

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی و تعیین میزان خطای دور به دور در موتور القایی

ابوالقاسم راعی
استادیار

وحید رشتچی
دانشجوی دکترا

دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

روشهای بهنگام مختلفی برای شناسایی خطای دور به دور موتور القایی ارائه شده است ولی هیچیک از آنها به تعیین میزان خطای دور به دور یا به عبارت دیگر تعداد دورهای اتصال کوتاه شده نمی‌پردازند. در این مقاله روش جدیدی برای شناسایی خطای دور به دور بر اساس شناسایی پارامترهای مدلی از موتور که در آن خطای دور به دور لحاظ شده است ارائه میشود. شناسایی پارامترها با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت میگیرد. با این روش علاوه بر تشخیص خطای دور به دور، میزان خطای دور به دور نیز با دقت کامل تعیین میشود. روش پیشنهادی متکی بر داده‌های اولیه جمع آوری شده از موتور سالم و یا موتوری که در آن خطای مصنوعی ایجاد شود نبوده و برای تغذیه اینورتری موتور نیز معتبر میباشد. عدم حساسیت روش به تغییرات بار، تغییرات ولتاژ شبکه، تغییرات دما و عدم تعادل ولتاژ شبکه با آزمایشهای فراوان نشان داده شده است. تغییرات لازم و تانید صحت مدل بکار رفته، الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی و تمهیدات جهت افزایش سرعت همگرایی الگوریتم از موارد دیگری است که در این مقاله مورد بحث قرار گرفته است.

کلمات کلیدی

موتور القایی، خطای دور به دور، الگوریتم ژنتیک

Using Genetic Algorithm for Detection and Magnitude Determination of Turn to Turn Faults in Induction Motor

A.Raie
Assistant Professor

V.Rashtchi
Ph.D.Student

Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

Various schemes are presented for on-line detection of turn faults in induction motor, but none of them deal with the magnitude of the fault, or in other words, the number of short turns.

This paper presents a novel scheme, for turn fault detection, based on parameter identification of a model in which the turn fault is considered. Parameter identification is done by a genetic algorithm. By using this technique, in addition to fault detection, the exact magnitude of the fault is also determined. The scheme requires neither prior data collection nor turning for each specific motor, and at the same time is valid for motors with inverter supplies. Insensitivity of the technique to load variation, supply voltage variation, temperature variation and unbalanced supply voltage is shown by many experimental tests. Necessary modification and validation of the model used for turn fault real number coded genetic algorithm, and schemes for its convergence speed up are other subjects discussed in this paper.

Keywords

Induction motor, Turn to turn fault, Genetic algorithm

الف - خطای دور به دور

موتورهای القائی نقش مهمی را در صنعت ایفا نموده و از اجزاء اصلی بسیاری از سیستمهای صنعتی و تجاری می‌باشند. به تبع این جایگاه مهم، عملکرد صحیح و قابل اطمینان آنها مورد توجه قرار گرفته و تحقیقات وسیعی برای تشخیص وقوع و وجود خطا در بخشهای مختلف آن صورت گرفته است. در این میان تشخیص خطای استاتور از آنرو که حدود ۳۰٪-۴۰٪ کل خطاهای موتور را تشکیل میدهد [۱ و ۲]، از اهمیت نسبی بالایی برخوردار میباشد. این خطا عمدتاً از خطای دور به دور آغاز شده و در صورت عدم شناسائی و اقدام به موقع توسعه یافته و میتواند منجر به خطاهای فاز به فاز یا فاز به زمین شود. در زمینه شناسائی خطای دور به دور، روشهای گوناگونی پیشنهاد شده‌اند که هر یک به نوبه خود دارای مزایا و محدودیتهائی می‌باشند. اگر چه روشهای پیشنهادی نوعاً این مزیت را دارند که راه حل‌های درجا و بهنگام می‌باشند، لیکن هیچیک به تعیین میزان خطای دور به دور یا به عبارت دیگر تعداد دورهای اتصال کوتاه شده نمی‌پردازند. همچنین این روشها بدلیل بکارگیری مدل ساده شده و یا بدلیل مشکلات اجرایی، حتی در تشخیص خطا نیز با محدودیتهائی مواجه می‌باشند. برخی از آنها در شرایط مختلف کاری موتور مانند تغییر بار، تغییر ولتاژ تغذیه، تغییر دما، عدم تعادل ولتاژ فازها و با تغذیه اینورتری معتبر نمی‌باشند. برخی دیگر متکی بر داده‌های حاصل از آزمایش می‌باشند، که این داده‌ها برای هر موتور بخصوصی در حالت سالم و یا با ایجاد خطای مصنوعی در آن می‌بایست جمع‌آوری شوند و نتیجتاً در عمل سهل‌الاستفاده نخواهند بود.

ب - مروری بر روشهای مرسوم برای تشخیص خطای دور به دور

استفاده از جریان توالی منفی خط و امپدانس توالی منفی خط، از اولین روشهای می‌باشند که برای شناسائی خطای دور به دور بکار گرفته شده‌اند [۳ و ۴]. صرف نظر نمودن از تغییرات جزئی امپدانس توالی منفی که ناشی از تغییرات بار، دما و سرعت می‌باشند و نیز عدم توجه به عدم تقارن ذاتی ماشین از جمله مسائلی هستند که از دقت و حساسیت این روش می‌کاهند. برای جبران این کاستیها، اندازه‌گیری جریان توالی منفی موتور سالم در حالت‌های مختلف و ثبت آنها در یک جدول و درونیابی برای مقادیر اندازه‌گیری نشده پیشنهاد گردیده است [۵]. در این صورت برای هر موتور خاص، انجام آزمایشها و اندازه‌گیری‌های متعدد مورد نیاز میباشد.

- استفاده از جمع جبری ولتاژهای لحظه‌ای خطوط نسبت به نقطه خنثی موتور روش دیگری است که پیشنهاد شده است [۶]. وجود مولفه‌های فرکانسی نامطلوب در این جمع جبری و نیاز به فیلتر نمودن و محاسبه مقدار متوسط و نیز لزوم دسترسی به نقطه خنثی موتور از محدودیت‌های این روش است.

- روش دیگری که برای تشخیص خطای دور به دور پیشنهاد شده است مبتنی بر نظارت بر بردار پارک جریان میباشد [۷]. اگر چه این روش قادر به تشخیص فاز معیوب نیز می‌باشد ولی فقط در ولتاژ متعادل خط قابل استفاده است که خود یک محدودیت میباشد.

- استفاده از طیف فرکانسی جریان خط موتور روش دیگری است که برای تشخیص خطای دور به دور بکار رفته است [۸]. این روش عمدتاً در حالت بی باری موتور قابل استفاده است.

- شبکه‌های عصبی نیز برای شناسائی خطای دور به دور مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳]. برای آموزش شبکه عصبی و فراهم آوردن داده‌های یادگیری برای یک موتور خاص، خطای مصنوعی در موتور ایجاد میشود و اندازه‌گیری‌هایی در شرایط مختلف صورت می‌گیرد [۱۳]. شبکه آموزش داده شده فقط برای همان موتور کاربرد داشته و حتی برای موتورهای سالم هم مدل نیز قابل استفاده نمیشود. این روش علی‌رغم همه تمهیدات بکار رفته، در شناسائی خطای تک دور ناتوان بوده است.

این تحقیق در راستای تصمیم‌گیری و انتخاب استراتژی مناسب، در قبال وقوع خطای دور به دور صورت گرفته است. در صورت وقوع خطای دور به دور، الزاماً بهترین تصمیم توقف موتور نبوده، و با داشتن میزان خطای دور به دور و بسته به نوع

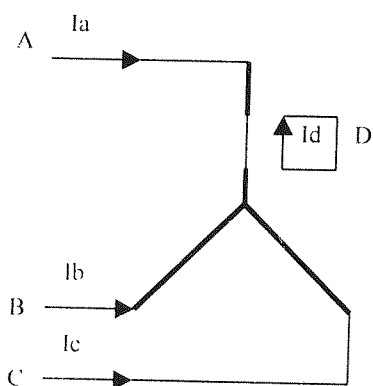
کاربرد، میتوان نسبت به ادامه کار در شرایط جدید و یا توقف آن تصمیم‌گیری نمود. با این فرض داشتن میزان خطای دور به دور از عوامل تعیین‌کننده در تصمیم‌گیری میباشد.

روشهای مرسوم همگی در این ویژگی مشترک هستند که وجود خطای دور به دور را تشخیص میدهند و نه میزان آنرا و در نتیجه در قبال وقوع خطا، تصمیمی جز توقف کار موتور معقول نمیباشد. روش پیشنهادی در این مقاله، امکان تعیین میزان خطای دور به دور را با آزمایش غیر مخرب و مستقل از موتور، بدون نیاز به ایجاد خطای مصنوعی بدست میدهد. بدیهی است که با داشتن میزان خطا، وجود خطا نیز بطریق اولی تشخیص داده شده است.

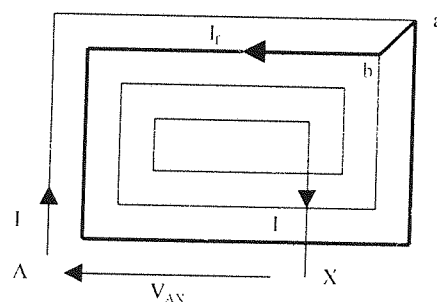
دستاوردهای این تحقیق در قالب مدلسازی موتور القائی با خطای دور به دور، معرفی و کاربرد الگوریتم ژنتیک در شناسایی پارامترهای یک مدل، پیاده‌سازی الگوریتم با کدینگ حقیقی برای تشخیص خطای دور به دور، سرعت بخشی به الگوریتم، بستر آزمایشگاهی و نتایج آزمایشی، در بخشهای بعدی ارائه میشوند.

۱- مدل سازی موتور القائی با خطای دور به دور

برای مدل سازی موتور با خطای دور به دور، دورهای اتصال کوتاه شده، به عنوان فاز چهارم در معادلات ماشین وارد میشوند [۸]. در شکل (۱-الف) قسمتی از کلاف یک فاز که در آن خطای دور به دور بین نقاط a, b اتفاق افتاده، نشان داده شده است.



(ب) ترکیب سیم پیچهای استاتور با وقوع خطای دور به دور



(الف) خطای دور به دور بین دو نقطه a, b

شکل (۱) وقوع خطای دور به دور در یک فاز.

با توجه به شکل (۱) واضح است که مسیر AX را میتوان به دو مسیر مستقل از هم تجزیه نمود. جریان حلقه های اتصال کوتاه (I_r) در یک مسیر بسته گردش نموده و MMF مخالف با جریان فاز تولید میکند. MMF فاز نیز، بدلیل اینکه تعدادی از حلقه های آن اتصال کوتاه و از مدار خارج شده اند، کاهش می یابد. با این توضیحات، به فرض وقوع خطای دور به دور در یک فاز، میتوان حلقه های اتصال کوتاه شده را به عنوان فاز چهارم (D) با ولتاژ صفر (اتصال کوتاه) در معادلات ماشین وارد نمود. شکل (۱-ب) ترکیب سیم پیچهای استاتور را برای یک موتور با اتصال ستاره و خطای دور به دور در فاز A نشان میدهد و معادلات (۱) الی (۹) بیانگر رفتار چنین موتوری میباشد.

$$V_s = R_s \times I_s + \frac{d\Lambda_s}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r \times I_r + \frac{d\Lambda_r}{dt} \quad (2)$$

$$\Lambda_s = L_{sa} \times I_a + L_{sb} \times I_b \quad (3)$$

$$\Lambda_r = L_{ra} \times I_a + L_{rb} \times I_b \quad (4)$$

$$V_s = [v_{sa} \quad v_{sb} \quad v_{sc} \quad 0]^T \quad (5)$$

$$I_s = [i_a \quad i_b \quad i_c \quad i_d]^T \quad (6)$$

$$I_r = [i_{ra} \quad i_{rb} \quad i_{rc}]^T \quad (7)$$

$$\Lambda_s = [\lambda_{sa} \quad \lambda_{sb} \quad \lambda_{sc} \quad \lambda_{sd}]^T \quad (8)$$

$$\Lambda_r = [\lambda_{ra} \quad \lambda_{rb} \quad \lambda_{rc}]^T \quad (9)$$

در معادلات (۱) الی (۹)، بردار ولتاژ فازهای استاتور، Λ_s, Λ_r بردار شارهای استاتور و روتور و I_r, I_s بردارهای جریان استاتور و روتور میباشند.

از آنجا نیکه اندوکتانسهای خودی با مربع تعداد دورهای سیم پیچ و اندوکتانسهای متقابل با حاصلضرب تعداد دورهای دو سیم پیچ متناسب بوده و این امر در موتور سالم و معیوب هر دو صادق است، روابط (۱۰) الی (۱۴) ماتریسهای مقاومت و اندوکتانس استاتور و روتور را نشان میدهند. در این روابط μ در صدی از حلقه های فاز A موتور میباشند که اتصال کوتاه شده اند. اندوکتانس نشتی حلقه های اتصال کوتاه شده برابر μL_{ls} است [۱۴] که در آن L_{ls} اندوکتانس نشتی یک فاز موتور میباشند. بدیهی است که ماتریس اندوکتانس خودی و مقاومت روتور در روابط نشان داده شده با حالت بدون خط تفاوتی ندارد.

$$R_s = r_s \times \text{diag}[(1-\mu) \quad 1 \quad 1 \quad \mu] \quad (10)$$

$$R_r = r_r \times I_{3 \times 3} \quad (11)$$

$$L_{ss} = L_{ls} \times \begin{bmatrix} 1-\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} + L_{ms} \times \begin{bmatrix} (1-\mu)^2 & -\frac{1-\mu}{2} & -\frac{1-\mu}{2} & \mu(1-\mu) \\ -\frac{1-\mu}{2} & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{\mu}{2} \\ -\frac{1-\mu}{2} & -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{\mu}{2} \\ \mu(1-\mu) & -\frac{\mu}{2} & -\frac{\mu}{2} & \mu^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$L_{sr} = L_{ms} \times \begin{bmatrix} (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r) & (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (1-\mu) \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \\ \mu \cdot \cos(\theta_r) & \mu \cdot \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \mu \cdot \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & L_{lr} + L_{ms} & \frac{-L_{ms}}{2} \\ \frac{-L_{ms}}{2} & \frac{-L_{ms}}{2} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (14)$$

روابط (۱۵) و (۱۶) معادلات گشتاور و سرعت را بدست می‌دهند.

$$T_e = \frac{P}{2} \times \mathbf{I}_s^T \times \frac{\partial \mathbf{L}_{sr}}{\partial \theta_r} \times \mathbf{I}_r \quad (15)$$

$$J \times \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_{it} \quad (16)$$

$$T_{it} = T_1 + T_c + k_1 \times \omega_r + k_2 \times \omega_r^2 \quad (17)$$

در رابطه (۱۶) T_{it} کل بار منتقله به شفت موتور می‌باشد که مولفه‌های آنرا رابطه (۱۷) نشان می‌دهد. در این رابطه T_1 ، بار مکانیکی، T_c گشتاور کولمب ناشی از اصطکاک، K_1 ضریب میرایی و K_2 برای مدل‌سازی بار ناشی از فن خنک‌کننده، بر روی شفت موتور می‌باشد.

در معادله (۱) از ولتاژ فازهای استاتور استفاده شده است که بدلیل عدم دسترسی به نقطه خنثی ماشین، این ولتاژها بطور معمول قابل دسترس و اندازه‌گیری 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 (۱۸) الی (۲۲) بر حسب ولتاژ خطوط دست می‌یابیم.

$$i_c = -(i_a + i_b) \quad (18)$$

$$\mathbf{V}_{sll} = \mathbf{R}_{sll} \times \mathbf{I}_{sll} + \frac{d\Lambda_{sll}}{dt} \quad (19)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{R}_r \times \mathbf{I}_r + \frac{d\Lambda_r}{dt} \quad (20)$$

$$\Lambda_{sll} = L_{s-sll} \times \mathbf{I}_{sll} + L_{srl} \times \mathbf{I}_r \quad (21)$$

$$\Lambda_r = L_{r-sll} \times \mathbf{I}_{sll} + L_{rr} \times \mathbf{I}_r \quad (22)$$

$$\mathbf{V}_{sll} = [v_{ab} \quad v_{bc} \quad 0]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{I}_{sll} = [i_a \quad i_b \quad i_d]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{I}_r = [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^T \quad (25)$$

$$\Lambda_{sll} = [\lambda_{ab} \quad \lambda_{bc} \quad \lambda_d]^T \quad (26)$$

$$\Lambda_r = [\lambda_{ra} \quad \lambda_{rb} \quad \lambda_{rc}]^T \quad (27)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \times \mathbf{I}_{sll}^T \times \frac{\partial L_{sll}}{\partial \theta_r} \times \mathbf{I}_r \quad (28)$$

$$L_{sll} = \begin{bmatrix} L_{ls} + (\mu^2 - 3\mu + \frac{3}{2})L_{ms} & -(L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms}) & (\frac{3}{2}\mu - \mu^2)L_{ms} \\ (L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms}) & 2(L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ms}) & 0 \\ (\frac{3}{2}\mu - \mu^2)L_{ms} & 0 & (L_{ls} + \mu^2L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$L_{srll} = \begin{bmatrix} L_{sr}[1,:] - L_{sr}[2,:] \\ L_{sr}[2,:] - L_{sr}[3,:] \\ L_{sr}[4,:] \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$L'_{srll} = \begin{bmatrix} L_{sr}[1,:] - L_{sr}[3,:] \\ L_{sr}[2,:] - L_{sr}[3,:] \\ L_{sr}[4,:] \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$L_{rsll} = \begin{bmatrix} L_{sr}[1,:] - L_{sr}[3,:] \\ L_{sr}[2,:] - L_{sr}[3,:] \\ L_{sr}[4,:] \end{bmatrix}^T \quad (32)$$

۲ - الگوریتم ژنتیک و کاربرد آن در شناسایی پارامترهای یک مدل

الف - ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک روشی است که می‌تواند برای حل دستگاه معادلات غیر خطی بکار گرفته شود. الگوریتم ژنتیک از توابع معیار برای سنجش پاسخ و محاسبه و مقایسه خطا استفاده می‌کند. این الگوریتم با استفاده از اعداد تصادفی و بر مبنای انتخاب طبیعی عملکرده و نیاز به داشتن تخمین اولیه خوبی از جواب مسئله نمی‌باشد. یعنی بدست آوردن پاسخ یک مسئله پیچیده می‌تواند از تخمین‌های اولیه ضعیف شروع و در روند تکاملی بقای اصلح، به دقت لازم برسد. از ویژگی‌های مهم این الگوریتم نسبت به سایر روشها، توانایی آن در بدست آوردن مینیمم یا ماکزیمم سراسری و عدم نیاز به مشتق توابع معیار میباشد که البته بدست آوردن مشتق توابع، نوعا ساده نبوده و یا ممکن است وجود نداشته باشد.

ب - فرم استاندارد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک در فرم استاندارد آن با رشته‌های باینری سر و کار دارد. هر رشته باینری که کروموزوم نامیده میشود، عضو جمعیتی است که از آن نسل‌های بعدی تولید میشود. عملگرهای الگوریتم ژنتیک که از فرآیند تکامل طبیعی اقتباس شده اند، جمعیت را بسوی تکامل که بمعنی بزرگتر شدن تابع معیار است پیش می‌برند. الگوریتم ژنتیک ساده‌ای که در بسیاری از مسائل عملی نتایج خوبی تولید میکند، سه عملگر زیر را در بر دارد:

- تولید مثل

- تزیوج

- جهش

شکل (۲) مراحل کار الگوریتم را با این سه عملگر نشان میدهد. نحوه کار هر عملگر بطور اختصار در ادامه آمده است.

تولید مثل

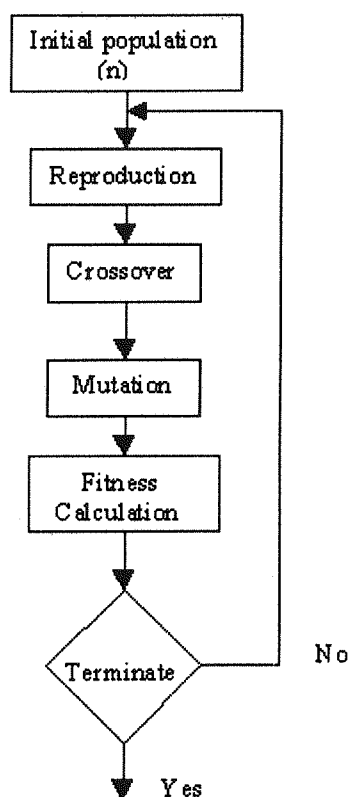
عملگر تولید مثل تکثیر هر کروموزوم را متناسب با تابع معیار آن انجام میدهد. بدین ترتیب کروموزومهایی که دارای تابع معیار بهتر هستند در نسل بعدی بیشتر تکثیر شده‌اند.

تزیوج

عملگر تزیوج، بر روی دو کروموزوم عمل کرده و دو کروموزوم جدید با ترکیب خصوصیات آنها تولید میکند. برای اینکار کروموزومهای حاصل از تولید مثل، دو به دو با احتمال P_c برای تزیوج انتخاب میشوند و سپس عدد تصادفی دیگری نقطه اثر عملگر را در کروموزومهای انتخابی تعیین میکند. تمامی بیت‌های دو رشته از این نقطه اثر با یکدیگر تعویض می‌شوند. شکل (۳-الف) نحوه کار این عملگر را نشان میدهد. تزیوج میتواند در چند نقطه اثر صورت پذیرد که به آن تزیوج چند گانه گفته میشود.

جهش

عملگر جهش، تغییرات تصادفی در افراد جمعیت را باعث میشود. برای اینکار افراد جمعیت با احتمال P_m برای انجام عملگر انتخاب میشوند. سپس یک عدد تصادفی نقطه اثر یا جهش را در کروموزوم انتخاب شده تعیین کرده و بیت مربوطه در این موقعیت مکمل میشود. شکل (۳-ب) نحوه کار این عملگر را نشان میدهد. این عملگر نیز میتواند بصورت چند گانه عمل کرده و در چند نقطه از کروموزوم باعث مکمل شدن بیتها شود.



شکل (۲) روند کار الگوریتم ژنتیک.

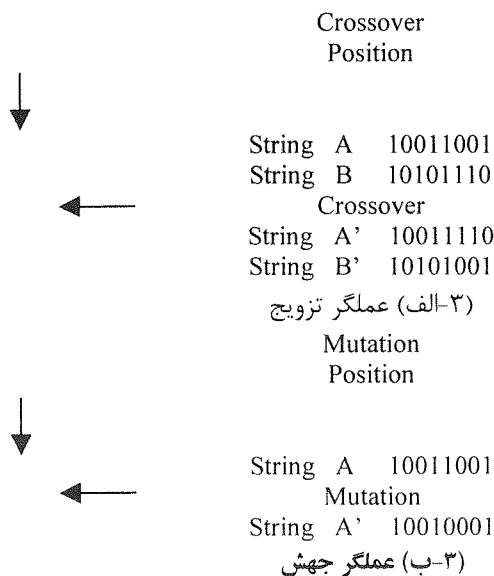
ج - استفاده از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی پارامترهای یک مدل

$\bar{Y}_{ei} = (y_1, y_2, \dots, y_j)$ را پاسخ دینامیک یا گذرای سیستمی با ورودی $\bar{X}_{ei} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ در نظر می‌گیریم. N زوج ورودی/خروجی $(\bar{X}_{ei}, \bar{Y}_{ei})_{i=1}^N$ از طریق آزمایش بدست می‌آیند. سیستم دارای مدلی با پارامترهای $\bar{P} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ می‌باشد. \bar{Y}_{ei} را پاسخ مدل شبیه‌سازی شده به \bar{X}_{ei} می‌نامیم. هدف از شناسایی پارامترها بدست آوردن \bar{P} به گونه‌ای است که به ازای هر $\bar{Y}_{ei} = \bar{Y}_{ei}, \bar{X}_{ei}$ شود.

با توجه به وجود نویز، خطاهای عددی در شبیه‌سازی مدل و نیز خطاهای دستگاه‌های اندازه‌گیری، در عمل هیچگاه این برابری حاصل نخواهد شد. لذا بهترین تخمین برای پارامترها، تخمینی است که مجموع مربعات خطا را برای n زوج $\bar{Y}_{ei}, \bar{Y}_{si}$ حداقل نماید و بعبارت دیگر تابع معیار (۳۳) را ماکزیمم کند.

$$\text{Fit} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\bar{Y}_{ei} - \bar{Y}_{si})^2} \quad (33)$$

بدین ترتیب مسئله شناسایی پارامترها به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل شده و با الگوریتم ژنتیک قابل حل می‌شود.



شکل (۳) عملگرهای تزویج و جهش.

۳ - پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک برای شناسایی خطای دور به دور

الف - الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی

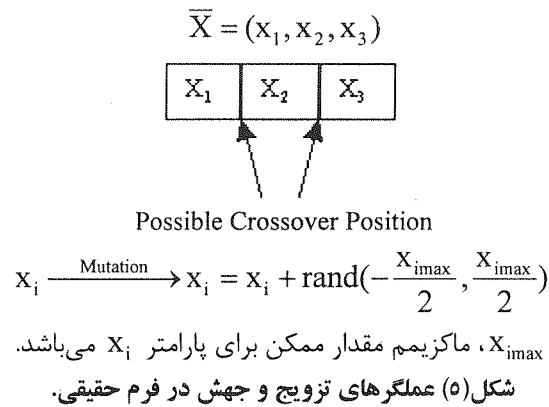
الگوریتم ژنتیک در فرم استاندارد، بر روی یک رشتهٔ باینری عمل می‌کند. ولی آنچه که در عمل و در بسیاری از کاربردها از جمله شناسایی پارامترها، مورد نیاز است، کار بر روی متغیرهای حقیقی می‌باشد. برای هماهنگ کردن این نیاز با فرم استاندارد، میتوان رشته بیت‌های متناظر با هر عدد حقیقی را بر اساس قواعد رمز کردن گوناگون بدست آورده و در کنار یکدیگر چیده و کروموزوم را تشکیل داد. نمونه‌ای از نحوه رمز کردن اعداد حقیقی با سه پارامتر حقیقی در شکل (۴) نشان داده شده است. پس از تشکیل کروموزوم، عملگرها میتوانند مطابق استاندارد استفاده شوند و به عنوان مثال نقطه تزویج میتواند در وسط یک پارامتر حقیقی رخ دهد.

$$\begin{aligned} \bar{X} &= (x_1, x_2, x_3) \\ \bar{X}' &= (x'_1, x'_2, x'_3) \\ 0 < x_1 < 0.001 & \quad x'_1 = x_1 \times 10000 & \quad 0 < x'_1 < 10 \\ 0 < x_2 < 0.03 & \quad x'_2 = x_2 \times 1000 & \quad 0 < x'_2 < 30 \\ 0 < x_3 < 10 & \quad x'_3 = x_3 & \quad 0 < x'_3 < 10 \end{aligned}$$

1101	11001	1010
------	-------	------

شکل (۴) نحوه کدینگ اعداد حقیقی.

در حل 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 پیاده‌سازی و افزایش سرعت همگرایی شده است. در این نگرش هر کروموزوم بجای مجموعه‌ای از بیتها، مجموعه‌ای 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 (۵) نحوه کار عملگرهای تزویج و جهش برای فرم حقیقی نشان داده شده است.



ب - پارامترهای مورد استفاده در مدل موتور القائی با خطای دور به دور

پارامترهای مدل ارائه شده در بخش ۲، برای موتور القائی با خطای دور به دور را میتوان با بردار \bar{P} نشان داد.

$$\bar{P} = (r_s, r_r, L_{ls}, L_{lr}, L_{ms}, J, T_l, T_c, k_1, k_2, \mu) \quad (34)$$

اگرچه از دید شناسائی خطای دور به دور، تعیین μ مورد توجه است ولی در پروسه شناسائی μ ، سایر پارامترها نیز میبایست تعیین مقدار و شناسائی گردند. دلیل این امر اینست که داده های حاصل از آزمایش، تحت شرایط کاری مختلف موتور میتوانند نمونه برداری شوند و تحت شرایط کاری مختلف، پارامترها ثابت نیستند. توضیح آنکه، تغییرات J, T_l با شرایط کاری، تغییرات مقاومتی با دما و تغییرات اندوکتانسی با شار و در نتیجه ولتاژ، قابل صرف نظر نبوده و ثابت فرض کردن آنها منجر به خطای تشخیص میشود. لذا برای هر مجموعه از داده های تجربی نمونه برداری شده، کلیه پارامترها و از آنجمله μ تخمین زده میشود.

ج - ورودی خروجی های بکار فته و تابع معیار انتخابی

برای شناسائی پارامترها، داده های نمونه برداری شده بصورت زوجهای ورودی/خروجی $(\bar{X}_{oi}, \bar{Y}_{oi})_{i=1,2,3}$ مورد نیاز است. متغیرهای انتخابی به عنوان ورودی و خروجی می‌بایست به سادگی قابل اندازه گیری باشند. ولتاژهای خط به عنوان ورودی، جریانهای موتور و سرعت روتور به عنوان خروجی، بهترین انتخاب ما میباشد. مولفه های بردارهای ورودی/خروجی آزمایشی و خروجی حاصل از شبیه سازی یعنی $\bar{X}_e, \bar{Y}_e, \bar{Y}_s$ در رابطه (۳۵) نشان داده شده اند.

$$\begin{aligned} \bar{X}_e &= (V_{ab}^e, V_{bc}^e) \\ \bar{Y}_e &= (I_a^e, I_b^e, I_c^e, \omega_r^e) \\ \bar{Y}_s &= (I_a^s, I_b^s, I_c^s, \omega_r^s) \end{aligned} \quad (35)$$

با توجه به توضیحات بخش (۳-ب)، تابع معیاری مطابق با رابطه (۳۶) برای الگوریتم ژنتیک تعریف کرده ایم.

$$Fit = \frac{1}{\sum_{i=1}^n ((I_{ai}^e - I_{ai}^s)^2 + (I_{bi}^e - I_{bi}^s)^2 + (I_{ci}^e - I_{ci}^s)^2 + k_w \times (\omega_{pi}^e - \omega_{pi}^s)^2)}$$

برای آنکه خطاهای مولفه‌ها در رابطه (۳۶) سهم یکسانی داشته باشند، ضریب k_w 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.

د - اجرای الگوریتم ژنتیک با شرایط متعارف

الگوریتم ژنتیک در فرم استاندارد نوعا با جمعیت ۵۰ الی ۱۰۰ نفری و با احتمال تزویج (P_c) بزرگ و احتمال جهش (P_m) بسیار کوچک اجرا میشود.

با انتخاب شرایط مشابه، یعنی جمعیت ۵۰ نفری، $P_c=0.75$ و احتمال جهش $P_m=0.01$ الگوریتم نوشته شده مورد آزمایش قرار گرفت که اگر چه دقت مطلوب بود ولی سرعت همگرایی آن مطلوب نبود. برای دسترسی به سرعت همگرایی بیشتر، شرایط مختلف و در محدوده‌های با تعداد جمعیت بین ۵۰ الی ۱۰۰، $0.5 < P_c < 0.85$ و $0.01 < P_m < 0.1$ ، مورد آزمایش قرار گرفت که البته در تمامی موارد همگرایی حاصل و شناسایی پارامترها با دقت کافی انجام گرفت و لیکن بهبود عمده‌ای در سرعت همگرایی حاصل نشد و تعداد دفعات تکرار در حدود ۸۰۰۰ بار باقیماند.

نهایتا جهت افزایش سرعت همگرایی تمهیداتی خارج از روش‌های متعارف اعمال شد که در بخش بعدی مورد بحث قرار میگیرد.

ع - تمهیدات اصلاحی برای افزایش سرعت همگرایی

در راستای افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک مورد بحث، روند عملکرد آن در طی اجرای مراحل مختلف الگوریتم و تحت شرایط مختلف، مورد نظارت و ارزیابی قرار گرفته و از مشاهدات استنتاجات ذیل بعمل آمد:

- افزایش احتمال جهش به افزایش سرعت همگرایی الگوریتم کمک می‌نماید.
- افزایش احتمال تزویج منجر به همشکل شدن جمعیت شده و الگوریتم کار آبی خود را که تکیه بر جمعیت دارد، از دست می‌دهد.

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

پس با تکیه بر این نتایج تغییرات و تمهیدات زیر بعمل آمده و بکار بسته شد:

- جمعیت ۵ نفری انتخاب شد.

- احتمال تزویج $P_c=0.25$ انتخاب شد.

- جهش بصورت چند گانه و دسته‌بندی 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 تغییرات بیان شده، سرعت همگرایی الگوریتم بسیار افزایش یافت. به گونه‌ای که در اجرای مکرر و در

حالات مختلف، در بهترین حالت با حدود ۱۰۰۰ بار تکرار، و در بدترین حالت با حدود ۳۰۰۰ بار تکرار، همگرایی حاصل شد.

لازم به ذکر است که قبل از اعمال تغییرات، تعداد دفعات تکرار ۸۰۰۰ بار و با جمعیت حداقل ۵۰ نفری بوده که به معنی

۴۰۰۰۰۰ بار محاسبه تابع معیار می‌باشد که این عدد پس از تغییرات، به حداکثر ۱۵۰۰۰ بار کاهش یافته و بعبارت دیگر

سرعت بیش از ۲۵ بار افزایش یافته است.

از آنجائیکه سه مورد آخر از تمهیدات انجام شده، بیشترین تاثیر را در افزایش سرعت همگرایی داشته‌اند، توضیح مختصری

در مورد هر یک ارائه میشود.

الف - جهش خانوادگی

ارزیابی های اولیه الگوریتم نشان داد که افزایش احتمال جهش در یک پارامتر، سرعت همگرایی 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. نهایتاً جهش خانوادگی بعنوان روشی معتدل انتخاب و اعمال گردید که سرعت همگرایی را بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. در این روش پارامترهای هر کروموزوم به چهار خانواده، با مفاهیم فیزیکی نزدیکی تقسیم شدند، که عبارتند از:

$$\begin{aligned} & \tau_s, \tau_r \\ & L_{ls}, L_{lr}, L_{ms} \\ & J, T_1, T_e, k_1, k_2 \\ & \mu \end{aligned}$$

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 می‌شود، تغییر تصادفی اعمال گردید.

ب - کاهش محدوده تغییرات تصادفی عملگر جهش

از آنجائیکه افزایش تابع معیار به منزله نزدیک تر شدن به نقطه هدف می‌باشد، 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 صورت مختلف امکان پذیر میباشد. در اجرای الگوریتم مورد بحث، تابع f_k طبق رابطه (۳۷) تعریف و بکار گرفته شده است.

$$f_k = \frac{1}{k_f \times \text{fit}}, k_f = \frac{10}{\text{fit}_{\max}} \quad (37)$$

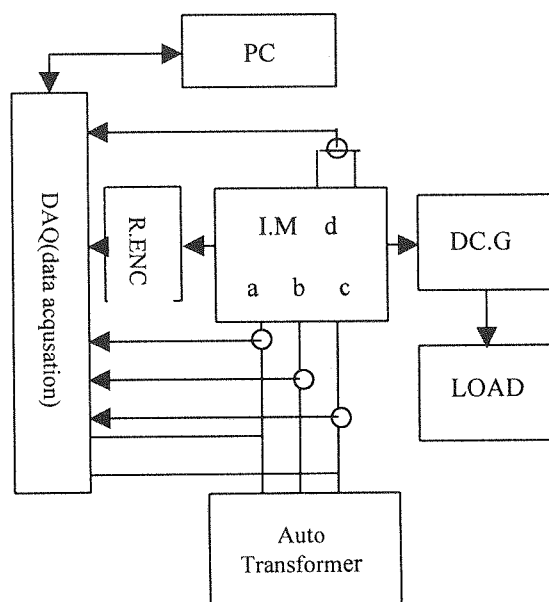
بدین ترتیب تغییرات تصادفی اعمالی به هر پارامتر انتخاب شده در عملگر جهش از رابطه (۳۸) بدست می‌آید.

$$\text{rand}\left(-f_k \times \frac{X_{\max}}{2}, f_k \times \frac{X_{\max}}{2}\right) \quad (38)$$

رابطه (۳۷) نشان میدهد که در مراحل پایانی، محدوده مورد جستجو برای هر پارامتر به حدود ۰/۱ محدوده اولیه کاهش می‌یابد.

ج - 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.



شکل (۶) بستر آزمایشگاهی مورد استفاده در انجام آزمایشها.

۵ - بستر و نتایج آزمایشگاهی

الف - بستر آزمایشگاهی

برای انجام آزمایش و ارزیابی روش پیشنهادی، از سیستم نشان داده شده در شکل (۶) 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 1HP و ولتاژ نامی ۳۸۰ ولت میباشد که پارامترهای آن عبارتند از:

$$V_{L-L}=380 \text{ volt}, I_g=2 \text{ A}, N_r=2775 \text{ rpm}$$

$$R_s=8.2 \text{ } \Omega, R_r=7.2 \text{ } \Omega$$

$$X_{ls}=0.023 \text{ H}, X'_{lr}=0.027 \text{ H}, X_{ms}=0.337 \text{ H}$$

برای ایجاد خطای مصنوعی دور به دور، یکی از فازهای این موتور به گونه‌ای خاص سیم پیچی شده و سر سیمهای لازم از این فاز به خارج آورده شده است. با استفاده از این سر سیمها میتوان خطاهای دور به دور از ۱ تا ۲۲ دور بجز سه حالت ۱۹، ۱۶، ۱۱ دور را به سادگی ایجاد نمود.

نمونه برداری از ورودیها و خروجیهای تجربی، بصورت ده بیتی و با فرکانس 5KHZ توسط کارت DAQ و توسط PC صورت میپذیرد. برای جلوگیری از توسعه خطا و صدمه دیدن موتور، 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.

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

ب - نتایج آزمایشی و ارزیابی الگوریتم

از آنجا که ادعای مهم ما در روش پیشنهادی این است که این روش برای هر موتور القائی و تحت شرایط کاری و محیطی مختلف جوابگو میباشد، مجموعه وسیعی از داده‌ها تحت شرایط مختلف کاری، جمع آوری و عملکرد الگوریتم مورد ارزیابی قرار گرفت. تغییر تعداد دورهای خطا با استفاده از سر سیمها، تغییر ولتاژ با استفاده از اتو ترانسفورمر، تغییر بار با استفاده از ژنراتور DC، تغییر دما با آزمایشهای پیاپی و راه اندازیهای مکرر، اعمال و نتایج بیش از ۶۰ آزمایش جمع آوری شد. این آزمایشها مطابق جدول (۱) برای خطاهای مصنوعی یک الی ۱۲ دور صورت گرفته و برای هر مورد از میزان خطا، پنج آزمایش با ولتاژهای ورودی در رنج ۹۰٪ الی ۱۰۰٪ و عدم تعادل در محدوده ۴٪ ولتاژ نامی و تغییر بار از صفر تا مقدار نامی انجام شده

است. همچنین سعی شده است که آزمایشها، ولتاژها، بارها و شرایط محیطی متنوعی را پوشش دهند. از آنجا که نمایش شرایط یکایک آزمایشها، جدول حجیمی را می‌طلبد، به ارائه شرایط آزمایشهای انجام شده برای ۱۲ و ۱ دور در جدول (۲) بسنده میشود.

جدول (۱) محدوده تغییرات شرایط کاری در آزمایشها

محدوده تغییرات تعداد دورهای خطای مصنوعی	صفر الی ۱۲ دور
محدوده کاهش ولتاژ ورودی	۱۰٪ ولتاژ نامی
محدوده عدم تعادل ولتاژ ورودی	۴٪ ولتاژ نامی
محدوده بار اعمالی	صفر الی بار نامی

جدول (۲) شرایط آزمایشهای انجام شده برای ۱ و ۱۲ دور خطای دور به دور

Nf: تعداد دور تشخیص داده شده

Rsg: مقاومت استاتور شناسائی شده

Rsa: مقاومت استاتور اندازه‌گیری شده

Tr: بار نامی

جدول (۲) شرایط آزمایشهای انجام شده برای ۱ و ۱۲ دور خطای دور به دور.

ولتاژها		میزان بار	Nf	Rsg	Rsa
V _{ab}	V _{bc}				
۳۴۶/۳	۳۴۲/۲	0	۱	۷/۷۳	۷/۸۸
۳۵۴/۳	۳۵۸/۶	0.25Tr	۱	۷/۷۹	۷/۹۲
۳۶۲/۸	۳۶۵/۶	0.5Tr	۱	۸/۱۲	۸/۰۰
۳۷۰/۴	۳۷۶/۷	0.75Tr	۱	۸/۱۸	۸/۰۵
۳۷۹/۵	۳۷۱/۴	Tr	۱	۸/۲۵	۸/۱۲

الف) یک دور خطای دور به دور

ولتاژها		میزان بار	Nf	Rsg	Rsa
V _{ab}	V _{bc}				
۳۴۹/۳	۳۴۹	0.5Tr	۱۱	۸/۴۰	۸/۲۵
۳۵۶	۳۵۷/۲	0.75Tr	۱۲	۸/۴۳	۸/۲۵
۳۶۴/۵	۳۶۳/۲	Tr	۱۲	۸/۵۱	۸/۳۲
۳۷۲/۸	۳۶۵/۱	0	۱۲	۸/۵۷	۸/۴
۳۸۱	۳۷۸	0.25Tr	۱۲	۸/۵۹	۸/۴۲

ب) دوازده دور خطای دور به دور

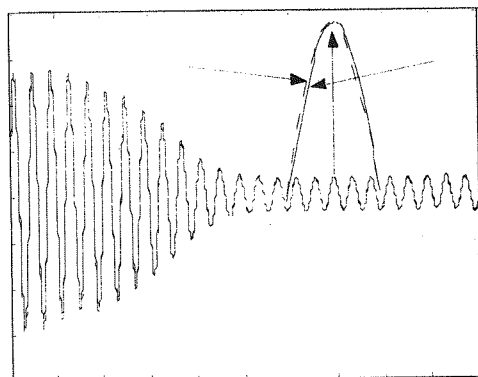
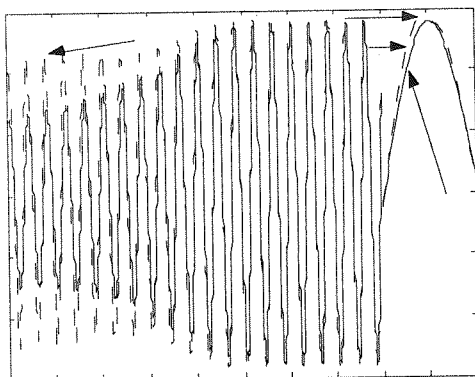
داده‌های بدست آمده، به الگوریتم ژنتیک اعمال و میزان خطای دور به دور، بجز ۵ مورد از ۶۰ مورد، با دقت کامل شناسائی شد. قابل توجه است که در این ۵ مورد نیز که مربوط به خطاهای ۷،۵،۳ و ۱۲ دور میباشند، میزان خطای تشخیص داده شده، فقط یک دور با مقدار واقعی تفاوت داشته است.

همچنین در روند ارزیابی صحت عملکرد الگوریتم دو کار دیگر صورت گرفته است. اولاً پارامتر قابل اندازه‌گیری r_p در هر آزمایش بطور مستقیم اندازه‌گیری و با پاسخ الگوریتم، مقایسه شد که تفاوت آنها در بدترین حالت بیش از ۲٪ نبوده است. ثانیاً منحنی‌های جریان سه فاز و فاز اتصال کوتاه شده و منحنی تغییرات سرعت موتور در آزمایشهای مختلف با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مقایسه و تطبیق بسیار خوب آنها ملاحظه شده است. بعنوان نمونه جریان فاز a و جریان فاز اتصال کوتاه شده و

منحنی تغییرات سرعت به ازای سه دور خطا و در حالت بی باری در شکل (۷) آمده است. منحنی‌های حاصل از آزمایش و منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی با دقت بسیار خوبی بر هم منطبق می‌باشند.

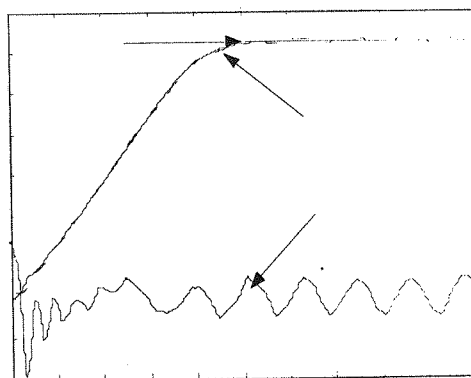
۶- نتیجه گیری و سخن پایانی

در این مقاله معادلات مدل موتور القائی با خطای دور به دور، بصورت مناسبی برای انجام آزمایش و بکارگیری در الگوریتم ژنتیک تغییر داده شده و صحت مدل با آزمایش‌های فراوان تایید شده است. الگوریتم ژنتیک با کدینگ حقیقی و تمهیدات خاص جهت افزایش سرعت همگرایی آن، برای شناسایی پارامترهای مدل ارائه شده است. تعیین میزان خطای دور به دور با الگوریتم مذکور و عدم حساسیت آن به تغییرات ولتاژ شبکه، عدم تعادل ولتاژ شبکه، تغییرات بار و دما، با بیش از ۶۰ آزمایش نشان داده شده است. بستر آزمایشگاهی و روش پیشنهادی امکان تست غیر مخرب هر موتور القائی را که از نظر ولتاژ و جریان در محدوده‌های تعیین شده باشند، جهت تعیین میزان خطای دور به دور فراهم می‌کند. بعبارت دیگر روش پیشنهادی، مستقل از موتور و بی نیاز از اطلاعات قبلی در مورد موتور سالم و یا غیر سالم است. اگر چه موتور مورد آزمایش و به تبع آن معادلات بکار رفته برای اتصال ستاره بوده است، و لیکن روش ارائه شده برای موتور با اتصال مثلث نیز معتبر می‌باشد. البته استفاده از این الگوریتم برای تشخیص خطا بصورت بهنگام (Real time) مستلزم افزایش توان پردازشی و نیز محدود کردن تعداد پارامترهای مورد شناسایی توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد.



(الف) جریان فاز a

× (ب) جریان فاز d اتصال کوتاه شده



(ج) منحنی تغییرات سرعت

× جریان فاز اتصال کوتاه شده بدلیل سیم پیچی خاص قابل اندازه‌گیری است.
شکل (۷) نمونه‌ای از منحنی‌های خروجی حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی.

- 1- Reproduction
- 2- crossover/mating

مراجع

- [1] IEEE Committee Report, "Report on large motor reliability survey of industrial plants", part I,II,III, IEEE Tran on Industry Applications Vol IA-10(2) pp.213-252, 1974
- [2] Austin H.Bonnett, George C.Soukup, "Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors", IEEE Trans ON Industry Applications Vol 28 NO 4 July 1992
- [3] J.L Kohler, J.Sottile AND F.C.Trutt," Alternatives for assessing the electrical integrity of induction machine", IEEE Trans on Industry Applications Vol 25 NO 8, pp.1107-1117,1992
- [4] S.F.Farag, R.G.Bartheld and T.G.Habetler,"An integrated On-line motor protection system", IEEE Industry Applications Magazine, pp.21-26, April 1992
- [5] G.B Kliman,W.J Premelani, R.A Koeg, D Hoeweler, "A new approach to on-line turn fault detection in AC motors", IEEE-IAS Annual meeting , pp.687-693, 1996
- [6] M.Alex Cash, Thomas G.Habetler, Gerald B.Kliman, "Insulation failure predication in induction machines using line-neutral voltages", IEEE Industry Applications Conference,IAS 97 Vol 1 , pp.208-212, 1997
- [7] Marques Cardoso, A.J.; Cruz, S.M.A.; Fonseca, D.S.B, "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach"IEEE Transactions on Energy Conversion ,Vol 14 No 3,pp.595-598, September 1999
- [8] Joksimovic,G.,Penman,J.,"The detection of interturn short circuits in the stator windings of operating motors on
"IEEE
Trans
Industrial Electronics Vol 47 No5, pp. 1078-1084, Oct 2000
- [9] Zhang Chaohai; Mao Zongyuan; Zhou Qijie
"On-line incipient fault detection of induction motors using artificial neural networks" IEEE International Conference,china, pp.458-462, 1994.
- [10] Chow, M.-y.; Mangum, P.M.; Yee, S.O.
,"neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors" IEEE Trans on Industrial Electronics, pp.448-453,1991
- [11] Nejjari, H.; Benbouzid, M.E.H.
"Monitoring and diagnosis of induction motors electrical faults using a current Park's vector pattern learning approach" , IEEE Trans on Industry Applications, pp.730-735, June 2000
- [12] Di Stefano, R.; Meo, S.; Scarano, M.,
"Induction motor faults diagnostic via artificial neural network", IEEE Industrial Electronics Symposium, Italy, pp.220-225, 1994
- [13] Tallam, R.M.; Habetler, T.G.; Gritter, D.J.; Burton,B.H.; Harley,R.G., "Neural network based on-line stator winding turn fault detection for induction motors", IEEE Industry Applications Conference, pp.375-380, October 2000
- [14] Tallam, R.M.; Habetler, T.G.; Harley,R.G., "Transient model for induction machines with stator winding turn faults", IEEE Industry Applications Conference, pp.304-309, October 2000