

## تخمین پارامترهای مدل ماشین القایی با در نظر گرفتن اثر اشباع به کمک روش سه مرحله‌ای

(1) احمد دارابی

[darabi\\_ahmad@hotmail.com](mailto:darabi_ahmad@hotmail.com)

(2) محمد یزدانی اسرمی

[yazdani@stu.nit.ac.ir](mailto:yazdani@stu.nit.ac.ir)

(1) صابر نقدی گنجی

[s.ganji@ieee.org](mailto:s.ganji@ieee.org)

دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده برق و رباتیک  
دانشگاه صنعتی بابل، دانشکده برق و کامپیوتر

واژه‌های کلیدی: ماشین القایی، اشباع، شناسایی پارامترها.

### چکیده

در این مقاله هدف، شناسایی پارامترهای ماشین القایی در حالت عدم اتصال به شبکه با در نظر گرفتن اثر اشباع می‌باشد. برای این منظور ابتدا مدل ماشین در Matlab/Simulink پیاده‌سازی و سپس نحوه مدل کردن اشباع نشان داده می‌شود. خواهیم دید که پارامترهای مکانیکی ماشین در حالت اتصال کوتاه اثر کمی بر روی جریان‌های خروجی دارند. از این خاصیت برای تخمین پارامترهای الکتریکی بدون در نظر گرفتن معادلات مکانیکی در هنگام وقوع یک اتصال کوتاه دو فاز به زمین استفاده می‌شود. با توجه به پارامترهای بدست آمده در مرحله اول، از روی شکل موج‌های راه‌اندازی موتور، مقادیر پارامترهای مکانیکی تخمین زده می‌شوند. دیده خواهد شد که با در نظر گرفتن اثر اشباع در مدل پیشنهادی مقاله، تا چه اندازه به نتایج مدل واقعی نزدیکتر می‌شویم.

### مقدمه

در دهه‌های اخیر بدلیل مصرف روزافزون انرژی الکتریکی و هزینه بالای تولید این انرژی از منابع فسیلی، تولید برق از منابع تجدیدپذیری همچون انرژی باد مورد توجه قرار گرفته شده است. بدلیل اتصال نیروگاه‌های بادی به شبکه‌های توزیع، پژوهش‌های گسترده‌ای بر روی این نیروگاه‌ها و ماشین‌های القایی موجود در آنها اعم از ژنراتور و موتور متمرکز شده است. این پژوهش‌ها عموماً در زمینه‌های تحلیل پایداری، کنترل و پیش‌بینی خطای ماشین القایی انجام شده‌اند. از طرفی برای طراحی، تحلیل حالت پایدار و عملکرد دینامیکی، کنترل بهینه ماشین القایی و تنظیمات رله‌های حفاظتی آن، به پارامترهای دقیق ماشین نیاز می‌باشد. از اینرو روش‌های گوناگونی برای تخمین پارامترهای ماشین القایی تاکنون بکار

## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

گرفته شده‌اند که به دو دسته عمده در حین کار (Online) و عدم اتصال به شبکه (Offline) تقسیم می‌شوند.

روش‌های تخمین و شناسایی پارامتر در حین کار بدلیل پیشرفت گسترده در زمینه کنترل جهت‌دار ماشین‌های القایی مورد توجه فراوان قرار گرفته‌اند [1]، [2]. با این وجود روش‌های شناسایی پارامتر در حالت عدم اتصال به شبکه، بدلیل سادگی، کم هزینه بودن و عدم نیاز به سخت افزار اضافی هنوز کاربرد بسیار دارند [3]، [4].

در گذشته مقالاتی در زمینه تشخیص پارامترهای ماشین الکتریکی القایی (IM) به چاپ رسیده است که نویسندگان با روش‌های متفاوت سعی در ارائه راهکارهای جدید و یا بهبود دقت پارامترهای بدست آمده حاصل از الگوریتم خویش، بوده‌اند. در [5] از ترکیب «تطبیق‌گر احتمال بیشینه» و «فیلتر کالمن» نهایتاً بردار پارامترهای بهینه تولید می‌شود. هر چند در این مقاله از شبیه‌سازی المان محدود برای یافتن نتایج اتصال کوتاه نامتقارن ماشین و سپس استفاده از این نتایج برای ورود داده به الگوریتمی که پارامترهای ماشین را تخمین می‌زند استفاده شده است، با اینحال در نظر نگرفتن اثر اشباع آهن ماشین بزرگترین اشکالی است که پارامترهای تخمین زده شده ماشین را بشکل جدی تحت تاثیر قرار می‌دهد. در [1] اهمیت شناسایی پارامترهای ماشین بخصوص ثابت زمانی رتور در کنترل شار جهت‌دار شده ماشین القایی تشریح شده است. در این مقاله روش کلیدزنی «CRPWM» جهت شناسایی ثابت زمانی رتور استفاده شده است. از اشکالات این روش می‌توان نیاز به تجهیزات و سخت‌افزار اضافی جهت کنترل، محدودیت کاربرد در سرعت‌های پایین و همچنین نیاز به محاسبه دقیق فرکانس لغزش را برشمرد. مقاله [2] از دو روش در حین کار و در حالت عدم اتصال به شبکه، جهت شناسایی پارامترهای ماشین القایی بخصوص ثابت زمانی آن بهره جسته است. نیاز به در نظر گرفتن حالت گذرای سرعت ماشین از اشکالات این روش می‌باشد. ضمناً به سبب بکار رفتن مشتق در سیستم کنترل جریان، این روش بسیار نویزپذیر بوده و علاوه بر آن تجهیزات و سخت‌افزار اضافی

جهت تزریق پالس به سیستم تولید شار، آن را پیچیده و گران می‌کند. در [6] تکنیکی معرفی شده است که به تقریب‌زنی در حین کار مقاومت، اندوکتانس و اندوکتانس گذرای استاتور، مستقل از سرعت و ثابت زمانی رتور می‌پردازد. با این حال، پارامترها بصورت لحظه‌ای قابل شناسایی نیستند. در [7] پارامترهای ماشین القایی به صورت Online با استفاده از تزریق یک سیگنال فرکانس بالا به ماشین، شناسایی شده‌اند.

در این مقاله برخلاف روش‌های پیشین که از جریان‌های ماشین به عنوان متغیرهای حالت استفاده می‌شده است، برای حذف مراحل اضافی و در نتیجه صرفه‌جویی در زمان پردازش، از شارها استفاده می‌شود. در این مطالعه یک روش سه مرحله‌ای مناسب برای تقریب زدن پارامترهای الکترومکانیکی یک ماشین القایی به کار برده می‌شود. اهداف اصلی این مقاله عبارتند از:

(1) ایجاد بلوک دیاگرام مدل الکترومکانیکی با در نظر گرفتن اشباع موتور القایی به فرم فضای حالت در Matlab/Simulink. لازم به ذکر است مدل پیشنهادی بر اساس تبدیل پارک به حالت  $d-q$  برده شده و برای یک موتور 2 قفسه‌ای بسط داده شده است.

(2) سازگار نمودن روش ضریب اشباع مقاطع-K مربوط به ماشین‌های سنکرون جهت تحلیل ماشین القایی به کمک روش عددی.

(3) استفاده از مدل ماشین القایی موجود در Matlab 7.6 بجای مراحل آزمایش Online و انجام آزمایشات سنتی بر روی مدل برای بدست آوردن پارامترهای اولیه.

(4) بیان یک مثال جهت نشان دادن کارآمدی روش پیشنهادی برای تقریب‌زنی پارامترهای یک ماشین القایی قفسه سنجایی.

### استخراج معادلات حالت غیرخطی برای ماشین القایی

در این قسمت ابتدا معادلات دیفرانسیلی مربوط به یک ماشین القایی دو قفسه‌ای با در نظر گرفتن اثر اشباع استخراج می‌گردد. سپس با استفاده از روش عددی، ضرایب اشباع محاسبه و از آنها جهت شناسایی پارامترها در روش سه مرحله‌ای استفاده می‌شود.

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

#### مدل‌های حالت الکترومکانیکی ماشین القایی

برای مدلسازی حالت الکترومکانیکی ماشین القایی می‌توان با رجوع به مراجع مختلف، مدلی از ماشین القایی را برگزید. در مرجع [8] مدل کاملی از ماشین القایی ارائه شده است که می‌تواند براحتی در محیط Matlab/Simulink شبیه‌سازی شود. با اینحال مدل استفاده شده در این مقاله بصورت تعمیمی از تعداد قفسه‌ها می‌باشد که مطابق شکل (1) نمایش داده شده است. این مدار معادل تعمیم یافته پارک یک ماشین القایی سه‌فاز است. رتورهای تک‌قفسه و دوقفسه به ترتیب با قرار دادن  $n=1$  و  $n=2$  بدست می‌آیند. بر این اساس، یک مدل رتور دو سیم‌پیچی ( $n=2$ ) در این مقاله برای ماشین القایی دو قفسه انتخاب شده است. در [9]، فرمول‌نویسی ماتریسی مدل دقیق ماشین القایی، شامل اتصال زمین، برای تحلیل حالت‌های متعادل و نامتعادل آورده شده است. برای پرهیز از ارجاع مکرر خلاصه‌ای از فرمول‌ها آورده می‌شود:

$$\Xi = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$W = g \begin{bmatrix} O_{n,n} & -I_n \\ I_n & O_{n,n} \end{bmatrix}$$

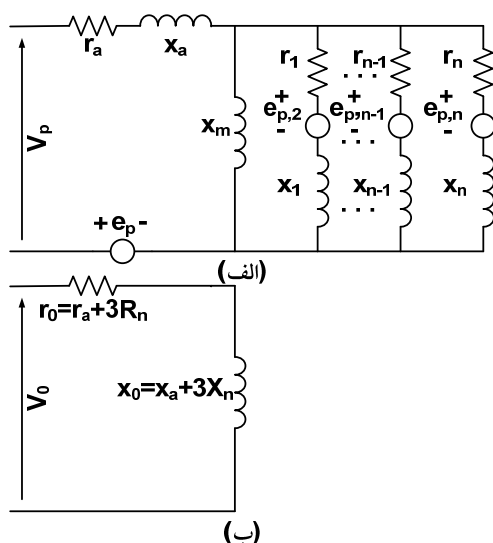
$$z_s = [z_d \quad z_q \quad z_0]^t \quad (4)$$

$$z_r = [z_{D_1} \dots z_{D_k} \quad z_{Q_1} \dots z_{Q_k}]^t; z = i, v, \psi; k = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$p(\omega_m) = \frac{1}{2H} ((T_e - T_m) - D\omega_m) \quad (6)$$

$$T_e = (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = i^t G_i i = \Psi^t G_\Psi \Psi \quad (7)$$

در روابط فوق،  $z_{D_k}$  و  $z_{Q_k}$  سیم‌پیچی رتور محور  $d$  و  $q$  شماره  $k$  برای متغیر  $Z$  می‌باشند.



شکل 1 - (الف) مدار معادل‌های تعمیم یافته پارک برای ماشین القایی با اتصال ستاره زمین شده، (ب) محور توالی صفر؛ و مقاومت و راکتانس زمین هستند

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_s & X_{sr} \\ X_{sr}^t & X_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \Leftrightarrow \Psi = Xi \quad (1)$$

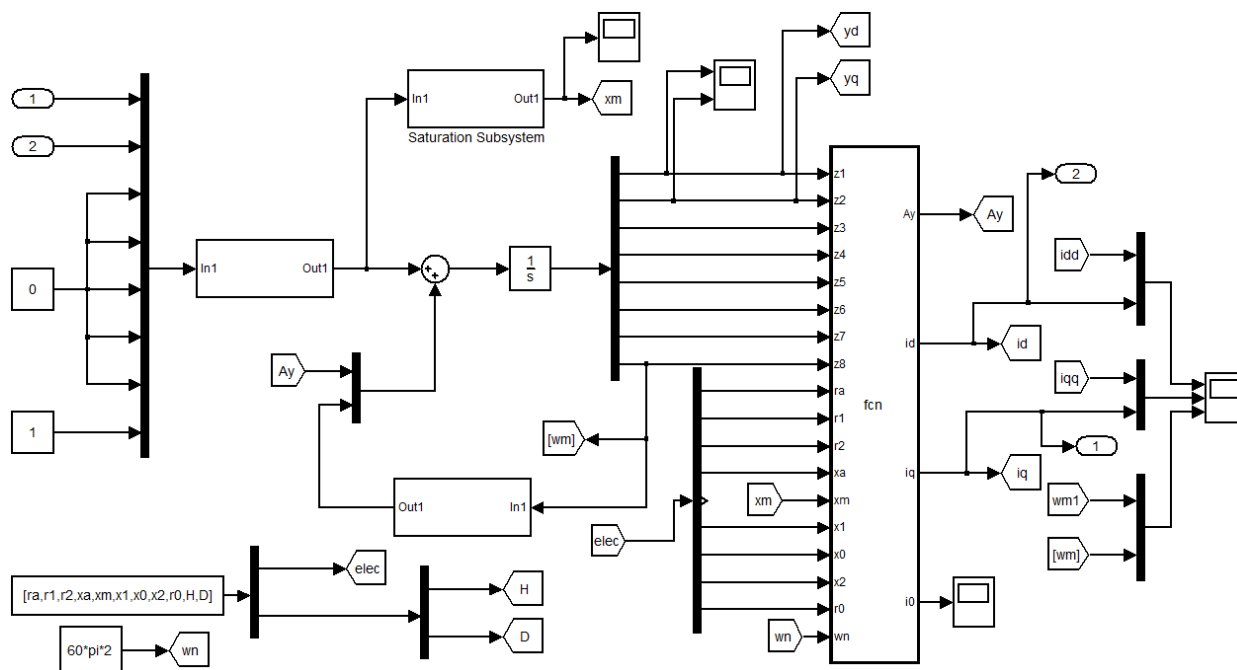
$$\begin{bmatrix} v_s \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & O_{3,2n} \\ O_{2n,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} + [\Pi + \Omega] \begin{bmatrix} \Psi_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow v = Ri + \Pi\Psi + \Omega\Psi$$

$$\Pi = \frac{p}{\omega_n} I_{2n+3}$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_s \Xi & O_{3,2n} \\ O_{2n,3} & W \end{bmatrix}$$

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل 2 - مدل ماشین پیاده سازی شده در محیط

$$y = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_0 & \omega_m \end{bmatrix}^t = \begin{bmatrix} C_z & O_{3,1} \\ O_{1,3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \omega_m \end{bmatrix} = Cx_z \quad (9)$$

$$\theta = [\Re \quad \chi \quad H \quad D]^t; \Re = [r_a \quad r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_0] \quad (10)$$

$$\chi = [x_a \quad x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m \quad x_0] \quad (11)$$

مدل ماشین پیاده‌سازی شده در محیط Matlab/Simulink در شکل (2) آورده شده است.

#### ضریب اشباع K برای ماشین القایی

جهت در نظر گرفتن اثر اشباع در مدل ماشین القایی، از آنجاییکه توالی صفر تحت تاثیر اشباع قرار نمی‌گیرد، لذا مدارهای معادل محور d و q ماشین در یک مدار تک‌فاز با متغیرهای مختلط ادغام می‌شوند [9]، [10]:

$$\bar{z}_t = z_d + jz_q; \bar{z}_k = z_{D_k} + jz_{Q_k}, z = i, v, \psi \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \bar{i}_m &= i_{md} + j i_{mq} = i_d + \sum i_{D_k} + j \left( i_q + \sum i_{Q_k} \right) \\ &= \bar{i}_m + \bar{i}_m + \bar{i}_m + \dots + \bar{i}_m, k = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (13)$$

Matlab/Simulink با تغییر متغیر، معادله (2) می‌تواند به فرم فضای حالت، با در نظر گرفتن جریان‌های ماشین بعنوان متغیرهای حالت، مطابق زیر بیان شود:

$$p \begin{bmatrix} z \\ \omega_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_z & O_{2n+3,1} \\ \frac{1}{2H} z^t G_z & -\frac{D}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_z & O_{2n+3,1} \\ O_{1,2n+3} & -\frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ T_m \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow p(x_z) = Ax_z + Bu, z = i, \Psi \quad (8)$$

مرتبه سیستم (8) با  $h = 2n + 4$  نشان داده می‌شود که برای این مقاله یک ماتریس 8 در 8 است. در نهایت، مدل حالت الکترومکانیکی می‌تواند به فرم کلی ماتریسی (8) و  $y = [i_d \quad i_q \quad i_0 \quad \omega_m]^t$  بعنوان بردار متغیر خروجی مرتب شود. سیستم (8) با استفاده از بردار پارامتر ماشین تعریف شده در (10) محاسبه می‌شود.

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

جدول 1 - پارامترهای مدل ضریب اشباع

$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$
34/1	-151	264	-228	-22/2	2/92

#### اشباع با جریان‌ها و شارها بعنوان متغیرهای حالت

وقتی جریان‌های ماشین القایی بعنوان متغیرهای حالت در نظر گرفته می‌شوند، (1)، (2)، به فرم ماتریسی فشرده بیان می‌دارد:

$$p[X(i)i] = \omega_n v - \omega_n [R + \Omega X(i)]i \quad (21)$$

$$p[X(i)i] = p[X(i)]i + X(i)p(i) \quad (22)$$

$$p[X(i)] = \frac{d[X(i)]}{di} \frac{di}{dt} = X_{inc} \frac{di}{dt} \quad (23)$$

$X_{inc}$  اندوکتانس افزایشی معرفی شده بوسیله مدل جریان می‌باشد، که فرم مدل حالت (21) را برای مشتق‌گیری دشوار و وقت‌گیر می‌سازد [10]، [11]. با انتخاب شارهای ماشین القایی بعنوان متغیرهای حالت در (1)، (2) داریم:

$$p[\Psi] = \omega_n u - \omega_n [R(X(i))^{-1} + \Omega] \Psi \quad (24)$$

فرم حالت (24) اندوکتانس افزایشی دیده شده در مدل جریان را نشان نمی‌دهد. بنابراین در این مقاله، شار به عنوان متغیر حالت برای مدل‌سازی انتخاب می‌شود.

#### روش عددی برای مدل ماشین القایی اشباع شده

با دانستن مقدار ضریب اشباع  $K_{\psi}$  در هر لحظه زمانی  $t_k$ ، سطح مغناطیس‌شوندگی ماشین القایی در لحظه  $t_{k+1}$  می‌تواند در بردار پارامتری  $\theta(t_k)$  که در مدل سیستمی (8) برای تحلیل عددی بکاررفته است، تنظیم شود:

$$\theta(t_k) = [\Re \quad \chi(t_k) \quad H \quad D]; \Re = [r_a \quad r_1 \quad r_2 \quad \dots \quad r_0]$$

$$\chi(t_k) = [x_a \quad x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_m(t_k) \quad x_0] \quad (25)$$

$$\bar{v}_t = r_a \bar{i}_t + \frac{1}{\omega_n} p(\bar{\psi}_t) + j \bar{\psi}_t \quad (14)$$

$$\bar{\psi}_t = x_a \bar{i}_t + x_m \bar{i}_m; \bar{\psi}_k = x_k \bar{i}_k + x_k \bar{i}_k, k=1, \dots, n \quad (15)$$

$$\psi_{ml} = x_m i_{ml} = \psi_l - x_a i_l, l=d, q \quad (16)$$

$$\bar{\psi}_m = \psi_{md} + j \psi_{mq} = \bar{\psi}_t - x_a \bar{i}_t = x_m \bar{i}_m \quad (17)$$

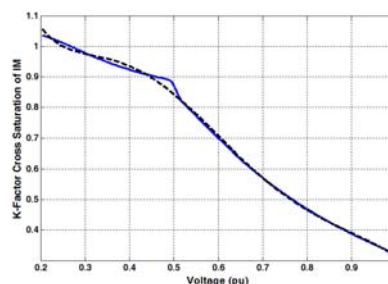
$$i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2}; \psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} \quad (18)$$

در روابط فوق، اندیس m متغیرهای متاثر از اشباع مغناطیسی را مشخص می‌کند. زیرنویس‌های t و k به ترتیب به متغیرهای ترمینال و متغیرهای شماره سیم‌پیچی km اشاره می‌نمایند. همانند تحلیل ماشین سنکرون [10]، ضریب اشباع متقاطع  $K_{\psi}$  بوسیله (19) معرفی می‌شود، درحالی‌که  $x_m^0$  مقدار ثابت اشباع نشده راکتانس مغناطیس‌کنندگی  $x_m$  است. در صورتی که ماشین بی‌بار و بارگذاری شده، بطور یکسان در حالت‌های دائمی و گذرا به اشباع برود، ضریب اشباع (19) می‌تواند بصورت (20) نیز بیان شود:

$$K_{\psi} = \frac{1}{x_m^0} \frac{\psi_m}{i_m} \approx \frac{1}{x_m^0} \frac{\psi_{t0}}{i_{t0}} \approx \frac{1}{x_m^0} \frac{v_{t0}}{i_{t0}} \quad (19)$$

$$= \lambda_0 + \lambda_1 (\omega_m \psi_m) + \lambda_2 (\omega_m \psi_m)^2 + \dots \quad (20)$$

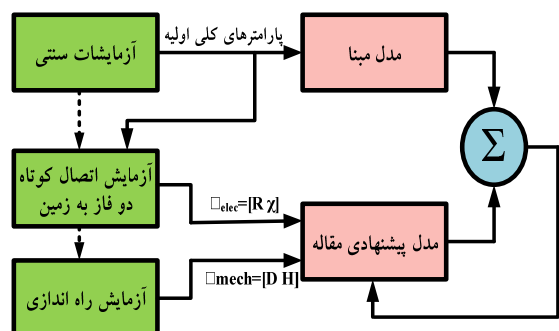
در رابطه فوق،  $(v_{t0}, i_{t0})$  داده‌های ماشین القایی در حالت بی‌بار استفاده شده برای محاسبه ضرایب  $\lambda_i$  برای  $i=1, \dots, 4$  می‌باشد. با استفاده از برازش منحنی مقادیر  $\lambda_1$  تا  $\lambda_6$  بدست آورده شده و در جدول (1) بیان شده است. همچنین منحنی  $K_{\psi}$  بر حسب ولتاژ در شکل (3) نشان داده شده است.



شکل 3 - منحنی  $K_{\psi}$  بر حسب ولتاژ



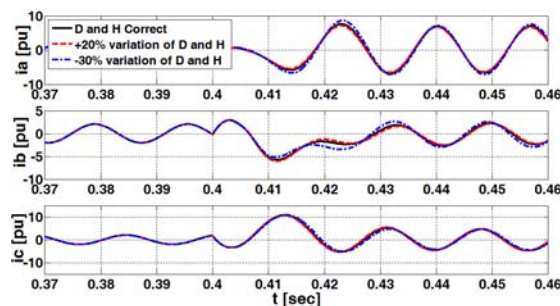
## بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



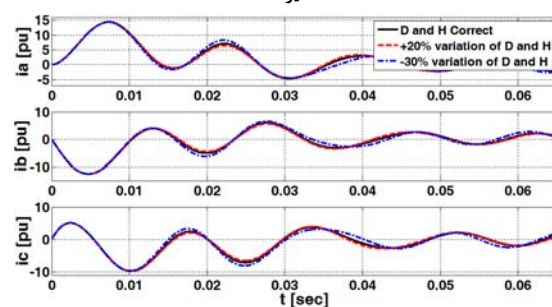
شکل 8 - الگوریتم سه مرحله‌ای ارائه شده در مقاله

### 4-1- آزمایش‌ها و تعیین پارامترهای ماشین القایی

ابتدا با استفاده از آزمایش‌های سنتی بی‌باری و رتور قفل شده و آزمایش DC، پارامترهای الکتریکی [12] و با استفاده از آزمایش شتاب منفی، پارامترهای مکانیکی مطابق جدول (2) محاسبه شدند. مدل ماشین موجود در Matlab/Simulink فقط شامل 1 مدار دمپر در هر محور بوده و نول آن به زمین وصل نمی‌باشد، بنابراین در مدل پیشنهادی برای صرف نظر کردن از مدار دوم و مدار توالی صفر مقدار پارامترهای آن بزرگ انتخاب می‌شود. با برپا کردن آزمایش اتصال کوتاه دوفاز به زمین مطابق شکل (9) و مقایسه شکل موج‌های جریان  $d$  و  $q$  نشان داده شده در شکل (10) برای مقادیر متفاوت ( $D=0.05, H=0.1$ ) و ( $D=0.06, H=0.11$ )، می‌توان مانند قبل نتیجه گرفت که پارامترهای مکانیکی ماشین تاثیر کمی روی جریان‌های اتصال کوتاه می‌گذارند. ولتاژ منبع ورودی 50٪ نامی است که در صورت Online بودن آزمایش محدودیتی در جریان استاتور ایجاد نکند و فرکانس منبع 60 هرتز و همچنین باز و بسته شدن سوئیچ‌ها در 0/4 ثانیه انجام می‌گیرد. با توجه به شکل (10) و اثرپذیری کم جریانهای  $d$  و  $q$  استاتور و همچنین با صرف نظر کردن از معادلات مکانیکی (با در نظر گرفتن  $H=\infty$ ) از روی داده‌های نمونه‌برداری شده این جریان‌ها از آزمایش اتصال کوتاه و قرار دادن مدل پیشنهادی مقاله در ابزار Control and Estimation Tools Manager در محیط Matlab/Simulink، پارامترهای الکتریکی، تخمین زده می‌شوند. در این تحقیق



شکل 6- جریان‌های استاتور فازهای a, b و c که تحت تاثیر کم تغییر پارامترهای مکانیکی D و H در آزمایش اتصال کوتاه دو فاز به زمین قرار می‌گیرند.



شکل 7- شکل موج‌های جریان راه‌اندازی فازهای a, b و c استاتور یک ماشین القایی به ازای سه مقدار مختلف H و D

گام 2: آزمایش اتصال کوتاه دوفاز به زمین برای تقریب‌زنی بردار پارامترهای الکتریکی  $\theta_{elec}=[R \ \chi]$  بدون در نظر گرفتن رابطه (6) به کار برده می‌شود. معادله (6) را می‌توان با در نظر گرفتن  $H \rightarrow +\infty$  از مدل ماشین القایی حذف نمود. گام 3: با استفاده از بردار تقریب‌زده شده پارامترهای الکتریکی  $\theta_{elec}$  گام 2، بردار پارامترهای مکانیکی  $\theta_{mech}=[D \ H]$  بر اساس داده‌های آزمایش راه‌اندازی محاسبه می‌شود. یک مزیت مهم این روش این است که به اندازه‌گیری‌های سرعت رتور در روند شناسایی نیازی نمی‌باشد.

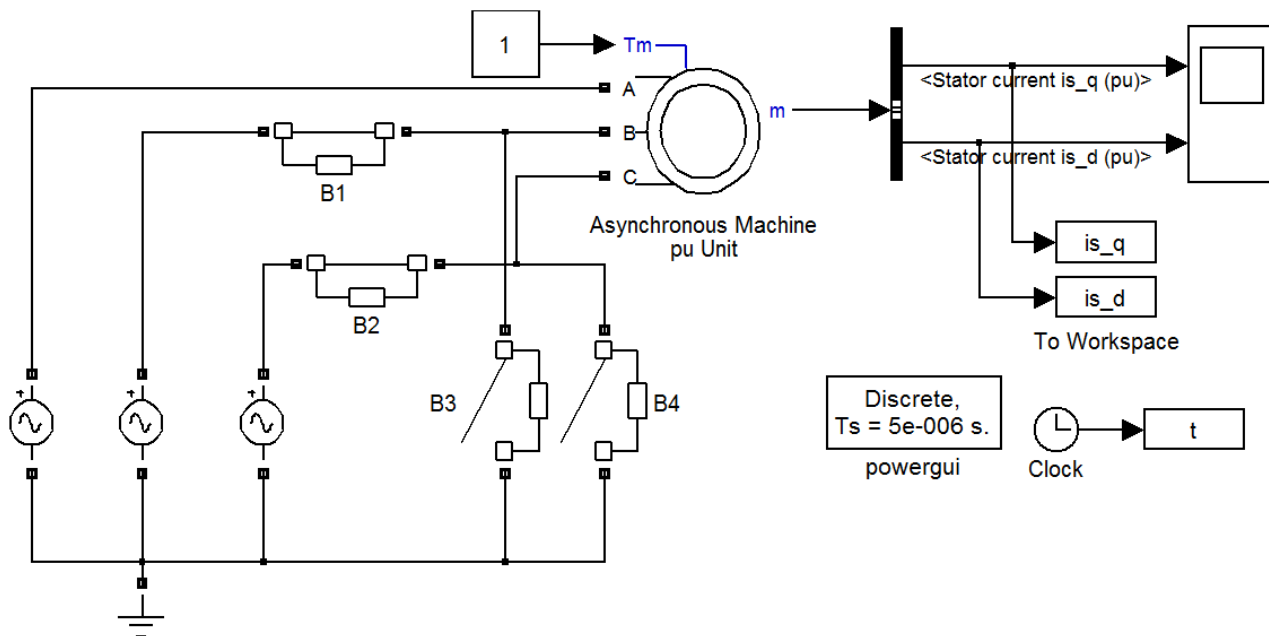
### 4- برپایی عملیات آزمایشگاهی

در این تحقیق برای برآورد پارامترها به جای داده‌های واقعی آزمایشگاهی از مدل ماشین القایی Matlab برای ساخت شکل موج‌ها، همچنین ابزار Control and Estimation Tools Manager در محیط Matlab/Simulink برای تخمین پارامترها استفاده شده است.

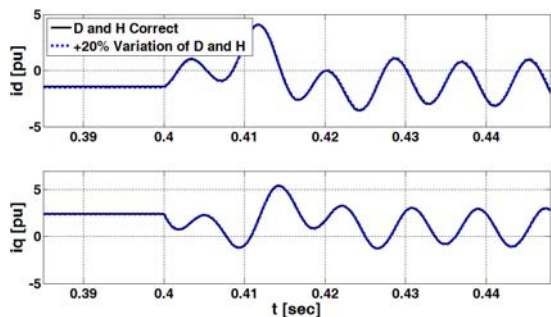
### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

تخمین زده شده به صورت جدول (3) می‌باشد.

برای برآورد از 61 داده که در بازه‌هایی با اندازه 0/001 نمونه‌برداری گشته‌اند، استفاده شده است و مقدار پارامترهای



شکل 9 - آزمایش اتصال کوتاه دو فاز به زمین در در Matlab/Simulink



شکل 10 - شکل موج‌های جریان استاتور محور  $d$  و  $q$  با دو مقدار مختلف

#### H و D

با پارامترهای محاسبه شده در این مرحله، مقادیر پارامترهای مکانیکی  $D$  و  $H$  مطابق توضیحات قبلی در ابزار Control and Estimation Tools Manager در محیط Matlab/Simulink، به ترتیب برابر 0/11 و 0/0085 با استفاده از آزمایش راه‌اندازی تخمین زده شده‌اند. می‌توان این اعداد را با مقادیر مدل مینا در جدول (2) مقایسه نمود.

مقدار	پارامتر
0/02	$\Gamma_a$ برحسب اهم
0/04	$X_a$ برحسب اهم
1/9	$X_m$ برحسب اهم
10	$\Gamma_0$ برحسب اهم
10	$X_0$ برحسب اهم
0/1	$D$ برحسب نیوتن در متر در ثانیه
0/05	$H$ برحسب کیلوگرم در متر مربع
0/02	$\Gamma_1$ برحسب اهم
10	$\Gamma_2$ برحسب اهم
0/04	$X_1$ برحسب اهم
10	$X_2$ برحسب اهم

جدول 2 - مقادیر اولیه بدست آمده از آزمایشات بی‌باری، رتور قفل شده و

#### آزمایش DC - مدل مینا

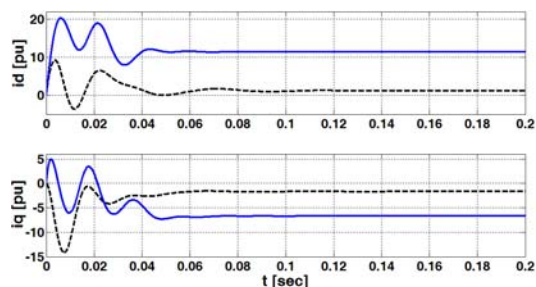
$\Gamma_a$	$X_a$	$X_m$	$\Gamma_1$	$X_1$
0/0209	0/048	1/49	0/0208	0/35

جدول 3 - پارامترهای الکتریکی بدست آمده بوسیله الگوریتم ارائه شده مدل

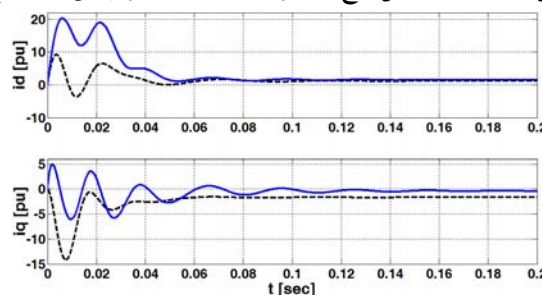
پیشنهادی

## 2-4- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

برای بررسی عملکرد این روش شکل موج‌های واقعی و مدل اولیه در شکل‌های (11) و (12) رسم شده‌اند. مقایسه این شکل موج‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای تخمینی جریان واقعی را بهتر دنبال می‌کنند. برای کم کردن خطای موجود بین جریان واقعی و جریان مدل باید از داده‌های بیشتری برای تخمین پارامترها استفاده شود. همچنین می‌توان مراحل تقریب‌زنی اشباع را چندین بار تکرار کرد و در هر مرحله از داده‌های مرحله قبل جهت بهبود نتایج استفاده نمود.



شکل 11 - مقایسه شکل موج‌های جریان  $d$  و  $q$  بدون تقریب‌زنی اولیه اشباع



شکل 12- مقایسه شکل موج‌های جریان  $d$  و  $q$  با پیشرفت یک مرحله‌ای تقریب‌زنی اشباع

## نتیجه‌گیری

در این مقاله از یک روش سه مرحله‌ای برای تخمین پارامترهای یک ماشین القایی دو قفسه سنجابی به صورت Offline استفاده شده است. در ابتدا مدل تعمیم یافته پارک از ماشین القایی در محور  $d$ - $q$  ارائه گشته و در مدل ارائه شده، از شار بعنوان متغیر حالت برای مدلسازی استفاده شده است تا متغیر اندوکتانس افزایشی را حذف کند و از دشواری و وقت‌گیری شبیه‌سازی بکاهد. این مدل با در نظر گرفتن اثر اشباع آهن شبیه‌سازی شد. اثر اشباع، توسط ضریب اشباع

مقاطع  $K_{\psi}$  و طی یک الگوریتم 5 مرحله‌ای معرفی گشت. سپس طی سه مرحله، تقریب‌زنی پارامترها صورت گرفت. در مرحله اول، آزمایشات سنتی رتور قفل شده، بی‌باری و dc برای بدست آوردن پارامترهای مدل مبنا که همان مدل پیش-فرض ارائه شده در Matlab/Simulink است، صورت گرفت. پارامترهای بدست آمده از این مرحله، به عنوان ورودی برای ورودی مرحله دوم، مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم، با توجه به اینکه در آزمایش اتصال کوتاه دو فاز به زمین، پارامترهای مکانیکی تغییرات چندانی ندارند، با حذف معادله مکانیکی ماشین و ذخیره داده‌های نمونه از جریان استاتور با استفاده از ابزار Control and Estimation Tools Manager، پارامترهای الکتریکی تخمین زده شد. در نهایت در مرحله سوم، پارامترهای مکانیکی با استفاده از آزمایش راه‌اندازی بدست آمد. بدست آمده از این روش با استفاده از مقایسه شکل موج‌های جریان  $d$  و  $q$  استاتور مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. در مدل ارائه شده می‌توان با افزایش تکرار در الگوریتم اشباع، به افزایش دقت در نتایج نهایی رسید.

بحث در مورد اینکه تعداد طبقات قفسه سنجابی ماشین القایی چه تاثیری بر روی عملکرد شناسایی پارامترها و دقت آنها دارد، می‌تواند زمینه‌ساز پژوهش‌های بعدی در ارائه مقالات آینده باشد.

## مراجع

- [1] H. A. Toliyat, M. S. Arefeen, K. M. Rahman, and D. Figoli, "Rotor Time Constant Updating Scheme for a Rotor Flux-Oriented Induction Motor Drive," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 14, pp. 850-857, SEPTEMBER 1999.
- [2] D. Telford, M. W. Dunnigan, and B. W. Williams, "Online Identification of Induction Machine Electrical Parameters for Vector Control Loop Tuning," *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 50, pp. 253-261, APRIL 2003.
- [3] P. T. Lagonotte, H. A. Miah, and M. Poloujadoff, "Modelling and identification of parameters of saturated induction machine operating under motor and generator

**بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق**

- conditions," *Elect. Machines Power Syst. J.*, pp. 107–121, Feb. 1999.
- [4] P. Ledesma and J. Usaola, "Doubly fed induction generators model for transients stability analysis," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, pp. 388–397, Jun. 2005.
- [5] R. Wamkeue, I. Kamwa, and M. Chacha, "Unbalanced transients-based maximum likelihood identification of induction machine parameters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, pp. 33–40, Mar. 2003.
- [6] J. L. Zamora and A. Garcia-Cerrada, "Online estimation of the stator parameters in and induction motor using only voltage and current measurements," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, pp. 805–816, May/June 2000.
- [7] H. Chai and P. P. Acarnley, "Induction motor parameter estimation algorithm using spectral analysis," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 139, pp. 165–174, May 1992.
- [8] P. C. KRAUSE, O. WASYN CZUK, and S. D. SUDHOFF, "ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS," in *IEEE Power Engineering Society, SECOND ed*, M. E. EL-Hawary, Ed.: A HOHN WILEY & SONS, INC. PUBLICATION.
- [9] R. e. Wamkeue, D. Aguglia, M. Lakehal, and P. Viarouge, "Two-Step Method for Identification of Nonlinear Model of Induction Machine," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 22, pp. 801–809, DECEMBER 2007.
- [10] S.-A. TAHAN and I. KAMWA, "A two-factor saturation model for synchronous machines with multiple rotor circuits," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 10, pp. 609–616, 1.995
- [11] A. M. E. Serafi and J. Wu, "Determination of the parameter representing the cross-magnetizing effect in saturated synchronous machines," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 8, pp. 333–340, Sep. 1993.
- [12] S. Ayasun and C. O. Nwankpa, "Induction Motor Tests Using MATLAB/Simulink and Their Integration Into Undergraduate Electric Machinery Courses," *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION*, pp. 37–46, FEBRUARY 2005.