

تخمین بلادرنگ پارامترهای موتور القایی توسط فیلتر کالمن بدون کاربرد سنسور

مهدی صادقیان لمراسکی^{۳،۱} جواد پشتان^۲ رضا قاسمی^{۳،۱} گئورگ قره پتیان^۱
mesadeghian@yahoo.com jposhtan@iust.ac.ir r_ghasemi@mail.com grptian@cic.aut.ac.ir
۱- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۲- دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳- شرکت مهندسی کاسپین نیرو

۱- مقدمه

موتورهای القایی بخصوص موتورهای قفس سنجابی مزایای فراوانی از جمله نیاز به تعمیر و نگهداری کمتر، قابلیت اطمینان بالاتر، قیمت، وزن، حجم و اینرسی کمتر، راندمان بیشتر، قابلیت عملکرد در محیطهای با گرد و غبار و قابل انفجار را دارند. تا جائیکه موتورهای القایی (قفس سنجابی) بخاطر متنوع بودن و همچنین بادوام بودن بعنوان موتور محرک صنعت شناخته میشوند.

تخمین پارامترهای موتور القایی (شارها، سرعت و مقاومت روتور) جهت کاربردهایی مانند تنظیم اتوماتیک کنترل کننده ها و تشخیص بروز خطا در موتور امری ضروری است. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد با محدودیت استفاده از حسگرهای سرعت و کابلهای اندازه گیری مربوطه مواجه می شویم، تخمین سرعت بدون استفاده از حسگر میتواند باعث کاهش هزینه و افزایش قابلیت اطمینان شود. EKF یک نوع بخصوص از روتیگر است که فیلتری بهینه بر روی نوزهای ورودی و اندازه گیری انجام میدهد و بر اساس یک مدل غیر خطی از موتور القایی که جریانهای استاتور، شارها و سرعت روتور را بعنوان متغیرهای حالت در بر میگیرد عمل تخمین کمیتهای مورد نظر را انجام میدهد. در [۱] روشی برای تخمین سرعت موتور القایی توسط EKF بیان شده، که از الگوریتم ژنتیک برای بهینه کردن کوواریانس نویز و

چکیده: در این مقاله یک روش جدید جهت تخمین بلادرنگ

مقاومت، سرعت و شارهای موتور القایی ارائه می شود. جهت انجام این کار اندازه های جریانها و ولتاژهای استاتور توسط فیلتر کالمن توسعه یافته^۱ (EKF) پردازش میشوند و با استفاده از الگوریتم فیلتر کالمن کمیتهای فوق تخمین زده می شوند. که از نتایج آن میتوان جهت تشخیص بروز خطا در موتور و تنظیم اتوماتیک کنترل کننده ها برای یک رنج وسیع از موتورها و بارها استفاده کرد. بعنوان نمونه با توجه به اینکه هنگام بروز خطای شکستگی میله، مقاومت روتور افزایش می یابد، میتوان با مقایسه مقدار تخمین زده شده با مقدار آزمایشگاهی بروز خطای شکستگی میله را بصورت بلادرنگ تشخیص داد و از گسترش آن جلوگیری کرد. از مزایای دیگر این روش عدم استفاده از سنسور سرعت میباشد که سبب صرفه جویی زیادی در هزینه ها میگردد. نتایج شبیه سازیهای انجام شده بر روی موتور القایی قفس سنجابی ۴ kw و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد که روش ارائه شده ابزار قدرتمندی جهت تخمین پارامترهای ماشین القایی میباشد.

واژه های کلیدی: ماشین القایی، EKF، تخمین بلادرنگ، مقاومت روتور، سرعت روتور.

^۱- Extended Kalman Filter
^۲-Experimental

سیستم بیان می شوند. این مدل در قاب مرجع X-Y روتور عبارتست از: [۴]

$$\frac{di_{sx}}{dt} = \frac{1}{\sigma l_s} v_{sx} - \gamma i_{sx} + \frac{B}{T_r} \psi_{rx} + n_p B w \psi_{ry} + n_p w i_{sy} \quad (1)$$

$$\frac{di_{sy}}{dt} = \frac{1}{\sigma l_s} v_{sy} - \gamma i_{sy} + \frac{B}{T_r} \psi_{ry} - n_p B w \psi_{rx} - n_p w i_{sx} \quad (2)$$

$$\frac{d\psi_{rx}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sx} - \frac{1}{T_r} \psi_{rx} \quad (3)$$

$$\frac{d\psi_{ry}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sy} - \frac{1}{T_r} \psi_{ry} \quad (4)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{2Mn_p}{j l_r n_{ph}} (i_{sy} \psi_{rx} - i_{sx} \psi_{ry}) - \frac{\tau_l}{j} \quad (5)$$

$$T_r = \frac{l_r}{R_r} \quad ; \quad \sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r}$$

$$B = \frac{M}{\sigma l_s l_r} \quad ; \quad \gamma = \frac{R_s l_r^2 + M^2 R_r}{\sigma l_s l_r^2}$$

v_{sx}, v_{sy} = ولتاژهای استاتور

i_{sx}, i_{sy} = جریانهای استاتور

ψ_{rx}, ψ_{ry} = شارهای روتور

R_s = مقاومت استاتور

R_r = مقاومت روتور

l_s = اندوکتانس استاتور

l_r = اندوکتانس روتور

M = اندوکتانس متقابل

n_p = تعداد جفت قطب

n_{ph} = تعداد فاز

j = اینرسی روتور

T_r = ثابت زمانی روتور

T_l = گشتاور بار

σ = ضریب کل نشتی

سیستم فوق می تواند به فرم کلی معادلات غیر خطی زیر

توصیف شود:

ماتریس های وزن EKF استفاده شده است. در [۳،۲] با در نظر گرفتن سرعت روتور بعنوان متغیر حالت، توسط EKF سرعت تخمین زده شده است. تخمین بلادرنگ پارامترهای موتور القایی بر اساس روشهای شناسایی و EKF در [۵،۴] بررسی شده است، که در این روشها فرض میشود که اندازه های جریانها و سرعت در دسترس هستند. یعنی تخمین با استفاده از سنسور سرعت انجام می شود. در [۶] عمل تخمین سرعت، دمای استاتور و روتور توسط EKF صورت گرفته است. در این تکنیک از مدل های ریاضی موتور شامل معادلات الکتریکی، مکانیکی و حرارتی موتور استفاده شده است. که این روش قادر به تخمین مقاومت روتور نمیشد. در [۷] ساخت وسیله ای بر اساس پردازشگرها جهت تشخیص خطا به صورت بلادرنگ در موتورهای القایی پیشنهاد شده است. در این سیستم تشخیص خطا با استفاده از روشهای شناسایی (روش بازگشتی^۳) پارامترهای خاصی از قبیل مقاومت میله روتور و سرعت روتور تخمین زده می شود.

در این مقاله روشی جدید برای تخمین شارها، سرعت و مقاومت روتور بصورت بلادرنگ^۴ با استفاده از EKF ارائه شده است. مزیت های این روش عبارتند از:

الف- تخمین بلادرنگ پارامترهای موتور، بدون استفاده از سنسور.

ب- تخمین سرعت روتور و در نتیجه عدم استفاده از سنسور مربوطه، که باعث صرفه جویی اقتصادی و افزایش قابلیت اطمینان میشود.

ج- تخمین مقاومت روتور، که با استفاده از آن میتوان بروز خطا در روتور را تشخیص داد.

۲- مدل استاندارد موتور القایی

موتورهای القایی بوسیله معادلات دیفرانسیل مرتبه پنج با چهار متغیر الکتریکی شامل جریانها، شارها و سرعت روتور بعنوان متغیر مکانیکی و ولتاژهای استاتور بعنوان ورودی

^۳ - Recursive

^۴ - Real time

$$k(k+1) = P(k+1)H^T(k+1)A(k+1) \quad (۱۸)$$

$$A(k+1) = [H(k+1)P(k+1)H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (۱۹)$$

$$H(k+1) = \left. \frac{\partial h[x(t), t]}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k+1|k)} \quad (۲۰)$$

لذا تخمین حالت بفرم رابطه (۲۱) بدست می آید:

$$\hat{x}(k+1|k+1) = \hat{x}(k+1|k) + k(k+1)B(k+1) \quad (۲۱)$$

$$B(k+1) = Y(k+1) - h[\hat{x}(k+1|k), k+1] \quad (۲۲)$$

که ماتریس کوواریانس فیلتر برابر است با:

$$P(k+1|k+1) = [I - k(k+1)H(k+1)]P(k+1|k) \quad (۲۳)$$

۴- پیاده سازی EKF بر روی موتور القایی

در این بخش مدل موتور القایی که در قسمت ۲ توصیف شد جهت اعمال به EKF مرور شده در بند ۳ استفاده می شود.

$$\begin{cases} U^T = [v_{sx} & v_{sy}] = [u_1 & u_2] \\ X^T = [i_{sx} & i_{sy} & \psi_{rx} & \psi_{ry} & w & R_r] = [x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6] \end{cases} \quad (۲۴)$$

$$\gamma_1 = \frac{R_s l_r^2}{\sigma l_s l_r^2} \quad ; \quad \gamma_2 = \frac{M^2}{\sigma l_s l_r^2}$$

با استفاده از مفروضات و روابط فوق، معادلات دینامیکی موتور بفرم زیر تبدیل می شود:

$$f = \begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{\sigma l_s} u_1 - (\gamma_1 + \gamma_2 x_6) x_1 + \frac{B}{l_r} x_6 x_3 + n_p B x_5 x_4 + n_p x_5 x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{\sigma l_s} u_2 - (\gamma_1 + \gamma_2 x_6) x_2 + \frac{B}{l_r} x_6 x_4 - n_p B x_5 x_3 - n_p x_5 x_1 \\ \dot{x}_3 = \frac{M}{l_r} x_6 x_1 - \frac{1}{l_r} x_6 x_3 \\ \dot{x}_4 = \frac{M}{l_r} x_6 x_2 - \frac{1}{l_r} x_6 x_3 \\ \dot{x}_5 = \frac{2M n_p}{j l_r n_{ph}} (x_2 x_3 - x_1 x_4) - \frac{T}{j} \\ \dot{x}_6 = 0 \end{cases} \quad (۲۵)$$

ماتریس اندازه گیری بفرم زیر در نظر گرفته می شود:

$$h[x(t), t] = [i_{sx} \quad i_{sy}]^T = [x_1 \quad x_2]^T \quad (۲۶)$$

$$\dot{X} = f(X, U) \quad (۲)$$

$$Y = H(X) \quad (۷)$$

که $X(t)$ بردار حالت n - بعدی، $U(t)$ سیگنال کنترل m - بعدی و $Y(t)$ بردار اندازه گیری p - بعدی می باشد.

۳- فیلتر کالمن توسعه یافته (EKF)

در این بخش الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته جهت استفاده در مساله تخمین پارامترهای موتور القایی مورد بررسی قرار می گیرد. این فیلتر توسط معادلات زیر توصیف میشود:

$$\dot{X}(t) = f(x(t), u(t), t) + G(t)w(t) \quad (۸)$$

$$Y(t) = h(x(t), t) + v(t) \quad (۹)$$

ماتریس نویز حالت $G(t)$

بردار نویز حالت $w(t)$

بردار نویز اندازه گیری $v(t)$

پیشگویی حالت برابر است با:

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k|k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(x(t), u(t), t) dt \quad (۱۰)$$

$k = \text{sampling step}$

با استفاده از قضیه مقدار میانگین و جایگذاری آن در رابطه (۱۰) میتوان رابطه فوق را بفرم رابطه (۱۲) بیان کرد:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t) dt = (t_{k+1} - t_k) f(t) = T_s f(t) \quad (۱۱)$$

$$\hat{x}(k+1|k) = \hat{x}(k|k) + T_s f(k) \quad (۱۲)$$

$T_s = \text{sampling period}$

که ماتریس کوواریانس فیلتر با رابطه (۱۳) بیان میشود:

$$P(k+1|k) = \varphi(k+1|k)P(k|k)\varphi(k+1|k) + \theta(k) \quad (۱۳)$$

$$\varphi(k+1|k) = e^{T_s F(k)} \quad (۱۴)$$

$$F = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k+1|k)} \quad (۱۵)$$

با استفاده از بسط تیلور رابطه (۱۴) بفرم زیر بیان میشود:

$$\varphi(k+1|k) \approx 1 + T_s F(k) \quad (۱۶)$$

همچنین ماتریس کوواریانس نویز حالت برابر است با:

$$\theta(k+1) = \int_{t_k}^{t_{k+1}} \varphi(t_{k+1})G(\tau)\theta(\tau)G^T(\tau)\varphi^T(t_{k+1}, \tau) d\tau \quad (۱۷)$$

و بهره فیلتر کالمن بفرم رابطه (۱۸) میباشد:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

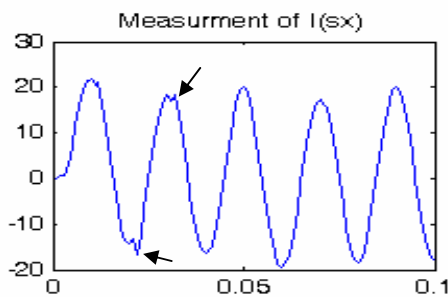
با استفاده از رابطه (۱۵) ماتریس ژاکوبین بصورت رابطه (۲۸) حاصل می شود:

$$F = \begin{bmatrix} -\gamma_1 - \gamma_2 x_6 & n_p x_5 & \frac{B}{l_r} x_6 & n_p B x_5 & n_p B x_4 + n_p x_2 & -\gamma_2 x_1 + \frac{B}{l_r} x_3 \\ n_p x_5 & -\gamma_1 - \gamma_2 x_6 & -n_p B x_5 & \frac{B}{l_r} x_6 & -n_p B x_3 - n_p x_1 & -\gamma_2 x_2 + \frac{B}{l_r} x_4 \\ \frac{M}{l_r} x_6 & 0 & -\frac{1}{l_r} x_6 & 0 & 0 & \frac{M}{l_r} x_1 - \frac{1}{l_r} x_3 \\ 0 & \frac{M}{l_r} x_6 & 0 & -\frac{1}{l_r} x_6 & 0 & \frac{M}{l_r} x_2 - \frac{1}{l_r} x_4 \\ -ax_4 & -ax_3 & -ax_2 & -ax_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$a = \frac{2Mn_p}{jl_r n_{ph}} \quad (29)$$

باعث حذف نویز و نامتقارنی شده است که در شکل‌های (۱) و (۲) وجود دارد.

بر اساس جریان‌های استاتور پارامترهای دیگر موتور از قبیل شارها، سرعت و مقاومت روتور تخمین زده می شوند که پاسخ این تخمینها بترتیب در شکل‌های (۵) الی (۸) رسم شده است.



شکل ۱: شکل موج جریان اندازه گیری شده I_{sx}

حال با استفاده از الگوریتم EKF ارائه شده در قسمت سوم و روابط استخراج شده در قسمت قبل، روش پیشنهاد شده بر روی یک موتور القایی نمونه شبیه سازی میشود.

۵- نتایج شبیه سازی

روش تخمین پیشنهاد شده در این مقاله با استفاده از نرم افزار Matlab بر روی یک موتور القایی قفس سنجایی kw ۴، ۲ قطب، ۳ فاز، ۵۰ HZ، ۳۸۰ V و ۱۵۰ rad/s با مشخصات زیر شبیه سازی شده است.

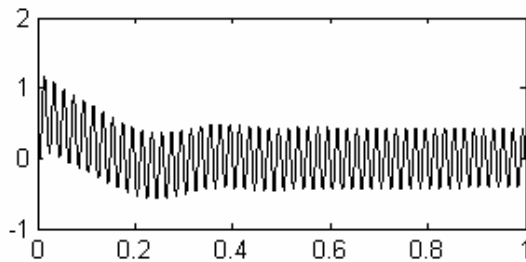
$$\begin{aligned} R_s &= 9.7\Omega & R_r &= 8.6\Omega & l_s &= l_r = 0.67H \\ M &= 0.64H & \sigma &= 0.0875 \\ j &= 0.011 \frac{kg}{m^2} & T_l &= 3.7 \frac{N}{m} \end{aligned}$$

برای انجام شبیه سازی فرض میشود که جریانها و ولتاژهای استاتور اندازه گیری می شود. که شکل موج جریانهای اندازه گیری شده استاتور در شکل‌های (۱) و (۲) رسم شده است. بعد از اعمال EKF جریانهای استاتور، فیلتر می شود که در شکل (۳) و (۴) آمده است. با مقایسه شکل‌های (۱) تا (۴) به این نتیجه می رسیم که اعمال روش ارائه شده در مقاله

جدول ۱: مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی

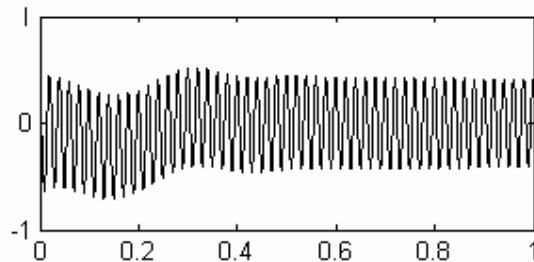
روش	سرعت rad/s	مقاومت (اهم)
EKF	۱۴۷	۸.۵
داده آزمایشگاهی	۱۵۰	۸.۶
درصد خطای تخمین	۲٪	۲.۳٪

φ_{rx}



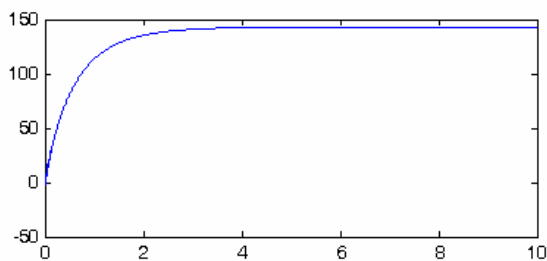
شکل ۵: شکل موج تخمین زده شده φ_{rx}

φ_{ry}



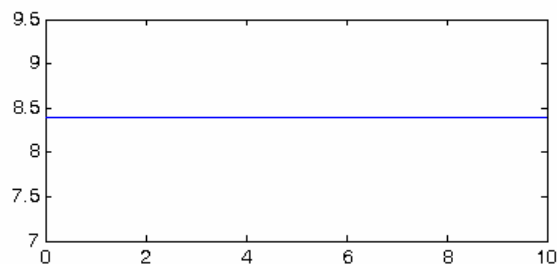
شکل ۶: شکل موج تخمین زده شده φ_{ry}

ω

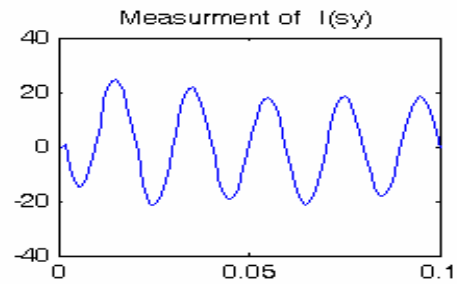


شکل ۷: مقدار تخمین زده شده ω

R_r

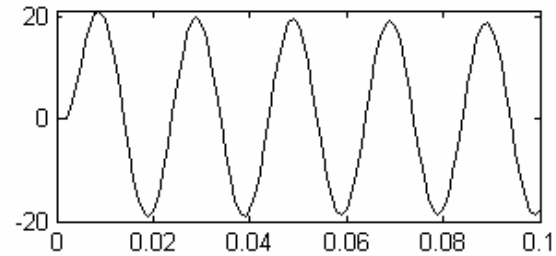


شکل ۸: مقدار تخمین زده شده R_r



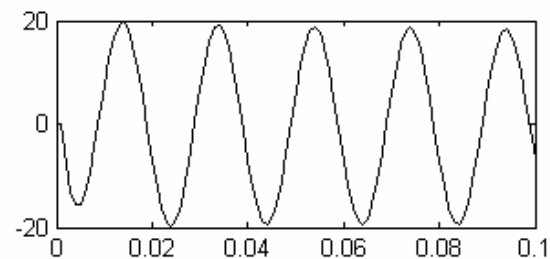
شکل ۲: شکل موج جریان اندازه گیری شده I_{sy}

I_{sx}



شکل ۳: شکل موج جریان فیلتر شده I_{sx}

I_{sy}



شکل ۴: شکل موج جریان فیلتر شده I_{sy}

در شکل (۷) تخمین سرعت روتور آمده است که نشان دهنده تخمینی دقیق و تقریباً بدون خطا از سرعت میباشد. در شکل (۸) تخمین مقاومت روتور آورده شده است که بیانگر یک تخمین دقیق و تقریباً معادل با مقدار نامی آن میباشد که در صورت بروز خطای شکستگی میله این نمودار تغییر میکند. که از روی افزایش مقدار آن میتوان بروز خطای شکستگی میله را تشخیص داد. این مساله با توجه به روابط ذکر شده در قسمت ۴ بوضوح روشن است. یعنی روش ذکر شده قادر است در شرایط مختلف عمل تخمین را انجام دهد. در جدول (۱) نتایج حاصل از شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی مقایسه شده است. در تمامی نمودارها واحد زمان ثانیه میباشد.

۶- نتیجه گیری

موتورهای القایی بخصوص موتورهای قفس سنجابی نقشی مهم و کلیدی در صنعت دارند. در این مقاله روشی جدید جهت تخمین پارامترهای موتور القایی ارائه شد که این پارامترها نقشی اساسی در تشخیص بلادرنگ بروز خطا در موتور و تنظیم اتوماتیک کنترل کننده ها دارند. روش ارائه شده با استفاده از EKF، شارها، سرعت و مقاومت روتور را به صورت بلادرنگ و بدون استفاده از حسگر سرعت تخمین می زند. لذا دیگر نیازی به استفاده از سنسور سرعت نیست و باعث صرفه جویی اقتصادی و حل محدودیتهای اجرایی استفاده از این سنسور می شود. همچنین با توجه به تخمین بلادرنگ مقاومت میتوان بروز خطای شکستگی میله روتور را قبل از گسترش آن و ایجاد مشکلات اساسی در سیستم، تشخیص داد. نتایج شبیه سازیهای انجام شده بر روی موتور القایی قفس سنجابی ۴ kw و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی نشان میدهد که روش ارائه شده ابزار قدرتمندی جهت تخمین پارامترهای ماشین القایی و تایید کننده موارد فوق میباشد.

۷- مراجع

- [۱] K. L. Shi, Y. K. Wong and S. L. Ho, "Speed Estimation of an Induction Motor Drive Using an Optimized Extended Kalman Filter," IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. ۴۹, No. ۱, PP. ۱۲۴-۱۳۳, February ۲۰۰۲.
- [۲] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong and S. L. Ho, "Speed Estimation of an Induction Motor Drive Using Extended Kalman Filter," IEEE Conference, Industry Application, PP. ۲۴۳-۲۴۸, ۲۰۰۰.
- [۳] L. Salvatore, S. Stasi, F. Cupertio, "Improved Rotor Speed Estimation Using Two Kalman Filter-Based Algorithms," IEEE Conference, Industry Application, vol. ۱, PP. ۱۲۵-۱۳۲, ۲۰۰۱.
- [۴] J. Stefan and M. Bodson, "Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors," IEEE Conference, PP. ۵۷۸-۵۸۵, ۱۹۹۲.
- [۵] L. Liron and G. Laliberte, "Application of the Extended Kalman Filter to Parameters Estimation of Induction Motors," EPE Conference, Power Electronics, PP. ۸۵-۹۰, ۱۹۹۳.
- [۶] J. K. Altayie, P.P. Acarnely, "Estimation of Speed, Stator Temperature and Rotor Temperature in Cage Induction Motor Drive Using the Extended Kalman Filter Algorithm," IEE Proceedings Online, ۱۹۹۷
- [۷] G. Bucci, C. Cecati, C. Landi, "Special Measurement System for on-line Fault Diagnosis of Induction Motors," IEEE Conference, ۱۹۹۴