

شبیه سازی و تحلیل کامپیوتری تعدادی از ماشین های الکتریکی و تعیین پارامترهای آنها

پروژه برتر ذوب آهن اصفهان در همایش تحقیقاتی سازمان توسعه و نوسازی معادن و صنایع معدنی ایران سال ۸۳

چکیده

هدف این مقاله ارائه یک روش هایبرید جدید برای شناسایی پارامترهای ماشین های القایی می باشد. نتایج شبیه سازی ها و آزمایشها، نشانگر کارایی خوب و قابل قبول این روش می باشند. از مزایای روش هایبرید می توان به همگرایی سریع و دقت بالای آن در یافتن ریشه های توابع و در کاربرد تخمین پارامترهای ماشین و مشخصه های آن اشاره نمود. متغیرهای اندازه گیری شده، جریان و ولتاژ استاتور، سرعت زاویه ای رتور و پارامترهای پیش بینی شده، مقاومت استاتور، اندوکتانس استاتور، اندوکتانس مغناطیس کنتدگی، مقاومت رتور و اندوکتانس رتور می باشند. این روش همچنان می تواند جهت تشخیص موتورهای فرسوده که دارای مشخصه های رفتاری مناسب نیستند، به کار رود.

۱- مقدمه

این مقاله کاربرد یک روش هایبرید را برای تخمین پارامترهای موتورهای القایی بیان می کند. در این روش، در ابتدا نقطه بهینه برای یک تابع هدف تعیین شده با استفاده از روش های غیرتحلیلی پیدا می شود. سپس این نتایج به عنوان نقطه شروع برای استفاده از یک روش تحلیلی پردازش می شوند. بنابراین روش تحلیلی از نقاط اولیه ای شروع می کند که همان نقاط بهینه روش غیرتحلیلی است. به منظور بهبود عملکرد و دینامیک درایوها مانند اینورترهای توان بالای CRPWM با استفاده از کنترل میکروکامپیوترهای سریع، به تخمین صحیحی از پارامترهای موتور القایی احتیاج است. الگوریتم ژنتیک، برای مسائل بهینه سازی به طور موفق به کار گرفته شده است ([1] و [2]). کاربرد الگوریتم

ژنتیک برای بهینه سازی هایی با چند تابع هدف در مقالات مختلفی آمده است ([3، 4 و 5]).

عموماً باور بر این است که شناسایی همزمان کلیه پارامترهای موتورهای القایی کاری مشکل است. با این وجود در [6] نشان داده شده است که می توانیم چهار پارامتر موتور القایی را به طور صحیح تخمین بزنیم. از مهمترین روش ها برای تخمین و شبیه سازی های پارامترهای موتور القایی می توان به آزمایش پاسخ فرکانسی با تابع تبدیل، با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات، فیلتر کالمن توسعه یافته و به کار گرفتن تخمین حداقل مربعات در تابع تبدیل ولتاژ استاتور به جریان استاتور اشاره نمود که در [9] و [10] شرح داده شدند. در این پروژه یک دستگاه نمونه بردار با فرکانس نمونه برداری 5kHz برای اندازه گیری ولتاژ و جریان استاتور و سرعت ماشین القایی استفاده شده است. در مقایسه با آزمایش رتور قفل شده یا آزمایش اتصال کوتاه، بعضی از شرایط عملکرد مانند اثر پوستی و اشباع در نظر گرفته شده اند. لذا پارامترهای تخمین زده شده صحت بیشتری دارند. به خاطر بعضی دلایل مثل اثر حرارت (اثر دما)، اصطکاک و ... پارامترهای موتورهای القایی بعد از کار کردن برای یک مدت طولانی تغییر می کنند و این امر (فرسودگی) روی کارایی ماشین اثر می گذارد. در این پروژه، الگوریتم ارائه شده جهت تخمین پارامترهای برخی از موتورهای کارخانه ذوب آهن به رفته است که نتایج حاصله در تعیین پارامترهای مدار معادل ماشین های انتخاب شده عملکرد مطلوب روش ارائه شده را نشان می دهد. با تعیین مشخصه های عملکرد این ماشین ها شامل بازده نامی، گشتاور نامی، گشتاور راه اندازی و حداکثر گشتاور، برخی از ماشین ها از مشخصه های عملکردی ارائه شده توسط کارخانه های

$$X'_r = kX_s \quad (3)$$

$$\text{اگر کلاس } A \Rightarrow k = 1$$

$$\text{اگر کلاس } B \Rightarrow k = 1.49$$

$$\text{اگر کلاس } C \Rightarrow k = 2.32$$

$$\text{اگر کلاس } D \Rightarrow k = 1$$

لذا ۴ پارامتر باید تخمین زده شوند. به همین علت و برای داشتن دو معادله، آزمایش کردن ماشین در دو نقطه کار مختلف ضروری می باشد.

۲- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه سازی و از نوع جستجوی غیرتحلیلی یک ابزار قدرتمند می باشد. در سالهای گذشته، الگوریتم ژنتیک در مسائل بهینه سازی در مهندسی صنعتی بیشترین توجه را جلب کرده بود. به طور کلی سه روش بهینه سازی وجود دارند:

۱- روش های دقیق و قطعی (تحلیلی)

۲- روش های غیرتحلیلی

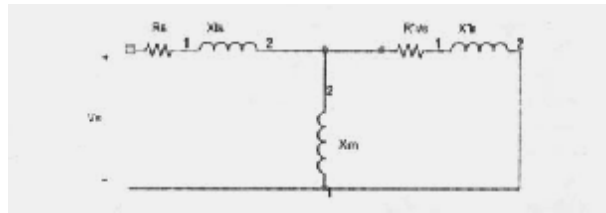
۳- روش های هایبرید

روش های دقیق و قطعی بر اساس قوانین ریاضی طراحی شدند و بسیاری از آنها به نقطه شروع حساس می باشند و به مشتق توابع هدف هم نیازمندند و نیز رسیدن به نقطه بهینه را تضمین نمی کنند. روش های غیرتحلیلی بر اساس قوانین احتمالی بوده و می توانند نقطه بهینه را با دقتی بالا پیدا کنند، ولی بدی این روش ها این است که به کندی به نقطه بهینه همگرا می شوند و زمان اجرای این روش ها طولانی می باشد. روش های هایبرید از مزایای دقت و سرعت روش های تحلیلی و روش های غیرتحلیلی به طور همزمان بهره می برند. در این روش ها ابتدا یک روش غیرتحلیلی برای رسیدن به نقطه ای نزدیک نقطه بهینه به کار گرفته می شود و بعد این نقطه به عنوان نقطه ابتدایی یا شروع روش دقیق استفاده می شود. به عنوان نتیجه در روش هایبرید: دقت در به دست آوردن نقطه بهینه در مقایسه با روش دقیق بهتر می شود و نیز همگرایی به نقطه بهینه سریعتر می شود. در این پروژه، بهینه سازی چند هدفه الگوریتم ژنتیک برای پیدا کردن نقطه های اولیه یا شروع برای روش نیوتن - رافسون، به عنوان روش هایبرید به کار می روند. الگوریتم

سازنده فاصله گرفته اند و این مسئله خصوصاً در بازده بار نامی که مستقیماً به مصرف انرژی در صنایع ارتباط دارد، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می باشد.

به منظور تست روش عملی ارائه شده در پروژه با استفاده از اندازه گیری ولتاژ، جریان و سرعت موتور در دو بار مختلف جهت تخمین پارامترهای مدار معادل ماشین از روشهای دقیق تعیین پارامترهای مدار معادل مانند استفاده از مشخصات هندسی ماشین نیز استفاده شده است. به این منظور یک ماشین ۴kW ساخت کارخانه موتوژن که جزء موتورهای پمپ آب می باشد انتخاب شد که نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از تخمین مطابقت بسیار بالایی داشت و این مسئله نشان می دهد که می تواند از روش ارائه شده در پروژه با اطمینان بالا در صنایع جهت تعیین پارامترهای مدار معادل ماشین بدان نیاز به از خط خارج کردن آنها بهره گرفت.

در این پروژه از مدل موتور القایی ارجاع یافته به مختصات مرجع ساکن استاتور، استفاده شده است. شکل (۱) مدل حالت ماندگار ماندگار موتور القایی را نمایش می دهد.



شکل (۱): مدل حالت ماندگار موتور القایی

مقاومت معادل و اندوکتانس معادل موتور القایی از دید نقطه ساکن عبارتند از:

$$R_{eq} = R_s + \frac{(R'_r \cdot \frac{X_m^2}{S})}{(\frac{R'_r}{S})^2 + (X_m + X_s)^2} \quad (1)$$

$$X_{eq} = X_s + \frac{X_m X_s (X_m + X_s) + R_r'^2 \frac{X_m}{S^2}}{(\frac{R'_r}{S}) + (X_m + X_s)^2} \quad (2)$$

برای ماشین های هر کلاسی، یک رابطه بین X'_r و X_s وجود دارد که این رابطه به صورت زیر می باشد:

$$C_m(S_{L,i}) = \begin{cases} \frac{C_m^\circ(S_{L,i})}{g_m} & C_m^\circ(S_{L,i}) > 0 \\ 0 & C_m^\circ(S_{L,i}) \leq 0 \end{cases}$$

$$L = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

که $C_m^\circ(S_{L,i})$ مقدار برازندگی برای m آمین تابع هدف و g_m مجموع برازندگی های مثبت می باشد. مقدار برازندگی برای هر تابع هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$C_m^\circ(S_{L,i}) = f_{objm}(S_{L,i}) - m_m$$

$$L = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

که در آن:

m_m مقدار متوسط m آمین تابع هدف جمعیت است. توابع هدف به عنوان معادلات (۱) و (۲) تعریف شدند. مقدار ماکزیمم برای همه توابع هدف صفر است. حل این مسئله بهینه سازی چند هدفه، به عنوان مقادیر اولیه برای روش نیوتن - رافسون می باشد.

۳- روش نیوتن - رافسون (N-R)

راههای زیادی برای مدل نمودن فرآیندهای فیزیکی و روش های مختلف برای تخمین پارامترها وجود دارد. به جز مسائل خطی، یافتن مقادیر ریشه ها در یک بازه انجام می گردد و این کار برای مسائل یک یا چند بعدی صحیح می باشد. تخمین از چند مقدار اولیه که جواب حدودی مسئله می باشند، آغاز می شود، یک الگوریتم مناسب که تا دستیابی به یکسری تبدیل های از پیش تعیین شده جواب را افزایش می دهد. اولین حدسی که برای جواب می زنیم بر روی قطعیت جواب تأثیر می گذارد این موضوع بالاخص در مسائل چند بعدی و چند هدفه ظاهر می گردد. تغییرات مدل بر اساس روابط ورودی/خروجی و خواص آماری خطای مدل در [6] توضیح داده شده است. برای موضوع ما، رابطه ورودی/خروجی به خوبی به وسیله روش نیوتن - رافسون تعریف گردیده است.

ژنتیک یک جمعیت را به عنوان حل برای مسئله می دهد و بر اساس کارایی آنها به هر کدام از آنها یک عدد برازندگی اختصاص داده می شود. بنابراین آنها به عنوان گزینه هایی برای تولید در نظر گرفته می شوند که بر اساس برازندگی شان انتخاب می شوند و سپس فرزندان تولید شده به وسیله عملگرهای جهش و ترکیب اصلاح شده و در جمعیت جدید قرار می گیرند. مسئله بهینه سازی چند هدفه می تواند به صورت زیر بیان شود:

بردار n بعدی X را بیابید به طوری که:

$$\text{Max}[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)],$$

$$\text{S.T. } X_{10} \leq X_i \leq X_{if} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

فرض کنید که تعداد جمعیت ثابت و برابر N باشد و هر حل مسئله چند هدفه به عنوان یک کروموزوم تعریف شود، SL ، با طول L . در الگوریتم ژنتیک، یک تابع احتمالی برای انتخاب بهترین کروموزوم تعریف می شود. برای تولید جمعیت جدید از عملگرهای جهش و ترکیب استفاده می شود. در تابع احتمالی، تابع هدف با وزن های فازی ترکیب می شود. لذا کروموزوم های با برازندگی بیشتر، شانس بیشتری برای تولید مثل دارند. تابع احتمال به صورت زیر تعریف می شود:

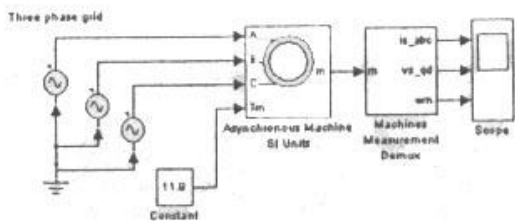
$$P_{L,i} = \frac{\prod_{m=1}^n [C_m(S_{L,i})]}{\sum_{L=1}^M \left[\prod_{m=1}^n [C_m(S_{L,i})] \right]} \quad (7)$$

که در آن:

$C_m(S_{L,i})$ عدد برازندگی m آمین تابع هدف برای L آمین کروموزوم است و n تعداد توابع هدف است و M تعداد کروموزوم است. عدد برازندگی m آمین تابع هدف برای L آمین کروموزوم به صورت زیر تعریف می شود:

۴- شبیه سازی مدل فرض شده

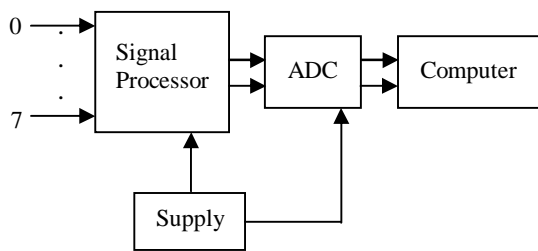
شکل (۲) بلوک دیاگرام موتور القایی که با ولتاژ سه فاز تغذیه می گردد را نشان می دهد. در این شکل موتور در ابتدا با مقادیر نامی گشتاور بار، ولتاژ، جریان و سرعت رتور که در Workspace ذخیره شده کار می کند. پس از آن مقدار گشتاور بار را برای رسیدن نقطه کار دیگری تغییر می دهیم. این اطلاعات هم ذخیره می شوند. اطلاعات ذخیره شده برای محاسبه V_{rms} ، I_{rms} و $\cos(j)$ مورد استفاده قرار می گیرد، بر اساس معادلات (۱۰) و (۱۱) مقاومت و اندوکتانس معادل موتور قابل محاسبه است پس برای دو نقطه کار ما دو مقدار R_{eq} و دو مقدار X_{eq} داریم. با استفاده از رابطه (۹) و ارتباط بین X_S و X_r' پارامترهای ماشین محاسبه می شوند.



شکل (۲): بلوک دیاگرام یک ماشین القایی سه فاز که توسط منبع سه فاز تغذیه شده است

۵- نمایش وسیله اندازه گیری

این وسیله از ۸ کانال تشکیل شده است: یکی برای سرعت، سه کانال برای ولتاژ و ۴ کانال برای جریان، فرکانس نمونه برداری ۵kHz برای هر کانال می باشد. این وسیله با پورت موازی به کامپیوتر متصل می شود و نرم افزار مربوط به آن هم در Dos و Windows98 اجرا می شود. شکل (۳) بلوک دیاگرام وسیله اندازه گیری را نمایش می دهد.



شکل (۳): بلوک دیاگرام وسیله اندازه گیری

$f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ توابعی هستند که برای حل مورد استفاده قرار می گیرند. ماتریس ژاکوبین به صورت زیر تعریف می شود:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \mathbf{K} & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \mathbf{K} & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \mathbf{K} & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (v)$$

تحریک با مقادیر اولیه آغاز می گردد و مقادیر جدید برای بردار X به صورت زیر تعریف می شوند:

$$X_{new} = -inv(J) * F \quad (8)$$

$$F = [f_1 \quad f_2 \quad \mathbf{K} \quad f_n]^T$$

تا وقتی که تغییرات بین X_{old} و X_{new} از مقدار مشخص شده e بزرگتر است این روش ادامه می یابد. توابع IM به صورت زیر هستند:

$$f_1 = R_{eq} - R_s - \frac{(R_r' \cdot \frac{X_m^2}{S})}{(\frac{R_r'}{S})^2 + (X_m + X_s)^2} \quad (9)$$

$$f_2 = X_{eq} - X_s - \frac{X_m X_s (X_m + X_s) + R_r'^2 \frac{X_m}{S^2}}{(\frac{R_r'}{S})^2 + (X_m + X_s)^2}$$

که در آن:

X_m و X_s ، R_s ، X_r' ، R_r' پارامترهای ماشین هستند که در شکل (۱) آمده اند. مقاومت معادل و اندوکتانس (R_{eq}, X_{eq}) به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$R_{eq} = \frac{V}{I} \cos(j) \quad (10)$$

$$X_{eq} = \frac{V}{I} \sin(j) \quad (11)$$

۷- نتایج آزمایش

این الگوریتم تعیین پارامتر بر اساس روش هایبرید می باشد که دارای سرعت و دقت بالایی می باشد. بالاخص در موتورهای القایی کوچک تقریباً تمام پارامترها می تواند بارها در همان زمان تغییر نماید. برای تست فرآیند مفروض ما از تعیین Online پارامترها که در زیر توضیح داده شده است استفاده نمودیم. مقادیر اولیه عبارتند از: $R_s = 1, X_s = 1, X_m = 50, X_r' = 2, R_r' = 1$

مقادیر تخمین زده شده در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): نتایج عملی ماشین مورد آزمایش

Parameter	Exact values	Estimated values	Percent Error
R_s	1.183	1.178	0.42
X_s	1.92	1.89	-1.5
X_m	22	22	0
R_r'	0.17	0.169	-0.5
X_r'	1.92	1.89	-1.5

تذکر: در جدول (۲) نتایج شبیه سازی به وسیله MathCAD2000 تست شده و خطای اندازه گیری در مقایسه با نتایج به دست آمده نشان داده شده است. به دلیل پارامترهای ماشین و مقاومت بالای کانکتورها R_s مقدار بزرگی دارند. به دلیل این که این موتور به عنوان موتور پمپ آب استفاده می شود در اینجا چند مقاومت با R_s سری قرار دارد که مقادیر نهایی در جدول (۲) نشان داده شده است. با مقایسه مقادیر تخمین زده شده با مقادیر داده شده کارخانه (موتورزن) نشان می دهد که تأثیر در نمایش موتور به دست می آید. نتایج به صورت زیر می باشد:

$$h_{nominal} = 77.52\% \quad \text{بهره ایده آل}$$

$h_{operating} = 74.29\%$ بهره پس از مدت زیادی کار کردن
با استفاده از پارامترهای تخمین زده شده نمایش ماشین می تواند به صورت زیر باشد:

$$Te = 63.57$$

$$Te_{max} = 74.27$$

$$Te_{start} = 9.052$$

در ابتدا مقادیر اندازه گیری شده آنالوگ به ورودی پردازشگر اطلاعات فرستاده می شود تا به مقادیر بامعنایی برای تبدیل به دیجیتال به وسیله بلوک ADC برسیم. پس از آن این اطلاعات دیجیتال به وسیله نرم افزار آماده شده برای تخمین پارامترهای ماشین استفاده می شود.

۶- نتایج شبیه سازی

بلوک دیاگرام این الگوریتم در شکل (۴) نشان داده شده است. پارامترهای ماشین القایی شبیه سازی شده در برنامه مطلب (Mathlab 6.5) به صورت زیر است:

$$R_s = 0.435 \quad X_s = 0.75 \quad X_m = 26.1$$

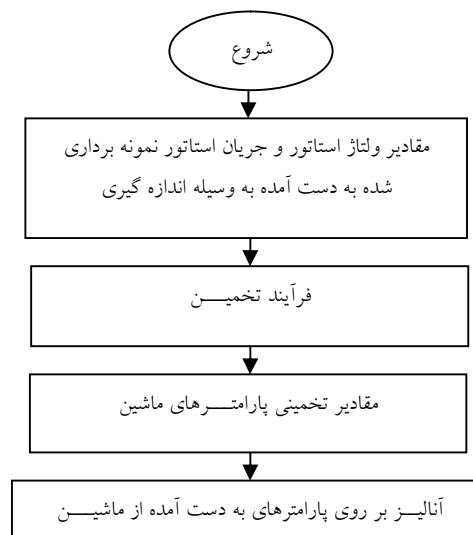
$$X_r' = 0.75 \quad R_r' = 0.816$$

مقادیر تخمین زده شده مقادیر واقعی و خطای مربوط به آنها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): مقادیر واقعی و تخمین زده شده پارامترهای

شبیه سازی ماشین

Parameter	Exact values	Estimated values	Percent Error
R_s	0.435	0.442	1.6
X_s	0.754	0.76	0.8
X_m	26.1	26.04	-0.1
R_r'	0.816	0.8152	-0.09
X_r'	0.754	0.76	0.8



شکل (۴): بلوک دیاگرام الگوریتم تخمین پارامترها

مراجع

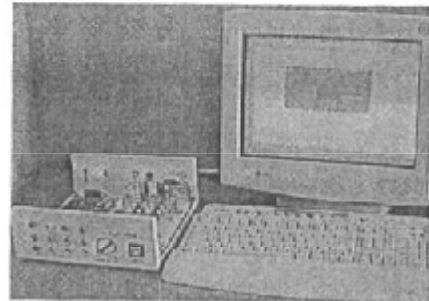
- [1]. D. E. Goldberg, Genetic Algorithms in search, optimization, and Machine learning, Reading, MA; Addison Wesley, 1989.
- [2]. L. Davis, Ed, Handbook of Generic Algorithms, New York; Van Nostrand Rein hold, 1991.
- [3]. T. Murata and H. Ishibuchi, "MOGAI multi-objective genetic algorithms", in *proc.2nd IEEE Int. conf. Evolutionary computer*, pp. 189-294, 1995.
- [4]. M. Moallem, B. Mirzaeian, O. A. Mohammad "Multi-objective Genetic-Fuzzy Optimal Design of PI controller in the indirect field Oriented control of an Induction Motor", *IEEE. Trans. on magnetics*, Vol. 37, No. 5, September 2001 pp. 3608-3612.
- [5]. B. Mirzaeian, M. Moallem, V. Tahani, C. Lucas, "Multi-objective Optimization Method Based on a Genetic Algorithm for switched Reluctance Motor Design", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38, No. 3, pp. 1524-1528, 2002.
- [6]. L. Loron, "Stator parameters Influence on the Field Oriented control Tuning", in *proceedings of the EPE 1993 conference Brighton, U.K.*, September 1993.
- [7]. A. Bunte and H. Grotstollen, "Parameter Identification of an Inverter-Fed Induction Motor at stanstill with a Correlation Method", in *proceedings of the EPE 1993 conference, Brighton, U.K.*, September 1993.
- [8]. L. Loron and G. Lalibete, "Application of the Extended kalman filter to parameter estimation of Induction Motors", in *proceedings of the EPE 1993 conference, Brighton, U.K.*, September 1993.
- [9]. M. Velez-Reyes, K. Minami and G. C. Verghese, "Recursive speed and parameter Estimation for Induction machines", in *proceedings of the IEEE Industry Application Conference, Sandiego, California*, 1989.
- [10]. J. Stephan, M. Bodson and J. Chiasson, "Real-time Estimation of the parameter and fluxes of Induction Motors", in *proceedings of IEEE Industry Application conference, Houston, Texas*, 1992.

ضمیمه

موتور ارائه شده در مقاله اخیر، موتور طرح کوثر ذوب آهن است که مشخصات آن به صورت زیر است:

کارخانه سازنده:	موتوژن
Type:	100/250
توان نامی:	۱۱kW
جریان نامی:	۲۴/۵A
نوع اتصال:	مثلث
تعداد زوج قطب:	۲
سرعت نامی:	۱۴۵۸rpm

با مقایسه مقادیر ایده آل با مقادیر به دست آمده به وسیله تخمین واقعی پارامترها می توان به این نتیجه رسید که نمایش ماشین با گذشت مدت زمانی زیاد تغییر می نماید و گشتاور نامی کاهش می یابد. وسیله اندازه گیری و ارتباط آن با نرم افزار در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): وسیله اندازه گیری موجود

۸- نتیجه گیری

در این پروژه با توجه به اهمیت صرفه جویی در مصرف انرژی الکتریکی و تعیین مشخصه های عملکرد ماشین های القایی که در شرایط بهره برداری یا به عبارت دیگر زیر بار هستند. روش عملی جهت تعیین پارامترهای مدار معادل ماشین ارائه شده است. در این روش نیاز به اندازه گیری ولتاژ، جریان و سرعت ماشین در دو بار مختلف است. با تعیین پارامترهای ماشین که نیاز به از خط خارج کردن آنها ندارد (مشابه روش های تست رتور قفل و بی باری) می توان مشخصه های عملکرد ماشین را تعیین نمود. روش تخمین ارائه شده بر اساس ترکیب دو روش غیرتحلیلی ژنتیک و تحلیلی نیوتن - رافسون به عنوان یک هایبرید است. در این روش هایبرید ارائه شده ابتدا روش ژنتیک جهت تعیین نقطه شروع برای روش تحلیلی نیوتن - رافسون به کار می رود، به این ترتیب سرعت و دقت روش افزایش می یابد. پارامترهای مدار معادل چندین ماشین در ذوب آهن توسط روش فوق تعیین شده و بر اساس آنها مشخصه های رفتاری موتورها مشخص شده است. جهت بررسی دقت روش ارائه شده برای چند موتور روش تعیین پارامترها مدار معادل با استفاده از مشخصات هندسی نیز استفاده شده که نتایج حاصله نشان دهنده عملکرد مطلوب روش ارائه شده می باشد. این پروژه با مبلغ ۶۴۵۰۰۰۰۰ ریال و به مدت یکسال انجام شد.