DSP-Based Sensorless Vector Control Sterategy Of PM Synchronous Motors Using Parallel Reduced-Order Kalman Filter

Hossein Shabanloo[*,1], **AmirHossein Abolmasoumi**[2], **AliAsghar Ghadimi**[3], **Mazdak Ebadi**[4]

[1] MSc Student of Arak University
Email: h.shabanloo@hotmail.com
[2] Assistant Professor of Arak University
Email: a-abolmasoumi@araku.ac.ir
[3] MSc Student of Arak University
Email: aa-ghadimi@araku.ac.ir
[4] Assistant Professor of Arak University
Email: m-ebadi@araku.ac.ir.

Abstract

this article present to the implementation of a sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) with surface magnet. Using Kalman Filter algorithm, the position and the rotor angular velocity have been estimated for the accurate performance of vector control method. With the abundance of Kalman Filter algorithms, Parallel Reduced-Order Kalman Filter of algorithm method which benefits high efficiency and less time in estimation process was selected as an algorithm for the estimation of the position and angular velocity in speed control of permanent magnet synchronous motor. The proposed method can be used in types permanent magnet synchronous motors. The experimental implementation of Kalman Filter algorithm requires a permanent magnet synchronous motor, PWM voltage source inverter and digital signal processor board. Simulink/MATLAB software has been used for ensuring performance results of Parallel Reduced-Order Kalman Filter and programming directly TMS320F2812 processor.

Keywords: Digital Signal Processor, Kalman Filter, Observer, Simulink/MATLAB Software, PMSM, Speed Control,Vector Control.

سومین کنفرانس بین المللی
دبی
۱۹-۱۸ آذرماه ۱۳۹۴
رویکرد های نوین در علوم، مهندسی و تکنولوژی
2015

استراتژی کنترل برداری بدون سنسور موتورهای سنکرون مغناطیس دائم بر اساس DSP با استفاده از فیلتر کالمن کاهش مرتبه موازی

حسین شعبانلو*[1]، امیرحسین ابوالمعصومی[2]، علی‌اصغر قدیمی[3]، مزدک عبادی[4]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه اراک. پست الکترونیکی: h.shabanloo@hotmail.com
[2]هیأت علمی دانشگاه اراک. پست الکترونیکی: a-abolmasoumi@araku.ac.ir
[2]هیأت علمی دانشگاه اراک. پست الکترونیکی: aaghadimi@araku.ac.ir
[2]هیأت علمی دانشگاه اراک. پست الکترونیکی: m-ebadi@araku.ac.ir

چکیده

این مقاله در خصوص پیاده‌سازی کنترل بدون سنسور یک موتور سنکرون مغناطیس دائم، با مغناطیس داخلی ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم مشاهده‌گر فیلترکالمن، موقعیت و سرعت زاویه‌ای روتور جهت عملکرد دقیق روش کنترل برداری، تخمین زده شده‌اند. با فراوانی الگوریتم‌های مشاهده‌گر فیلترکالمن، روش الگوریتم فیلتر کالمن کاهش مرتبه یافته موازی که از بازده بالای بالا و زمان کمتری در پروسه‌ی تخمین برخوردار می‌باشد، به منظور الگوریتمی جهت تخمین موقعیت و سرعت زاویه‌ای در پروسه‌ی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم انتخاب شده است. پیاده‌سازی آزمایشگاهی الگوریتم فیلترکالمن، نیازمند یک موتور سنکرون مغناطیس دائم، اینور ***PWM*** منبع ولتاژ و برد پردازنده سیگنال دیجیتال می‌باشد. به منظور اطمینان از نتایج عملکرد فیلتر کالمن و برنامه‌ریزی پردازنده‌ی ***TMS320F2812***، از نرم‌افزار ***Simulink/MATLAB*** استفاده شده است.

کلمات کلیدی: پردازنده سیگنال دیجیتال، فیلتر کالمن، مشاهده‌گر، نرم‌افزار Simulink/MATLAB، موتورسنکرون مغناطیس دائم، کنترل سرعت، کنترل برداری.

1- مقدمه:

در سال‌های اخیر، به کارگیری از موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به صورت گسترده در صنایع مختلفی از قبیل صنعت برق، گاز، نظامی، حمل‌ونقل و ... افزایش یافته است. کیفیت بالا، توان بالا، استحکام بالا، اینرسی کم و بالا بودن گشتاور به جریان از جمله ویژگی‌های مهم در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم می‌باشند. همچنین از سویی، کشف مواد مغناطیسی جدید با انرژی و مقاومت بالا در برابر خاصیت مغناطیس‌زدایی، موجب شده تا در طراحی و ساخت موتورهای سنکرون مغناطیس دائم توسعه‌ی چشمگیری به وقوع بپیوندد (Alahakoon, 2000).

روش کنترل برداری جهت کنترل سرعت و یا موقعیت انواع موتورهای الکتریکی، یکی از روش‌های کنترلی پربازده‌ی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به شمار می‌رود که دانستن سرعت و موقعیت روتور از الزامات روش کنترل برداری می‌باشد. در برخی از کابردهای موتور سنکرون مغناطیس دائم، با استفاده از انکودرها موقعیت و سرعت زاویه‌ای روتور می‌شود. استفاده از انکودرها باعث افزایش حجم و هزینه‌ی پروسه‌ی کنترلی شده و از سویی قابلیت اطمینان سیستم را پایین می‌آورد. از اینرو، مشاهده‌گرهای متفاوتی از جمله مشاهده‌گر مد لغزشی (Zhaowei et al., 2013)، مشاهده‌گر لیونبرگر (Jianwen, Nolan, & Hopkins, 2002)، مشاهده‌گر فیلتر کالمن (Aydogmus & Sünter, 2012; Bolognani, Tubiana, & Zigliotto, 2002, 2003; Dong-Hoon, Byoung-Gun, & Dong-seok, 2010; Huang, Moses, Anayi, & Yao, 2006; Jin-Su, Byoung-Gun, Tae-Sung, Dong Myung, & Dong-seok, 2008; Karimi, Zamani, Abbaszadeh, & Hemmati, 2011; Nguyen Khanh, Nguyen Trung, & Ha, 2014; Nguyen Khanh, Nguyen Trung, Hunter, & Ha, 2012)، مشاهده‌گر سیستم تطبیقی مدل مرجع (Kuang-Yao & Ying-Yu, 2003) و ... جهت تخمین موقعیت و سرعت زاویه‌ای به کار گرفته می‌شوند.

در این بین مشاهده‌گر فیلترکالمن، از قابلیت غیرخطی و برگشتی برخوردار بوده که بر اساس نویز سیستم، پارامترهای مورد نظر را تخمین می‌زند و از بازده‌ی بالا در شبیه‌سازی و پیاده‌سازی برخوردار می‌باشد. بدین منظور در (Aydogmus & Sünter, 2012) یک فیلتر کالمن توسعه یافته با استفاده از مبدّل ماتریسی در موتور سنکرون مغناطیس دائم پیاده-سازی شده است. در (Bolognani et al., 2003) الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته جهت عملکرد بهینه‌ی کنترل برداری موتور سنکرون مغناطیس دائم، در شبیه‌سازی بهبود بخشیده شده است. در (Huang et al., 2006) فیلترکالمن خطی با استفاده از خروجی متعامد مدل خطی موتور سنکرون مغناطیس دائم، به طراحی و پیاده‌سازی تخمینگر پرداخته است. همچنین در مراجع (Dong-Hoon et al., 2010; Jin-Su et al., 2008) روش فیلترکالمن کاهش مرتبه موازی توسط پردازنده‌ی دیجیتال سیگنال (DSP)، برنامه‌نویسی پیاده‌سازی شده است. علاوه بر این، در مراجع (Nguyen Khanh et al., 2014; Nguyen Khanh et al., 2012) فیلتر کالمن کاهش مرتبه توسط برد فیلد آرایه‌ی گیت برنامه‌ریز (FPGA)، برنامه‌نویسی و موقعیت و سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم تخمین زده می‌شوند.

در این مقاله، الگوریتم فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته جهت تخمین موقعیت و سرعت زاویه‌ای موتور سنکرون مغناطیس دائم ارائه شده است. فیلترکالمن ارائه شده در سرعت‌های پایین از بازده‌ی بالایی در پروسه‌ی تخمین برخوردار بوده که بر اساس ساختار مطرح شده در این مقاله می‌توان در انواع موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، اعم از مغناطیس سطحی و داخلی به‌کار برد. عملکرد مطلوب و نتایج حاصل از فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی در موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی، حاکی از صحت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی می‌باشد. در اجرای آزمایشگاهی الگوریتم فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی، برد DSP-TMS320F2812 که نسبت به برد FPGAها از سرعت بالایی برخوردار می‌باشد، استفاده

شده است. همچنین در این مقاله به منظور اطمینان از عملکرد فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی و برنامه‌ریزی پردازنده‌ی TMS320F2812، از محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است.

2- مدل ریاضی موتورهای سنکرون مغناطیس دائم:

معادلات ولتاژ موتورهای سنکرون مغنطیس دائم، در قاب مرجع گردان به صورت رابطه‌ی (1) تعریف می‌شود:

$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + sL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & r_s + sL_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \left\{ (L_d - L_q)(\omega_e i_d - i_q) + \omega_e \lambda_f \right\} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

معادله‌ی دینامیکی موتورهای سنکرون مغنطیس دائم به منظور محاسبه‌ی سرعت روتور به فرم رابطه‌های (2) و (3) تعریف می‌شود:

$$s\omega_e = \frac{1}{j}\left[n_p T_e - n_p T_l - B\omega_e \right] \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 n_p \left(\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \right) \quad (3)$$

در روابط فوق، i_q, i_d و v_q, v_d به ترتیب جریان و ولتاژهای محورهای d و q در قاب مرجع گردان، S عملگر مشتق، ω_e سرعت چرخش روتور، θ_e موقعیت زاویه‌ای روتور، L_q, L_d به ترتیب اندوکتانس محورهای d و q، λ_f شارپیوند مغناطیس دائم و r_s مقاوت استاتور، B ضریب استحکاک، j ممان اینرسی، n_p تعداد جفت قطب، T_l گشتاور بار و T_e گشتاور الکترومغناطیسی در معادلات موتورهای سنکرون مغنطیس دائم به شمار می‌روند.

به منظور پیاده‌سازی تئوری‌های تخمین سرعت و موقعیت روتور در موتورهای سنکرون مغنطیس دائم، نیاز به معادلات ولتاژ قاب مرجع ساکن می‌باشد که با اعمال تبدیل معکوس پارک در رابطه‌ی (1)، می‌توان معادلات ولتاژ در قاب مرجع ساکن را مطابق رابطه‌ی (4) بدست آورد:

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_s + sL_d & \omega_e (L_d - L_q) \\ -\omega_e (L_d - L_q) & r_s + sL_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} + \left\{ (L_d - L_q)(\omega_e i_d - i_q) + \omega_e \lambda_f \right\} \begin{pmatrix} -Sin\theta_e \\ Cos\theta_e \end{pmatrix} \quad (4)$$

که i_α, i_β و v_α, v_β به ترتیب جریان و ولتاژهای محوهای α و β در قاب مرجع ساکن می‌باشند.

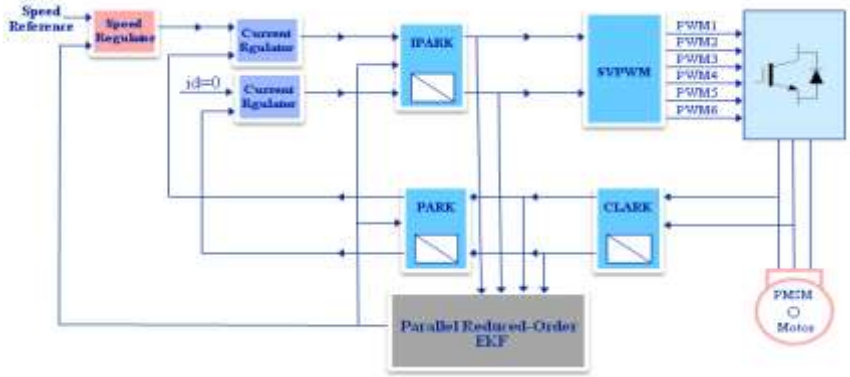
در روابط فوق اگر $L_q = L_d$ برقرار باشد موتور از نوع مغناطیس سطحی و اگر $L_q > L_d$ برقرار باشد، موتور از نوع مغناطیس داخلی می‌باشد که در این مقاله یک موتور سنکرون مغنطیس دائم با مغناطیس سطحی جهت انجام آزمایشات در نظر گرفته شده است.

3- استراتژی کنترل برداری توسط الگوریتم فیلترکالمن:

3-1- کنترل برداری موتور سنکرون مغناطیس دائم:

بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری بدون سنسور موتور سنکرون مغنطیس دائم در شکل (1) نشان داده شده است. در شکل (1) مشاهده می‌شود جهت تامین ولتاژ و جریان موتور سنکرون مغنطیس دائم بر اساس مدولاسیون بردار فضایی، ولتاژ و جریان‌های موتور سنکرون مغنطیس دائم با استفاده از تبدیلات پارک و کلارک به ترتیب به قاب مرجع ساکن و گردان انتقال داده می‌شوند. همچنین از ولتاژ و جریان‌های قاب مرجع ساکن، جهت انجام محاسبات پروسه‌ی تخمین

موقعیت و سرعت استفاده می‌شود. تخمین سرعت به دلیل اجرای پروسه‌ی کنترل سرعت، و همچنین تخمین موقعیت به دلیل نیازمندی تبدیلات پارک و پارک‌معکوس، در روش کنترل برداری الزامی می‌باشند. کنترل سرعت توسط انواع کنترلرهای خطی و یا غیرخطی پیاده‌سازی می‌شود؛ در حالی که کنترلرهای PI اغلب به دلیل سادگی به عنوان کنترلرهای جریان انتخاب می‌شوند تا ولتاژهای قاب مرجع گردان بدست آیند و با تبدیل پارک‌معکوس بر این ولتاژها، ولتاژهای قاب مرجع ساکن که نیازمند عملکرد مدولاسیون بردار فضایی می‌باشند فراهم شوند. از اینرو، محاسبه‌ی موقعیت و سرعت که یک اصل اساسی در روش کنترل برداری می‌باشند، با استفاده از انواع مشاهده‌گرها انجام می‌شود که مشاهده‌گر فیلترکالمن از جمله‌ی این مشاهده‌گرها به شمار می‌رود. همچنین در پروسه‌ی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم توسط تئوری کنترل برداری، به منظور دست‌یابی ماکزیمم رنج گشتاور به جریان، جریان id در مقدار مرجع صفر کنترل و تنظیم می‌شود.



شکل(1): بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری بدون سنسور موتور سنکرون مغناطیس دائم

2-3- الگوریتم فیلتر کالمن:

الگوریتم فیلترکالمن به عنوان یک مشاهده‌گر، متغییرهای حالت یک سیستم کنترل را که توسط معادلات دیفرانسیل خطی اداره می‌شوند، تخمین می‌زند. لذا به منظور اجرای الگوریتم فیلترکالمن در سیستم‌های کنترل غیرخطی که از روش‌های بهینه در تخمین متغییرهای حالت سیستم می‌باشد، معادلات باید به فرم خطی تبدیل شوند. از اینرو، به کارگیری الگوریتم فیلترکالمن با استفاده از معادلات خطی، به عنوان فیلترکالمن توسعه یافته (EKF) شناخته می‌شود.

معادلات فضای حالت یک موتور سنکرون مغنطیس دائم جهت پیاده‌سازی الگوریتم فیلترکالمن به صورت رابطه‌ی (5) در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)) + Bu(t) + \sigma(t) \\ y(t) &= h(x(t)) + \mu(t) \end{aligned} \qquad (5)$$

در معادلات فوق $u(t), x(t)$ و $y(t)$ به ترتیب متغیرهای حالت، ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم، $\sigma(t)$ و $\mu(t)$ به ترتیب بردارهای نویز سیستم و نویز اندازه‌گیری در پروسه‌ی تخمین و مستقل از متغییرهای حالت سیستم می‌باشند.

جهت اعمال الگوریتم فیلترکالمن، در معادله‌ی غیر خطی رابطه‌ی (5) نیاز به خطی‌سازی داریم که پس از اعمال خطی-سازی، معادلات به فرم رابطه‌ی (6) تغییر شکل می‌دهند:

(6)

$$\delta\dot{x}(t) = F(x(t))\delta x(t) + B\delta u(t) + \sigma(t)$$
$$\delta y(t) = H(x(t))\delta x(t) + \mu(t)$$

که $F(x(t))$ ماتریس ژاکوبین و $H(x(t))$ ماترس خروجی بوده و به صورت روابط (7) و (8) در زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$F(x(t)) = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=x(t)} \tag{7}$$

$$H(x(t)) = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x=x(t)} \tag{8}$$

گسسته‌سازی بخش اوّل رابطه‌ی (6) توسط پریود نمونه‌برداری T_c، طی روابط (9)، (10) و (11) که در زیر بیان شده انجام می‌شود:

(9)

$$x(t_n) = \Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1}))x(t_{n-1}) + \left(\int_{t_{n-1}}^{t_n} \Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1}))Bd\tau\right)u(t_{n-1}) + v(t_{n-1})$$

در رابطه‌ی (9) جهت محاسبه‌ی $\Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1}))$ که ماتریس انتقال حالت رابطه‌ی (6) به شمار می‌رود، می‌توان از تقریب اویلر جهت سادگی محاسبات استفاده کرده تا روابط (9) و (10) به فرم زیر بدست آیند(Nguyen Khanh et al., 2014):

$$\Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1})) \cong I + FT_c \tag{10}$$

(11)

$$\int_{t_{n-1}}^{t_n} \Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1}))Bd\tau \cong BT_c$$

طی گسسته‌سازی صورت گرفته، رابطه‌ی (5) با تقریب نزدیکی به فرم رابطه‌ی (12) تبدیل می‌شود:

(12)

$$x(t_n) = (I + FT_c)x(t_{n-1}) + BT_c u(t_{n-1}) + v(t_{n-1})$$
$$y(t_n) = Hx(t_n) + \xi(t_n)$$

در روابط فوق، $v(t_n)$ فرم گسسته‌ی نویز سیستم با کواریانس $Q(t_n)$ $(Q = \mathrm{cov}(\sigma))$ و $\xi(t_n)$ فرم گسسته‌ی نویز اندازه‌گیری با کواریانس $R(t_n)$ $(R = \mathrm{cov}(\mu))$ می‌باشند.

فیلترکالمن جهت تخمین متغییرهای حالت از دو مرحله‌ی پیشگویی و به‌روزرسانی استفاده می‌کند:

1 - پیشگویی:

تخمین اولیه‌ی متغییرهای حالت سیستم در این مرحله، توسط رابطه‌ی (13) صورت می‌پذیرد:

$$\hat{x}_{n|n-1} = (I + FT_c)\hat{x}_{n-1} + BT_c u_{n-1} \tag{13}$$

کواریانس خطا نیز طی رابطه‌ی (14) محاسبه می‌شود:

$$P_{n|n-1} = \Phi_{n-1}P_{n-1}\Phi_{n-1}^T + Q \tag{14}$$

2 - به‌روزرسانی:

در این مرحله، با تخمین بدست آمده در مرحله‌ی پیشگویی و با استفاده از رابطه‌ی (4)، متغییرهای حالت و کواریانس خطا طی رابطه‌های (15) و (16) توسط بهره‌ی‌کالمن به‌روزرسانی می‌شوند:

$$\hat{x}_n = \hat{x}_{n|n-1} + K_n\left(y_n - H\hat{x}_{n|n-1}\right) \tag{15}$$

$$P_n = P_{n|n-1} - K_n H P_{n|n-1} \tag{16}$$

بهره‌ی کالمن K_n در روابط (15) و (16)، طی رابطه‌ی (17) محاسبه می‌شود:

$$K_n = P_{n|n-1}H^T\left(HP_{n|n-1}H^T + R\right)^{-1} \tag{17}$$

در فیلترکالمن توسعه یافته، خطی‌سازی معادلات حالت سیستم، ممکن است به واگرایی الگوریتم فیلترکالمن سرعت ببخشد که تحقق این امر، پیچیدگی سیستم و به سبب آن افزایش محاسبات را در پی دارد. جهت رفع مشکل فوق تعداد عملگرها کاهش داده می‌شوند که برای رسیدن بدین هدف می‌توان از مشاهده‌گر کالمن دو مرحله‌ای استفاده کرد (Hilairet, Auger, & Berthelot, 2009). برای این منظور در (Nguyen Khanh et al., 2012)، با کاهش مرتبه‌ی سیستم و یا به عبارتی با کاهش تعداد متغییرهای حالت سیستم، از دو فیلترکالمن موازی جهت تخمین استفاده شده که با این کار سبب افزایش سرعت تخمین نیز شده است.

4- فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم:

به دلیل وابستگی بین سرعت و موقعیت موتور سنکرون مغنطیس دائم با نیرومحرکه‌های الکتریکی، از رابطه‌ی (4) که معادلات ولتاژ موتور، در قاب مرجع ساکن بوده و دارای مولفه‌های نیرومحرکه‌ی الکتریکی می‌باشد به منظور پیاده‌سازی الگوریتم فیلترکالمن استفاده می‌شود. از اینرو، معادلات نیرومحرکه‌های الکتریکی بر اساس رابطه‌ی (4)، به فرم رابطه‌ی (18) در زیر استخراج می‌شوند:

$$e = \begin{pmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} \overset{\Delta}{=} \omega_e \lambda_f \begin{pmatrix} -Sin\,\theta_e \\ Cos\,\theta_e \end{pmatrix} \tag{18}$$

وابستگی بین سرعت و موقعیت با نیرومحرکه‌های الکتریکی، به فرم روابط (19) و (20) ارائه می‌شوند (Dong-Hoon et al., 2010):

$$Tan\theta = \frac{\lambda_f \omega_e Sin\theta}{\lambda_f \omega_e Cos\theta} = \frac{-e_\alpha}{e_\beta} \Rightarrow \theta = Tan^{-1}\left(\frac{-e_\alpha}{e_\beta}\right) \tag{19}$$

$$\omega = \frac{1}{\lambda_f}\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tag{20}$$

بر اساس راوبط (19) و (20) که می‌توان موقعیت و سرعت زاویه‌ای را با استفاده از نیرومحرکه‌های الکتریکی محاسبه نمود، سعی داریم تا در ابتدا با کمک الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته موازی، هر دو مولفه‌ی نیرو محرکه‌ی الکتریکی را تخمین زده و سپس با استفاده از راوبط (19) و (20) به ترتیب موقعیت و سرعت زاویه‌ای را محاسبه نماییم؛

از اینرو، معادلات فضای حالت یک موتور سنکرون مغنطیس دائم در الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته موازی جهت تخمین به صورت رابطه‌ی (20) ارائه می‌شود:

(21)

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{-\omega_e(L_d-L_q)}{L_d} & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ \frac{\omega_e(L_d-L_q)}{L_d} & \frac{-r_s}{L_d} & 0 & \frac{-1}{L_d} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & 0 & \omega_e & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} + (L_d-L_q)(\omega_e \dot{i}_d - \ddot{i}_q)\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -Sin\theta_e \\ Cos\theta_e \end{pmatrix}$$

جهت کاهش حجم معادلات، رابطه‌ی فوق را به صورت رابطه‌ی (22) باز نویسی می‌کنیم:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & 0 & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{-r_s}{L_d} & 0 & \frac{-1}{L_d} \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & 0 & \omega_e & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{pmatrix} + (L_d-L_q)(\omega_e \dot{i}_d - \ddot{i}_q)\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -Sin\theta_e \\ Cos\theta_e \end{pmatrix} \quad (22)$$

در رابطه‌ی (22)، v'_α و v'_β به منظور کاهش حجم معادلات به فرم رابطه‌ی (23) در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} v'_\alpha &= v_\alpha - \omega_e(L_d-L_q)i_\beta \\ v'_\beta &= v_\beta + \omega_e(L_d-L_q)i_\alpha \end{aligned} \quad (23)$$

جهت کاهش حجم معادلات رابطه‌ی (22) و افزایش سرعت تخمین و پیاده‌سازی الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته موازی در معادلات موتور سنکرون مغنطیس دائم، می‌توان معادلات جریان‌های i_α و i_β را از هم جدا در نظر گرفت که در آن صورت، روابط (24) و (25) در زیر جهت انجام محاسبات تخمین در نظر گرفته می‌شوند(Nguyen Khanh et al., 2012):

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & \omega_e & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_\alpha \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{pmatrix} + (L_d-L_q)(\omega_e \dot{i}_d - \ddot{i}_q)\begin{pmatrix} 0 \\ -Sin\theta_e \\ Cos\theta_e \end{pmatrix} + v'_\alpha \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_\beta \\ e_\beta \\ e_\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_e \\ 0 & -\omega_e & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_\beta \\ e_\beta \\ e_\alpha \end{pmatrix} + (L_d-L_q)(\omega_e \dot{i}_d - \ddot{i}_q)\begin{pmatrix} 0 \\ Cos\theta_e \\ -Sin\theta_e \end{pmatrix} + v'_\beta \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

مدل دینامیکی روابط (24) و (25) جهت پیاده‌سازی الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته موازی، به فرم رابطه‌ی (26) در نظر گرفته می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + W \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \tag{26}$$

در رابطه‌ی (26)، بردار متغییرهای حالت سیستم به فرم‌های $x(t)=[i_\alpha, e_\alpha, e_\beta]^T$ و یا $x(t)=[i_\beta, e_\beta, e_\alpha]^T$ بوده و بردار ورودی‌های سیستم برابر $u(t)=[v'_\alpha]$ و یا $u(t)=[v'_\beta]$ در نظر گرفته می‌شوند. بردار خروجی برابر i_α و یا i_β بوده و W به عنوان خطای مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شود که قادر به نمایش خطی در معادلات نمی‌باشد؛ ماتریس‌های A ، B، C و رابطه‌ی غیرخطی W، طی رابطه‌ی (27) بدست می‌آیند:

(27)

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \mp\omega_e \\ 0 & \pm\omega_e & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$W = (L_d - L_q)(\omega_e \dot{i}_d - \ddot{i}_q) \begin{pmatrix} 0 \\ -Sin\theta_e \\ Cos\theta_e \end{pmatrix}$$

با دست یافتن به پارامترهای رابطه‌ی (27) که از الزامات اجرای الگوریتم فیلتر کالمن به شمار می‌روند، بر اساس روابط (7)، (8) و (9) به ترتیب به محاسبه‌ی ماتریس ژاکوبین، ماتریس خروجی و ماتریس انتقال حالت نیازمندیم که برای یک موتور سنکرون مغنطیس دائم پارامترهای ذکر شده طی رابطه‌های (28)، (29) و (30) بدست می‌آیند:

(28)

$$F = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x=x(t)} = A = \begin{pmatrix} \frac{-r_s}{L_d} & \frac{-1}{L_d} & 0 \\ 0 & 0 & \mp\omega \\ 0 & \pm\omega & 0 \end{pmatrix}$$

$$H = \left.\frac{\partial h}{\partial x}\right|_{x=x(t)} = C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{29}$$

$$\Phi(t_n, t_{n-1}, x(t_{n-1})) \cong I + FT_c = \begin{pmatrix} 1 - \frac{r_s T_c}{L_d} & \frac{-T_c}{L_d} & 0 \\ 0 & 1 & \mp\omega T_c \\ 0 & \pm\omega T_c & 1 \end{pmatrix} \tag{30}$$

بر اساس معادلات الگوریتم فیلترکالمن توسعه یافته موازی ارائه شده جهت تخمین سرعت و موقعیت موتور سنکرون مغناطیس دائم، مشاهده می‌شود که مقادیر e_α و e_β در هر مرحله محاسبه و به‌روزرسانی می‌شوند که تحقق این امر در

خصوص جریان‌های i_α و i_β نیز واقع است؛ با این تفاوت که در هر مرحله‌ی محاسباتی به دلیل جداسازی جریان‌ها تنها یکی از جریان‌ها محاسبه و به‌روزرسانی می‌شود.

با تخمین متغییرهای حالت مورد نظر در موتور سنکرون مغناطیس دائم، سرعت و موقعیت موتور طی روابط (30) و (32) محاسبه می‌شوند:

$$\hat{\theta}(n) = Tan^{-1}\left(\frac{-\hat{e}_\alpha(n)}{\hat{e}_\beta(n)}\right) \tag{31}$$

$$\hat{\omega}(n) = {}^{1}\!/_{\lambda_f}\sqrt{\hat{e}_\alpha^2(n)+\hat{e}_\beta^2(n)} \tag{32}$$

5- پیاده‌سازی سیستم آزمایشگاهی و نتایج شبیه‌سازی:

در این مقاله، استراتژی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم به روش کنترل برداری بر اساس مدولاسیون بردار فضایی در محیط Simulink نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی شده است. فرکانس کلیدزنی مدولاسیون در 10 کیلوهرتز و زمان مرده در یک میکروثانیه تنظیم شده‌اند. الگوریتم فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی جهت پیاده‌سازی، توسط بلوک S-Function به زبان C مدل‌سازی شده تا بر اساس برنامه‌نویسی بلوک مربوطه قادر به تولید کدهای پردازنده‌ی TMS320F2812 توسط نرم‌افزار MATLAB باشیم.

لذا با لینک شدن نرم‌افزارهای MATLAB و Code Composer Studio v3.3، کدهای پروسه‌ی کنترل سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم مبتنی بر الگوریتم فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی به زبان C تولید و در پردازنده بارگذاری می‌شوند. مقادیر پارامترهای Kp و Ki در کنترلر سرعت در مقادیر Kp=*، Ki=* و در کنترلرهای جریان در مقادیر Kp=*، Ki=* به روش سعی و خطا تنظیم شده‌اند. پارامترهای موتور سنکرون مغناطیس دائم در جدول (1) مشاهده می‌شوند.

جدول (1): مشخصات موتور سنکرون مغناطیس دائم

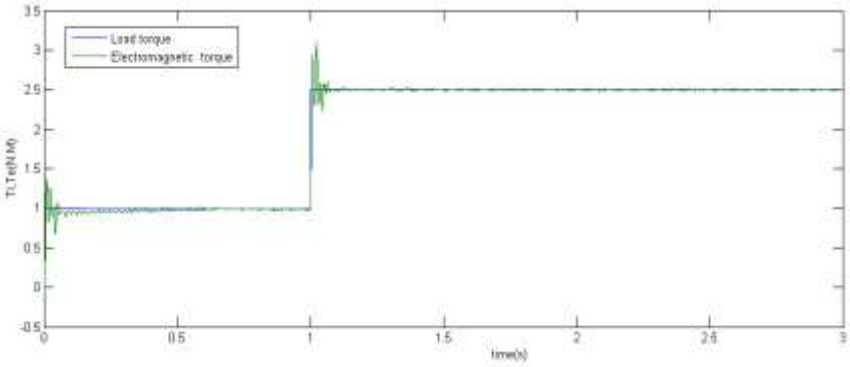
پارامتر	مقدار
توان	1(kw)
سرعت	1000(rpm)
جریان	15(A)
گشتاور	9.5 (N.M)
اینرسی روتور	12 ($kg.cm^2$)
اندوکتانس	0.01821(H)
تعداد قطب	4
شار پیوند	0.4 (wb)
مقاومت استاتور	2.7(Ω)

همچنین در اینورتر طراحی شده از 6 کلید IGBT با جریان نامی 50 آمپر و ولتاژ نامی 600 ولت، و در مدار گیت درایو از تراشه 6N137 به منظور ایزولاسیون و از IR2132 به جهت منبع تغذیه‌ی سوئیچینگ استفاده شده است.

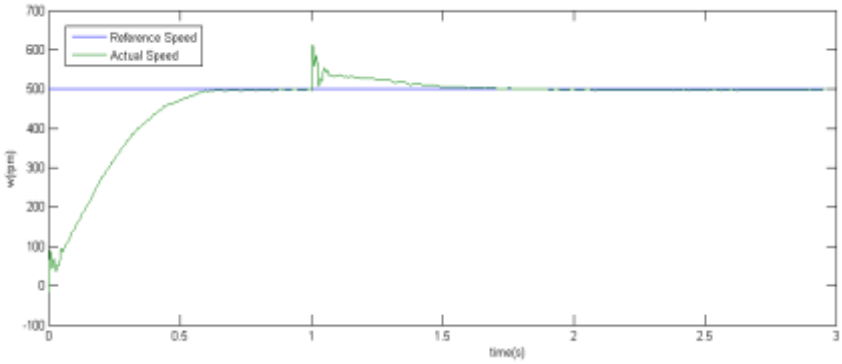
به منظور تست اولیه در سرعت مرجع 500 دوربردقیقه، تغییر گشتاور بار از یک نیوتون.متر به 2.5 نیوتون.متر در زمان یک ثانیه در نظر گرفته شده است. شکل (2)، شکل (3) و شکل (4) به ترتیب منحنی تغییرات گشتاور بار و الکترومغناطیسی، منحنی سرعت واقعی و مرجع و منحنی جریان‌های سه‌فاز موتور سنکرون مغناطیس دائم، در اثر تغییر گشتاور بار را نشان می‌دهند.

به منظور بررسی عملکرد فیلترکالمن ارائه شده، سرعت مرجع که در ابتدا از 100 دوربردقیقه برخوردار می‌باشد در زمان‌های یک، دو و چهارثانیه به ترتیب از مقادیر 200 و 400 و 800 دوربردقیقه برخوردار گشته است. در شکل (6) و شکل (7) به ترتیب منحنی جریان‌های سه‌فاز abc و محورهای dq در موتور دیده می‌شود که متناسب با تغییرات سرعت مرجع از تغییرات به سزایی برخوردار می‌باشند. علاوه بر اینها در شکل (8) منحنی موقعیت روتور در حالت واقعی و تخمین زده شده توسط فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته به نمایش گذاشته شده است.

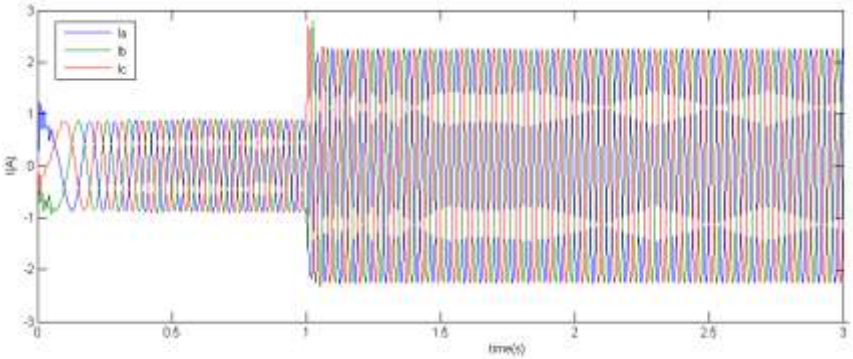
در شکل (9) Set up آزمایشگاهی طراحی شده جهت پیاده‌سازی دیده می‌شود.



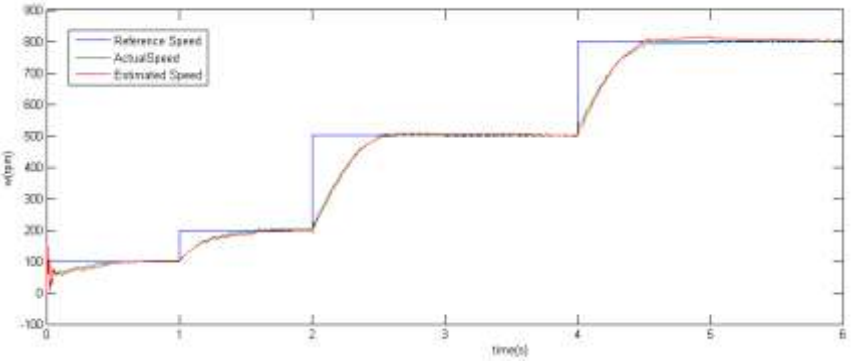
شکل(2):منحنی تغییرات گشتاور بار و گشتاور الکترومغناطیسی



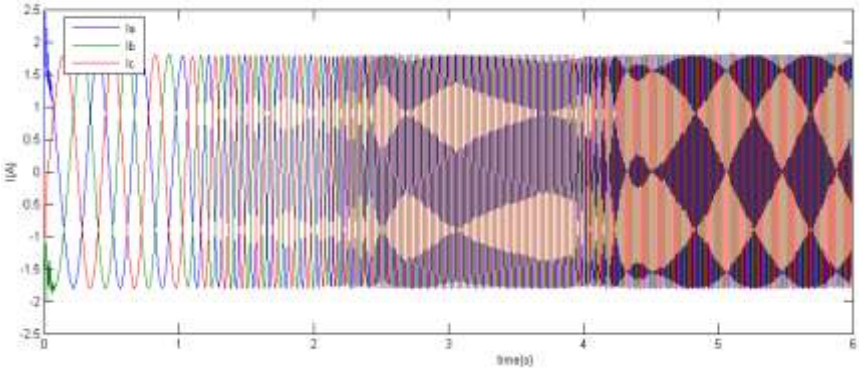
شکل(3):منحنی سرعت‌ها مرجع و واقعی در اثر تغییر گشتاور بار



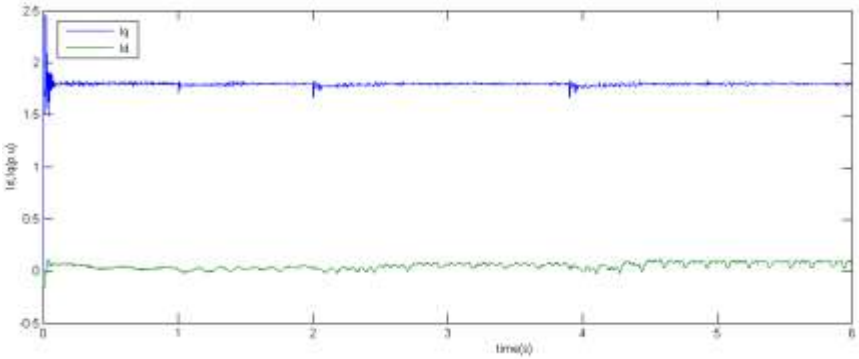
شکل(4):منحنی جریان‌های سه‌فاز a، b و c در اثر تغییر گشتاور بار



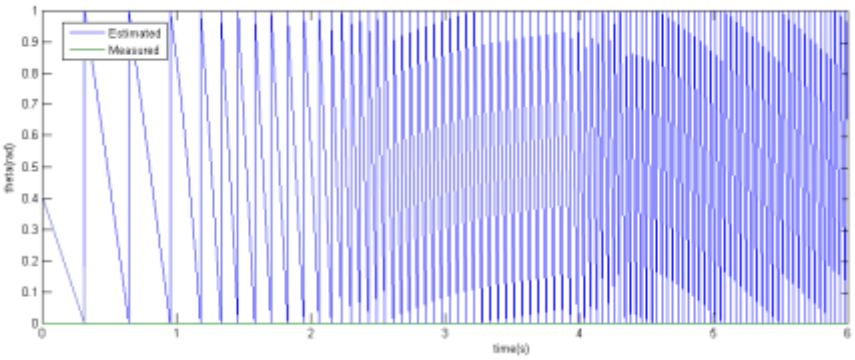
شکل(5): منحنی تغییرات سرعت‌های مرجع، واقعی و تخمین



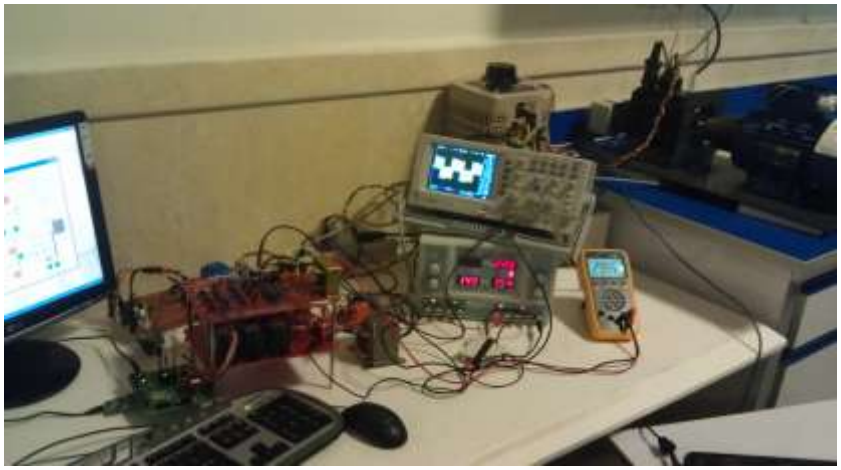
شکل(6): منحنی جریان‌های سه‌فاز a، b و c در اثر تغییرات سرعت مرجع



شکل(7): منحنی جریان محورهای d و q در اثر تغییرات سرعت مرجع



شکل(8): منحنی موقعیت واقعی و تخمین در اثر تغییرات سرعت مرجع



شکل(9): تست Set up آزمایشگاه طراحی شده

6- نتیجه‌گیری:

این مقاله در خصوص کنترل سرعت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم به روش کنترل برداری با استفاده از مشاهده‌گر فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی ارائه شد. مدولاسیون بردار فضایی در روش کنترل برداری به عنوان شیوه‌ی کلیدزنی در نظر گرفته شده است. جهت پیاده‌سازی و برنامه‌ریزی پردازنده‌ی TMS320F2812 از محیط Simulink نرم-افزار MATLAB استفاده شده است. نتایج ارائه شده در خصوص تخمین موقعیت و سرعت موتور سنکرون مغناطیس دائم سطحی توسط الگوریتم فیلترکالمن کاهش مرتبه یافته موازی حاکی از دقت بالا می‌باشد. بر اساس روش ارائه شده، پارامترهای تخمین زده شده را می‌توان در موتور سنکرون مغناطیس دائم داخلی نیز پیاده‌سازی کرد.

7- تشکر و قدردانی

از آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی دانشگاه اراک، زمینه‌ساز بستر مناسب انجام آزمایشات و راهنمایی‌های بی‌چشم‌داشت جناب آقای دکتر امیر حیدری مدیر تولید و فنی شرکت سپید گچ، تشکر و قدردانی می‌گردد.

8- فهرست منابع

Alahakoon, S. (2000). Digital Motion Control Techniques for Electrical Drives. kungliga tekniska hogskolan .

Aydogmus, O., & Sünter, S. (2012). Implementation of EKF based sensorless drive system using vector controlled PMSM fed by a matrix converter. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 43(1), 736-743. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.062

Bolognani, S., Tubiana, L., & Zigliotto, M. (2002, 2002). Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives. Paper presented at the Power Conversion Conference, 2002. PCC-Osaka 2002. Proceedings of the.

Bolognani, S., Tubiana, L., & Zigliotto, M. (2003). Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives. Industry Applications, IEEE Transactions on, 39(6), 1741-1747. doi: 10.1109/TIA.2003.818991

Dong-Hoon, Y., Byoung-Gun, P., & Dong-seok, H. (2010, 7-10 Nov. 2010). Sensorless control strategy of IPMSM based on a parallel reduced-order EKF. Paper presented at the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society.

Hilairet, M., Auger, F., & Berthelot, E. (2009). Speed and rotor flux estimation of induction machines using a two-stage extended Kalman filter. Automatica, 45(8), 1819-1827. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2009.04.005

Huang ,M. C., Moses, A. J., Anayi, F., & Yao, X. G. (2006, 23-26 May 2006). Linear Kalman filter (LKF) sensorless control for permanent magnet synchronous motor based on orthogonal output linear model. Paper presented at the Power Electronics, Electrical Drives ,Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on.

Jianwen, S., Nolan, D., & Hopkins, T. (2002, 2002). A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives. Paper presented at the Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE.

Jin-Su, J., Byoung-Gun, P., Tae-Sung, K., Dong Myung, L., & Dong-seok, H. (2008, 10-13 Nov. 2008). Parallel reduced-order Extended Kalman Filter for PMSM sensorless drives. Paper presented at the Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE.

Karimi, M. H., Zamani, H., Abbaszadeh, K., & Hemmati, S. (2011, 11-13 May 2011). DSP-based optimal sensor-less vector control drive for axial-flux PM motor. Paper presented

at the Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on.

Kuang-Yao, C., & Ying-Yu, T. (2003). Design of a sensorless commutation IC for BLDC motors. Power Electronics, IEEE Transactions on, 18(6), 1365-1375 .doi: 10.1109/TPEL.2003.818867

Nguyen Khanh, Q., Nguyen Trung, H., & Ha, Q. P. (2014). FPGA-Based Sensorless PMSM Speed Control Using Reduced-Order Extended Kalman Filters. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 61(12), 6574-6582. doi: 10.1109/TIE2014.2320215.

Nguyen Khanh, Q., Nguyen Trung, H., Hunter, G. P., & Ha, Q. P. (2012, 26-29 Nov. 2012). FPGA-based sensorless PMSM drive using parallel reduced-order Extended Kalman Filter. Paper presented at the Control, Automation and Information Sciences) ICCAIS), 2012 International Conference on.

Zhaowei, Q., Tingna, S., Yindong, W., Yan, Y., Changliang, X., & Xiangning, H. (2013). New Sliding-Mode Observer for Position Sensorless Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 60(2), 710-719. doi: 10.1109/TIE.2012.2206359

International Conference 2015 3rd

Abu Dhabi CONFERENCE, Emirates, 2015

December 9-10

ZAYED UNIVERSITY

on New Approches in Sciences, Engineering & Technology

CERTIFICATE OF ATTENDANCE

Hossein Shabanloo, Amirhossein Abolmasoumi, Aliasghar Ghadimi, Mazdak Ebadi

at Zayed University, Abu Dhabi Emirates presented a manuscript entitled:

DSP-Based Sensorless Vector Control Sterategy Of PM Synchronous Motors Using Parallel Reduced-Order Kalman Filter

Prof.Ian Michael
Scientific Secretary

Dr.M.Moshkani
Conference Chairman

ZAYED UNIVERSITY