Archive of SID

بهینه سازی همزمان چند تابع هدف با الگوریتم ژنتیک - فازی و کاربرد آن در کنترل سرعت موتور القایی

بهزاد میرزائیان * ، مهدی معلم ** ، ولی اله طحا نی*** و کارو لوکس***

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فنی،دانشگاه تهران

(دریافت مقاله:۷۸/۵/۳ - دریافت نسخهٔ نهایی ۸۰/۲/۲۹)

چکیده – *در این مقاله یک روش جدید براساس الگوریتم ژنتیک - فازی برای بهینه سازی همزمان چند تابع هدف ارائه شده است . از الگوریتم ارائه شده برای تعیین نقطهٔ بهینهٔ دو تابع هدف ریاضی غیر خطی و طراحی و تنظیم بهینهٔ ضرایب بهره یک کنترل کنندهٔ کلاسیک PI در روش کنترل اسکالری یک موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری[1] به عنوان یک سیستم غیر خطی استفاده شده است. برای تعیین و تنظیم ضرایب بهرهٔ کنترل کننده پاسخ سیستم به ورودی پله در نظر گرفته شده و زمان خیز[2] (Tr)، ماکزیمم جهش[3] (Mp)، زمان تثبیت[4] (Ts) و خطای حالت ماندگار[5] (Ess) به عنوان چهار تابع هدف بهینه می شوند. نتایج حاصله از روش جدید ارائه شده در این مقاله با نتایج حاصل از به کارگیری روش سعی و خطا [۱۳ و۱۴] در تنظیم ضرایب کنترل کننده ها و روش فازی وزنی[۴] در تعیین نقطهٔ بهینهٔ دو تابع ریاضی مقایسه شده است . از امتیازات برجستهٔ الگوریتم بهینه سازی ارائه شده این است که می توان درجهٔ اهمیت توابع هدف را از قبل مشخص کرده و یا به صورت فازی با توجه به بهبود تابع هدف در روند بهینه سازی تعیین کرد. نتایج به دست آمده نشان دهندهٔ عملکرد مناسب روش ارائه شده است .*

واژگان کلیدی: *بهینه سازی همزمان چند تابع هدف، روش ژنتیک- فازی، کنترل سرعت موتور القایی*

A New Multi-Objective Optimization Method Based on Genetic-Fuzzy Algorithm and its Application in Induction Motor Speed Control

B. Mirzaeian* M. Moallem V. Tahani*** Caro Lucas *****

Department of Electrical and Computer Engineering, Isfahan University of Technology

Department of Electrical Engineering, Tehran University

ABSTRACT- *In this paper, a new method based on genetic-fuzzy algorithm for multi-objective optimization is proposed. This method is successfully applied to several multi-objective optimization problems. Two examples are presented: the first example is the optimization of two nonlinear mathematical functions and the second one is the design of PI controller for control of an induction motor drive supplied by Current-Source-Inverter (CSI). Step response of the system is considered and controller parameters are designed based on multi-objective optimization technique. Rise-time, maximum over-shoot, settling time and steady state error are considered as objective functions. The simulation results of the new method for induction motor speed control and optimization of two nonlinear mathematical functions are compared with the results obtained from other methods [4,14,15], which shows better performance.*

Keywords: *Multi-Objective optimization, Genetic-Fuzzy Method, Induction Motor Speed Control*

---

* دانشجوی دکترا ** دانشیار *** استاد

www.SID.ir

Archive of SID

فهرست علائم

$C_m^o(S_{L,i})$	مقدار برازندگی کروموزم L ام برای تابع هدف mام در مرحله iام اجرای الگوریتم ژنتیک - فازی	S_L	کروموزم L ام
$C_m(S_{L,i})$	عدد برازندگی تابع هدف m ام در مرحله i ام الگوریتم ژنتیک- فازی	Tr	زمان خیز
Ess	خطای حالت دائمی	Ts	زمان تثبیت
f_{objm}^{min} و f_{objm}^{max}	مقادیر مینیمم و ماکزیمم تابع هدف m ام	T_c	ثابت زمانی ،کنترل کننده کلاسیک PI
$F_{objm}(S_{L,i})$	مقدار تابع هدف m ام برای کروموزم S_L در مرحله i ام الگوریتم ژنتیک- فازی	Y_d	خروجی مطلوب (سرعت مطلوب موتور)
G_C	ضریب بهره کنترل کننده کلاسیک PI	$Y(t_{final})$	خروجی واقعی (سرعت واقعی موتور)
K_m	درجهٔ اهمیت تابع هدف m ام	μ_m	میانگین تابع هدف m ام در جمعیت دنباله $\{S_L\}_{L=1}^N$
Mp	ماکزیمم جهش	$\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m)$	درجه عضویت تابع هدف m در مجموعه‌های فازی
$P_{L,i}$	احتمال تولید فرزند جدید از کروموزم L ام در مرحله i ام الگوریتم ژنتیک – فازی	γ_m	مجموع مقادیر مثبت $C_m^0(S_{L,i})$

۱- مقدمه

بهینه سازی همزمان چند تابع هدف یکی از مسائل موردتوجه پژوهشگران، خصوصاً طراحان درایوهای الکتریکی در سالهای اخیر بوده است . محققانی همچون بیلمن و زاده [۱]، زیمرمن [۲] ساکاوا[۳]، روش فازی را برای بهینه سازی توابع هدف به کار گرفتند. النو و وایت [٤] از وزنهای فازی برای ترکیب چند تابع هدف در روند بهینه سازی استفاده کردند. اسچافر[٥]، کارساو[٦] ، فیلمینگ و فونسکا [۷- ۹] از روش ژنتیک در بهینه سازی همزمان چند تابع هدف استفاده کردند. ترکیب توابع هدف با وزنهای ثابت یا تصادفی و سپس استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی موضوعی است که محققانی همچون کاتمن [۱۰] ، مورتا [۱۱]، بورفی [۱۲] مورتا و هیسائو [۱۳] به کارگرفتند.

در این مقاله یک روش جدید برمبنای الگوریتم ژنتیک با استفاده از وزنهای فازی برای هر تابع هدف برای افزایش سرعت همگرانی روش به منظور بهینه سازی همزمان چند تابع هدف ارائه شده است . به منظور نشان دادن کارایی روش بهینه سازی ارائه شده ، از آن در بهینه سازی دو تابع غیر خطی ریاضی و تنظیم بهینهٔ ضرایب بهرهٔ کنترل‌کنندهٔ کلاسیک PI در روش کنترل اسکالر موتور القایی استفاده شده است . نتیجهٔ حاصل از به کارگیری روش بهینه سازی ژنتیک- فازی برای توابع هدف ریاضی با روش فازی وزنی [٤] و عملکرد موتور در اثر به کارگیری ضرایب بهرهٔ بهینهٔ کنترل کنندهٔ به دست آمده از روش جدید با ضرایبی که به صورت سعی و خطا تعیین می شوند[١٥،١٤]، مقایسه شده اند. نتایج نشان می‌دهند که الگوریتم پیشنهاد شده در این مقاله توانسته تمامی توابع هدف در نظر گرفته شده را نسبت به روشهای قبلی بهبود بخشد.

۲- شرح روش

در هر مسئلهٔ بهینه سازی دو ابزار جستجو و تحلیل مورد نیاز است .جستجو شامل تکنیکهای محاسباتی برای یافتن نقطهٔ

www.SID.ir

Archive of SID

بهینه سراسری و تحلیل ابزاری است که برای طراحی محاسبات و سنجش تابع هدف به کار برده می شود. اگر این دو ابزار وابسته به یکدیگر باشند فقط محاسبات سری امکانپذیر بوده و در صورتی که مستقل از هم باشند روشهای محاسبات موازی می تواند به کار رود. روش ژنتیک – فازی ارائه شده در این مقاله از روشهای محاسباتی موازی است

۲-۱- معرفی الگوریتم ژنتیک – فازی

الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای بهینه سازی غیرتحلیلی یا تکاملی[۶] است که در مسائل بهینه سازی و طراحی کاربردهای زیادی پیدا کرده است . در واقع این الگوریتم یک روش محاسباتی تکاملی است که از فرایند های تکاملی الهام می گیرد. فرایند تکاملی یک مسئلهٔ بهینه سازی استوار بر یک جمعیت است. گلدبرگ روشهای محاسباتی موجود را با روش محاسباتی تکاملی براساس الگوریتم ژنتیک مقایسه کرده و نتیجه می گیرد که این روش یک روش مقاوم بهینه سازی تصادفی جهت‌دار است . الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه از کرموزومها شروع کرده و به سمت یک جمعیت بهینه حرکت می کند. این الگوریتم یک ابزار جستجوست که توسط یک تابع هدف به ابزار تحلیل ارتباط پیدا می کند. در ادامه الگوریتم ژنتیک – فازی معرفی می شود.

الگوریتم ژنتیک – فازی برای بهینه سازی همزمان چند تابع هدف

هدف، تعیین بردار X به گونه ای است که M تابع هدف را بهینه سازد، پس مسئلهٔ بهینه سازی به صورت زیر قابل بیان است

$$\text{Maximize}[f_1(x), f_2(x), ..., f_M(x)]$$
$$\text{S.T.} \quad x_{io} \le x_i \le x_{if} \quad i = 1,..., n \qquad (۱)و(۲)$$

جواب X یک بردار n بعدی است که به صورت زیر درنظر گرفته می شود

$$X = [X_1, X_2, ..., X_n] \;;\; X \in R^n \qquad (۳)$$

فرض می شود که تعداد جمعیت N بوده و طی مراحل اجرای الگوریتم ثابت بماند . هر حل مسئلهٔ بهینه سازی چند تابع هدف به صورت یک کروموزم S_L با طول L درنظر گرفته می‌شود. بنابراین برای مجموعهٔ دنباله های $\{S_L\}_{L=1}^{N}$ در مرحلهٔ i ام اجرای الگوریتم $P_{L,i}$، احتمال اینکه فرزند جدید از کروموزم L ام در مرحلهٔ i ام تولید شود، نامیده شده که در ادامه تعریف شده است . ابتدا مقدار برازندگی هر کروموزم به صورت زیر تعریف می شود

$$C_m^0(S_{L,i}) = f_{objm}(S_{L,i}) - \mu_m$$
$$m=1,\ldots,M \qquad L=1,\ldots,N \qquad (٤)$$

عدد برازندگی به صورت زیر برای هر تابع هدف در مرحلهٔ i ام اجرای الگوریتم تعریف می شود

$$C_m(S_{L_1 i}) = \begin{cases} \dfrac{C_m^0(S_{L_i})}{\gamma_m} & \text{if} \quad C_m^0(S_{L_1 i}) > 0 \\ 0 & \text{if} \quad C_m^0(S_{L_1 i}) \le 0 \end{cases} \qquad (٥)$$
$$L=1,\ldots,N \qquad m=1,\ldots,M$$

با توجه به معادله‌های ارائه شده، $P_{L_1 i}$ به صورت زیر تعریف می‌شود

$$P_{L_1 i} = \frac{\prod_{m=1}^{M}\left[C_m(S_{L,i})\right]^{K_m}}{\sum_{L=1}^{N}\left[\prod_{m=1}^{M}\left[C_m(S_{L,i})\right]^{K_m}\right]} \qquad (٦)$$

K_m : درجهٔ اهمیت تابع هدف m ام است که به صورت فازی تعریف می شود، این کمیت در ادامه معرفی شده است.

۲-۲- ارائهٔ یک رابطه برای تعیین ضریب K_m با استفاده از مفاهیم فازی

با استفاده از مفا هیم فا زی به صورت زیر ضریب K_m تعیین می شود

$$u_m \tilde{f}_{objm}(x) \qquad m = 1,...,M \qquad X \in R^n \qquad (٧)$$

www.SID.ir

Archive of SID

$$\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m)=\begin{cases}0 & \text{if} \quad u_m \geq f_{objm_m}^{max} \\ \dfrac{-u_m+f_{objm}^{max}}{f_{objm}^{max}-f_{objm}^{min}} & \text{if} \quad f_{objm}^{min} \leq u_m \leq f_{objm}^{max} \\ 1 & \text{if} \quad u_m \leq f_{objm}^{min}\end{cases} \tag{۸}$$

تابع $\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m)$ فضای R را به ناحیه بسته [۱و۰] نگاشت می‌کند. f_{objm}^{min}و f_{objm}^{max} مقادیر مینیمم و ماکزیمم تابع هدفm ام هستند که به صورت زیر تعریف می شوند

$$f_{objm}^{min}=\min_{X}[f_{objm}(x)] \qquad X_{io} \leq X_i \leq X_{if} \quad i=1,..,n \tag{۹}$$

$$f_{objm}^{max}=\max_{X}[f_{objm}(x)] \qquad X_{io} \leq X_i \leq X_{if} \quad i=1,..,n \tag{۱۰}$$

ضریب α_m ، به صورت زیر تعریف می شود

$$\alpha_m=\frac{wf_{objm}}{\sum_{m=1}^{M} wf_{objm}} \qquad m=1,...,M \tag{۱۱}$$

$$wf_{objm}=\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m) \tag{۱۲}$$

با توجه به معادله های بالا، وزن فازی به کار رفته در فرایند بهینه سازی به صورت زیر تعریف می شود

$$K_m=\alpha_m \qquad m=1,...,M \tag{۱۳}$$

معادلهٔ (۱۳) نشان می دهد که کروموز مهایی که بتوانند مقادیر توابع هدف را به مقادیر بهینهٔ انفرادی خود در فضای شدنی حل مسئله نزدیکتر سازند شانس بیشتری برای انتخاب در تولید نسل جدید را دارند ، ضمن اینکه به کرو موزمهای ضعیفتر نیز شانس انتخاب داده شده است. بر اساس مطالب شرح داده شده مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک- فازی برای بهینه سازی همزمان چند تابع هدف به صورت زیر است

۱- تولید جمعیت اولیه از دنباله ها (کروموزمها)، ژنهای هر کروموزم به طور تصادفی انتخاب می شوند.(چون هر کروموزم یک کاندیدای حل مسئلهٔ بهینه سازی است، لذا در تولید تصادفی آن باید محدودیتهای موجود در مسئله را در نظر گرفت.)

۲- تعیین مقدار برازندگی و عدد برازندگی برای هر تابع هدف بر اساس معادله های (٤) و(٥) سپس تعیین $P_{L,i}$ بر ا ساس معادلهٔ (٦).

۳- انتخاب تصادفی دنباله ها (کروموزمها) با استفاده از روش چرخ رولت[۷] بر اساس تابع احتمال $P_{L,i}$.

٤- تولید کروموزمهای جدید از کروموزمهای انتخاب شده با استفاده از عملگرهای جابه جایی و جهش. (اگر کروموزمی محدودیتهای مسئله را براورده نکرد ، کنار گذاشته شده و کروموزم دیگری تولید می شود.)

٥- جایگزین کردن نسل جدید به جای نسل قدیم.

٦- به مرحله (۲) بروید مگر اینکه مراحل الگوریتم پایان یافته یا ماکزیمم تابع احتمال $P_{L,i}$ پس از چند نسل متوالی حتی با تغییر احتمال جهش، تغییرات چندانی نداشته باشد.

۳- نتایج شبیه سازی

در این بخش عملکرد الگوریتم ژنتیک- فازی ارائه شده در بهینه سازی دو تابع هدف ریاضی و همچنین طراحی و تنظیم ضرایب بهرهٔ کنترل کنندهٔ کلاسیک PI در کنترل سرعت یک موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری مورد استفاده قرار گرفته و نتایج حاصله با روش فازی وزنی[٤] در خصوص توابع هدف ریاضی و روش سعی و خطا[١٤ و١٥] در مورد کنترل سرعت موتور القایی مقایسه شده اند.

۳-۱- کاربرد روش بهینه سازی ژنتیک- فازی در بهینه‌سازی همزمان دو تابع هدف ریاضی

در این مسئله هدف یافتن بردار X در یک فضای محدود به صورتی است که دو تابع هدف زیر را بهینه سازد

$$f_1(x)=10-\sum_{i=1}^{2}(x_i-7)^2 \qquad 1 \leq x_i \leq 10 \qquad i=1,2 \tag{١٤}$$

$$f_2(x)=900-\sum_{i=1}^{2}\left[(x_i-5)^2-10\cos(2\pi(x_i-5))\right] \tag{١٥}$$

$$1 \leq X_i \leq 10 \qquad i=1,2$$

www.SID.ir

Archive of SID

توابع هدف داده شده درمعادله های (١٤) و (١٥) از مرجع [١٦]گرفته شده اند. نقاط بهینهٔ انفرادی هریک از توابع هدف با استفاده از روش تحلیلی پاول[٨] [١٧ و ١٨] ، به صورت زیر به دست می آیند

$$X_{opt1} = [7 \quad 7]$$
$$X_{opt2} = [5 \quad 5] \qquad (١٦)$$

با استفاده از روش فازی وزنی، النو- وایت [٤] و روش ژنتیک - فازی ارائه شده در بخش دوم نتایج بهینه سازی همزمان دو تابع هدف در جدول(١) آورده شده است.لازم به ذکر است که در روش فازی وزنی [٤] ابتدا توابع هدف توسط وزنهای فازی با یکدیگر ترکیب شده ، سپس تابع هدف به دست آمده با روش ژنتیک بهینه می شود. برای تعیین درجه اهمیت توابع هدف در روش ژنتیک - فازی از معادله‌های ارائه شده در بخش (٢-٢) استفاده می شود و مقادیر ماکزیمم و مینییمم هر یک از توابع هدف با استفاده از روش تحلیلی پاول به دست می آیند.

٣-٢- طراحی و تنظیم بهینهٔ ضرایب بهرهٔ کنترل کنندهٔ کلاسیک PI با استفاده از روش ژنتیک - فازی برای کنترل دور موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری (CSI)در روش کنترل اسکالر

از الگوریتم ژنتیک - فازی شرح داده شده برای طراحی بهینهٔ ضرایب بهرهٔ کنترل کنندهٔ کلاسیک نوع PI بر اساس چند تابع هدف که در روش کنترل اسکالر یک موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان به کار گرفته شده، استفاده می شود. نمودار جعبه‌ای (١) سیستم موتور- درایو القایی را نشان می‌دهد.در این سیستم خروجی اینورتر امواج شبه مربعی شش پالسه ایده ال فرض شده اند و شبیه سازی موتور بر اساس معادله های دو محوری پارک و برای هر تعداد دلخواه از هارمونیکهای موجود در شکل موج جریانهای تغذیه کننده موتور انجام شده است. در این شبیه سازی موتور القایی به همراه بانک خازنی متصل در دو سرآن مد نظر قرار گرفته و معادله های حالت سیستم با شش متغیر حالت به دست آمده است ، سپس معادله های الکتریکی و معادلهٔ مکانیکی موتور در حوزهٔ زمان حل می شوند.جزئیات بیشتر در مرجع [١٤ و ١٥] آورده شده است .

کنترل کننده سرعت در نمودارجعبه ای (١) که یک کنترل کننده کلاسیک PI است، دارای تابع تبدیل زیراست

$$G(S) = (1 + \frac{1}{STc}).G_C \qquad (١٧)$$

هر کاندیدای حل مسئلهٔ بهینه سازی به صورت یک کروموزم به شکل زیر در نظر گرفته می شود

Speed	Controller
Gc	Tc

ضرایب کنترل کنندهٔ PI براساس پاسخ سیستم به ورودی

$$Ya = a.u(t) \qquad a>0 \qquad (١٨)$$

به گونه ای تنظیم می‌شود که مشخصه های پاسخ سیستم یعنی T_r ، M_p و T_s، Ess بهینه شوند. به این منظور توابع هدف به صورت زیر تعریف می شوند

$$F_{obj1} = -(T_r / M_T + p)$$
$$F_{obj2} = -(T_s / M_T + p)$$
$$F_{obj3} = -(M_p / M_E + p)$$
$$F_{obj4} = -(E_{ss} / M_E + p) \qquad (١٩)$$

فاکتورهای M_T و M_E برای هم واحد سازی به کار رفته اند.P، ضریب جریمه برای توابع هدف است .

برای پاسخهایی که ناپایدار هستند یا در فاصلهٔ زمانی M_T تثبیت نشوند، مقادیر مشخصه های پاسخ سیستم و ضریب جریمهٔ P طبق جدول (٢) درنظر گرفته می شوند.

در جدول (٢)، E_p به صورت زیر تعریف می‌شود

$$E_p = Y_d - Y(t_{final}) \qquad (٢٠)$$

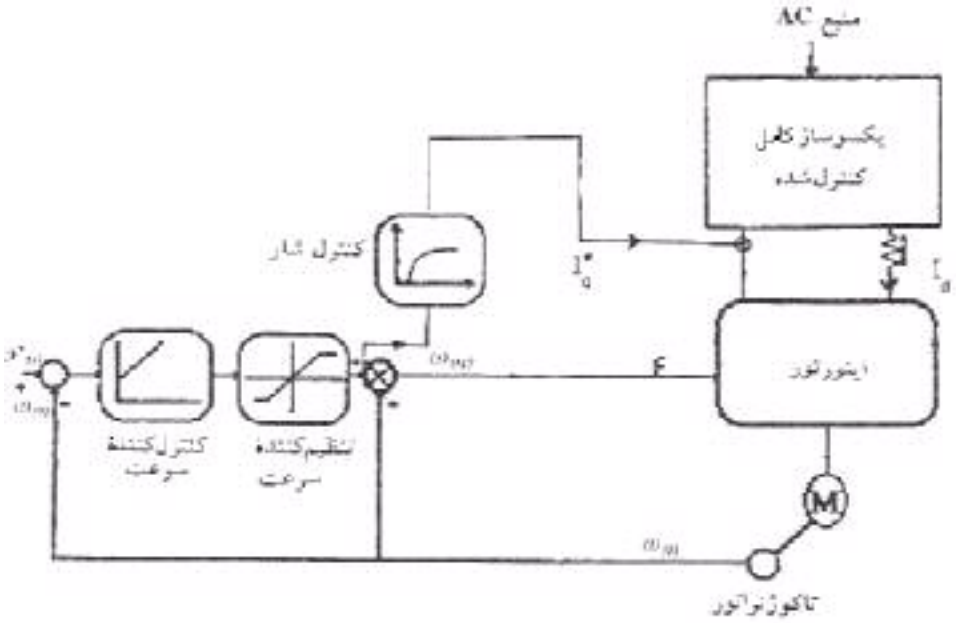
K_1، K_2، K_3 و K_4 ضرایب نشان دهندهٔ درجهٔ اهمیت پارامترهای مشخصه پاسخ سیستم هستندکه بر اساس معادله‌های بخش (٢-٢) به صورت فازی به گونه ای تعیین می‌شوند که کروموزمهایی که بتوانند توابع هدف را به مقادیر بهینه انفرادی خود نزدیکتر کنند شانش بیشتری برای انتخاب در نسل بعدی

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱- نتایج بهینه سازی دو تابع هدف

نام روش	x_{opt1}	x_{opt2}	$F_{obj1}(x_{opt})$	$F_{obj2}(x_{opt})$	درصد نزدیکی به مقدار بهینه انفرادی	
ژنتیک-فازی	7.0	6.0	9.0	915.0	F_{obj1}	90%
					F_{obj2}	99.45%
فازی وزنی [٤]	6.0	6.0	8.0	918.0	F_{obj1}	80%
					F_{obj2}	99.78%



شکل ۱- نمودار جعبه‌ای روش کنترل اسکالر موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان

جدول ۲- تعیین مشخصه های پاسخ سیستم در حالت ناپایدار و تثبیت نشده

نوع حالت	E_{ss}	T_s	T_r	Mp	P
حالت تثبیت نشده	E_p	M_T	M_E	0.0	2
جالت ناپایدار	Y_d	M_T	T_r	Y_d	6

را داشته باشند ، ضمن اینکه به کروموزمهای ضعیفتر نیز شانس انتخاب داده می‌شود. محدوده‌های قابل قبول برای متغیرهای مورد نظر، معادله‌های (۹) و (۱۰)، با توجه به مشخصات موتور مورد نظر از طریق بهینه سازی انفرادی هر یک از توابع هدف با استفاده از شبیه سازی رایانه ای درایو مورد نظر به دست می‌آیند، شکل (۱). در بهینه سازی انفرادی

جدول۳ – محدوده‌های ضرایب کنترل کنندهٔ کلاسیک

	کنترل کنندهٔ سرعت	
Gc	Max.	50
	Min.	1
Tc	Max.	1
	Min.	0.01

www.SID.ir

Archive of SID

هر یک ازتوابع هدف ، درجهٔ اهمیت سایر توابع هدف صفر در نظر گرفته می‌شود. محدوده‌های به دست آمده از روش بالا برای موتور با مشخصات جدول (٤) برای ضریب بهره‌های کنترل کنندهٔ PI در جدول (٣) داده شده اند.

با درنظر گرفتن توابع هدف، معادلهٔ (١٩) و شکل هر کروموزم که کاندیدای حل مسئلهٔ بهینه سازی است با به کارگیری الگوریتم ژنتیک- فازی شرح داده شده، بخش(٢-١) و استفاده از وزنهای فازی، پارامترهای کنترل کننده به گونه ای که مشخصه های پاسخ دینامیکی موتور بهینه شوند، محاسبه و تعیین می شوند.

به عنوان مثال برای یک موتور القایی با مشخصات داده شده در جدول (٤)، ضرایب بهینه کنترل کننده های PI مطابق جدول (٥) به دست می‌آیند.

از ضرایب کنترلی ارائه شده در جدول (٥) برای کنترل سرعت موتور القایی با مشخصات جدول (٤) به روش کنترل اسکالر مطابق با نمودار (١) استفاده می شود. در شکلهای (٢) تا (١٠) مشخصه های دینامیکی پاسخ موتور با به کارگیری ضرایب بهرهٔ کنترل کنندهٔ بهینهٔ جدول (٥) و ضرایب کنترلی که از روش سعی و خطا [١٥،١٤] به دست آمده اند، مقایسه شده‌اند.

در شکل (٢) ، مشخصه های حالت گذرای موتور القایی کنترل شده با روش اسکالرنشان داده شده است. در این شکلها موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنای داده شده به کنترل کننده ٦٠٠ دور در دقیقه است. از ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی ژنتیک- فازی در سیستم موتور- درایو استفاده شده است. در این شکل سرعت موتورو گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، نسبت به زمان نشان داده شده اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

در شکل (٣)، مشخصه های حالت گذرای موتور القایی کنترل شده با روش اسکالرنشان داده شده است. در این شکلها موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنای داده شده به کنترل کننده ٦٠٠ دور در دقیقه است. از ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی ژنتیک - فازی در سیستم موتور- درایو استفاده شده است. در این شکل سرعت موتور، گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، ولتاژ فاز (a) استاتور و جریان فاز (a) استاتور نسبت به زمان نشان داده شده‌اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

در شکل (٤) ، مشخصه های حالت گذرای موتور القایی کنترل شده با روش اسکالر نشان داده شده است. در این شکلها موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنای داده شده به کنترل کننده ٦٠٠ دور در دقیقه است. از ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش سعی و خطا [١٥،١٤] در سیستم موتور- درایو استفاده شده است. در

جدول ٤ -:مشخصات موتور القائی

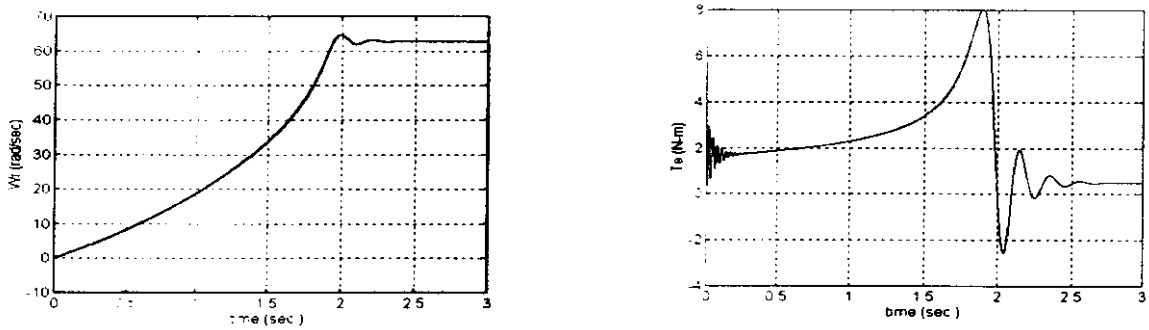
$R_r(\Omega)$	$L_{Ls}(mH)$	$L_{Lr}(mH)$	$L_m(H)$
0.355	2.46	2.465	0.0692
P (تعداد قطبهای ماشین)	Wr (rpm) (سرعت نامی)	J (kg-sec^2/rad)	
4	600	0.12	

www.SID.ir

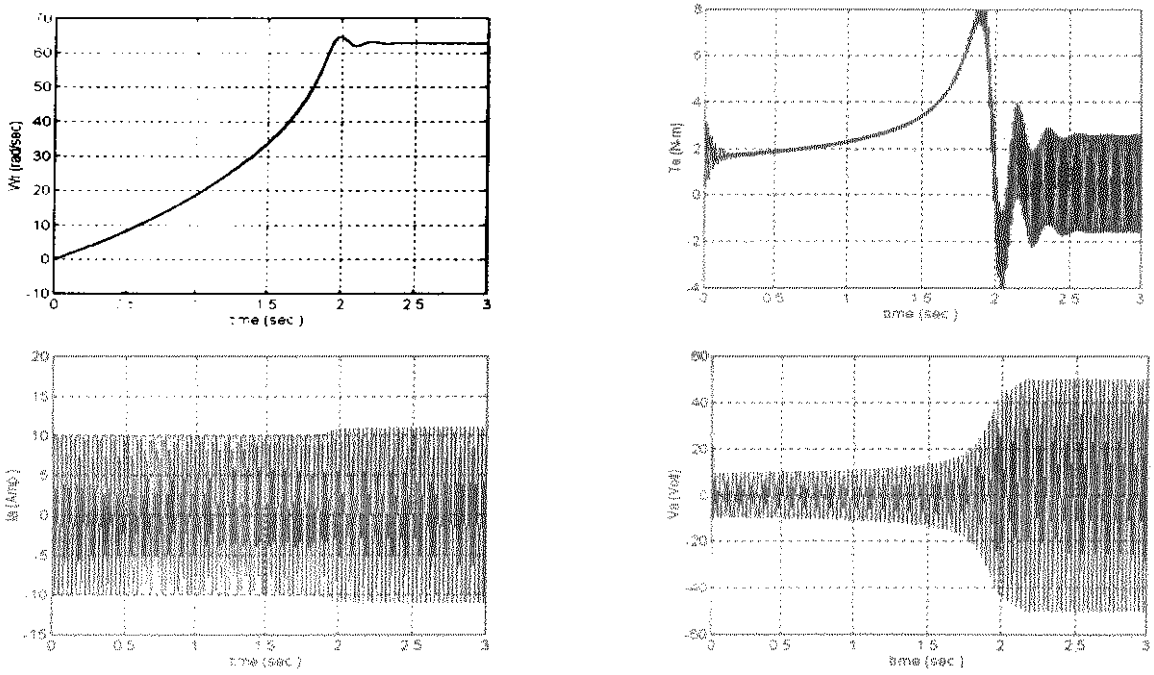
Archive of SID

جدول ۵ - ضرایب کنترل کننده های کلاسیک بدست آمده از الگوریتم ژنتیک-فازی

	کنترل کنندهٔ سرعت
Gc	1.375
Tc	0.125



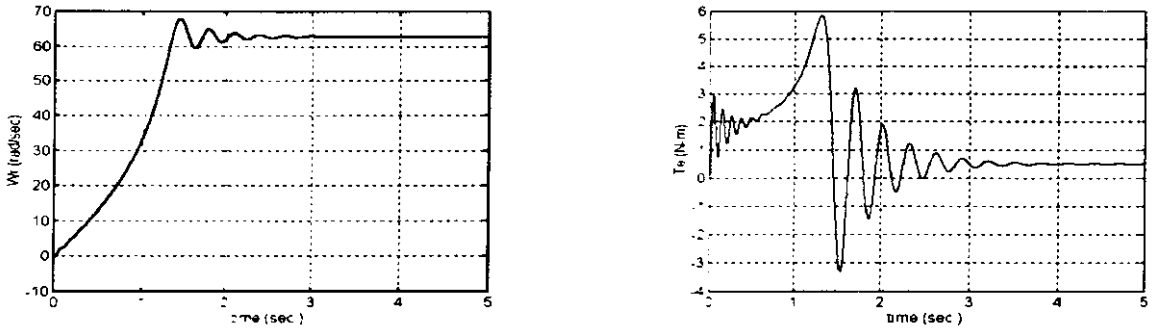
شکل ۲- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کنندهٔ PI به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک – فازی با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور (موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنا (600 rpm) 63.7 rad/sec است)



شکل ۳- تغییرات زمانی سرعت، گشتاور الکترومغناطیسی، جریان فاز (a) و ولتاژ فاز (a) موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک – فازی با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنا (600 rpm) 63.7 rad/sec است)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ٤- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش سعی و خطا [١٤و١٥] با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنا (600 rpm) 63.7 rad/sec است)

این شکل سرعت موتورو گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، نسبت به زمان نشان داده شده اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

در شکل (٥) ، مشخصه های حالت گذرای موتور القایی کنترل شده با روش اسکالر نشان داده شده است. در این شکلها موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنای داده شده به کنترل کننده ٦٠٠ دور در دقیقه است. از ضرایب کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش سعی و خطا [١٥،١٤] در سیستم موتور-درایو استفاده شده است. در این شکل سرعت موتورو گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، نسبت به زمان نشان داده شده اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا هارمونیک یازدهم موجود در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

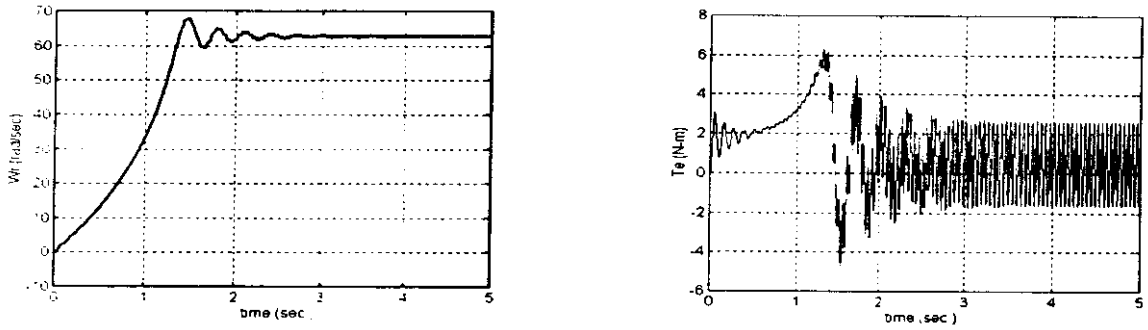
شکل(٦-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (٦-ب)، نتایج حاصله از به کارگیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت حاصله ازروش سعی و خطا[١٥،١٤] در روش کنترل اسکالر هنگامی که سرعت اولیه موتور٦٠٠ دور در دقیقه بوده و سرعت مبنا٧٦٤ دور در دقیقه است را نشان می دهند. در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا هارمونیک یازدهم موجود در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

شکل(٧-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (٧-ب)، نتایج حاصله از به کارگیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت حاصله ازروش سعی و خطا [١٥،١٤] درروش کنترل اسکالر هنگامی که سرعت اولیه موتور٦٠٠ دور در دقیقه بوده و سرعت مبنا صفر دور در دقیقه (حالت سکون) است را نشان می دهند. در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا هارمونیک یازدهم موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور، انجام شده است.

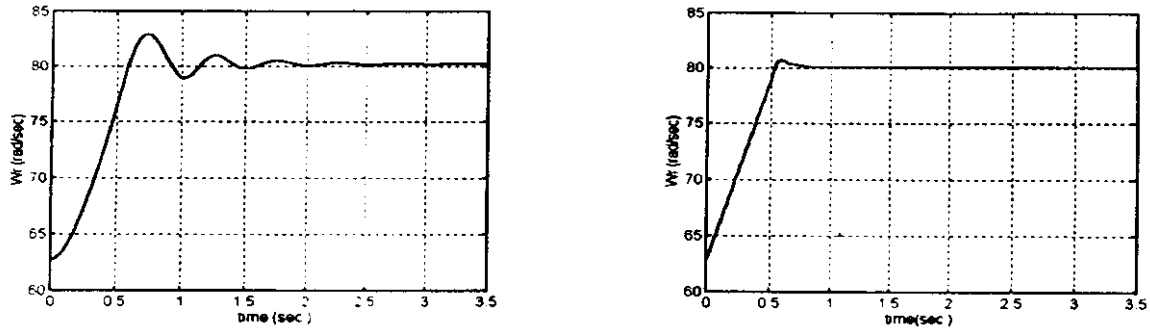
شکل(٨-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کار گیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (٨-ب)، نتایج حاصله از به کار گیری ضرایب بهرهٔ کنترل کننده سرعت حاصله ازروش سعی و خطا [١٥،١٤] در روش کنترل اسکالر هنگامی که سرعت اولیه موتور٦٠٠ دور در دقیقه بوده و سرعت مبنا ١٩١ - ، دور در دقیقه (دور معکوس) است را نشان می‌دهند. در این شکلها شبیه سازی سیستم با در

www.SID.ir

Archive of SID

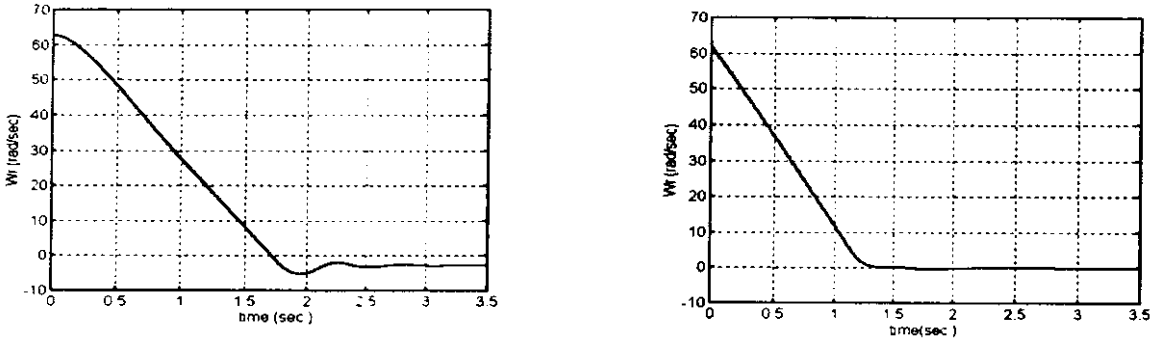


شکل ۵- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کنندهٔ PI به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۴و۱۵] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه اندازه شده و سرعت مبنا 63.7 rad/sec (600 rpm) است)



(ب) (الف)

شکل ٦- تغییرات زمانی سرعت و موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کنندهٔ PI به دست آمده الف) روش بهینه‌سازی ژنتیک – فازی، ب) روش سعی و خطا [۱۴و۱۵] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (سرعت اولیه موتور 63.7 rad/sec (600 rpm) و سرعت مبنا 80 rad/sec (764 rpm) است)

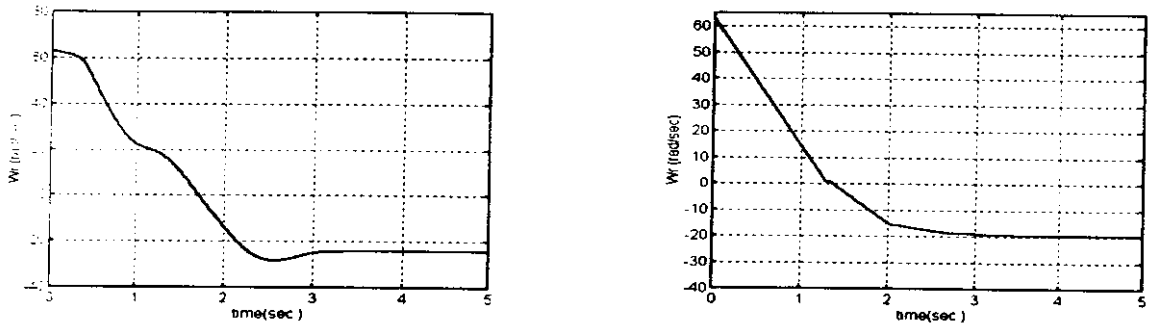


(ب) (الف)

شکل ۷- تغییرات زمانی سرعت موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کنندهٔ PI به دست آمده الف) روش بهینه‌سازی ژنتیک – فازی، ب) روش سعی و خطا [۱۴و۱۵] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (سرعت اولیه موتور 63.7 rad/sec (600 rpm) و سرعت مبنا rad/sec صفر (حالت سکون))

www.SID.ir

Archive of SID



(ب) (الف)

شکل ۸- تغییرات زمانی سرعت موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کنندهٔ PI به دست آمده الف) روش بهینه‌سازی ژنتیک – فازی، ب) روش سعی و خطا [۱٤و۱۵] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کنندهٔ موتور (سرعت اولیه موتور (600 rpm) 63.7 rad/sec و سرعت مبنا (191 rpm) 20 rad/sec-، دور معکوس است)

نظرگرفتن تاثیرات تا هارمونیک یـازدهم موجـود در جریانـهای تغذیه کنندهٔ موتور، انجام شده است.

شـکل(۹)، مشـخصات حـالت گذرای سـرعت و گشـتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور القایی با به کار گیـری ضرایـب بهرهٔ کنترل کننده سرعت به دسـت آمـده از روش بهینـه سـازی ژنتیک- فازی در روش کنترل اسـکالر هنگامـی کـه بـار موتـور دارای تغییرات پله ای از نصف بار نامی به بار نامی ، از بار نامی به یک چهارم بار نامی و از یک چهارم بار نامی بـه نصـف بـار نامی است را نشان مـی دهـد. در تمـامی بارهـا سـرعت مبنـای انتخاب شده برای موتور، سرعت نامی ٦۰۰ دور در دقیقه است.

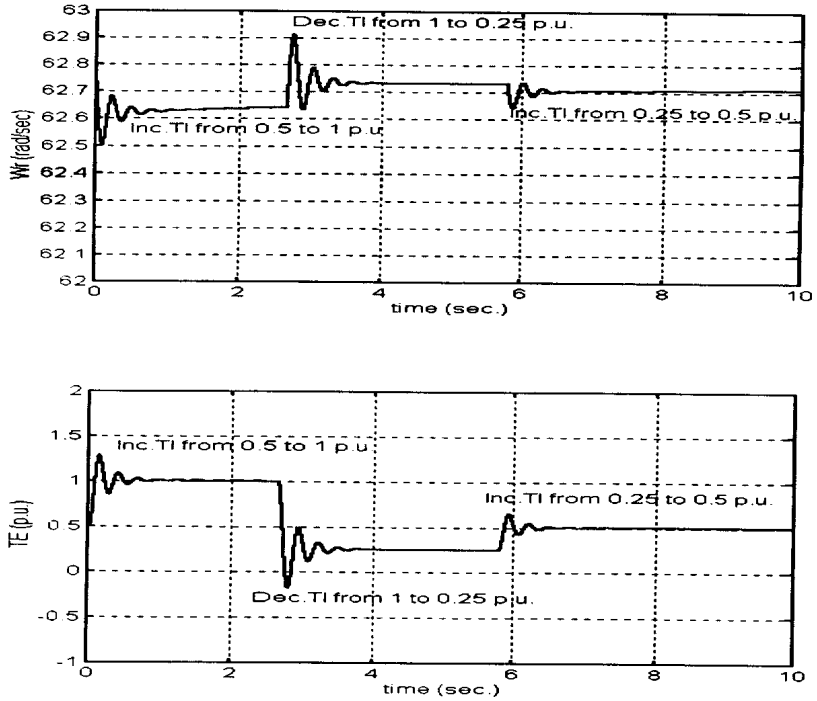
شکل(۱۰) ، مشخصات حـالت گذرای سـرعت و گشـتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور القایی با به کارگیـری ضرایـب بـهرهٔ کنـترل کننـده سـرعت بـه دسـت آمـده از روش سـعی و خطا[۱۵،۱٤] در روش کنترل اسـکالر هنگامـی کـه بـار موتـور دارای تغییرات پله ای از نصف بار نامی به بار نامی ، از بار نامی به یک چهارم بار نامی و از یک چهارم بار نامی بـه نصـف بـار نامی است، را نشان می دهـد. در تمـامی بارهـا سـرعت مبنـای انتخاب شده بـرای موتـور، سـرعت نـامی ٦۰۰ دور در دقیقـه، است.

٤- نتایج

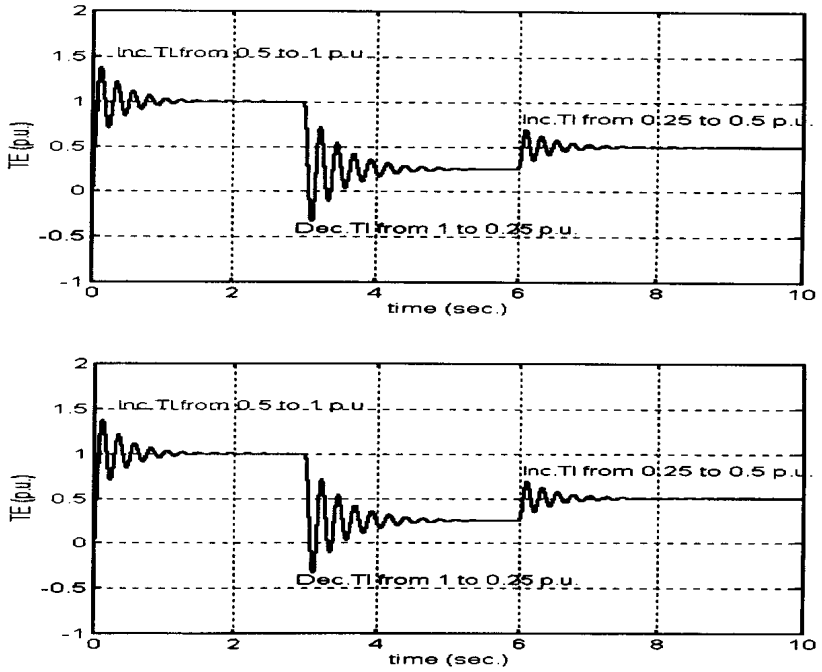
در ایـن مقالـه روش جدیـدی براسـاس الگوریتـم ژنتیک - فازی برای بهینه سازی همزمان چند تابع هـدف ارائـه شده است . این الگوریتم بـرای بهینـه سـازی همزمـان دو تـابع هدف غیرخطی ریاضی و طراحی و تنظیم بهینـهٔ ضرایـب بـهرهٔ کنترل کنندهٔ کلاسیکPI در کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر به کارگرفته شده اسـت. نتـایج حاصلـه از شـبیه سـازی رایانه‌ای در جدول (۱) و شکلهای (۲) تا (۱۰)، نمایـانگر رفتـار مناسب روش ارائه شده است. چون سیستم در نظر گرفته شده ، شکل (۱)، یک سیستم غیرخطی اسـت ، لـذا طراحـی و تنظیـم ضرایـب کنـترل کننـدهٔ سـرعت در آن کـه یـک کنـترل کننـدهٔ کلاسیک PI است، به نحوی که پاسـخ سیسـتم بـه ورودی مبنـا مناسب باشد کار مشـکل و وقتگیـری اسـت . ایـن ضرایـب بـا صرف وقت زیـاد بـا روش سـعی و خطـا در طـی یـک پـروژهٔ دیگرحاصل شده که نتایج عملکـرد ایـن ضرایـب در شـکلهای، (٤)،(۵)، (٦-ب)،(۷-ب)،(۸-ب) و(۱۰)،ارائه شده اسـت. روش ارائه شده در این مقاله ضمن اینکه توانسته مشکل صرف وقـت زیاد توسط طراح را برطرف کند، قابلیت بهینـه سـازی ضرایـب بهرهٔ مورد نظر، با درنظر گرفتـن چندیـن تـابع هـدف بـه طـور

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۹- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با بکارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش بهینه‌سازی ژنتیک – فازی در اثر تغییر پله‌ای بار از نصف بار نامی به بار نامی و از بار نامی به یک چهارم بار نامی و سپس از یک چهارم بار نامی به نصف بار نامی (سرعت مبنا موتور ۶۳/۷ rpm (۶۰۰ rpm) است)



شکل ۱۰- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۴ و ۱۵] در اثر تغییر پله‌ای بار از نصف بار نامی به بار نامی و از بار نامی به یک چهارم بار نامی و سپس از یک چهارم بار نامی به نصف بار نامی (سرعت مبنا موتور ۶۳/۷ rad/sec (۶۰۰ rpm است)

www.SID.ir

Archive of SID

هزمان را داراست . ضمن اینکه در ایـن روش از ابتـدا می‌تـوان درجهٔ اهمیت توابع هدف را با توجه بـه نظـر اسـتفاده کننـده از موتور یا طراح معین کرده و یا همانند روش شرح داده شـده در متن مقاله به صورت فازی در فرایند بهینـه سـازی تعییـن کـرد. امتیاز تعیین فازی درجهٔ اهمیت توابع هدف این است که ضمـن آنکه تا حد امکان می‌توان به نقاط بهینه انفرادی هر یک از توابع هدف نزدیک شد، سرعت همگرایی روش در یافتن نقطهٔ بهینـهٔ سراسر نیز افزایش یافته و در زمان محاسبات رایانـه ای صرفـه جویی بسیار زیادی می‌شود.

واژه نامه

1. current source inverter (CSI)
2. rise time
3. maximum overshoot
4. settling time
5. steady state error (Ess)
6. evolutionary
7. roulette wheel selection
8. Powell's Method

مراجع

1. Bellman, R.E. and Zadeh, L.A.," Decision Making in a Fuzzy Environment, Management", *SCI.B17*, pp. 141-164,1970
2. Zimmermann, H.J., "Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions," *Fuzzy Sets and Systems 1*, pp. 45-55, 1978
3. Sakawa, I.M., Fuzzy Sets and Interactive Multi-Objective Optimization , *Plenumpress, New York, London*, 1993.
4. Trebi-Ollennu, A., White, B. A., "Multi-Objective Genetic Algorithm Optimization Approach to Nonlinear Control System Design," *IEE. Proc. Control Theory App1.,* Vol. 144, No.2, pp. 137-142, March 1997.
5. Schaffer, J.D., "Multi-Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms," *Proc. Ist. Conf. Genetic Algoritms*, pp. 93-100, 1985.
6. Kursawe, F., " A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization in Parallel Problem Solving from Nature," *H.P. Schwefel and R. Manner, Eds. Berlin, Germany, Springer-verlag*, pp. 193-197, 1991.
7. Fonseoa, C.M., and Fleming, P.J., "An Overview of Evolutionary Algorithms in Multi-Objective Optimization," *Dept. of Automatic Control and Systems Eng.University of Sheffield.U.K. Res., Rep. 527*, 1994, & In *Evolutionary Computation* ,Vol. 3, No. 1, pp. 1-16,1995.
8. Fonseca, C.M., and Fleming, P.J., "Genetic Algorithms for Multi-Objective Optimization, Discussion, and Generalization," *Genetic Algorithms Proc. Fifth. IM, Conf. 5. Forrest. Ed. San. Mareo, CA/ Morgan Kaufmann,* pp. 416-423,1993.
9. Fonseca, C.M., and Fleming, P.J., " Multi-Objective Genetic Algorithms Made Easy, Selection, Sharing and Making Restriction," *Ist IEE/IEEE Int. conf. GA'S in Engineering Systems. Innovations and Applications*, *Sheffield, U.K*.pp. 42-52,1995.
10. Wienke, D., Lucasiue, C., and Koteman, G., "Multi-Criteria Target Vector Optimization of Analytical Procedures Using a Genetic Algorithm. Part 1, Theory, Numerical Simulations, and Application to Automatic Emission Spectroscopy," *Analytic Chimica Acta*, vol .265, No.2 , pp. 211-225 , 1992.
11. Murata, T., and Ishibuchi, H., "MOGAi, Multi-Objective Genetic Algorithms," *Proc. 2nd IEEE Int, Conf, Evolytionary Computat.*, pp. 289-294, 1995.
12. Borghi, Casadei, D., Fabbri, M., and Serra, G., "Reduction of Torque Ripple in Permanent Magnet Actuators by a Multi-Objective Minimization Technique," *Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag), Riode Janeiro Brazil, November 2-6 ,*Vol 1, pp. 155-157, 1997.
13. Lshibuchi, H., Murata, T., "A Multi- Objective Genetic local Search Algorithm and Application to Flow-Shop Scheduling", *LEEE Trans. on Sys. Man and Cyb*. Part C, Vol.28, No.3, pp. 392-403, August 1998.

١٤. : سلطانی،ج. ، و میرزائیان دهکـردی، ب.، " کنـترل موتـور القایی سرعت متغیر تغذیـه شـده بـا اینورتـر نـوع جریـان اجباری " ، *کنفرانس مهندسی برق ایران- قدرت*، ص ص، ١٥٥-١٦٤، اردیبهشت ١٣٧٣.

١٥. : سلطانی ،ج.، و میرزائیـان دهکـردی،ب، " کنـترل موتـور القایی سرعت متغیر تغذیـه شـده بـا اینورتـر نـوع جریـان

www.SID.ir

Archive of SID

اجباری " ، *نشریه علمی-پژوهشی امیر کبیر ، سال هشتم ، شماره ۲۹* ، ص ص، ٦٩-٧٧، پاییز ١٣٧٤.

16. Chun, J. S., Pillim, J. Jung, H. K., and Huhn, S. Y., "A Study on Comparisons of Optimization Performance between Immune Algorithm and other Non-Deterministic Algorithms," *Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (Compumag), Riode Janeiro Brazil, November 2-6*, pp. 553-554, 1997.
17. Box, M. J., Davies, D., Swann, W.H., *Non-Linear Optimization Techniques*, Oliver & Boyes, 1984.
18. Luenberger, D. G., *Linear and Nonlinear Programming*, Second Edition, Addison-Wesly Publishing Company, 1984.

www.SID.ir