود جلوگیری گردد. این مسئله برای مشتق خطا پیش نمی‌آید.

قوانین فازی نیز با توجه به کاهش و افزایش سگنال‌های ورودی تعریف می‌شوند؛ بطور مثال اگر خطا کمی مثبت بوده و مقدار مشتق خطا ناچیز باشد، باید سیگنال کنترلی (خروجی فازی) کمی مثبت باشد.

۴-۱- طراحی کنترل کننده فازی برای سیستم AVR غیرخطی

کنترل کننده‌های بسیاری برای سیستم AVR طراحی شده است:

۱) کنترل کننده PID کسری به روش چند هدفه آشوبناک [۱۱].

۲) کنترل کننده PID کسری به روش ازدحام مورچگان آشوبناک [۱۲].

۳) کنترل کننده PID با روش ترکیبی ژنتیک و کاوش باکتریایی [۱۳].

۴) کنترل کننده PID با روش ازدحام مورچگان [۱۴].

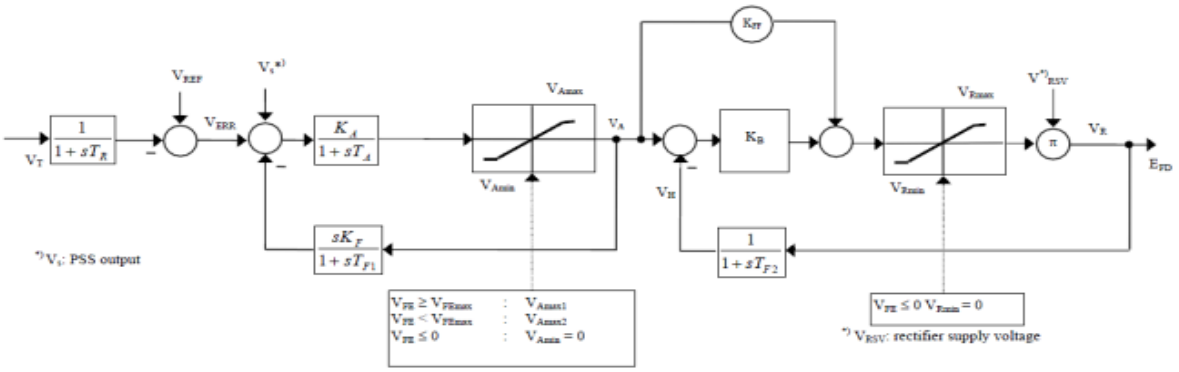
۵) کنترل کننده PID با روش ازدحام پرندگان [۱۵].

اما نکته قابل توجه در این طراحی ها این است که در همه آنها یا مدل خطی سیستم در نظر گرفته شده است یا طراحی به صورت تک هدفه می‌باشد. سیستم AVR مورد بحث در این مقاله دارای محرک غیرخطی است که در شکل ۵ مشاهده می‌شود و پارامترهای آن در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای سیستم تحریک

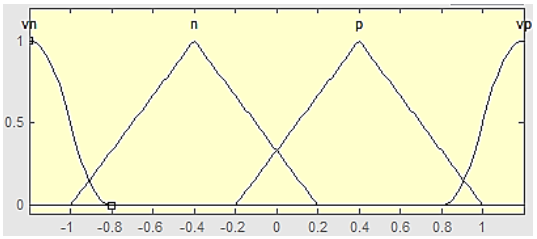
پارامتر	مقدار
T_A	۱ ms
T_{F1}	۴۰۰ ms
T_{F2}	۱۰۰ ms
T_R	۱۲ ms
K_A	۴۰۰۰
K_F	۱۶,۷
K_{FF}	۱
K_B	۱
E_{FDmax}	۶,۳۸ p.u.
V_{FEmax}	۴,۳۹۹ p.u.
V_{Amax2}	۶,۳۸ p.u.
V_{Amax1}	۳,۵۰۶ p.u.
V_{Rmax}	۶,۳۸ p.u.
V_{Rmin}	−۵,۱۰۱ p.u.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

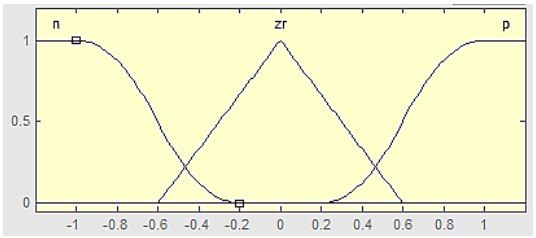


شکل ۵: سیستم تحریک IEEE-ST1A

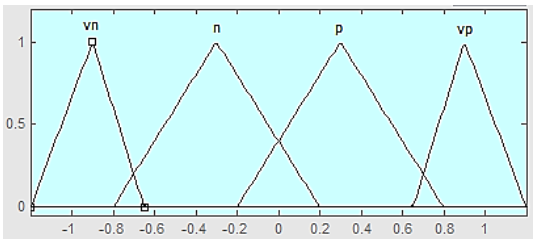
اکنون توابع عضویت کنترل کننده فازی را تعریف می‌کنیم.



شکل ۶: سیگنال خطا



شکل ۷: سیگنال مشتق خطا



شکل ۸: سیگنال کنترلی

قوانین فازی به شرح زیر است:

جدول ۲: قوانین فازی

d_e	e			
	vn	n	p	vp
n	vn	vn	n	p
zr	vn	n	p	vp
p	n	p	vp	vp

نمادهای e، d_e، p، vp، zr، n و vn به ترتیب نشان دهنده کلمات خطا، مشتق خطا، مثبت، خیلی مثبت، صفر، منفی و خیلی منفی است.

برای بهینه سازی، کروموزوم‌های روش پیشنهادی نقاط حدی توابع ورودی و خروجی فازی است که قرینگی در آن حفظ شده است و توابع هدف به صورت زیر تعریف می‌شود که پس از بهینه سازی توابع هدف با روش GMADM، مجموعه Pareto front در شکل زیر نشان داده می‌شود (OS، t_s و e_{ss} به ترتیب فراجهش، زمان نشست و خطای حالت ماندگار است).

$$\begin{cases} f1=\exp(OS) \\ f2=t_S \\ f3=1+e_{ss} \end{cases} \xrightarrow{S.to} e_{ss} < 0.005 \qquad (۱۱)$$

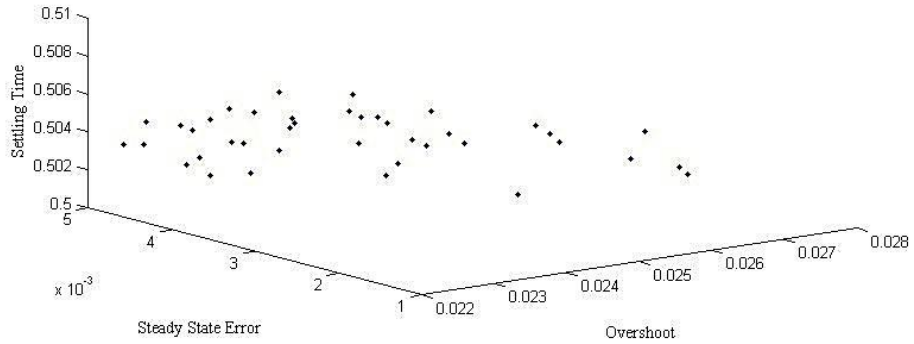
تمام نقاط شکل زیر جواب‌های بهینه هستند. انتخاب بهترین جواب از بین جواب‌های بهینه بستگی به تصمیم گیرنده دارد. یکی از این جواب‌ها به شرح زیر است.

جدول ۳: جواب بهینه

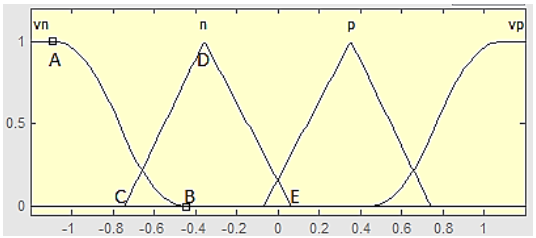
پارامتر	مقدار بهینه	پارامتر	مقدار بهینه
A	−۱,۰۹۳۷۵	I	−۰,۰۵۶۲۵
B	−۰,۴۴۳۷۵	J	۰,۵۸۱۲۵
C	−۰,۷۴۳۷۵	K	−۱,۲
D	−۰,۳۵۶۲۵	L	−۰,۸۸۷۵
E	۰,۰۶۸۷۵	M	−۰,۶۱۲۵
F	−۰,۹۰۶۲۵	N	−۰,۷۶۲۵
G	۰,۰۲۵	O	−۰,۲۴۳۷۵
H	−۰,۶۱۸۷۵	P	۰,۱۰۶۲۵

مقادیر بهینه در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

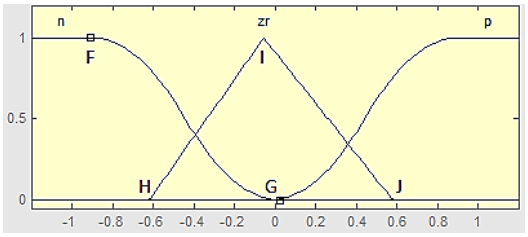
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]



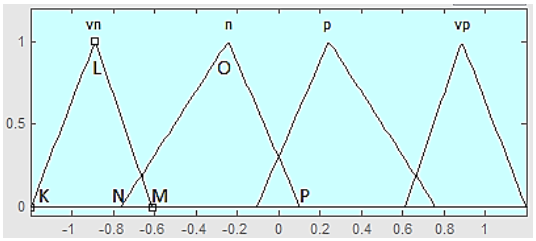
شکل ۹: Pareto front



شکل ۱۰: توابع عضویت بهینه خطا

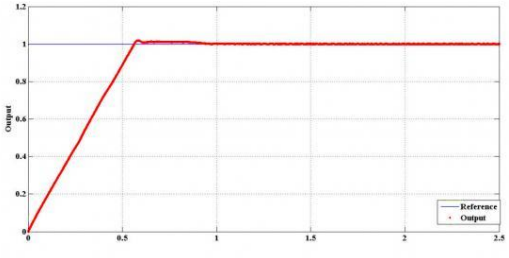


شکل ۱۱: توابع عضویت بهینه مشتق خطا



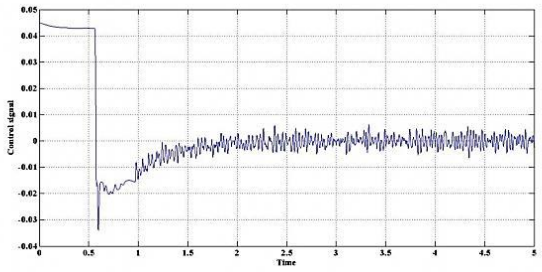
شکل ۱۲: توابع عضویت بهینه سیگنال کنترلی

بهترین خروجی AVR غیرخطی و همچنین سیگنال کنترلی که از توابع عضویت بهینه فوق بدست آمده است در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.



شکل ۱۳: بهترین خروجی AVR غیرخطی

$$OS = 0.0263, t_S = 0.5032, e_{SS} = 0.001556$$



شکل ۱۴: سیگنال کنترل

با توجه به شکل فوق و اعداد توابع بهینه، سیستم دارای عملکرد گذرا و حالت ماندگار مناسبی است.

سیگنال کنترل نیز از یک مقدار ثابت شروع شده و در نهایت خول نقطه صفر تغییرات پی در پی دارد. این تغییرات ناشی از غیرخطی بودن سیستم است.

مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی توانسته به خوبی شرایط مد نظر را برآورده سازد و کارایی لازم را دارا می‌باشد. همانگونه که پیش از این اشاره شد، به دلیل اینکه اکثر مطالعات و مقالات قبلی سیستم خطی را در نظر گرفته‌اند، نمی‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را با نتایج دیگر مقالات مقایسه کرد.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک روش بهینه سازی چند معیاره به نام تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی ارائه شد. اساس روش پیشنهادی بر الگوریتم ژنتیک استوار بود که عملگر انتخاب آن تغییر کرده بود. به عبارت دیگر، مقادیر توابع هدف، ناشی از کروموزوم‌ها، در یک ماتریس قرار می‌گیرند و به روش آنتروپی وزن دهی شده و به روش تاپسیس گزینه مناسب انتخاب می‌گردد. چون الگوریتم چند هدفه (چند شاخصه) است یک مجموعه جواب بهینه خواهیم داشت. پس از بیان الگوریتم پیشنهادی، یک کنترل کننده فازی با رویکرد طراحی شد. کنترل کننده طراحی شده بر روی سیستم خودکار تنظیم ولتاژ غیرخطی که یک سیستم مهم برای ثابت نگهداشتن سطح ولتاژ خروجی ژنراتور است، پیاده سازی گردید. نتایج شبیه سازی نشان می‌داد که کنترل کننده بهینه طراحی شده با روش تصمیم گیری چند شاخصه ژنتیکی توانسته بر عملکرد گذرا و مانای سیستم تأثیر مطلوب گذاشته و بطور کلی خواسته‌ها را برآورده سازد.

مراجع

[۱] خاکی صدیق علی، "*سیستم‌های کنترل خطی*"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه پیام نور، ۱۳۸۱.

[2] Ayala Helon Vicente Hultmann, and Coelho Leandro Dos Santos, "Tuning of PID Controller Based on a Multiobjective Genetic Algorithm Applied to a Robotic Manipulator", *Expert Systems with Applications*, pp. 8968-8974, 2012.

[3] Zolfagharian Ali, Noshadi Amin, Md.Zain Mohd Zarhamdy, and Abu.Bakar Abd Rahim, "Practical multi-objective controller for preventing noise and vibration in an automobile wiper system", *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 8, pp. 54-68, 2013.

[4] Reynoso-Meza Gilberto, Blasco Xavier, Sanchis Javier, and M.Herrero Juan, "Comparison of design concepts in multi-criteria decision-making using level diagrams", *Information Sciences*, Vol. 221, pp. 124–141, 2012.

[5] Behroozsarand Alireza, and Shafiei Sirous, "Optimal control of distillation column using Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm-II", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 24, pp. 25-33, 2010.

[6] Tang K.S, Man K.F, Chen G, and Kwong S, "A GA-optimized fuzzy PD+I controller for nonlinear systems", *The 27th Annual Conference of the IEEE*, 2001.

[7] Deb Kalyanmoy, "*Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*", Interscience Series in Systems and Optimization, John Wiley and Sons, 2001.

[۸] اصغرپور محمد جواد، "*تصمیم گیری‌های چند معیاره*"، چاپ هفتم، تهران، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.

[9] IEEE Power Engineering Society, "*IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*", IEEE Std 421.5-1992, 2006.

[10] Saadat Hadi, "*Power System Analysis*", New York: McGraw-Hill, 1999.

[11] Pan Indranil, and Das Saptarshi, "Frequency domain design of fractional order PID controller for AVR system using chaotic multi-objective optimization", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 51, pp. 106-118, 2013.

[12] Tang Yinggan, Cui Mingyong, Hua Changchun, Li Lixiang, and Yang Yixian, "Optimum design of fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller for AVR system using chaotic ant swarm", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39 (8), pp. 6887-6896, 2012.

[13] Kim Dong Hwa, "Hybrid GA–BF based intelligent PID controller tuning for AVR system (linear)", *Applied Soft Computing*, Vol. 11 (1), pp.11-22, 2011.

[14] Zhu Hui, Li Lixiang, Zhao Ying, Guo Yu, and Yang Yixian, "CAS algorithm-based optimum design of PID controller in AVR system (linear)", *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 42 (2), pp. 792-800, 2009.

[15] V. Mukherjee, and S.P. Ghoshal, "Intelligent particle swarm optimized fuzzy PID controller for AVR system", *Electric Power Systems Research*, Vol. 77 (12), pp. 1689-1698, 2007.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-10]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1392.7.4.3.8]