

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

بهزاد میرزائیان\* ، مهدی معلم\*\* ، ولی اله طحانی\*\*\* و کارو لوکس\*\*\*

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فنی، دانشگاه تهران

(دریافت مقاله: ۷۸/۵/۳ - دریافت نسخه 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 نقطه بهینه دو تابع هدف ریاضی غیر خطی و طراحی و تنظیم بهینه ضرایب بهره یک کنترل کننده کلاسیک PI در روش کنترل اسکالری یک موتور القایی تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری<sup>۱</sup> به عنوان یک سیستم غیر خطی استفاده شده است. برای تعیین و تنظیم ضرایب بهره کنترل کننده پاسخ سیستم به ورودی پله در نظر گرفته شده و زمان خیز<sup>۲</sup> (Tr)، ماکزیمم جهش<sup>۳</sup> (Mp)، زمان تثبیت<sup>۴</sup> (Ts) و خطای حالت ماندگار<sup>۵</sup> (Ess) به عنوان چهار تابع هدف بهینه می شوند. نتایج حاصله از روش جدید ارائه شده در این مقاله با نتایج حاصل از سه کارگیری روش سعی و خطا [۱۳ و ۱۴] در تنظیم ضرایب کنترل کننده ها و روش فازی وزنی [۴] در تعیین نقطه بهینه دو تابع ریاضی مقایسه شده است. از امتیازات برجسته الگوریتم بهینه سازی ارائه شده این است که می توان درجه 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 دهنده 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

\*\*\* استاد

\*\* دانشیار

\* دانشجوی دکترا

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

## ۱- مقدمه

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 بهینه ضرایب بهره کنترل کننده کلاسیک PI در روش کنترل اسکالر موتور القایی استفاده شده است. نتیجه حاصل از به کارگیری روش بهینه سازی ژنتیک- فازی برای توابع هدف ریاضی با روش فازی وزنی [۴] و عملکرد موتور در اثر به کارگیری ضرایب بهره بهینه کنترل کننده به دست آمده از روش جدید با ضرایبی که به صورت سعی و خطا تعیین می شوند [۱۵، ۱۴]، مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهند 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 مسئله بهینه سازی دو ابزار جستجو و تحلیل مورد نیاز است. جستجو شامل تکنیکهای محاسباتی برای یافتن نقطه

بهینه سازی همزمان چند تابع هدف یکی از مسائل مورد توجه پژوهشگران، خصوصاً طراحان درایوهای الکتریکی در سالهای اخیر بوده است. محققانی همچون بیلمن و زاده [۱]، زیمرمن [۲] ساکاو [۳]، روش فازی را برای بهینه سازی توابع هدف به کار گرفتند. النو و وایت [۴] از وزندهای فازی برای ترکیب چند تابع هدف در روند بهینه سازی استفاده کردند. اسچافر [۵]، کارساو [۶]، فیلمینگ و فونسکا [۷-۹] از روش ژنتیک در بهینه سازی همزمان چند تابع هدف استفاده کردند. ترکیب توابع هدف با وزندهای ثابت یا تصادفی و سپس استفاده از الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی موضوعی است که محققانی همچون کاتمن [۱۰]، مورتا [۱۱]، بورفی [۱۲] مورتا و هیسائو [۱۳] به کار گرفتند.

در این مقاله یک روش جدید بر مبنای الگوریتم ژنتیک با استفاده از وزندهای فازی برای هر تابع هدف برای افزایش سرعت همگرانی روش به منظور بهینه سازی همزمان چند تابع

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

$$C_m^0(S_{L,i}) = f_{objm}(S_{L,i}) - \mu_m \quad m=1, \dots, M \quad L=1, \dots, N \quad (4)$$

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

$$C_m(S_{L,i}) = \begin{cases} C_m^0(S_{L,i}) & \text{if } C_m^0(S_{L,i}) > 0 \\ \gamma_m & \text{if } C_m^0(S_{L,i}) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$L=1, \dots, N \quad m=1, \dots, M$$

با توجه به معادله های ارائه شده،  $P_{L,i}$  به صورت زیر تعریف می شود

$$P_{L,i} = \frac{\prod_{m=1}^M [C_m(S_{L,i})]^{K_m}}{\sum_{L=1}^N \left[ \prod_{m=1}^M [C_m(S_{L,i})]^{K_m} \right]} \quad (6)$$

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

۲-۲- ارائه یک رابطه برای تعیین ضریب  $K_m$  با استفاده از

### مفاهیم فازی

با استفاده از مفاهیم فازی به صورت زیر ضریب  $K_m$

تعیین می شود

$$u_m \tilde{f}_{objm}(x) \quad m=1, \dots, M \quad X \in R^n \quad (7)$$

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<sup>۱</sup> است که در مسائل بهینه سازی و طراحی کاربردهای زیادی پیدا کرده است. در واقع این الگوریتم یک روش محاسباتی تکاملی است که از فرایندهای تکاملی الهام می گیرد. فرایند تکاملی یک مسئله 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 جهت دار است. الگوریتم ژنتیک با یک جمعیت اولیه از کروموزومها شروع کرده و به سمت یک جمعیت بهینه حرکت می کند. این الگوریتم یک ابزار جستجو است 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 مسئله بهینه سازی به صورت زیر قابل بیان است

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } [f_1(x), f_2(x), \dots, f_M(x)] \\ & \text{S.T. } x_{i0} \leq x_i \leq x_{if} \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (1) \text{ و } (2)$$

جواب  $X$  یک بردار  $n$  بعدی است که به صورت زیر در نظر گرفته می شود

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_n] ; X \in R^n \quad (3)$$

۲- تعیین مقدار برازندگی و عدد برازندگی برای هر تابع هدف بر اساس معادله های (۴) و (۵) سپس تعیین  $P_{L,i}$  بر اساس معادله (۶).

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

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

۵- جایگزین کردن نسل جدید به جای نسل قدیم.

۶- 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 بهره کنترل کننده 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 [ ۴ ] در خصوص توابع هدف ریاضی و روش سعی و خطا [ ۱۴ و ۱۵ ] در مورد کنترل سرعت موتور القایی مقایسه شده اند.

#### ۳-۱- کاربرد روش بهینه سازی ژنتیک- فازی در بهینه سازی

##### 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

$$f_1(x) = 10 - \sum_{i=1}^2 (x_i - 7)^2 \quad 1 \leq x_i \leq 10 \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

$$f_2(x) = 900 - \sum_{i=1}^2 [(x_i - 5)^2 - 10 \cos(2\pi(x_i - 5))] \quad (15)$$

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

$$\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m) = \begin{cases} 0 & \text{if } u_m \geq f_{objm}^{\max} \\ \frac{-u_m + f_{objm}^{\max}}{f_{objm}^{\max} - f_{objm}^{\min}} & \text{if } f_{objm}^{\min} \leq u_m \leq f_{objm}^{\max} \\ 1 & \text{if } u_m \leq f_{objm}^{\min} \end{cases} \quad (8)$$

تابع  $\mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m)$  فضای  $R$  را به ناحیه بسته  $[0, 1]$  نگاشت می کند.  $f_{objm}^{\max}$  و  $f_{objm}^{\min}$  مقادیر مینیمم و ماکزیمم تابع هدف  $m$  ام هستند که به صورت زیر تعریف می شوند

$$f_{objm}^{\min} = \min_X [f_{objm}(x)] \quad (9)$$

$$X_{io} \leq X_i \leq X_{if} \quad i = 1, \dots, n$$

$$f_{objm}^{\max} = \max_X [f_{objm}(x)] \quad (10)$$

$$X_{io} \leq X_i \leq X_{if} \quad i = 1, \dots, n$$

ضریب  $\alpha_m$ ، به صورت زیر تعریف می شود

$$\alpha_m = \frac{wf_{objm}}{\sum_{m=1}^M wf_{objm}} \quad m = 1, \dots, M \quad (11)$$

$$wf_{objm} = \mu_{\tilde{f}_{objm}}(u_m) \quad (12)$$

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

$$K_m = \alpha_m \quad m = 1, \dots, M \quad (13)$$

معادله (۱۳) نشان می دهد که کروموزمهایی که بتوانند مقادیر توابع هدف را به مقادیر بهینه انفرادی خود در فضای شدنی حل مسئله نزدیکتر سازند شانس بیشتری برای انتخاب در تولید نسل جدید را دارند، ضمن اینکه به کروموزمهای 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 مسئله بهینه سازی است، لذا در تولید تصادفی آن باید محدودیتهای موجود در مسئله را در نظر گرفت).

معادله های حالت سیستم با شش متغیر حالت به دست آمده است، سپس معادله های الکتریکی و معادله مکانیکی موتور در حوزه زمان حل می شوند. جزئیات بیشتر در مرجع [۱۴ و ۱۵] آورده شده است.

کنترل کننده سرعت در نمودار جعبه ای (۱) که یک کنترل کننده کلاسیک PI است، دارای تابع تبدیل زیر است

$$G(S) = \left(1 + \frac{1}{ST_c}\right) \cdot G_C \quad (17)$$

هر کاندیدای حل مسئله بهینه سازی به صورت یک کروموزوم به شکل زیر در نظر گرفته می شود

Speed	Controller
Gc	Tc

ضرایب کنترل کننده PI براساس پاسخ سیستم به ورودی  $Y_a = a \cdot u(t) \quad a > 0$  (۱۸)

به گونه ای تنظیم می شود که مشخصه های پاسخ سیستم یعنی  $T_r$ ،  $M_p$  و  $T_s$ ،  $E_{ss}$  بهینه شوند. به این منظور توابع هدف به صورت زیر تعریف می شوند

$$\begin{aligned} F_{obj1} &= -(T_r / M_T + p) \\ F_{obj2} &= -(T_s / M_T + p) \\ F_{obj3} &= -(M_p / M_E + p) \\ F_{obj4} &= -(E_{ss} / M_E + p) \end{aligned} \quad (19)$$

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 فاصله زمانی  $M_T$  تثبیت نشوند، مقادیر مشخصه های پاسخ سیستم و ضریب جریمه  $P$  طبق جدول (۲) در نظر گرفته می شوند.

در جدول (۲)،  $E_p$  به صورت زیر تعریف می شود

$$E_p = Y_d - Y(t_{final}) \quad (20)$$

$K_1$ ،  $K_2$ ،  $K_3$  و  $K_4$  ضرایب نشان دهنده درجه اهمیت پارامترهای مشخصه پاسخ سیستم هستند که بر اساس معادله های بخش (۲-۲) به صورت فازی به گونه ای تعیین می شوند که کروموزمهایی که بتوانند توابع هدف را به مقادیر بهینه انفرادی خود نزدیکتر کنند شانس بیشتری برای انتخاب در نسل بعدی

توابع هدف داده شده در معادله های (۱۴) و (۱۵) از مرجع [۱۶] گرفته شده اند. نقاط بهینه انفرادی هر یک از توابع هدف با استفاده از روش تحلیلی پاول [۱۷ و ۱۸]، به صورت زیر به دست می آیند

$$\begin{aligned} X_{opt1} &= [7 \quad 7] \\ X_{opt2} &= [5 \quad 5] \end{aligned} \quad (16)$$

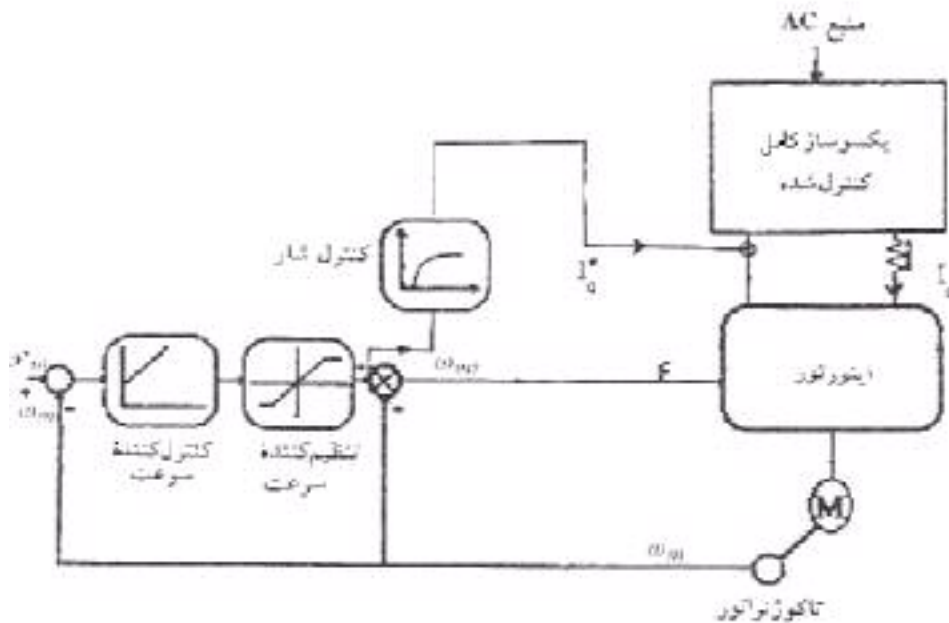
با استفاده از روش فازی وزنی، الیوت [۴] و روش ژنتیک - فازی ارائه شده در بخش دوم نتایج بهینه سازی همزمان دو تابع هدف در جدول (۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که در روش فازی وزنی [۴] ابتدا توابع هدف توسط وزنه های فازی با یکدیگر ترکیب شده، سپس تابع هدف به دست آمده با روش ژنتیک بهینه می شود. برای تعیین درجه اهمیت توابع هدف در روش ژنتیک - فازی از معادله های ارائه شده در بخش (۲-۲) استفاده می شود و مقادیر ماکزیمم و مینیمم هر یک از توابع هدف با استفاده از روش تحلیلی پاول به دست می آیند.

**۲-۳- طراحی و تنظیم بهینه ضرایب بهره کنترل کننده 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 بهینه ضرایب بهره کنترل کننده 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 جعبه ای (۱) سیستم موتور- درایو القایی را نشان می دهد. 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 سر آن مد نظر قرار گرفته و

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 [۴]	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
حالت ناپایدار	$Y_d$	$M_T$	$T_r$	$Y_d$	6

جدول ۳- محدوده‌های ضرایب کنترل کننده کلاسیک

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

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

کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش پیشنهادی ژنتیک- فازی در سیستم موتور- درایو استفاده شده است. در این شکل سرعت موتور و 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 کننده موتور، انجام شده است.

در شکل (۳)، 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 ۶۰۰ دور در دقیقه است. از ضرایب بهره 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 شده اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور، انجام شده است.

در شکل (۴)، 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 ۶۰۰ دور در دقیقه است. از ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] در سیستم موتور- درایو استفاده شده است. در

هر یک از توابع هدف، درجه اهمیت سایر توابع هدف صفر در نظر گرفته می شود. محدوده های به دست آمده از روش بالا برای موتور با مشخصات جدول (۴) برای ضرایب بهره های کنترل کننده PI در جدول (۳) داده شده اند.

با در نظر گرفتن توابع هدف، معادله (۱۹) و شکل هر کروموزم که کاندیدای حل مسئله بهینه سازی است با به کارگیری الگوریتم ژنتیک- فازی شرح داده شده، بخش (۲-۱) 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 (۴)، ضرایب بهینه کنترل کننده های PI مطابق جدول (۵) به دست می آیند.

از ضرایب کنترلی ارائه شده در جدول (۵) برای کنترل سرعت موتور القایی با مشخصات جدول (۴) به روش کنترل اسکالر مطابق با نمودار (۱) استفاده می شود. در شکلهای (۲) تا (۱۰) مشخصه های دینامیکی پاسخ موتور با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده بهینه جدول (۵) و ضرایب کنترلی که از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] به دست آمده اند، مقایسه شده اند.

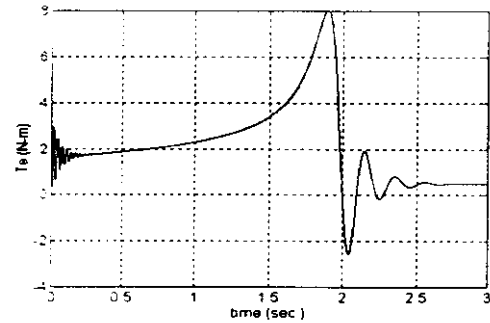
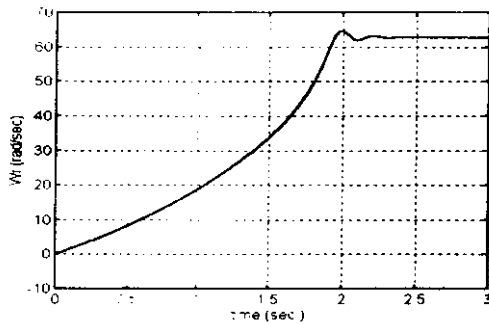
در شکل (۲)، مشخصه های حالت گذرای موتور القایی کنترل شده با روش اسکالرنشان داده شده است. در این شکلها موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنای داده شده به کنترل کننده ۶۰۰ دور در دقیقه است. از ضرایب بهره

جدول ۴ - مشخصات موتور القایی

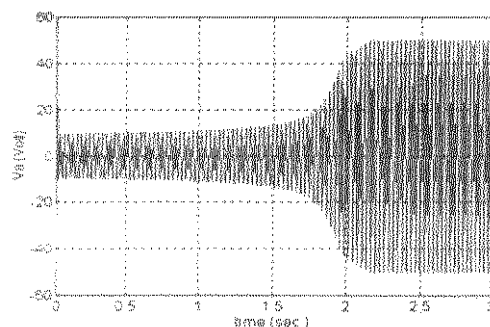
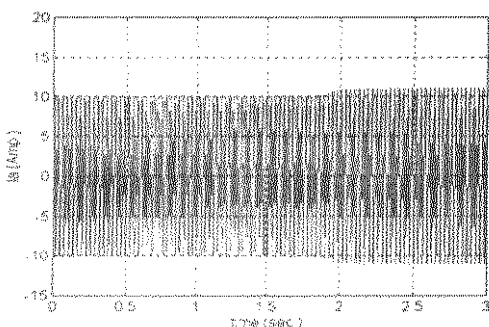
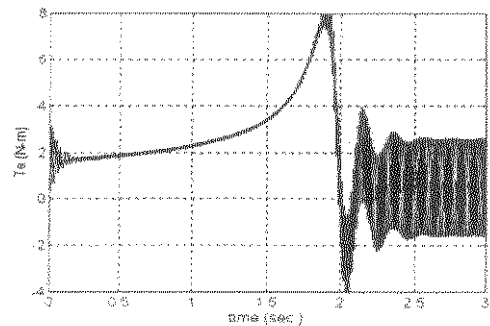
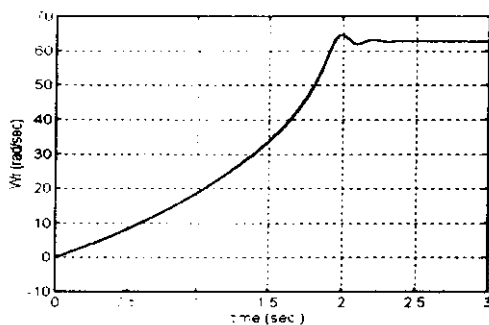
$R_r (\Omega)$	$L_{Ls} (mH)$	$L_{Lr} (mH)$	$L_m (H)$
0.355	2.46	2.465	0.0692
P (تعداد قطبهای ماشین)	Wr (rpm) (سرعت نامی)	J (kg-sec <sup>2</sup> /rad)	
4	600	0.12	

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

کنترل کننده سرعت	
Gc	1.375
Tc	0.125

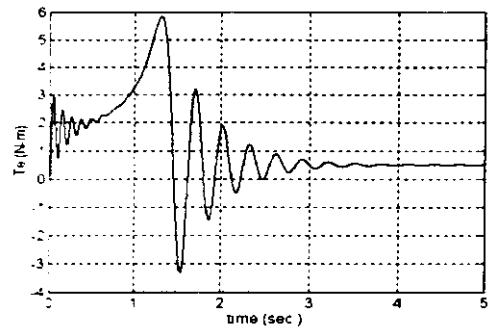
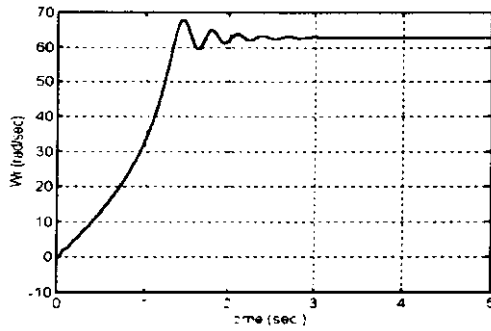


شکل ۲- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک - فازی با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مبنا (600 rpm) (63.7 rad/sec) است)



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)





شکل ۴- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه اندازی شده و سرعت مینا 63.7 rad/sec (600 rpm) است)

شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیرات تا هارمونیک یازدهم موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور، انجام شده است.

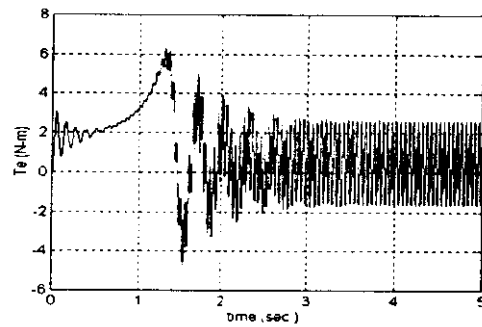
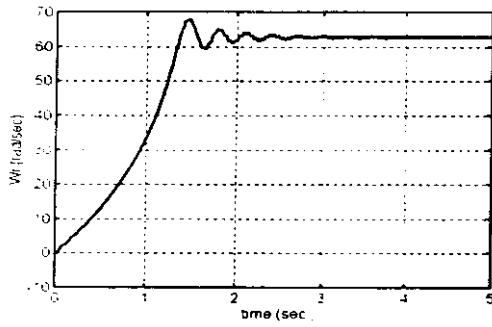
شکل (۷-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (۷-ب)، نتایج حاصله از به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت هنگامی که سرعت اولیه موتور ۶۰۰ دور در دقیقه بوده و سرعت مینا صفر دور در دقیقه (حالت سکون) است را 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 (۸-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (۸-ب)، نتایج حاصله از به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت حاصله از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] در روش کنترل اسکالر هنگامی که سرعت اولیه موتور ۶۰۰ دور در دقیقه بوده و سرعت مینا ۱۹۱-، دور در دقیقه (دور معکوس) است را نشان می دهند. در این شکلها شبیه سازی سیستم با در

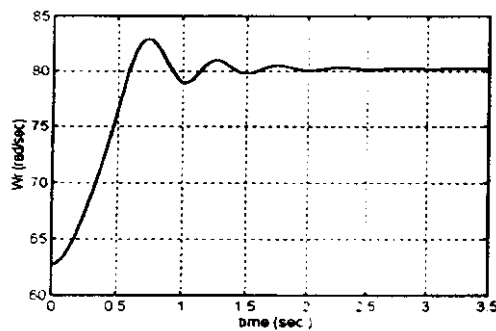
این شکل سرعت موتور و گشتاور الکترومغناطیسی خروجی، نسبت به زمان نشان داده شده اند، در این شکلها شبیه سازی سیستم با در نظر گرفتن تاثیر هارمونیک اصلی در جریانهای تغذیه کننده موتور، انجام شده است.

در شکل (۵)، 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 مینای داده شده به کنترل کننده ۶۰۰ دور در دقیقه است. از ضرایب کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] در سیستم موتور-درایو استفاده شده است. در این شکل سرعت موتور و 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 کننده موتور، انجام شده است.

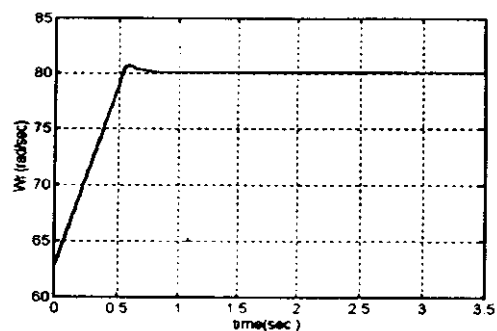
شکل (۶-الف)، مشخصات حالت گذرای سرعت خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک- فازی و شکل (۶-ب)، نتایج حاصله از به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت حاصله از روش سعی و خطا [۱۵،۱۴] در روش کنترل اسکالر هنگامی که سرعت اولیه موتور ۶۰۰ دور در دقیقه بوده و سرعت مینا ۷۶۴ دور در دقیقه است را نشان می دهند. در این



شکل ۵- تغییرات زمانی سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۵و۱۴] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (موتور از حالت سکون راه انداز شده و سرعت مبنا  $63.7 \text{ rad/sec}$  ( $600 \text{ rpm}$ ) است)

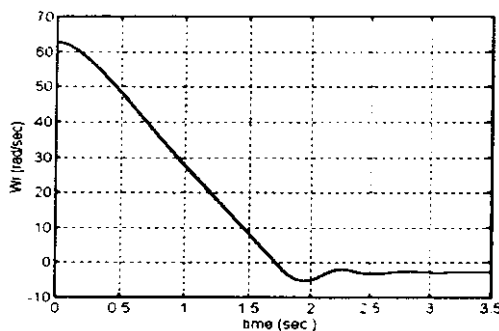


(ب)

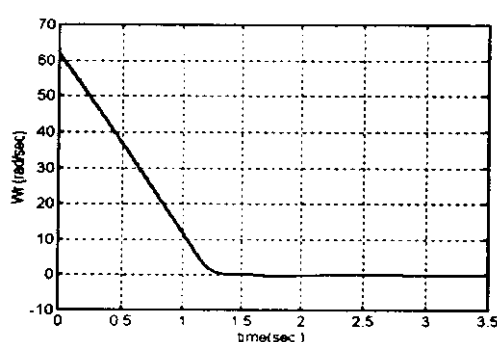


(الف)

شکل ۶- تغییرات زمانی سرعت و موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده الف) روش بهینه سازی ژنتیک - فازی، ب) روش سعی و خطا [۱۵و۱۴] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (سرعت اولیه موتور  $63.7 \text{ rad/sec}$  ( $600 \text{ rpm}$ ) و سرعت مبنا  $80 \text{ rad/sec}$  ( $764 \text{ rpm}$ ) است)

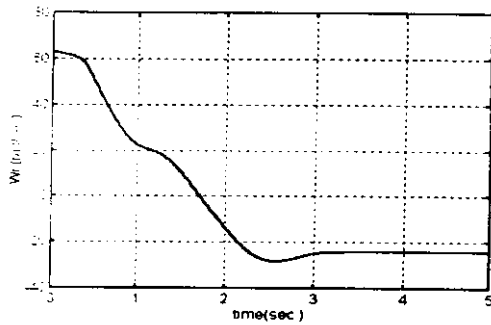


(ب)

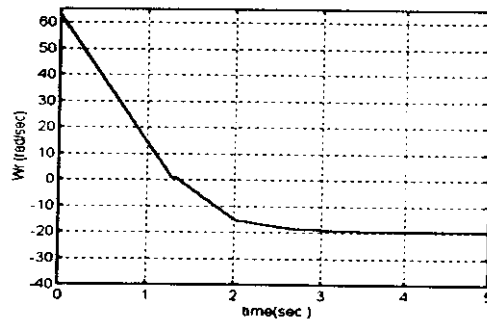


(الف)

شکل ۷- تغییرات زمانی سرعت موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده الف) روش بهینه سازی ژنتیک - فازی، ب) روش سعی و خطا [۱۵و۱۴] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (سرعت اولیه موتور  $63.7 \text{ rad/sec}$  ( $600 \text{ rpm}$ ) و سرعت مبنا  $\text{rad/sec}$  صفر (حالت سکون))



(ب)



(الف)

شکل ۸- تغییرات زمانی سرعت موتور با به کارگیری ضرایب کنترل کننده PI به دست آمده الف) روش بهینه سازی ژنتیک - فازی، ب) روش سعی و خطا [۱۵ و ۱۴] با در نظر گرفتن تاثیرات تا یازدهمین هارمونیک موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور (سرعت اولیه موتور 600 rpm) 63.7 rad/sec و سرعت مبنا (191 rpm) 20 rad/sec، دور معکوس است)

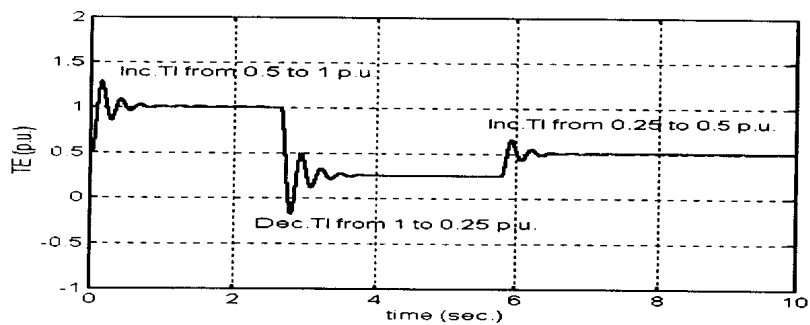
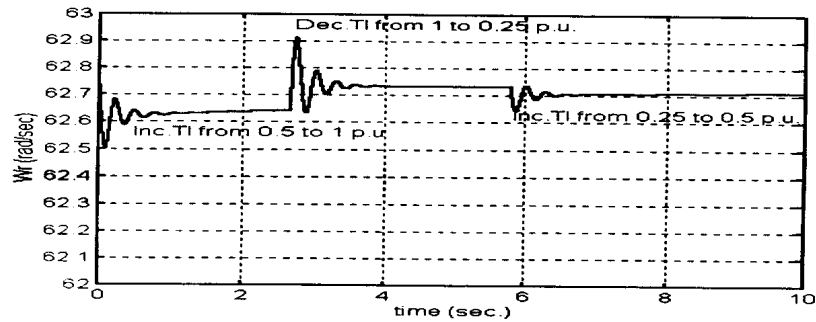
#### ۴- نتایج

در این مقاله روش جدیدی براساس الگوریتم ژنتیک - فازی برای بهینه سازی همزمان چند تابع هدف ارائه شده است. این الگوریتم برای بهینه سازی همزمان دو تابع هدف غیرخطی ریاضی و طراحی و تنظیم بهینه ضرایب بهره کنترل کننده کلاسیک PI در کنترل سرعت موتور القایی به روش رایانه‌ای در جدول (۱) و شکل‌های (۲) تا (۱۰)، نمایانگر رفتار مناسب روش ارائه شده است. چون سیستم در نظر گرفته شده، شکل (۱)، یک سیستم غیرخطی است، لذا طراحی و تنظیم ضرایب کنترل کننده سرعت در آن که یک کنترل کننده کلاسیک PI است، به نحوی که پاسخ سیستم به ورودی مبنا مناسب باشد کار مشکل و وقتگیری است. این ضرایب با صرف وقت زیاد با روش سعی و خطا در طی یک پروژه دیگر حاصل شده که نتایج عملکرد این ضرایب در شکل‌های (۴)، (۵)، (۶-ب)، (۷-ب)، (۸-ب) و (۱۰)، ارائه شده است. روش ارائه شده در این مقاله ضمن اینکه توانسته مشکل صرف وقت زیاد توسط طراح را برطرف کند، قابلیت بهینه سازی ضرایب بهره مورد نظر، با در نظر گرفتن چندین تابع هدف به طور

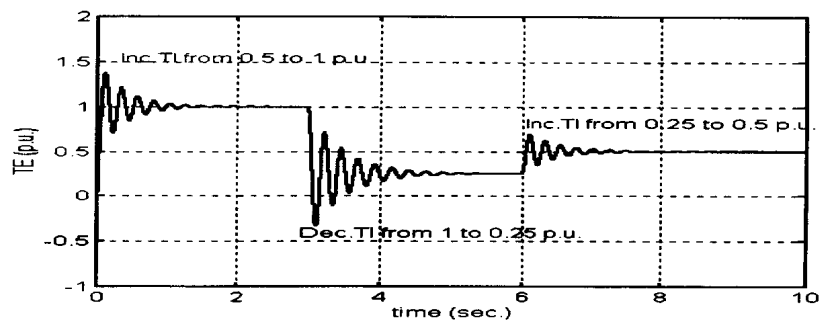
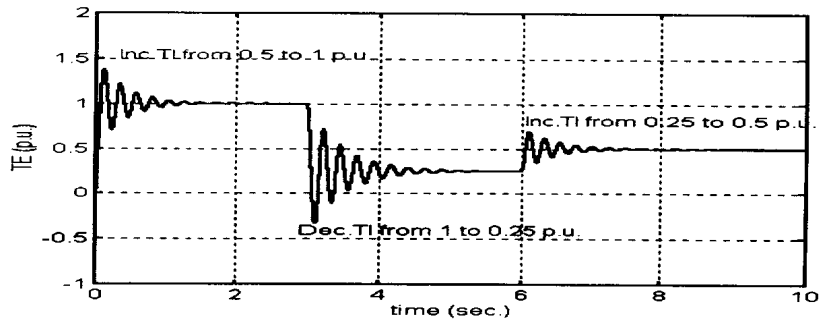
نظر گرفتن تاثیرات تا هارمونیک یازدهم موجود در جریانهای تغذیه کننده موتور، انجام شده است.

شکل (۹)، مشخصات حالت گذرای سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش بهینه سازی ژنتیک - فازی در روش کنترل اسکالر هنگامی که بار موتور 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 به نصف بار نامی است را نشان می دهد. در تمامی بارها سرعت مبنای انتخاب شده برای موتور، سرعت نامی 600 دور در دقیقه است.

شکل (۱۰)، مشخصات حالت گذرای سرعت و گشتاور الکترومغناطیسی خروجی موتور القایی با به کارگیری ضرایب بهره کنترل کننده سرعت به دست آمده از روش سعی و خطا [۱۵، ۱۴] در روش کنترل اسکالر هنگامی که بار موتور 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 به نصف بار نامی است، را نشان می دهد. در تمامی بارها سرعت مبنای انتخاب شده برای موتور، سرعت نامی 600 دور در دقیقه، است.



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  $63/7 \text{ rpm}$  ( $600 \text{ rpm}$ ) 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  $63/7 \text{ rad/sec}$  ( $600 \text{ rpm}$ ) است)

آنکه تا حد امکان می‌توان به نقاط بهینه انفرادی هر یک از توابع هدف نزدیک شد، سرعت همگرایی روش در یافتن نقطه بهینه سراسر نیز افزایش یافته و در زمان محاسبات رایانه ای صرفه جویی بسیار زیادی می‌شود.

همزمان را داراست. ضمن اینکه در این روش از ابتدا می‌توان درجه اهمیت توابع هدف را با توجه به نظر استفاده کننده از موتور یا طراح معین کرده و یا همانند روش شرح داده شده در متن مقاله به صورت فازی در فرایند بهینه سازی تعیین کرد. امتیاز تعیین فازی درجه اهمیت توابع هدف این است که ضمن

## واژه نامه

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

## مراجع

- Bellman, R.E. and Zadeh, L.A., "Decision Making in a Fuzzy Environment, Management", *SCI.B17*, pp. 141-164, 1970
  - Zimmermann, H.J., "Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions," *Fuzzy Sets and Systems 1*, pp. 45-55, 1978
  - Sakawa, I.M., *Fuzzy Sets and Interactive Multi-Objective Optimization*, Plenum Press, New York, London, 1993.
  - Trebi-Ollennu, A., White, B. A., "Multi-Objective Genetic Algorithm Optimization Approach to Nonlinear Control System Design," *IEE. Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 144, No.2, pp. 137-142, March 1997.
  - Schaffer, J.D., "Multi-Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms," *Proc. Ist. Conf. Genetic Algorithms*, pp. 93-100, 1985.
  - 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.
  - Fonseca, 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.
  - 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.
  - 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.
  - Wienke, D., Lucasie, 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.
  - Murata, T., and Ishibuchi, H., "MOGAi, Multi-Objective Genetic Algorithms," *Proc. 2nd IEEE Int. Conf. Evolutionary Computat.*, pp. 289-294, 1995.
  - 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.
  - Ishibuchi, H., Murata, T., "A Multi-Objective Genetic local Search Algorithm and Application to Flow-Shop Scheduling", *IEEE Trans. on Sys. Man and Cyb. Part C*, Vol.28, No.3, pp. 392-403, August 1998.
- ۱۴: سلطانی، ج.، و میرزائیان دهکردی، ب.، "کنترل موتور القایی سرعت متغیر تغذیه شده با اینورتر نوع جریان اجباری"، *کنفرانس مهندسی برق ایران- قدرت*، ص ص، ۱۵۵-۱۶۴، اردیبهشت ۱۳۷۳.
- ۱۵: سلطانی، ج.، و میرزائیان دهکردی، ب.، "کنترل موتور القایی سرعت متغیر تغذیه شده با اینورتر نوع جریان

اجباری“، نشریه علمی-پژوهشی امیرکبیر، سال هشتم،  
شماره ۲۹، صص ۶۹-۷۷، پاییز ۱۳۷۴.

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-Wesley  
Publishing Company, 1984.