

## یک روش جدید برای دینامومتری موتورهای القایی تکفاز

حمید لسانی<sup>۱</sup>      زهرا نصیری قیداری<sup>۲</sup>      فرید توتونچیان<sup>۳</sup>

۱- استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران

[Lesani@ut.ac.ir](mailto:Lesani@ut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تهران - تهران- ایران

[z.Nasiri\\_gh@yahoo.com](mailto:z.Nasiri_gh@yahoo.com)

۳- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران- ایران

[Farid.Tootoonchian@yahoo.com](mailto:Farid.Tootoonchian@yahoo.com)

**چکیده:** انجام تست‌های مختلف بر روی موتورهای القایی تکفاز، به منظور بررسی وضعیت کارکرد موتور و مشخصات خروجی آن، که به دینامومتری موتور، نزد الکتروموتورسازان معروف است؛ بخش تفکیک‌ناپذیری از فرآیند تولید و عرضه الکتروموتورهای القایی، می‌باشد. تجهیزاتی که به این منظور به کار می‌رود، گذشته از آنکه گرانقیمت‌اند، نیاز به ادوات مکانیکی خاصی جهت کوپل موتور به آن، دارند. در ضمن، عمل باز و بسته کردن اتصالات مکانیکی، نیز زمان‌بر است. در این مقاله روشی ارائه شده، که در آن، دینامومتری موتور، از طریق شبیه‌سازی دینامیکی و استاتیکی، بعد از سنجش دقیق پارامترهای آن، انجام می‌گردد. برای بررسی صحت نمودارهای بدست آمده از محاسبات، این نمودارها با نتایج عملی بدست آمده از دینامومتر، مقایسه شده است. نتیجه این مقایسه بیانگر موفقیت و سودمندی روش ارائه شده می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** موتورهای القایی تکفاز، دینامومتری، شناسایی پارامترهای الکتریکی و مکانیکی، شبیه‌سازی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۵/۸/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۸۷/۹/۲

نام نویسنده‌ی مسئول : زهرا نصیری قیداری

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - تهران - خیابان کارگر شمالی - تقاطع بزرگراه جلال آل احمد - پردیس دانشکده‌های فنی

دانشگاه تهران - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

امروزه در جوامع صنعتی حدود ۷۰ درصد انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه‌ها توسط موتورهای الکتریکی مصرف می‌شود [۱]-[۴]؛ در میان انواع موتورهای الکتریکی، موتورهای القایی به دلایل اقتصادی و فنی، پرمصرف‌ترین موتورهای الکتریکی صنعتی و خانگی محسوب می‌شوند. در بین موتورهای القایی نیز، موتورهای تکفاز بدلیل کاربرد فراوان در وسایل خانگی، تیراژ بسیار بالایی دارند. لذا تغییر اندک در بهبود مشخصات آنها، تاثیر عمده‌ای در کیفیت برق شبکه خواهد گذاشت. از طرفی استانداردهای سختگیرانه‌ای که اخیراً برای کارخانجات سازنده الکتروموتور اجباری شده، آنها را ملزم به ارائه داده‌های الکترومکانیکی برای هر یک از موتورها، کرده است؛ بدیهی است دینامومتری به روش مرسوم سرعت تولید را به شدت کاهش خواهد داد، چرا که این روش، دارای معایب ذیل است:

- (۱) هزینه سنگین اولیه
- (۲) زمان‌بر بودن فرایند دینامومتری
- (۳) احتیاج به ادوات مکانیکی خاص برای هر موتور
- (۴) سرعت نمونه‌برداری پایین، که باعث از دست رفتن اطلاعات در فاصله بین دو نمونه‌برداری متوالی می‌شود.

(۵) نیاز به نیروی انسانی ماهر جهت برقراری اتصالات مکانیکی در این مقاله، روشی برای کاهش این مشکلات، ارائه می‌شود. با استفاده از این روش، نیاز به دینامومتری به روش مرسوم، عملاً حذف می‌گردد. اگر پارامترهای موتور را به شکل دقیقی در اختیار داشته باشیم، گذشته از آنکه امکان ارائه اطلاعات مربوط به پارامترها، به مصرف‌کنندگان، فراهم می‌شود؛ می‌توان با استفاده از این پارامترها و نیز مدل دینامیکی موتور، داده‌برگ کاملی، شامل همه مشخصات فنی و منحنی‌های الکترومکانیکی آن، به موازات تولید هر موتور، (بدون کاهش سرعت تولید) تهیه کرد. در این راستا، بعد از بررسی انواع روش‌های نوین استخراج پارامترهای موتورهای القایی، از روش تحلیل جریان تخلیه استاتور [۲]، بدلیل سرعت و دقت بالای آن، پارامترهای موتور مورد نظر را بدست آورده و از روی معادلات دینامیکی حاکم بر آن، منحنی‌های دینامیکی و از فرم فازوری آن معادلات، منحنی‌های دینامومتری موتور حاصل می‌شود

## ۲- شناسایی پارامترهای موتورهای القایی تکفاز

به لحاظ ساختار الکترومکانیکی موتورهای الکتریکی، پارامترهای آن به دو گروه دسته‌بندی می‌شوند، پارامترهای الکتریکی و پارامترهای مکانیکی.

### ۱-۲ پارامترهای الکتریکی

برای پیش‌بینی رفتار موتور از مدل‌های مربوط به آن، استفاده می‌شود. پارامترهای الکتریکی، در اصل، مقادیر المان‌های مربوط به

مدل موتور می‌باشند. برای موتورهای القایی تکفاز مدل‌های گوناگونی ارائه شده است؛ که رفتار دینامیکی و استاتیکی موتور را تحت شرایط کاری مختلف پیش‌بینی می‌کنند [۲]-[۱۰]. دقت نتایج خروجی این مدل‌ها، ناشی از دقت پارامترهای مدل می‌باشد. برای شناسایی این پارامترها، روش‌های مختلفی وجود دارد که به دو بخش روش‌های کلاسیک و جدید تقسیم می‌شوند. منظور از روش کلاسیک، مجموع آزمایش‌های رتور قفل، بی‌بار و تست DC می‌باشد. این روش دارای معایبی است که از جمله آنها می‌توان به دقت کم، زمان‌بر بودن، هزینه بالا و نیاز به ابزار مکانیکی ویژه، اشاره کرد.

روش‌های جدید، هر یک برای تعدیل تمام یا بخشی از معایب روش کلاسیک ارائه شده‌اند. مرجع [۱] از تئوری میدان‌های متعامد و گردان، پارامترهای سیم‌پیچی کمکی، اصلی و رتور را بدست می‌آورد. مرجع [۲] از تحلیل جریان تخلیه استاتور استفاده می‌کند. مرجع [۸] برای تعیین پارامترها از دو روش اندازه‌گیری تکفاز و حالت دو فاز بهره‌مند شده و مرجع [۹] از مدل q-d برای تقریب پارامترها استفاده کرده است. در این مقاله از روش [۲] استفاده شده است. در این روش، ابتدا تابع انتقال سیم‌پیچ اصلی و کمکی با توجه به شکل (۱)، به صورت زیر استخراج می‌شوند:

$$\frac{I_s}{|V_1|} = \frac{L_s}{r_s^2} \frac{1 + s(\sigma T_r)}{1 + s(T_r + T_s) + s^2(\sigma T_r T_s)} \quad (1)$$

$$\frac{I_f}{|V_2|} = \frac{L_f}{r_f^2} \frac{1 + s(\sigma T_r')}{1 + s(T_r' + T_f) + s^2(\sigma T_r' T_f)} \quad (2)$$

ابتدا با استفاده از تبدیل لاپلاس معکوس از روابط فوق، جریان‌های دشارژ سیم‌پیچی‌های اصلی و کمکی به صورت (۳) و (۴) بدست می‌آید:

$$i_s(t) = A_0 (A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (3)$$

$$i_f(t) = B_0 (B_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + B_2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (4)$$

که در آن:

$$A_0 = \frac{|V_1|}{r_s} \quad (5)$$

$$T_s = A_1 T_1 + A_2 T_2 \quad (6)$$

$$T_r = T_1 + T_2 - T_s \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{T_1 T_2}{T_r T_s} \quad (8)$$

$$A_1 + A_2 = 1 \quad (9)$$

$$B_0 = \frac{|V_2|}{r_f} \quad (10)$$

$$T_f = B_1 \tau_1 + B_2 \tau_2 \quad (11)$$



شکل (۲): شماتیک عملی مدار موتور تکفاز برای استخراج پارامترهای الکتریکی

## ۲-۲- پارامترهای مکانیکی

مطابق معادله گشتاورها:

$$T_{em} - T_l - T_f = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (17)$$

مهمترین پارامتر مکانیکی موتور که مستقیماً با خروجی آن در ارتباط است، ممان اینرسی رتور می‌باشد. برای اندازه‌گیری ممان اینرسی روش‌های گوناگونی در مرجع [۱۱] پیشنهاد شده است. دسته‌ای از این روش‌ها J رتور را بعد از جداسازی رتور از موتور اندازه می‌گیرند، نظیر روش ارتعاش پیچشی و روش پاندولی. اما روش مکانیکی سومی نیز وجود دارد که با استفاده از وزنه، تسمه و پولی، J رتور را بدون نیاز به خارج کردن آن از موتور، اندازه‌گیری می‌کند. پولی متصل شده به محور موتور، عموماً از جنس پلاستیک سبک است. البته این روش به یک تسمه سبک و تعدادی وزنه استاندارد هم نیاز دارد. جهت زمان-سنجی دقیق از دو کلید نوری استفاده می‌شود تا زمان‌های عبور وزنه‌ها، از خطوط ابتدا و انتها را تعیین کنند. شکل (۳) مجموعه آزمایشگاهی مورد نیاز این آزمایش را نشان می‌دهد.

در این روش، شتاب افتادن وزنه از رابطه ذیل بدست می‌آید:

$$a = \frac{2(x_1 + x_2) - 4(x_1 \cdot x_2)^{1/2}}{(t_1 - t_2)^2} \quad (18)$$

که در آن a، شتاب خطی وزنه و  $t_1 - t_2$ ، مدت زمانی است که طول می‌کشد تا وزنه فاصله میان  $x_1$  و  $x_2$  را طی کند.

در محاسبه این معادله فرض می‌شود شتاب وزنه‌ها در طول زمان  $t_2 - t_1$  ثابت مانده و وزنه‌ها به قدری سنگین هستند که بتوانند بر اصطکاک غلبه کنند. در این حالت با صرف نظر از اصطکاک لغزشی و غلتشی، ممان اینرسی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$J = \{(1/a) - (1/g)\} \cdot W \cdot r^2 - J_p \quad (19)$$

و با اعمال اثر اصطکاک لغزشی و غلتشی،

$$\frac{(J + J_p) \cdot a}{r} = (W - W \cdot a/g)r - F \quad (20)$$

$$T_r' = \tau_1 + \tau_2 - T_f \quad (12)$$

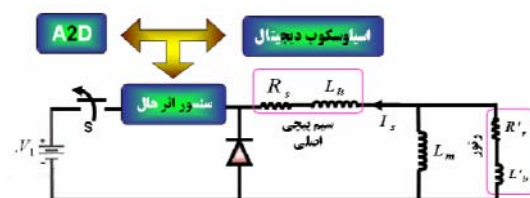
$$\sigma' = \frac{\tau_1 \tau_2}{T_r' T_f} \quad (13)$$

$$B_1 + B_2 = 1 \quad (14)$$

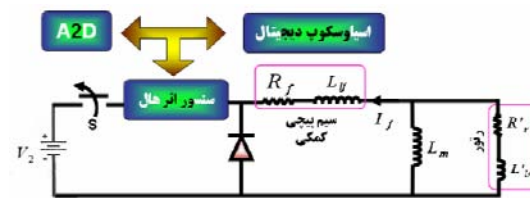
$$\frac{L_{ls}}{L_{lf}} = \frac{L'_{lr}}{L''_{lr}} = \frac{r'_r}{r''_r} = \frac{L_m}{L'_m} = \frac{L'_r}{L''_r} = \left( \frac{N_s}{N_f} \right)^2 = a^2 \quad (15)$$

$$T_r = \frac{L'_r}{r'_r} = \frac{a^2 L''_r}{a^2 r''_r} = \frac{L''_r}{r''_r} = T_r' \Rightarrow T_r = T_r' \quad (16)$$

برای استخراج پارامترهای الکتریکی، ابتدا هر یک از سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی به یک منبع تغذیه DC وصل می‌شود. ولتاژ این منبع تا جایی افزایش می‌یابد که جریان سیم‌پیچ‌ها نامی گردد. سپس با توجه به شکل (۱)، به هنگام قطع کلید S، شکل موج جریان عبوری از سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی ( $I_f$  و  $I_s$ ) با استفاده از یک سنسور جریان اثر هال (LEM10A) به صورت شکل (۶-الف و ب) نمونه‌برداری و توسط اسیلوسکوپ دیجیتالی نمایش و ذخیره می‌گردد. نمودارهای حاصل از اسیلوسکوپ پس از ذخیره شدن در کامپیوتر با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برازش می‌شوند تا معادله تخلیه سیم‌پیچ‌ها بدست آید. به این ترتیب ضرایب معادله‌های (۳) و (۴) مشخص می‌شوند. با در دست داشتن این ضرایب و با توجه به معادلات (۵) تا (۱۶)، پارامترهای الکتریکی موتور محاسبه می‌گردد. شماتیک مدار تست عملی در شکل (۲) نشان داده شده است.

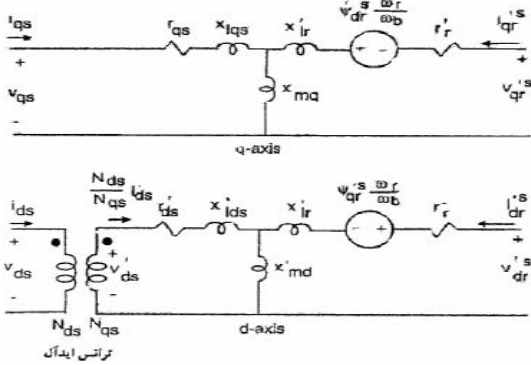


(الف)



(ب)

شکل (۱): شماتیک مدار موتور تکفاز برای استخراج پارامترهای آن به روش تحلیل جریان تخلیه الف) سیم‌پیچ اصلی، وقتی سیم‌پیچ کمکی مدار باز است. ب) سیم‌پیچ کمکی، وقتی سیم‌پیچ اصلی مدار باز است.



شکل (۴): مدار معادل موتور القایی تکفاز

$$\psi_{mq} = x_{Mq} \left( \frac{\psi_{qs}^s}{x_{qs}} - \frac{\psi_{qr}^s}{x_{lr}'} \right) \quad (24)$$

$$\psi_{md} = x_{Md} \left( \frac{\psi_{ds}^s}{x_{ds}} + \frac{\psi_{dr}^s}{x_{lr}'} \right) \quad (25)$$

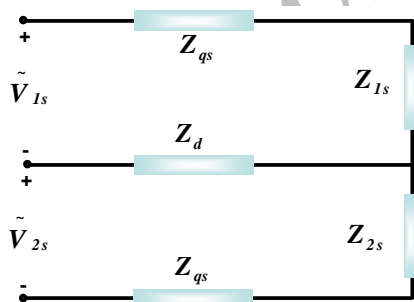
$$\frac{1}{x_{Mq}} = \frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x_{lqs}} + \frac{1}{x_{lr}'} \quad (25)$$

$$\frac{1}{x_{Md}} = \frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x_{lds}'} + \frac{1}{x_{lr}'} \quad (25)$$

$$T_{em} = \frac{P}{2} L_{mq} (i_{dr}^s \cdot i_{qs} - i_{qr}^s \cdot i_{ds}) \quad (26)$$

$$T_{em} - T_{mec} - T_{damp} = 2.H \cdot \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} \quad (27)$$

اما در شبیه‌سازی حالت دایم، همه متغیرهای حالت دایم، مشابه نتایج دینامومتری، بر حسب سرعت محاسبه می‌شوند. بدین منظور، از فرم فازوری معادلات ولتاژ-جریان و شار-جریان و مدار معادل ساده شده شکل (۵) استفاده می‌شود.

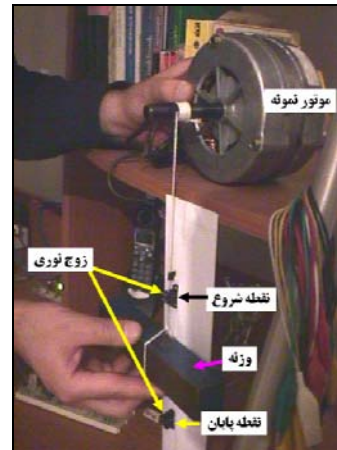


شکل (۵): مدار معادل حالت دایم موتور القایی تکفاز

روابط ولتاژ-جریان و گشتاور متوسط به صورت زیر می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \tilde{V}_{1s} \\ \tilde{V}_{2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{qs} + Z_{1s} + Z_d & -Z_d \\ -Z_d & Z_{qs} + Z_{2s} + Z_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1s} \\ \tilde{I}_{2s} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$T_{avg} = \frac{P}{2} \cdot \omega_e \cdot \left[ |I_{1r}'|^2 \times \frac{r_r'}{S_1} - |I_{2r}'|^2 \times \frac{r_r'}{S_2} \right] \quad (29)$$



شکل (۳): شماتیک روش سقوط آزاد وزنه، تسمه و پولی

که در آن،  $w$ ، وزن وزنه ها،  $g$ ، شتاب جاذبه،  $r$ ، شعاع پولی،  $J_p$ ، ممان اینرسی پولی،  $F$ ، نیروی اصطکاک می‌باشد. از آنجا که نیروی اصطکاک تا محدوده دور نامی ثابت است [۱۱]، از تفریق معادلات حاصل از داده‌های بدست آمده از دو مجموعه آزمایش، ممان اینرسی به صورت (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$J = \frac{\{W_2 - W_1 - (W_2 \cdot a_2 - W_1 \cdot a_1) / g\} \cdot r^2}{(a_2 - a_1)} - J_p \quad (21)$$

### ۳- مدل موتورهای القایی تکفاز مختلف

در این قسمت انواع موتورهای تکفاز خازن دائم، خازن راه انداز، دو خازنی و فاز شکسته مورد بررسی قرار می‌گیرند.

برای شبیه‌سازی این موتورها در حالت گذرا، با استفاده از مدار معادل شکل (۴)، معادلات ولتاژ-جریان و شار-جریان در سمت سیم-پیچی اصلی به شرح زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{aligned} V_{qs} &= r_{qs} \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \\ V_{ds}' &= r_{ds}' \cdot i_{ds}' + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}' \end{aligned} \quad (22)$$

$$V_{qr}^s = r_r' \cdot i_{qr}^s + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^s - \omega \lambda_{dr}^s$$

$$V_{dr}^s = r_r' \cdot i_{dr}^s + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^s + \omega \cdot \lambda_{qr}^s$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} & \lambda_{ds} & \lambda_{qr} & \lambda_{dr} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} L_{qr} & 0 & L_{sr} \cos \theta_r & L_{sr} \sin \theta_r \\ 0 & L_{dr} & -L_{sr} \sin \theta_r & L_{sr} \cos \theta_r \\ L_{sr} \cos \theta_r & -L_{sr} \sin \theta_r & L_r & 0 \\ L_{sr} \sin \theta_r & L_{sr} \cos \theta_r & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (23)$$

با استفاده از این مدار معادل و روابط زیر، این موتورها در حالت گذرا، شبیه‌سازی می‌شوند:

$$i_f(t) = B_0(B_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + B_2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (31)$$

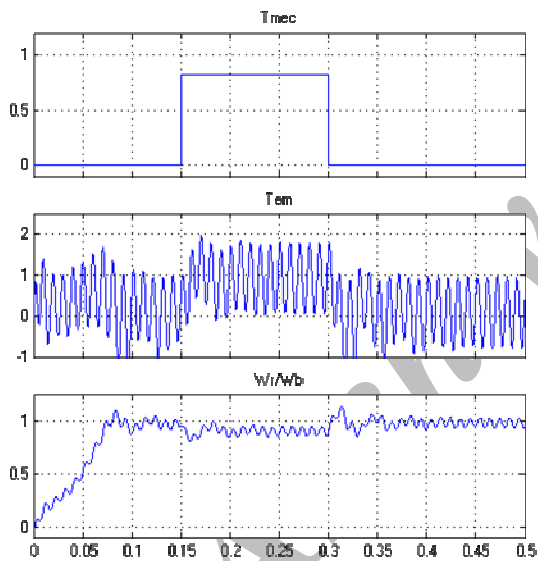
$$\begin{cases} B_0 = 0.5488 \\ B_1 = 0.5858 \\ B_2 = 0.4142 \end{cases}, \quad \begin{cases} T_1 = 0.0045 \\ T_2 = 0.0291 \end{cases}$$

اکنون با استفاده از معادلات (۵) تا (۱۶) پارامترهای الکتریکی موتور به شرح ذیل بدست می‌آیند.

جدول (۱): پارامترهای استخراجی برای موتور القایی تکفاز خازن دایم

A	L'lr	R'r	Lm
1.05	0.1808	38.1915	0.7476
Rf	Llf	Rs	Lls
60.2635	0.2142	60.2635	0.1808

سپس، با استفاده از روش سقوط آزاد وزنه، تسمه و پولی، J برابر  $0.00146 \text{ kg.m}^2$  محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت گذرا، برای پارامترهای فوق در شکل (۷) آمده است.



شکل (۷): نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی موتور خازن دایم

#### ۲-۴- موتور دو خازنی

یک موتور ۴ قطب، ۲۲۰ ولت، ۵۰ هرتز، با خازن دائم ۸ میکرو فاراد، انتخاب می‌نماییم. شکل موج جریان تخلیه سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی، به صورت شکل (۸) بدست می‌آیند. مقادیر ضرایب در این حالت عبارتند از:

$$\begin{cases} A_0 = 0.8844 \\ A_1 = 0.6373 \\ A_2 = 0.3627 \end{cases}, \quad \begin{cases} T_1 = 0.0036 \\ T_2 = 0.0361 \end{cases} \quad (32)$$

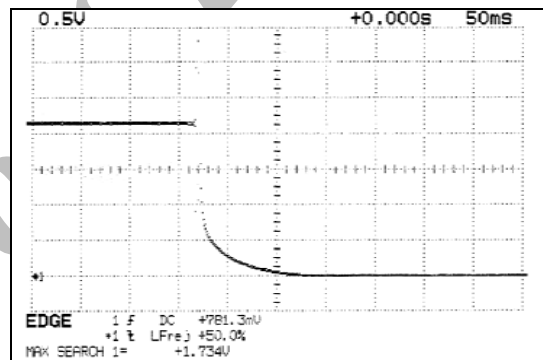
تفاوت انواع موتورهای تکفاز، در حالت دائم، در عبارت  $Z_d$  آنها و در حالت گذرا، در نحوه تولید ولتاژ سیم‌پیچی کمکی از ولتاژ سیم‌پیچی اصلی است.

#### ۴- پیاده‌سازی روش پیشنهادی

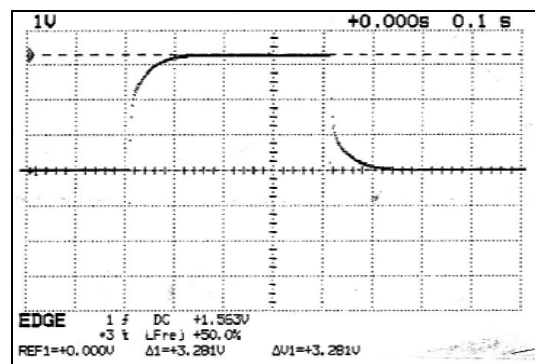
در اینجا مشخصات خروجی موتورهای تکفاز نمونه از هر نوع را به روش پیشنهادی استخراج می‌نماییم و سپس نتایج شبیه‌سازی آنها را با نتایج دینامومتری مقایسه می‌کنیم.

#### ۱-۴- موتور خازن دایم

موتور انتخابی، یک موتور ۶ قطب، ۲۲۰ ولت، ۵۰ هرتز، با خازن ۶ میکرو فاراد می‌باشد. ابتدا با استفاده از مدار شکل (۲)، منحنی‌های جریان تخلیه سیم‌پیچ‌های اصلی و کمکی، به صورت شکل (۶) بدست می‌آیند.



شکل (۶-الف): شکل موج جریان تخلیه سیم‌پیچ اصلی خازن دایم

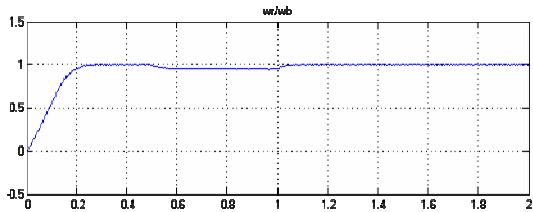
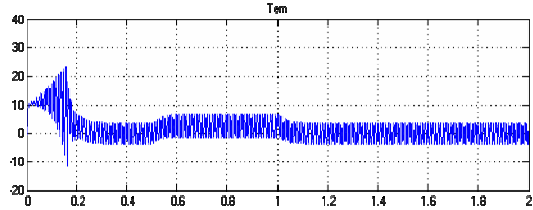
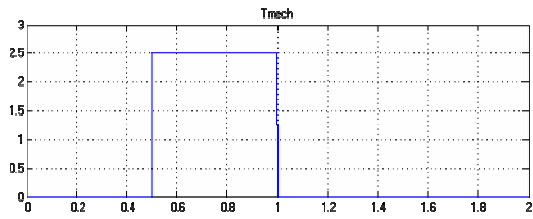


شکل (۶-ب): شکل موج جریان تخلیه سیم‌پیچ کمکی خازن دایم

سپس این منحنی‌ها، توسط معادله‌های (۳) و (۴)، برازش شده و ضرایب معادلات به صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$i_s(t) = A_0(A_1 e^{-\frac{t}{T_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{T_2}}) \quad (30)$$

$$\begin{cases} A_0 = 0.8844 \\ A_1 = 0.6373 \\ A_2 = 0.3627 \end{cases}, \quad \begin{cases} T_1 = 0.0036 \\ T_2 = 0.0361 \end{cases}$$



شکل (۹): نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی دو خازنی

جدول (۳): پارامترهای استخراجی برای موتور القایی تکفاز

خازن راه‌انداز

A	$L'_{lr}$	$R'_r$	$L_m$
1.18	0.0068	4.12	0.2127
$R_f$	$L_{lf}$	$R_s$	$L_{ls}$
7.14	0.0103	2.02	0.0089

و  $J = 0.00146 \text{ kg.m}^2$  محاسبه می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت گذرا، برای پارامترهای فوق در شکل (۱۰) آمده است.

#### ۴-۴- موتور فاز شکسته

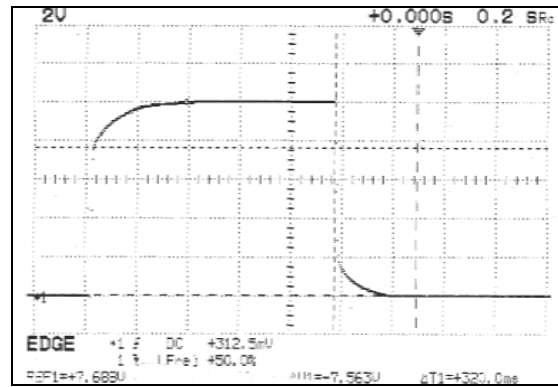
موتور تحت تست، یک موتور ۴ قطب، ۲۲۰ ولت و ۵۰ هرتز می‌باشد. پارامترهای این موتور به شرح جدول (۴) بدست می‌آیند.

جدول (۴): پارامترهای بدست آمده برای موتور القایی تکفاز فاز

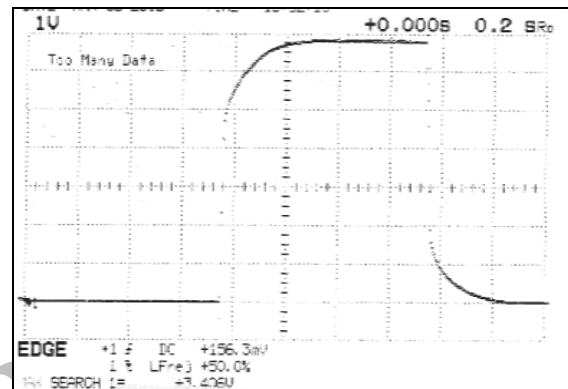
شکسته

A	$L'_{lr}$	$R'_r$	$L_m$
1.05	0.0197	2.321	0.2074
$R_f$	$L_{lf}$	$R_s$	$L_{ls}$
21.93	0.02239	6.71	0.0197

و  $J = 0.0125 \text{ kg.m}^2$  اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت گذرا، برای پارامترهای فوق در شکل (۱۱) آمده است.



شکل (۸-الف): جریان تخلیه سیم‌پیچ اصلی در موتور دو خازنی



شکل (۸-ب): جریان تخلیه سیم‌پیچ کمکی در موتور دو خازنی

$$\begin{cases} B_0 = 0.5488 \\ B_1 = 0.5858 \\ B_2 = 0.4142 \end{cases}, \begin{cases} T_1 = 0.0045 \\ T_2 = 0.0291 \end{cases} \quad (33)$$

بالاخره، پارامترهای الکتریکی موتور مطابق جدول (۲) و  $J$  برابر  $0.0627 \text{ kg.m}^2$  بدست می‌آیند.

جدول (۲): پارامترهای استخراجی برای موتور القایی تکفاز دو خازنی

A	$L'_{lr}$	$R'_r$	$L_m$
1.05	0.0214	1.9755	0.2084
$R_f$	$L_{lf}$	$R_s$	$L_{ls}$
12.9180	0.0962	5.13123	0.0214

نتایج حاصل از شبیه‌سازی حالت گذرا، با استفاده پارامترهای فوق در شکل (۹) آمده است.

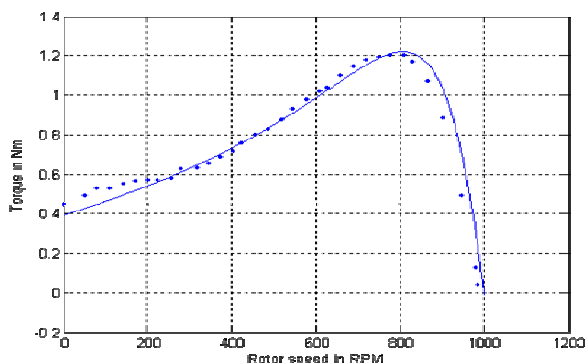
#### ۴-۳- موتور خازن راه‌انداز

یک موتور ۴ قطب، ۱۱۰ ولت، ۵۰ هرتز، با خازن ۱۵/۵ میکروفاراد، انتخاب می‌نماییم. طبق روال ارائه شده در مورد موتورهای خازن دائم و دو خازنی؛ پارامترهای این موتور به شرح جدول (۳) بدست می‌آیند.

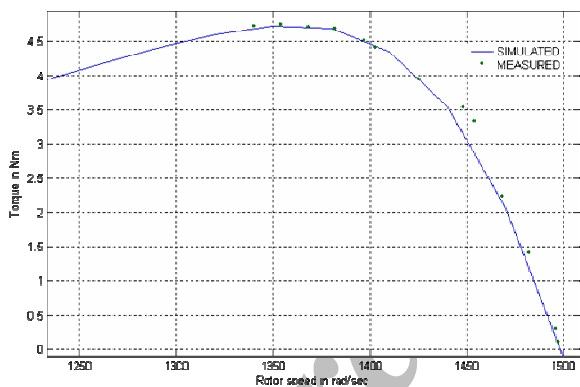
نمودارهای بدست آمده از دینامومتری نرم‌افزاری (شبیه‌سازی) و دینامومتری به روش مرسوم (اندازه‌گیری) با هم مقایسه می‌شوند.

### ۵-۱- مقایسه نمودارهای گشتاور-سرعت

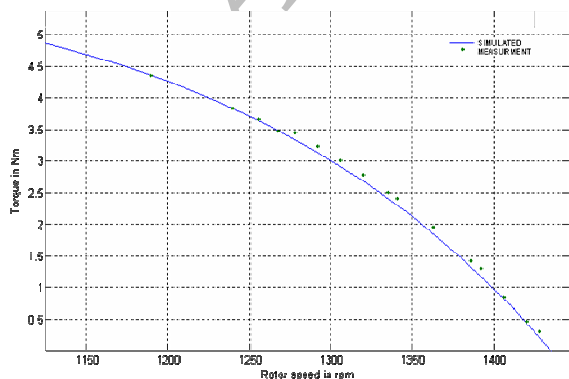
در شکل‌های (۱۲) تا (۲۷) نتایج شبیه‌سازی با خط پر و نتایج تست عملی به صورت دایره‌های توپر نشان داده شده‌اند.



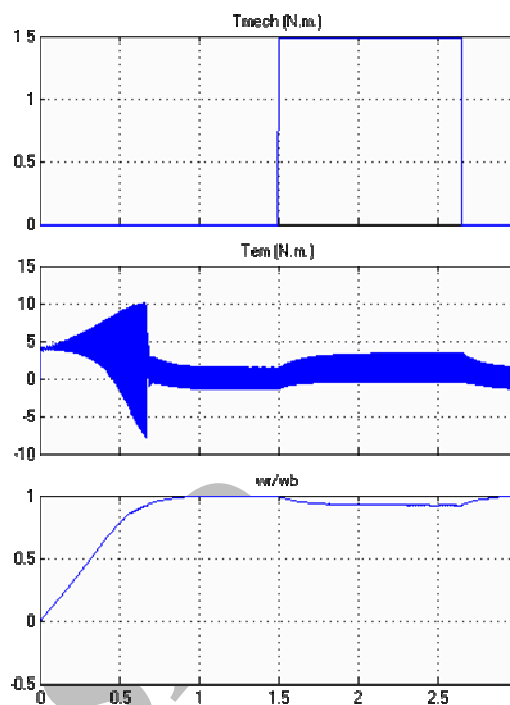
شکل (۱۲): نمودار گشتاور سرعت، حاصل از دینامومتری و شبیه‌سازی موتور خازن دائم



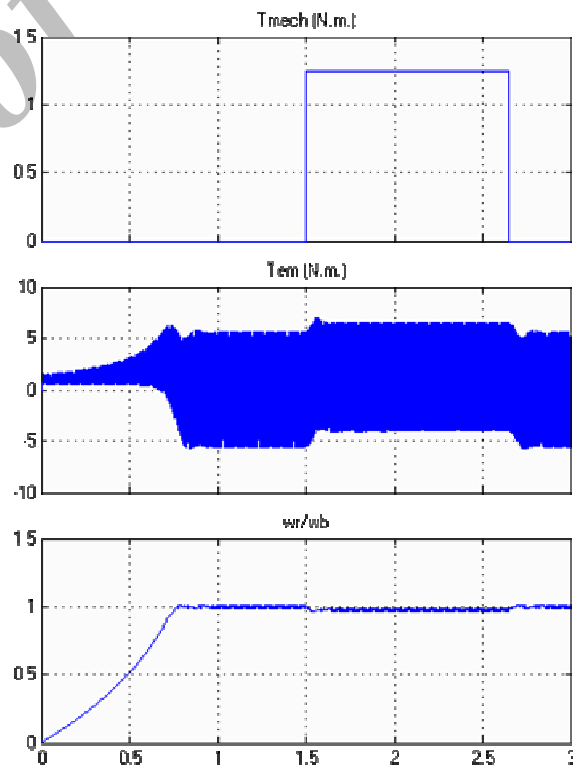
شکل (۱۳): نمودار گشتاور سرعت در موتور دو خازنی



شکل (۱۴): نمودار گشتاور سرعت در موتور خازن راه انداز



شکل (۱۰): نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی موتور خازن راه‌انداز

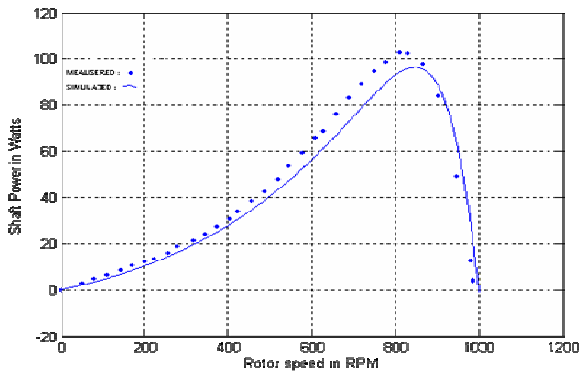


شکل (۱۱): نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی موتور فاز شکسته

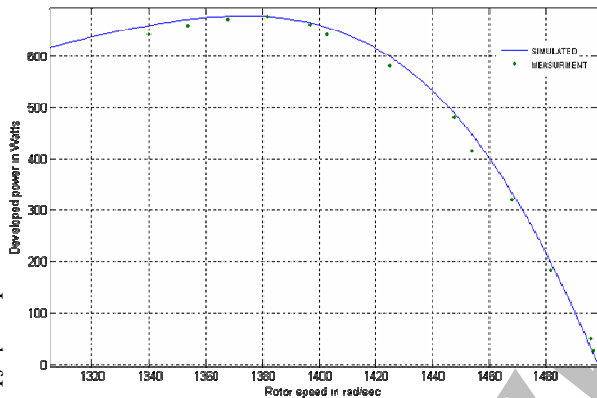
### ۵- مقایسه نمودارهای حاصل از دینامومتری نرم-

### افزاری و دینامومتری به روش مرسوم

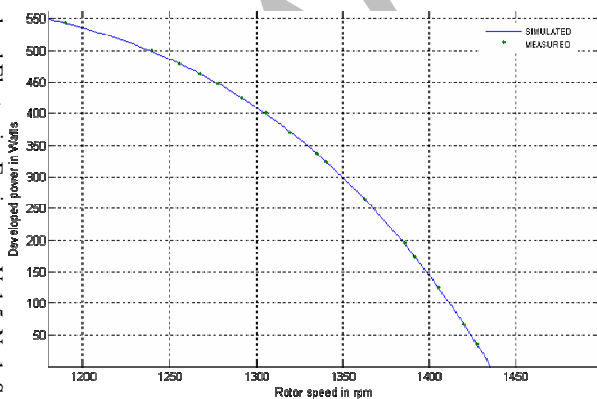
مهمترین منحنی‌های دینامومتری، منحنی‌های گشتاور-سرعت، توان-سرعت، بازده-سرعت و جریان-سرعت هستند. در این مرحله،



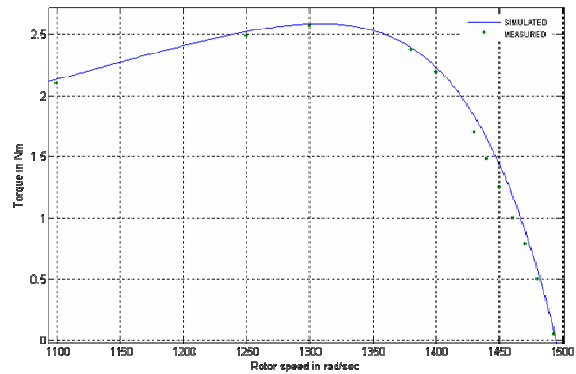
شکل (۱۶): نمودار حاصل از دینامومتری و شبیه‌سازی موتور خازن دائم



شکل (۱۷): نمودار حاصل از دینامومتری و شبیه‌سازی موتور دو خازنی



شکل (۱۸): نمودار حاصل از دینامومتری و شبیه‌سازی موتور خازن راه‌انداز



شکل (۱۵): نمودار گشتاور سرعت در موتور فاز شکسته

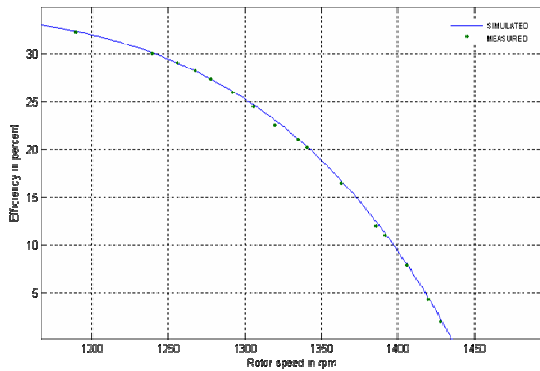
با توجه به رابطه  $(T_{max} \approx \frac{V_{th}^2}{x_{th} + x_2'})$  بدیهی است که گشتاور ماکزیمم، به مقاومت رتور، بستگی ندارد و  $R_r$  روی  $S_{Tmax}$  موثر است. مقایسه منحنی‌های گشتاور سرعت، تطابق خوبی بین نتایج دینامومتری و شبیه‌سازی در گشتاور راه‌اندازی و حداکثر نشان می‌دهد.

گشتاور راه‌اندازی در موتورهای القایی متناسب با  $R_r I_r$  می‌باشد؛ چون جریان رتور با توان دوم ظاهر می‌شود. لذا گشتاور راه‌اندازی شدیداً به مضرب آن یعنی  $R_r$  وابسته است به عبارت دیگر هرگاه در انتخاب  $R_r$  (به عنوان یکی از پارامترهای موتور) خطا وارد شود (هر چند میزان خطا اندک باشد) اولین تأثیر آن در گشتاور راه‌اندازی ظاهر می‌گردد. همانطور که در شکل‌ها نشان داده شده، گشتاور راه‌اندازی، فقط در موتور خازن دائم اندازه‌گیری شده است. این موضوع به دلیل محدودیت دینامومتر مورد استفاده می‌باشد. در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که در شبیه‌سازی، گشتاور راه‌اندازی برابر  $0.40 \text{ N.m}$  و در دینامومتری برابر  $0.46 \text{ N.m}$  می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد نمونه‌برداری دینامومتر در واحد زمان بسیار اندک می‌باشد، لذا تفاوت‌هایی اینگونه، طبیعتاً بروز خواهند کرد.

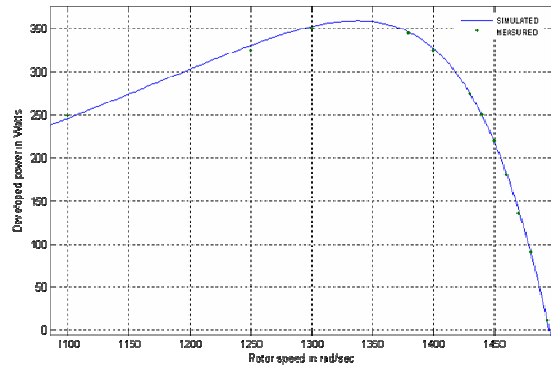
## ۲-۵- مقایسه نمودار توان مکانیکی خروجی - سرعت

مقایسه نمودارهای پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده توان خروجی، در شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) حاکی از تطابق این نمودارهاست. حداکثر توان اندازه‌گیری شده در موتور خازن دائم برابر  $102 \text{ وات}$  در سرعت  $811 \text{ rpm}$  است و حداکثر توان پیش‌بینی شده آن برابر  $98 \text{ وات}$  در سرعت  $838 \text{ rpm}$  است.

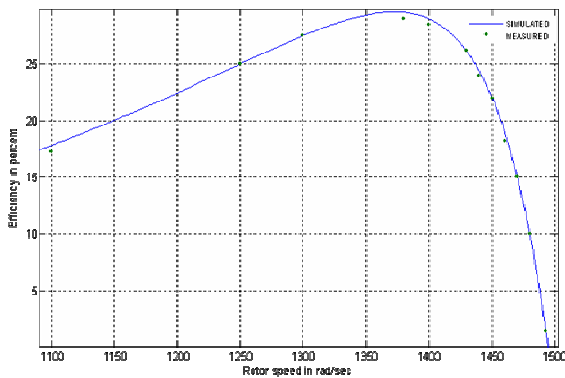




شکل (۲۲): نمودار بازده - سرعت در موتور خازن راه انداز



شکل (۱۹): نمودار حاصل از دینامومتری و شبیه‌سازی موتور فاز شکسته



شکل (۲۳): نمودار بازده - سرعت در موتور فاز شکسته

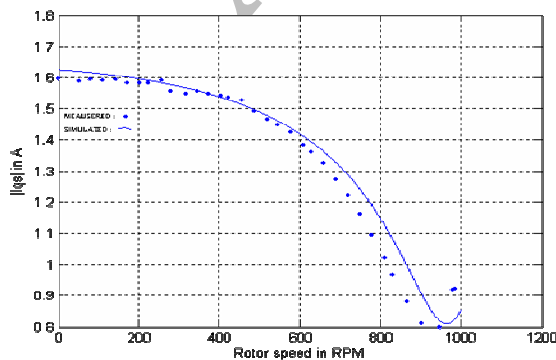
### ۵-۳- نمودار بازده - سرعت

طبق تعریف  $\eta\% = \frac{P_{avg}}{P_{in}} \times 100$  چون می‌توان  $P_{in}$  را مستقل از پارامترهای موتور، با استفاده از اندازه‌گیری اندازه و زاویه ولتاژ و جریان موتور بدست آورد، لذا دقت نمودار  $\eta$  به دقت در محاسبه  $P_{avg}$  بر می‌گردد. یعنی اگر  $P_{avg}$  به صورت دقیق بدست آید؛ می‌توان ادعا کرد که میان منحنی‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده بازده نیز تطابق مقبولی، وجود خواهد داشت.

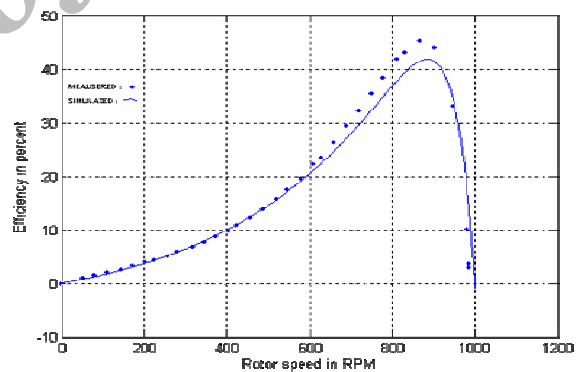
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، نتایج محاسبات، تطابق قابل قبولی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد.

### ۵-۴- نمودارهای جریان - سرعت

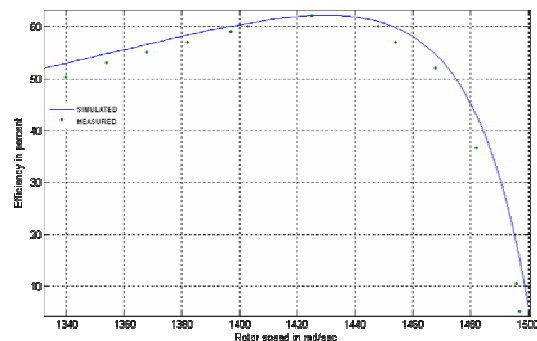
جریان اصلی موتور تکفاز، متناسب با  $\frac{jx_{mq}}{Z'_{lr} + jx_{mq}}$  است، که بخش حقیقی  $Z'_{lr}$  نیز متناسب با سرعت رتور می‌باشد، یعنی انتظار می‌رود با افزایش سرعت رتور، جریان‌ها کاهش یابند (نسبت به جریان حین دور گرفتن). شکل‌های (۲۳) تا (۲۶) تطابق تغییرات جریان سیم‌پیچی اصلی اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲۴): تغییرات جریان سیم‌پیچی اصلی در موتور خازن دائم



شکل (۲۰): نمودار بازده - سرعت در موتور خازن دائم

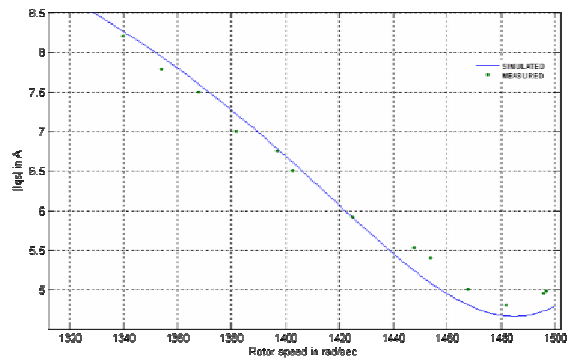


شکل (۲۱): نمودار بازده - سرعت در موتور دو خازنی

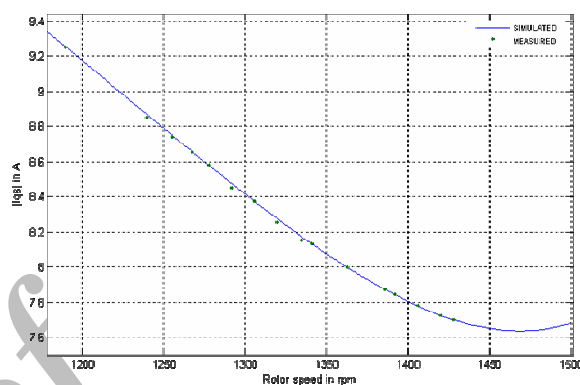
این مقاله بدون استفاده از سخت افزار دینامومتر، صرفاً با استفاده از پارامترهای شناسایی شده موتور منحنی‌های مذکور را با خطایی کمتر از ۴/۸ درصد بدست می‌آورد. با توجه به این که در این روش پارامترهای موتور عملاً بدست می‌آیند، لذا علاوه بر منحنی‌های دینامومتری مرسوم، مشخصه‌های حالت گذرا و حتی خود پارامترهای استخراجی موتور می‌توانند برای هر موتور تولیدی در اختیار مصرف‌کنندگان قرار گیرند. بدین منظور ابتدا پارامترهای موتور از روش دشارژ بدست آمد، سپس نمودارهای دینامومتری به صورت نرم‌افزاری محاسبه گردید. با توجه به تطابق این نمودارها با نمودارهای حاصل از دینامومتری به روش مرسوم، (مطابق جدول (۵)) از آنجا که سرعت انجام این روش بالا و هزینه آن به مراتب پایین‌تر است، استفاده از آن برای کارخانه‌های تولید الکتروموتور پیشنهاد می‌گردد.

## مراجع

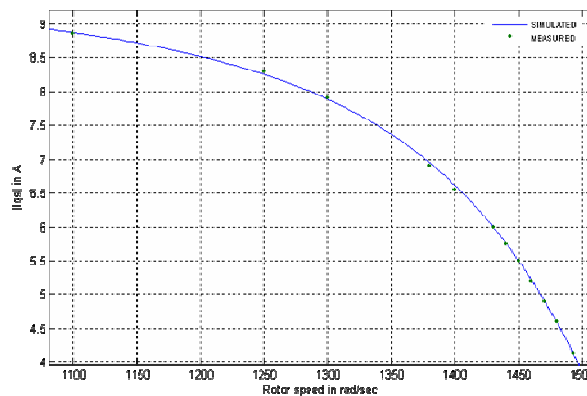
- [1] Meza Cobila R., "Equivalent Circuit for a poly phase induction motor", Electrical Machines and Systems, 2001 ICEM, Aug. 2001.
- [2] Ziari I., Vahedi A., Behjat V., "Charge and Discharge Stator Windings Current Response Analysis to Identify SPIM Parameters", ICEM 2004, Cracowa, Poland, sep. 2004.
- [3] Rusmos K., Vadstrup P., "Parameter Identification Of induction Motor Using Stochastic Optimization Algorithms", R&D of Grandfos, 2003.
- [4] Stancovik A. M., Aydin T., "Modeling & Analysis of Single Phase Induction Machines with Dynamic Phasors". IEEE Trans. on Power System, 1998.
- [5] Hon Singer V. "Modeling & Simulation of SPIM with External Rotor" IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 1, pp. 457-462, 2000.
- [6] Liang B., Ball A. D., "Simulation and fault detection of three-phase induction motor", Proc. of IEEE Region 10 Conference on Electrical Engineering, TENCON 02, Vol. 3, Oct. 2002.
- [7] Waterford H., Brice C.W., "Estimation of induction motor parameters by a genetic algorithm", Pulp and Paper Industry Technical Conference, June 2003.
- [8] Rasmussen H., "A new observer for speed sensorless filed oriented control of an induction motor", proc. of IEEE 28th Annual IECON 02, Vol. 1, Nov. 2002.
- [9] Ojo, O., Omozusi, O., Omoigui M., Jimoh A. A., "parameter estimation of Single phase induction machines", Industry Application Conference, 2001, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 4, pp. 2280-2287, Oct. 2001.
- [10] Peixoto A., Seixas Z. M., "Electrical parameter estimation considering the saturation effects in induction machines", Power Electronics Specialists Conference, 2000. PESC 00. 2000 IEEE 31st Annual, Volume 3, pp.1563 - 1568 vol.3, 18-23 June 2000
- [11] Lin Paul I-H., Messal Edward E., "Design of a Real-Time Rotor Inertia Estimation System for Motors with a Personal Computer", IEEE Trans. on Energy Conversion, pp. 292-296, 1991.



شکل (۲۵): تغییرات جریان سیم‌پیچی اصلی در موتور دو خازنی



شکل (۲۶): تغییرات جریان سیم‌پیچی اصلی در موتور خازن راه انداز



شکل (۲۷): تغییرات جریان سیم‌پیچی اصلی در موتور فاز شکسته

## ۶- مقایسه نمودارها

به لحاظ گوناگونی پارامترهای مورد مقایسه، حاصل این مقایسه‌ها در جدول (۵) خلاصه شده است.

## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله روشی نوینی برای تعیین منحنی‌های دینامومتری انواع موتورهای القایی تک‌فاز ارائه شد. اهمیت روش ارائه شده زمانی مشخص می‌گردد که قیمت چند ده هزار دلاری دینامومترها و زمان زیاد لازم برای دینامومتری مورد توجه قرار گیرد. روش ارائه شده در

جدول (۵): مقایسه مشخصات بدست آمده از روش شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، برای موتور القایی تکفاز

نوع موتور	گشتاور راه‌اندازی (N.m)	گشتاور ماکزیمم (N.m)	سرعت گشتاور ماکزیمم (rpm)	حداکثر توان (W)	سرعت رتور در حداکثر توان (rpm)	حداکثر بازده (%)
خازن دائم	اندازه‌گیری شده	0.40	1.2	811	811	45.23%
	محاسبه شده	0.46	1.2	808	838	44.6%
	خطای FS	0.13%	0.0%	0.37%	2.86%	3.22%
دو خازنی	اندازه‌گیری شده	-	4.75	1354	1382	60.06%
	محاسبه شده	0.11	4.74	1360	1380	62%
	خطای FS	-	-0.21%	4.4%	-0.0739%	0.1449%
خازن راه انداز	اندازه‌گیری شده	-	-	-	-	-
	محاسبه شده	4.8	5.777	750	580.3	1070
	خطای FS	-	-	-	-	-
فاز شکسته	اندازه‌گیری شده	-	2.58	1300	360	1340
	محاسبه شده	0.52	2.5921	1308	359.387	1337.5
	خطای FS	-	0.46%	0.61%	-0.17%	-0.18%
	سرعت رتور در حداکثر جریان سیم‌پیچی اصلی (A)	سرعت رتور در حداکثر جریان سیم‌پیچی اصلی (rpm)	جریان سیم‌پیچی کمکی در راه‌اندازی (A)	حداقل جریان سیم‌پیچی کمکی (A)	سرعت رتور در حداکثر جریان سیم‌پیچی کمکی (rpm)	حداکثر بازده (%)
خازن دائم	اندازه‌گیری شده	866	1.59	0.8	946	0.475
	محاسبه شده	850	1.625	0.812	962	0.480
	خطای FS	1.88%	2.15%	0.25%	1.66%	1.04%
دو خازنی	اندازه‌گیری شده	1436	-	4.81	1482	-
	محاسبه شده	1440	12.1	4.67	1485	0.66
	خطای FS	-0.2778%	-	4.4%	0.2%	-
خازن راه انداز	اندازه‌گیری شده	-	-	-	-	-
	محاسبه شده	1092	14.1663	7.637	1467	6.48
	خطای FS	-	-	-	-	-
فاز شکسته	اندازه‌گیری شده	1380	-	4.13	1493	3.86
	محاسبه شده	1371	9.45	3.8	1500	3.8916
	خطای FS	-0.65%	-	-8.6%	0.46%	0.81%

ادامه جدول (۵)

جریان سیم پیچی کمکی نامی (A)	جریان سیم پیچی اصلی نامی (A)	توان نامی (w)	بازده در نقطه کار نامی	گشتاور نامی (N.m.)	سرعت نامی (rpm)		
0.57	0.99	89.55	44.22%	1.11	850	اندازه گیری شده	خازن دائم
0.56	1.04	86.25	40.65%	1.09		محاسبه شده	
-1.7%	4.8%	-3.8%	-1.3%	-1.8%		خطای FS	
0.76	5.92	581	62	3.95	1425	اندازه گیری شده	دو خازنی
0.768	5.9125	599	62.2	4		محاسبه شده	
1.1%	-0.12%	3%	0.32%	1.25%		خطای FS	
9.5	7.87	186.5	12.5	1.3	1388	اندازه گیری شده	خازن راه انداز
9.6	7.86	186.8	12	1.275		محاسبه شده	
1.04%	-0.12%	0.16%	-4.1%	-1.9%		خطای FS	
4.35	5.75	250	24	1.48	1440	اندازه گیری شده	فاز شکسته
4.343	5.7575	248.6	24.35	1.65		محاسبه شده	
-0.16%	0.13%	-0.56%	1.4%	10%		خطای FS	