شناسائی دقیق پارامترهای مدل تابع سیم پیچ موتور القائـــی با الگوریتـــم ژنتیک

وحید رشتچی
مربی
دانشکده فنی، دانشگاه زنجان

ابوالقاسم راعی
استاد یار
دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

مدل تابع سیم پیچ، کاربرد وسیعی برای تجزیه و تحلیل رفتار موتور القـائی دارد، ولـی روش سیسـتماتیکی بـرای تعییـن دقیـق پارامترهای آن ارائه نشده است. تعیین مقدار اندوکتانسهای نشتی میله های روتور، اندوکتانس نشتی سـیم پیچـهای اسـتاتور، متوسـط فاصله هوائی و مقاومت میله های روتور، بر اساس محاسبات تقریبی صورت می پذیرد.

در این مقاله برای اولین بار روشی سیستماتیک برای تعیین پارامترهای مدل تابع سیم پیچ ارائه میشود. روش پیشنهادی با اسـتفاده از الگوریتم ژنتیک و داده های جمع آوری شده از یک آزمایش ساده بر روی موتور مورد نظر، پارامترهای مـدل را بـادقت بـالائی تعیین میکند. الگوریتم ژنتیک بکار رفته، با کدینگ حقیقی بوده و برای استفاده از آن ناگزیر به اصلاح مدل میباشیم. در مدل اصلاح شده توزیع واقعی سیم پیچهای استاتور در یک شیار لحاظ شده و نقطه ای فرض نمیشود. صحت و دقت پارامترهای بدست آمده، بـا مقایسه داده های حاصل از آزمایش و نتایج شبیه سازی، برای شرایط مختلف کاری و از جمله خطاهای دور به دور اسـتاتور، انجـام شده و تطبیق آنها نشان داده شده است.

کلمات کلیدی

موتور القائی، تابع سیم پیچ، الگوریتم ژنتیک، شناسائی پارامتر.

Accurate Identification of Parameters, in Winding Function Model of Induction Motor, Using Genetic Algorithm.

V.Rashtchi
Instructor
Engineering Department,
Zanjan University

A.Raie
Assistant Professor
Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

Winding function model is widely used for analyzing the behaviour of induction motor, but there is no systematic method for accurate determination of its parameters. To compute, rotor bar leakage inductance, stator leakage inductance, average air gap and rotor bar resistance, approximate formulas are used.

In this paper for the first time a systematic method for accurate parameter identification of winding function model is presented. The proposed scheme uses a genetic algorithm with data collected from a simple experiment on the selected motor. The genetic algorithm is real coded, and in order to be able to use it, the model should be modified to take into account the actual winding distribution in a slot. The validity of the scheme, correctness and accuracy of the parameters obtained are shown by comparing and finding the matching of experimental and simulation results, for a machine under different operating point conditions, including stator turn faults.

Keywords

Induction motor, Genetic algorithm, Winding function, Parameter identification.

مقدمه

تجزیه و تحلیل و شبیه سازی رفتار موتور القائی در شرائط غیر متعارف، مثلا پس از وقوع انواع خطاهای روتور واستاتور، نقش مهمی را برای بررسی و ارزیابی روشهای تشخیص خطا و استراتژی های حفاظتی و احیانا دستیابی به روشهای بهتر بازی میکند. بدیهی است که مطالعه رفتار موتور تحت چنین شرایطی، بصورت تجربی امکان پذیر نبوده و مدل مرسوم dq نیز بدلیل مبتنی بودن بر توزیع سینوسی و تعادل فازها، برای تجزیه و تحلیل و شبیه سازی، قابل استفاده نمیباشد. مناسبترین مدلی که برای شبیه سازی رفتار موتور القائی در حوزه زمان و تحت چنین شرائطی مطرح شده است، مدل تابع سیم پیچ میباشد. از آنجا که در این مدل، هندسه ماشین، توزیع سیم پیچها و اتصالات لحاظ شده است، انواع خطاهای استاتور و روتور و نیز خطاهای مکانیکی مانند ناهم محوری روتور در آن بسادگی قابل نمایش است[۲و۱].

از مشکلات استفاده از این مدل، تعیین مقدار برخی از پارامترها، مانند اندوکتانسهای نشتی و مقاومت میله های روتور، اندوکتانس نشتی سیم پیچهای استاتور و متوسط فاصله هوائی میباشد.

برای تعیین این پارامترها، نوعا روابط تقریبی استفاده میشود و در صورت وجود داده های آزمایشی و تفاوت فاحش آن با نتایج شبیه سازی، اصلاحاتی مبتی بر تجربه و یا سعی و خطا صورت میگیرد. بطور خلاصه روش سیستماتیکی که انطباق خروجی های مدل و نتایج آزمایشی را تضمین نماید، ارائه نشده است.

این مقاله روشی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، برای شناسائی پارامترهای مدل تابع سیم پیچ ارائه میکند. معادلات مدل و پارامترهای آن در ادامه همین بخش معرفی میشوند. نگرش جدیدی در پیاده سازی الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی و کاربرد آن در شناسائی پارامترهای مدل تابع سیم پیچ موضوع بحث بخش دوم مقاله است.نکات مهم اجرائی در پیاده سازی الگوریتم و تمهیداتی که منجر به همگرائی آن شده است در بخش سوم مطرح میشوند. ارزیابی روش با نشان دادن انطباق داده های حاصل از آزمایش و نتایج شبیه سازی، برای موتور سالم و موتور با خطای استاتور، در بخش چهارم آمده است.

۱ـ معادلات و پارامترهای مدل تابع سیم پیچ

در مدل تابع سیم پیچ جریان هر میله روتور و هر فاز استاتور به عنوان متغیر های مجزا تلقی شده و با در نظرگرفتن کوپلاژ مغناطیسی بین میله های روتور و فازهای استاتور اندوکتانسهای متقابل بصورت تابعی از موقعیت زاویه ای روتور محاسبه میشوند. همچنین MMF ایجاد شده در فاصله هوائی، با توزیع واقعی در نظر گرفته میشود. این ویژگیها در روابط و معادلاتی که در ادامه ارائه خواهند شد، مد نظر قرار گرفته اند.

روابط (۱) الی (۸)، معادلات الکتریکی روتور و استاتور ماشین را نشان میدهند.

$$V_S = R_S I_S + \frac{d\Lambda_S}{dt} \quad (۱)$$

$$V_r = R_r I_r + \frac{d\Lambda_r}{dt} \quad (۲)$$

$$\Lambda_s = L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \quad (۳)$$

$$\Lambda_r = L_{rs} I_s + L_{rr} I_r \quad (۴)$$

$$V_s = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T \quad (۵)$$

$$I_s = [I_a \quad I_b \quad I_c]^T \quad (۶)$$

$$I_r = [I_{r1} \quad I_{r2} \quad .... \quad I_{rn} \quad I_{re}]^T \quad (۷)$$

$$V_r = [0] \quad (۸)$$ (برای موتور قفس سنجابی)

روابط (۹) الی (۱۲)، معادلات مکانیکی حاکم بر ماشین را نشان میدهند.

$$T_e = I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_{rm}} I_r \quad (۹)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_{lt}) \quad (۱۰)$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_m \quad (۱۱)$$

$$T_{lt} = T_l + T_c + k_1 \times \omega_r + k_2 \times \omega_r^2 \quad (۱۲)$$

در رابطه (۱۰)کل بار منتقله به شفت موتور می باشد که مولفه های آنرارابطه (۱۲) نشان میدهد. در این رابطه T_l بار مکانیکی، T_c گشتاور کولمب ناشی از اصطکاک، k_1 ضریب میرائی و k_2 برای مدل سازی بار ناشی از فن خنک‌کننده بر روی شفت موتور می باشد.

روابط (۱۳) الی (۱۷)، ماتریسهای اندوکتانس و مقاومت بکار رفته در معادلات (۱) الی (۴) را نشان میدهند.

$$R_S = \mathrm{diag}([R_{sa} \quad R_{sb} \quad R_{sc}]) \quad (۱۳)$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} 2(R_b+R_e) & -R_b & 0 & \dots & -R_b \\ -R_b & 2(R_b+R_e) & -R_b & \dots & 0 \\ 0 & -R_b & 2(R_b+R_e) & \dots & . \\ . & . & . & & . \\ . & . & . & \dots & . \\ -R_b & 0 & \dots & \dots & 2(R_b+R_e) \end{bmatrix} \tag{۱۴}$$

$$\mathbf{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{saa}+l_{ls} & L_{sab} & L_{sac} \\ L_{sba} & L_{sbb}+l_{ls} & L_{sbc} \\ L_{sca} & L_{scb} & L_{scc}+l_{ls} \end{bmatrix} \tag{۱۵}$$

$$\mathbf{L_{rr}} = \begin{bmatrix} L_{mr}+2(l_b+l_e) & L_{r12}-l_b & L_{r13} & \dots & L_{r1n}-l_b \\ L_{r21}-l_b & L_{mr}+2(l_b+l_e) & L_{r23}-l_b & \dots & L_{r2n} \\ L_{r31} & L & L & \dots & . \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ L_{rn1} & L_{rn2} & L_{rn3} & \dots & L_{mr}+2(l_b+l_e) \end{bmatrix} \tag{۱۶}$$

$$\mathbf{L}_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sar1} & L_{sar2} & \dots & L_{sarn} \\ L_{sbr1} & L_{sbr2} & \dots & L_{sbrn} \\ L_{scr1} & L_{scr2} & \dots & L_{scrn} \end{bmatrix} \tag{۱۷}$$

در روابط فوق، e نشانگر میله انتهائی روتور و n تعداد میله‌های روتور می باشد.

محاسبه اندوکتانسهای خودی و متقابل بر اساس تئوری تابع سیم پیچ با استفاده از رابطه (۱۸) صورت میگیرد که متغیرهای آن عبارتند از:

φ موقعیت زاویه ای روتور نسبت به استاتور

θ موقعیت زاویه ای در سطح داخلی استاتور برای انتگرال‌گیری

L طول روتور

r شعاع متوسط فاصله هوائی

$g^{-1}(\varphi,\theta)$ تابع معکوس هوائی

$$L_{ij}(\varphi) = \mu_0 L r \int_0^{2\pi} g^{-1}(\varphi,\theta) N_i(\varphi,\theta) N_j(\varphi,\theta) d\theta \tag{۱۸}$$

درصورت یکنواخت بودن فاصله هوائی، $g^{-1}(\varphi,\theta)=1/g$ خواهد بود. اندوکتانسهای خودی با مساوی قرار دادن I , j و از همان رابطه (۱۸) بدست می‌آیند.

در معادله (۱) ولتاژ فازهای استاتور ظاهر شده است که به دلیل عدم دسترسی به نقطه زمین ماشین این ولتاژها قابل دسترس نمی‌باشند. برای رفع این مشکل با استفاده از معادله (۱) ، $(v_{as}-v_{bs})$ و $(v_{bs}-v_{cs})$ را تشکیل داده و با توجه به اینکه $I_a+I_b+I_c=0$ است به معادلات (۱۹) الی (۳۱) بر حسب ولتاژ خطوط دست می یابیم. این معادلات در شبیه سازی بکار می روند و پارامترهای الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده در این معادلات، یعنی $g, l_e, l_b, r_e, r_b, r_{sa}, r_{sb}, r_{sc}, l_{ls}, J, T_l, T_c, k_1, k_2$ توسط الگوریتم ژنتیک تعیین مقدار می‌شوند.

$$\boldsymbol{\Lambda}_{sll} = \mathbf{L}_{ssll}\mathbf{I}_{sll} + \mathbf{L}_{srll}\mathbf{I}_r \tag{۱۹}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_r = \mathbf{L}_{rsll}\mathbf{I}_{sll} + \mathbf{L}_{rr}\mathbf{I}_r \tag{۲۰}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}_{sll} = [\Lambda_{sab} \quad \Lambda_{sbc}] \tag{۲۱}$$

$$\Lambda_{sab} = \Lambda_{sa} - \Lambda_{sb}$$

$$\Lambda_{sbc} = \Lambda_{sb} - \Lambda_{sc}$$

$$\mathbf{I}_{sll} = [I_a \quad I_b]^T \tag{۲۲}$$

$$\mathbf{L}_{srll} = [\mathbf{L}_{sar} - \mathbf{L}_{sbr} \quad \mathbf{L}_{sbr} - \mathbf{L}_{scr}]^T \tag{۲۳}$$

$$\mathbf{L}_{rsll} = [\mathbf{L}_{sar}{}^T - \mathbf{L}_{sbr}{}^T \quad \mathbf{L}_{sbr}{}^T - \mathbf{L}_{scr}{}^T]^T \tag{۲۴}$$

$$\mathbf{DL}_{srll} = [\mathbf{DL}_{sar} - \mathbf{DL}_{scr} \quad \mathbf{DL}_{sbr} - \mathbf{DL}_{scr}]^T \tag{۲۵}$$

$$\mathbf{D} = \frac{\partial}{\partial \theta_{rm}}$$

$$\mathbf{R}_{sll} = \begin{bmatrix} R_{sa} & -R_{sb} \\ R_{sc} & R_{sb}+R_{sc} \end{bmatrix} \tag{۲۶}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Lambda}_{sll}}{dt} = \mathbf{V}_{sll} - \mathbf{R}_{sll}\mathbf{I}_{sll} \tag{۲۷}$$

$$\frac{d\boldsymbol{\Lambda}_r}{dt} = -\mathbf{R}_r\mathbf{I}_r \tag{۲۸}$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_l) \tag{۲۹}$$

$$T_e = \mathbf{I}_{sll}{}^T \frac{\partial \mathbf{L}_{srll}}{\partial \theta_{rm}} \mathbf{I}_r \tag{۳۰}$$

$$\frac{d\theta_{rm}}{dt} = \omega_m \tag{۳۱}$$

الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی و بکارگیری آن در شناسائی پارامترهای مدل تابع سیم پیچ

الف ـ الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی

الگوریتم ژنتیک روشی است که میتواند برای حل دستگاه معادلات غیر خطی و مسائل بهینه سازی پیچیده بکار رود. این الگوریتم با استفاده از اعداد تصادفی و بر مبنای انتخاب طبیعی عمل میکند و نیاز مند داشتن تخمین اولیه خوبی از جواب مسئله نمی باشد. یعنی بدست آوردن پاسخ یک مسئله پیچیده میتواند از تخمینهای اولیه ضعیف شروع و در روند تکاملی بقای اصلح، به دقت لازم برسد[۳].

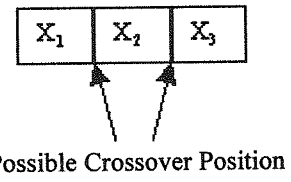
الگوریتم ژنتیک در فرم استاندارد آن بر روی رشته‌های باینری، موسوم به کروموزوم، که پاسخهای محتمل مسئله میباشند عمل میکند. الگوریتم ژنتیک ساده‌ای که در بسیاری از مسائل عملی از جمله شناسائی پارامترهای مدل dq موتور القائی از اطلاعات پلاک موتور[۴]، نتایج خوبی بدست داده است، از سه عملگر تولید مثل، تزویج وجهش استفاده میکند. این عملگرها که از فرآیند تکامل طبیعی اقتباس شده اند، جمعیت کروموزومها را بسوی تکامل، که بمعنی بزرگتر شدن تابع معیار است پیش میبرند.

در بسیاری از مسائل از جمله شناسائی پارامترها، پاسخ مسئله مجموعه ای از اعداد حقیقی است. برای هماهنگ کردن این مسائل با فرم استاندارد الگوریتم ژنتیک، روش متداول، استفاده از رمز باینری برای اعداد حقیقی و چیدن آنها در کنار یکدیگر و تشکیل کروموزوم است. در اینصورت نقطه اثر عملگرها، مطابق با فرم استاندارد، میتواند بیتهای میانی پارامترهای حقیقی نیز انتخاب شود.

درحل مسئله مورد بحث این مقاله، که با پارامترهای حقیقی سروکار دارد، نگرش جدیدی برای تشکیل کروموزوم و نحوه کار عملگرها بکار رفته است که باعث سهولت پیاده سازی و افزایش سرعت همگرائی شده است. در این نگرش هر کروموزوم بجای مجموعه ای از بیتها،مجموعه ای از اعداد حقیقی در نظر گرفته میشود. نقطه تزویج تنها میتواند، مرز بین اعداد حقیقی انتخاب شود و عملگر جهش، پس از انتخاب یکی از اعداد حقیقی در کروموزوم، مقدار آنرا بطور تصادفی تغییر میدهد. در شکل (۱) نحوه کار عملگرهای تزویج و جهش برای فرم حقیقی نشان داده شده است.

عملگر تولید مثل، مشابه فرم استاندارد، تکثیر هر کروموزوم را متناسب با تابع معیار آن انجام میدهد. بدین ترتیب کروموزومهائی که دارای تابع معیار بهتر هستند در نسل بعدی بیشتر تکثیر میشوند. روند کار الگوریتم با عملگرهای سه گانه در شکل (۲) نشان داده شده است.

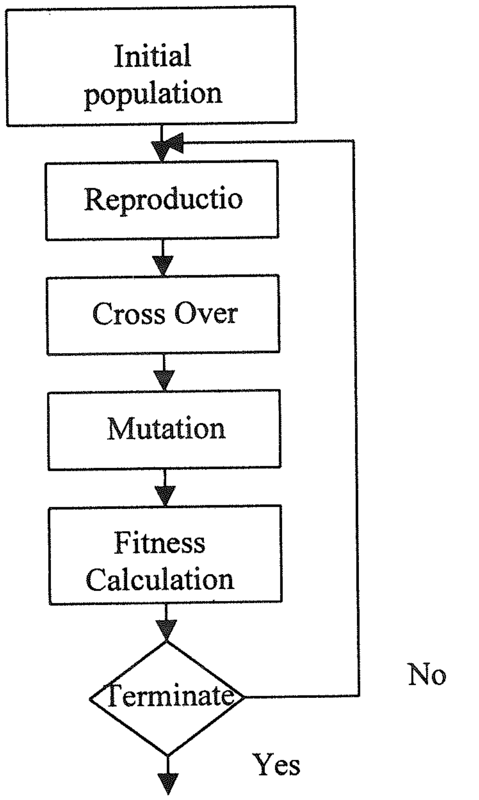
$$\overline{X} = (x_1, x_2, x_3)$$



$$x_i \xrightarrow{\text{Mutation}} x_i = x_i + \text{rand}(-\frac{x_{imax}}{2}, \frac{x_{imax}}{2})$$

x_{imax} ماکزیمم مقدار ممکن برای پارامتر x_i می باشد.

شکل(۱)عملگرهای تزویج و جهش در فرم حقیقی.



شکل (۲) روند کار الگوریتم ژنتیک.

ب ـ شناسائی پارامتر های مدل تابع سیم پیچ با الگوریتم ژنتیک

$\overline{Y}_{ei} = (I_a^e, I_b^e, I_c^e, \omega_r^e)$ را پاسخ دینامیک یا گذرای موتور القائی به ورودی $\overline{X}_{ei} = (V_{ab}^e, V_{bc}^e)$ در نظرمیگیریم. N زوج ورودی/خروجی $(\overline{X}_{ei}, \overline{Y}_{ei})_{i=1:n}$ میتوانند از طریق آزمایش بدست آیند. پارامترهای مدل تابع سیم پیچ موتور القائی را میتوان با بردار $\overline{P}$ نشان داد.

$$\overline{P} = (g, l_e, l_b, r_e, r_b, r_{sa}, r_{sb}, r_{sc}, k_{sl}, J, T_l, T_c, k_1, k_2) \quad (۳۲)$$

در پارامترهای بیان شده اندوکتانس نشتی هر فاز بصورت درصدی از اندوکتانس خودی یعنی $L_{lsx} = k_{sl} \times L_{msx}$ فرض شده، و k_{sl} به عنوان پارامتر در نظر گرفته شده است.

پاسخ مدل شبیه سازی شده به $\overline{X}_{ei}$ را $\overline{Y}_{si} = (I_a^s, I_b^s, I_c^s, \omega_r^s)$ می نامیم. هدف از شناسائی پارامترها بدست آوردن $\overline{P}$ به گونه ای است که به ازای هر $\overline{X}_{ci}$ ، $\overline{Y}_{si} = \overline{Y}_{ei}$ شود.

با توجه به وجود نویز، خطاهای عددی در شبیه سازی مدل و نیز خطاهای دستگاههای اندازه گیری، در عمل هیچگاه این برابری حاصل نخواهد شد. لذا بهترین تخمین برای پارامترها، تخمینی است که مجموع مربعات خطا را برای n زوج $\overline{Y}_{si}, \overline{Y}_{ei}$ حداقل نماید و بعبارت دیگر تابع معیار (۳۲) را ماکزیمم کند.

$$Fit = \frac{}{\sum_{i=1}^{n}((I_{ai}^e - I_{ai}^s)^2 + (I_{bi}^e - I_{bi}^s)^2 + (I_{ci}^e - I_{ci}^s)^2 + k_\omega \times (\omega_{ri}^e - \omega_{ri}^s)^2)} \quad (۳۲)$$

برای آنکه خطاهای مولفه ها در رابطه(۳۲) سهم یکسانی داشته باشند، ضریب k_ω به خطای سرعت اعمال شده است. این ضریب متناسب با نسبت دامنه جریان به سرعت موتور انتخاب میشود، که برای موتور مورد آزمایش ۰/۱ انتخاب شده است.

بدین ترتیب مسئله شناسائی پارامترها به یک مسئله بهینه سازی تبدیل شده و با الگوریتم ژنتیک قابل حل میشود.

۲- نکات اجرائی در پیاده سازی الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله شناسائی پارامترهای مدل تابع سیم پیچ به سادگی قابل استفاده نمی باشد. در این بخش نکات اجرائی و تمهیداتی که پیاده سازی را ممکن نموده است مورد بحث قرار میگیرد.

اولا زمان شبیه سازی، نقش تعیین کننده‌ای را در بکارگیری الگوریتم ژنتیک بازی میکند. برای رسیدن به همگرائی چند هزار بار تکرار الگوریتم و چند ده هزار بار شبیه سازی متعارف می‌باشد. شبیه سازی رفتار موتور بر اساس مدل تابع سیم پیچ نوعا زمان بر بوده و گزارش ها حکایت از آن دارد که با پردازشگر های رایج و برای شبیه‌سازی حدود یک ثانیه از عملکرد موتور، متجاوز از یکساعت زمان لازم است. بدیهی است که چنین سرعتی برای شبیه‌سازی، روش را غیر عملی میکند. با تمهیدات انجام شده، سرعت شبیه سازی به حد بلادرنگ افزایش داده شده و نزدیک به ۱ ثانیه با پردازنده AMD-Athlon و فرکانس ۱۲۰۰ مگاهرتز رسیده است.

ثانیا ساده کردن مدل و نقطه‌ای فرض نمودن توزیع سیم پیچها در شیار استاتور، مانع از همگرا شدن الگوریتم میشود که این مشکل نیز با اعمال توزیع واقعی سیم پیچها مرتفع شده است. توضیح آنکه، ساده سازی مدل، باعث جهشهای پله‌ای در اندوکتانسهای متقابل، نوسانات گشتاور خصوصا در حالت گذرا و در نتیجه خطای سرعت بدست آمده از شبیه سازی میشود. از آنجا که الگوریتم ژنتیک در پی شناسائی پارامترهائی است که با استفاده از آنها نتایج شبیه سازی یا خروجیهای مدل بر نتایج آزمایش منطبق شود، و مدل ساده شده دارای خطا است، همگرائی حاصل نمیشود. استفاده از توزیع واقعی سیم پیچها باعث افزایش دقت مدل، رفع خطای شبیه سازی و در نتیجه همگرائی الگوریتم میشود.

ثالثا، استفاده از شرائط متعارف برای اجرای الگوریتم و نیز نحوه کار عملگرها بصورت متعارف امکانپذیر نبوده و همگرائی حاصل نمی شود. در ادامه به روند استنتاج تغییرات و تمهیدات لازم که منجر به همگرائی تضمین شده و در مدت قابل قبول شده است می‌پردازیم.

الگوریتم ژنتیک درفرم استاندارد، نوعا با جمعیت ۵۰ الی ۱۰۰ نفری وبا احتمال تزویج (P_c) بزرگ و احتمال جهش(P_m) بسیار کوچک اجرا میشود. چنین جمعیتی با ۲۰۰۰ بار تکرار الگوریتم و با زمان یک ثانیه برای هر بار شبیه سازی، نیازمند متجاوز از ۳۰ ساعت زمان اجرا میباشد که عملا غیر قابل قبول میباشد. لذا الگوریتم ابتدا با جمعیت ۱۰ نفری و احتمال تزویج P_c=0.75 و احتمال جهش P_m=0.01 و سپس تحت شرائط مختلف در محدوده‌های، تعداد جمعیت بین ۱۰ الی ۲۰، $0.5<P_c<0.85$ و $0.01<P_m<0.1$ ، مورد آزمایش قرار گرفت که در هیچیک از موارد همگرائی قابل قبول حاصل نگردید.

بمنظور رسیدن به همگرائی تضمین شده و در زمان اجرای قابل قبول، روند عملکرد الگوریتم، در طی اجرای مراحل مختلف الگوریتم و تحت شرائط مختلف، مورد نظارت و ارزیابی قرار گرفته و از مشاهدات، استنتاجات ذیل بعمل آمد:

- افزایش احتمال جهش، به افزایش سرعت همگرائی الگوریتم کمک می‌نماید.
- افزایش احتمال تزویج منجر به همشکل شدن جمعیت شده و الگوریتم کار آیی خود را که تکیه بر جمعیت دارد، از دست می دهد.

- افزایش جمعت به آن اندازه که بار محاسباتی را افزایش میدهد، تاثیری در افزایش سرعت همگرائی ندارد و در مجموع از نظر زمانی الگوریتم را کند میکند.

با تکیه بر این نتایج، تغییرات و تمهیدات زیر بعمل آمده وبکار بسته شد:

- جمعیت ۵ نفری انتخاب شد.
- احتمال تزویج $P_c=0.25$ انتخاب شد.
- جهش بصورت چند گانه و دسته بندی شده که آنرا جهش خانوادگی می‌نامیم، با احتمال $P_m=0.75$ اعمال شد.
- محدوده تغییرات تصادفی عملگر جهش متناسب با افزایش تابع معیار کاهش داده شد.
- تزریق بهترین فرد هر نسل به جمعیت نسل بعدی، با جایگزینی آن فرد به جای بدترین فرد، انجام شد.

پس از اعمال این تغییرات، عملکرد الگوریتم بطور مکرر و با استفاده از داده‌های حاصل از آزمایشهای مختلف، مورد ارزیابی قرار گرفت. در کلیه موارد همگرائی حاصل شد و در بدترین حالت با حدود ۲۰۰۰ بار تکرار و زمان اجرای حدود ۳ ساعت، پارامترها شناسائی شدند.از آنجائیکه سه مورد آخر از تمهیدات انجام شده، بیشترین تاثیر را در افزایش سرعت همگرائی داشته‌اند، توضیح مختصری در مورد هر یک ارائه میشود.

جهش خانوادگی

ارزیابی های اولیه الگوریتم نشان داد که افزایش احتمال جهش در یک پارامتر، سرعت همگرائی را افزایش میدهد که حد آن با $P_m=1$ حاصل میشود. در ادامه این روند، اثر جهش چند گانه با P_m بالا و برای کلیه پارامترها بررسی شد. نتیجه بدست آمده، بهبود چشمگیری را نشان نمیداد که میتواند ناشی از تصادفی شدن بیش از حد فرآیند باشد. نهایتا جهش خانوادگی بعنوان روشی معتدل انتخاب و اعمال گردید، که سرعت همگرائی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در این روش پارامترهای هر کروموزوم به چهار خانواده، با مفاهیم فیزیکی نزدیک به هم تقسیم شدند، که عبارتند از:

- g
- l_e, l_b, k_{sl}
- $r_e, r_b, r_{sa}, r_{sb}, r_{sc}$
- J, T_l, T_c, k_1, k_2

برای اجرای عملگر جهش خانوادگی، هر خانواده با احتمال P_m برای اجرای عملگر جهش انتخاب و سپس به یکی از اعضاء خانواده که بصورت تصادفی انتخاب می شود، تغییر تصادفی اعمال گردید.

کاهش محدوده تغییرات تصادفی عملگر جهش

از آنجائیکه افزایش تابع معیار به منزله نزدیک‌تر شدن به نقطه هدف می باشد، بهتر است با رشد مقدار تابع معیار، تغییرات تصادفی پارامترها کمتر شود. بعبارت دیگر اگر محدوده تغییرات تصادفی برای هر پارامتر با ضریبی کاهش داده شود جستجوی دقیق تری صورت میپذیرد. انتخاب ضریب به صور مختلف امکان‌پذیر میباشد. در اجرای الگوریتم مورد بحث، تابع f_k طبق رابطه(۳۳) تعریف و بکار گرفته شده است.

$$f_k = \frac{1}{k_f \times fit}, k_f = \frac{10}{fit_{max}} \qquad (۳۳)$$

بدین ترتیب تغییرات تصادفی اعمالی به هر پارامتر انتخاب شده درعملگر جهش از رابطه (۳۴) بدست میآید.

$$rand(-f_k \times \frac{x_{imax}}{2}, f_k \times \frac{x_{imax}}{2}) \qquad (۳۴)$$

رابطه (۳۳) نشان میدهد که در مراحل پایانی، محدوده مورد جستجو برای هر پارامتر به حدود ۰/۱ محدوده اولیه کاهش می‌یابد.

تزریق بهترین فرد نسل قدیم

با افزایش احتمال اعمال عملگر جهش به طریق ذکر شده، ملاحظه شد که در برخی حالتها، بدلیل تغییرات تصادفی زیاد، جمعیت جدید ویژگیهای نسل قبل را از دست میدهد. بمنظور جلوگیری از این اتفاق در هر مرحله از تکرار الگوریتم و پس از اجرای عملگرهای تزویج و جهش، بهترین فرد نسل قدیم جایگزین بدترین فرد نسل جدید میشود. بدین ترتیب انقراض نسل اتفاق نمی‌افتد و حفظ خصوصیات در نسل بعدی تضمین میشود.

۳- بستر و نتایج آزمایشگاهی

الف ـ بستر آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش و ارزیابی روش پیشنهادی، از سیستم نشان داده شده در شکل(۳) استفاده شده است. در این سیستم امکان نمونه برداری از ورودیها و خروجیهای مورد نظر و تحت شرایط مختلف ولتاژ و بار به سادگی فراهم است.

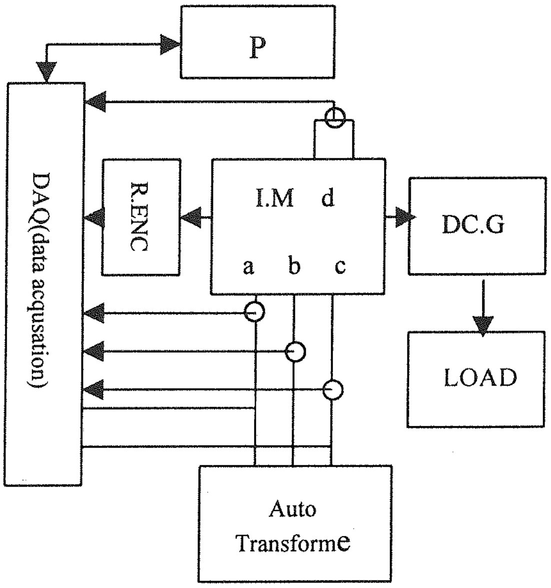
موتور القائی مورد آزمایش، موتوری دو قطبی با قدرت

۱HP و ولتاژ نامی ۳۸۰ ولت میباشد که با سیم پیچی خاص، امکان ایجاد خطای دور به دور نیز در آن فراهم شده است که پارامترهای آن عبارتند از:

$V_{L-L}=380$ volt , $I_{sr}=2$ A , $N_r=2775$ rpm
$R_s=8.2\ \Omega$, $R'_r=7.2\ \Omega$
$X_{ls}=0.023$ H , $X'_{lr}=0.027$ H , $X_{ms}=0.337$ H
Ns=24 (stator slot), Nr=18(rotor slot)

موتور مورد استفاده در هر فاز دارای چهار کلاف متحد المرکز ۹۰ دوری با اتصال ستاره می‌باشد.

نمونه برداری از ورودیها و خروجی های آزمایشی، بصورت ده بیتی و با فرکانس KHZ۵ توسط کارت DAQ و توسط PC صورت میپذیرد. نمونه برداری برای مدت کوتاهی در حدود یک ثانیه از ابتدای راه اندازی تا تثبیت سرعت موتور در سرعت نامی صورت میپذیرد و حدود ۵۰۰۰ نمونه ثبت میگردد.



شکل(۳) بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در انجام آزمایشها.

نمونه های ثبت شده، پیش از اعمال به الگوریتم ژنتیک از یک فیلتر میان گذر با فاز صفر عبور داده میشوند، تا اثر نویز سو ئیچینگ منبع تغذیه کامپیوتر و نیز آفست DC ناشی از ویژگی سنسورهای بکار رفته، حذف شوند.

ب ـ نتایج آزمایش و ارزیابی الگوریتم

در این قسمت، برای ارزیابی روش پیشنهادی، به سه سؤال مهم پاسخ داده میشود. اولا اینکه تفاوت مقدار بدست آمده برای پارامترها، از طریق شناسائی و از طریق روابط تقریبی، تا چه حد بر تطابق نتایج شبیه سازی و آزمایشی اثر دارند؟ ثانیا اینکه، آیا الگوریتم پیشنهادی نسبت به داده‌های حاصل از آزمایش حساس نمی باشد؟ بعبارت دیگر آیا با تغییر شرائط آزمایش، باز هم همگرائی حاصل میشود؟ و برای یک موتور واحد، مجموعه یکسانی از پارامترها شناسائی میشوند؟. ثالثا و از همه مهمتر اینکه، پارامترهائی که بدین طریق برای یک موتور سالم بدست می‌آیند آیا برای شبیه سازی همان موتور، تحت خطا قابل استفاده هستند؟ و نتیجه شبیه سازی با واقعیت تا چه حد تطابق دارد؟. سؤال سوم از آنرو مهم است که قرار است مدل برای مطالعه رفتار موتور تحت شرائط غیر متعارف چون بروز خطا استفاده شود، که امکان بررسی تجربی آن وجود نداشته و یا بسیار مشکل است. در ادامه، این سؤالات در سه قسمت مجزا، پاسخ داده میشوند.

دقت روش و مقایسه نتایج با مقادیر بدست آمده از فرمولهای تقریبی

ستون اول از جدول(۲) مقادیر پارامترهای موتور را که از روابط تقریبی بدست آمده اند نشان میدهد. محاسبه اندوکتانسهای نشتی میله های روتور با استفاده از روابط الکترومغناطیس حاکم و با فرض چگالی جریان یکنواخت در میله ها، و خطوط شار عمودی، انجام شده است. البته روابط تا حد امکان ساده شده‌اند تا محاسبه امکان‌پذیر گردد. مقاومت میله ها نیز با استفاده از سطح مقطع و طول آنها و مقاومت مخصوص آلو مینیوم و با صرف نظر نمودن از اثر پوستی محاسبه شده است. اندوکتانس نشتی هر فاز استاتور ۳٪ اندوکتانس خودی آن فرض شده و مقاومت فازهای استاتور با اهم متر اندازه گیری شده اند. فاصله هوائی متوسط با اعمال ضریب ۱/۲ به فاصله هوائی فیزیکی حاصل شده است. پارامترهای مکانیکی موتور با آزمایش دیگری که پارامترهای مدل dq موتور را شناسائی می نماید، شناسائی شده اند.

ستون دوم از جدول(۲)، پارامترهای شناسائی شده توسط الگوریتم پیشنهادی را نشان میدهد. داده های مورد استفاده الگوریتم، توسط سیستم شکل(۳) جمع آوری شده‌اند و شرائط آزمایش مربوطه یعنی ولتاژها و بار، در سطر اول جدول (۱) آمده است. همگرائی پس از ۲۰۰۰ بار تکرار الگوریتم حاصل شده است.

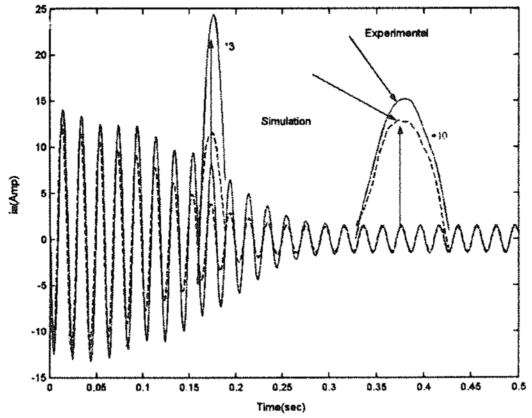
مقایسه ستون اول و دوم از جدول(۲) اختلاف بین مقادیر شناسائی شده و بدست آمده از روابط تقریبی را تا حد۱۰۰٪ نشان میدهد. اثر این اختلاف بر شکل موج جریان فاز a استاتور و سرعت موتور در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. شکل (۴) نتایج آزمایش و شبیه سازی با پارامترهای محاسبه شده را نشان میدهد. شکل

(۵) نتایج آزمایش و شبیه سازی با پارامترهای شناسائی شده و تطابق بمراتب بهتر آنها را بنمایش میگذارد.

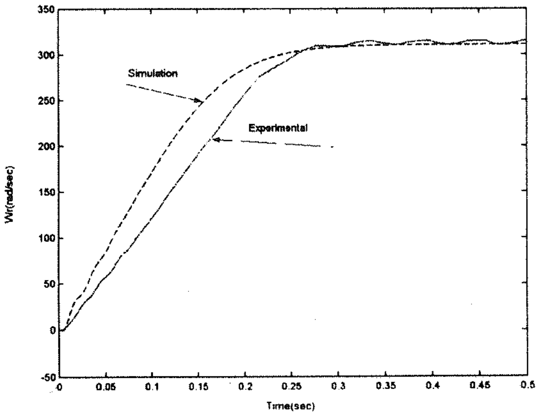
اختلاف دامنه جریانهای حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی با پارامترهای محاسبه شده از روابط تقریبی، بیش از ۱۵٪ است در حالیکه این اختلاف برای جریانهای حاصل از آزمایش و شبیه سازی با پارامترهای شناسائی شده، کمتر از ۲٪ می باشد.

جدول(۱) شرائط ولتاژ خطوط و بار در انجام آزمایشها.

	V_{ab} (volt)	V_{ab} (volt)	T_l
آزمایش اول	378	381	0
آزمایش دوم	379	378	0
آزمایش سوم	374	375	$T_n^{\%}$
آزمایش چهارم	377	377	$T_n^{\%}$

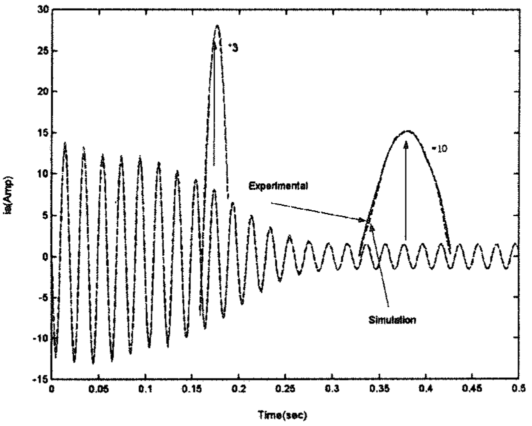


الف ـ جریان فاز a استاتور

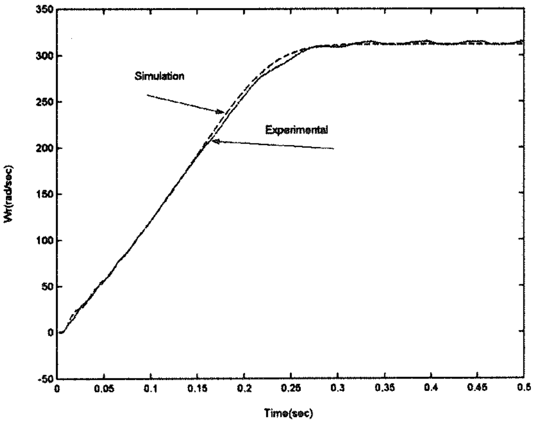


ب ـ سرعت موتور

شکل(٤)مقایسه نتایج شبیه سازی با پارامترهای محاسبه شده و نتایج آزمایش عملی برای جریان فاز a استاتور و سرعت موتور.



الف ـ جریان فاز a استاتور(بدلیل تطابق کامل، اختلاف دو منحنی حتی با بزرگنمائی ۱۰ برابر نیز مشهود نمی باشد.)



ب- سرعت موتور

شکل(۵) مقایسه نتایج شبیه سازی با پارامترهای شناسائی شده و نتایج آزمایش عملی برای جریان فاز a استاتور و سرعت موتور.

عدم حساسیت روش پیشنهادی به ولتاژ و بار، در انجام آزمایش، برای جمع آوری داده های مورد نیاز الگوریتم

برای نشان دادن عدم حساسیت روش به شرائط آزمایش، موتور مورد مطالعه با ولتاژها و بارهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. الگوریتم ژنتیک نیز برای داده‌های بدست آمده از هر یک از آزمایشها، بطور جداگانه اجرا شد. در کلیه موارد همگرائی با حداکثر ۲۰۰۰ بار تکرار حاصل شد. شرائط چهار نمونه از آزمایشها در جدول (۱) آمده است. پارامترهای بدست آمده از این چهار آزمایش نیز در ستونهای ۲ الی ۵ جدول (۲) ارائه شده اند. همانطور که ملاحظه میشود، پارامترهای بدست آمده از آزمایشهای مختلف، حد اکثر ۵٪ اختلاف دارند.

جدول(۲) پارامترهای محاسبه و شناسائی شده برای موتور مورد آزمایش

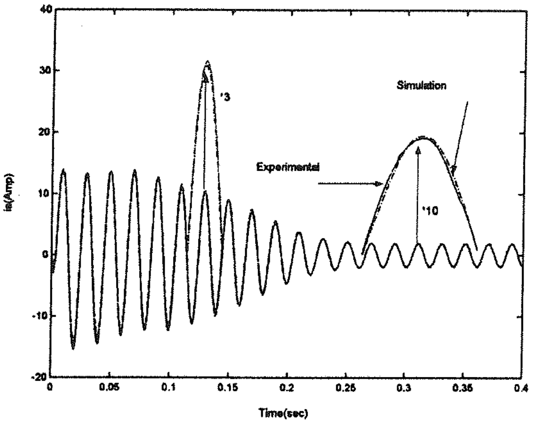
نوع پارامتر	پارامترهای محاسبه شده	پارامترهای شناسائی شده _ سری اول	پارامترهای شناسائی شده _ سری دوم	پارامترهای شناسائی شده _ سری سوم	پارامترهای شناسائی شده _ سری چهارم
g	0.75e-3	1.09e-3	1.11e-3	1.17e-3	1:15e-3
l_e	8.42e-9	1.73e-8	1.77e-8	1.79e-8	1.68e-8
l_b	6.98e-8	1.72e-7	1.77e-7	1.78e-7	1.75e-7
r_e	5.17e-6	4.05e-6	3.95e-6	3.90e-6	3.81e-6
r_b	5.34e-5	2.83e-5	2.55e-5	2.70e-5	2.73e-5
r_{sa}	7.3	7.43	7.41	7.23	7.11
r_{sb}	7.3	7.39	7.21	7.15	6.98
r_{sc}	7.48	7.55	7.35	7.25	7.69
K_{sl}	0.03	0.0691	0.0662	0.0699	0.0687
T_l	0.05	0.05	0.05	0.63	1.93
J	2.30e-3	2.32e-3	2.29e-3	16.0e-3	16.2e-3
K_1	1.58e-3	1.64e-6	1.6e-6	3.83e-6	5.83e-6
K_2	1.50e-6	1.51e-6	1.52e-6	3.79e-6	5.91e-6

× بدلیل سیم پیچی خاص موتور وامکان ایجاد خطا، مقاومت فاز a بیشتر از دو فاز دیگر است و تفاوت شدید مقادیر J , k1 , k2 در ستونهای دوم وسوم بدلیل اضافه شدن ژنراتور برای بارگذاری موتور می باشد.

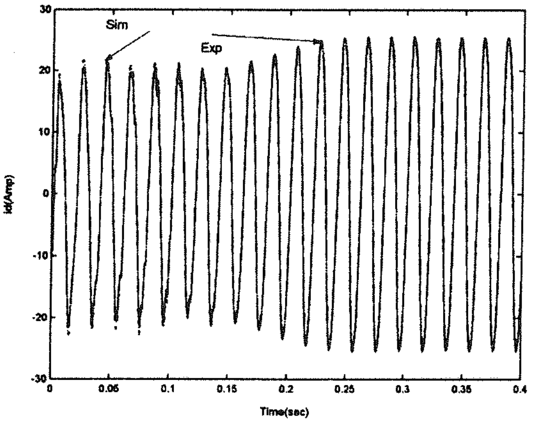
استفاده از پارامترهای موتور سالم برای شبیه سازی خطای دور به دور

در این قسمت ارزش اصلی مدل تابع سیم پیچ و الگوریتم پیشنهادی، نشان داده میشود. در واقع نمونه‌ای ارائه میشود که نشان میدهد چگونه میتوان با استفاده از پارامترهای موتور سالم، رفتار موتور را با فرض وقوع انواع خطا و با دقت بالائی مطالعه نمود.

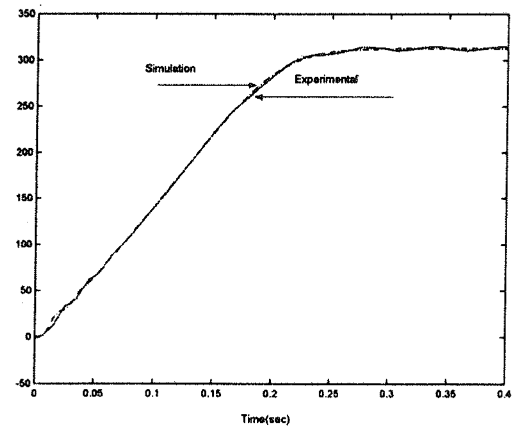
خطای مورد مطالعه در اینجا، خطای دور به دور استاتور انتخاب شده است. این انتخاب از آنرو است که، موتور مورد آزمایش بگونه ای سیم پیچی شده است که امکان ایجاد خطای مصنوعی دور به دور در آن و جمع آوری داده های تجربی و مقایسه آنها با نتایج شبیه سازی فراهم بوده است. لذا با استفاده از پارامترهای بدست آمده برای موتور سالم، مدل تابع سیم پیچ، با لحاظ نمودن خطای دور به دور ساخته و شبیه سازی انجام شد. همچنین داده های تجربی، با ایجاد خطای دور به دور، از موتور مورد آزمایش جمع‌آوری شد. اینکار برای دورهای متفاوت تکرار و در همه موارد تطبیق نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایش مشاهده شد. شکل (۶) نمونه ای از نتایج آزمایش و شبیه سازی را برای جریان فاز a استاتور، جریان اتصال کوتاه و سرعت موتور با ۵ دور خطای دور به دور نشان میدهد، که حکایت از دقت کافی شبیه سازی دارند.



الف) جریان فاز a استاتور(بدلیل تطابق کامل، اختلاف منحنی‌ها با بزرگنمائی نیز چندان مشهود نمی باشد.)



ب) جریان حلقه های اتصال کوتاه (اختلاف پیک دو جریان، در حد ٤٪ می باشد)



ج) سرعت موتور

شکل (٦) مقایسه نتایج شبیه سازی با پارامترهای شناسائی شده با نتایج آزمایش، برای جریان فاز a استاتور،جریان حلقه‌های اتصال کوتاه و سرعت موتور با وجود خطای دور به دور ۵ دوری.

٤- نتیجه گیری

در این مقاله روشی مبتنی بـر الگوریتـم ژنتیـک، بـرای شناسائی پارامترهای مدل تابع سیم پیچ ارائـه شـده اسـت. اهمیت مدل تابع سیم پیچ در مطالعه رفتـار موتـور القائی، تحت شرائط غیر متعارف، مثلا بروز انواع خطاهـای روتـور و استاتور و خطاهــای مکـانیکی مـانند نـاهم محـوری روتـور میباشد. روش مرسوم در تعیین پارامترهای مدل، استفاده از روابط تقریبی و احیانا اصلاحاتی مبتنی بر تجربه و سـعی و خطا می باشد. با این روش تضمینی برای تطابق کامل نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایش وجود ندارد. لـذا ایـن روش در کاربردهائیکه دقت بالائی را می‌طلبند، کار آئی ندارد.

روش پیشنهادی، شناسائی دقیق پارامترهای مدل تـابع سیم پیچ هر موتور القائی دلخواه را میسـر میکنـد. در ایـن روش، یک آزمایش ساده بر روی موتور سالم انجـام شـده و داده های تجربی لازم جمع آوری می شود. سپس الگوریتـم ژنتیکی با کدینـگ حقیـقی بـا استفاده از ایـن داده هـا، پارامترها را شناسائی میکند. دقت پارامترهای بدسـت آمـده از این روش و عدم حساسیت آن به شـرائط آزمـایش مـورد نیاز، نشان داده شده است.

همچنین به عنوان نمونـه ای از کـار آئـی مـدل و روش پیشنهادی، شبیه سازی رفتار موتـور تحـت خطـای دور بـه دور در اسـتاتور، بـا اسـتفاده از مـدل تـابع سـیم پیـچ و پارامترهای بدست آمده از موتور سالم، انجام شده و تطـابق نتایج شبیه سازی با نتایج آزمایش نشان داده شده است.

با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک دهها هزار بار شبیه سـازی را می‌طلبد و با توجه به اینکه شبیه سازی با مدل تابع سیم پیچ بطـور نسـبی زمـان بـر اسـت، پیـاده سـازی الگوریتـم بسادگی و در زمان معقول میسـر نبـوده و تمـهیدات انجـام شده برای اجرائی شدن آن از دیگر مطالبی است کـه مـورد بحث قرار گرفته است.

مراجع

[1] Xiaogang Luo, Yuefeng Liao, Hamid A.Toliyat, "Multiple coupled circuit modeling of induction machines", IEEE Trans on Industry Applications,Vol.31, No.2, pp.311-318, April 1995

[2] Hamid A.Toliyat ,Thomas A.Lipo,"Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and enf ring faults", IEEE Trans on Energy Conversion,Vol.10, No.2, pp.241-247, June 1995

[3]D.E.Goldberg," Genetic algorithms in search,optimization,and machin learning. " Addison-Wesley,1989.

[4]Pragasen Pillay,Ray Nolan,"Application of genetic algorithm to motor parameter determination for transient torque calculation" IEEE Trans on Industry Applications,Vol.33, No.5, pp.1273-1282, Sept 1997