کنترل بدون‌حسگر پیش‌بین گشتاور موتور القایی سه‌فاز با استفاده از یک مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی

مجتبی امیری*[۱]، رضا کیانی‌نژاد[۲]

*۱- دانشگاه علوم تحقیقات، واحد اهواز، اهواز، ایران. پست الکترونیکی:**amiri.m3558@yahoo.com**

۲- دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. پست الکترونیکی: **reza.kiani@scu.ac.ir**

چکیده: این مقاله یک سیستم درایو بدون حسگر سرعت متغیر مبتنی بر روش کنترل پیش‌بین گشتاور برای موتور القایی سه‌فاز پیشنهاد می‌دهد. نوآوری این مقاله یکپارچه‌سازی مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی با روش کنترل پیش‌بین گشتاور به منظور تخمین سرعت، به عنوان پارامتر تطبیقی، و مشاهده متغیرهای حالت موتور می‌باشد. متغیرهای حالت مشاهده‌شده، از جمله شارهای روتور و استاتور، برای پیش‌بینی مقدار شار و گشتاور الکترومغناطیسی در گام بعدی نمونه برداری بکار گرفته می‌شوند. بعلاوه، به دلیل وابستگی مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی به مقاومت استاتور و متغیر بودن این پارامتر به‌دلیل شرایط عملکردی موتور از جمله گرم‌شدگی سیم‌پیچ استاتور، یک تخمین‌گر مقاومت استاتور بر اساس قواعد پایداری کلاسیک طراحی می‌شود. عملکرد سیستم درایو پیشنهادی شامل روش کنترل پیش‌بین گشتاور، مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی و تخمین‌گر مقاومت استاتور با استفاده از نرم افزار Matlab/Simulink اعتبار سنجی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی کارایی و عملکرد موثر روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بدون‌حسگر، تخمین‌گر مقاومت استاتور، سیستم درایو سرعت متغیر، کنترل پیش‌بین گشتاور، مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی، موتور القایی سه‌فاز.

۱- مقدمه

امروزه، روش‌های درایو بدون حسگر بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند، به‌طوری‌که مقالات متعددی در زمینه درایو بدون حسگر موتور القایی ارائه شده است. این روش‌ها در موتورهای القایی بیشتر مد نظر است چرا که در این نوع موتورها سرعت شفت روتور با سرعت میدان مغناطیسی برابر نیست در حالیکه در ماشین‌های سنکرون این چنین است. روش‌هایی که با آن سرعت موتور تخمین زده می‌شود نباید به حسگرهای عجیب و خارج از دسترس نیاز داشته باشند (مثلا حسگر شار که اصلا شاید وجود تجاری هم نداشته باشد). در کنترل بدون حسگر ماشین القایی، باید روشی ارائه کرد که سرعت روتور را با استفاده از اطلاعات پایانه‌ای موتور (یعنی ولتاژ و جریان) تخمین بزنند [۱]و[۲].

برای کنترل مشخصه‌های الکترومکانیکی موتور القایی سه‌فاز در محدوده‌ی وسیعی از سرعت‌ها، از روش های پربازده، مثل کنترل جهت دار شار(FOC) [۳]، کنترل مستقیم شار و گشتاور(DTC) [۴] کنترل غیرخطی مبتنی بر سیگنال پیش خور غیر خطی [۵] استفاده کنند. در کنار روش های ذکر شده، روش کنترل پیش بین مدل (MPC) در بیست سال اخیر به شدت مورد توجه محققان قرار گرفته است. ویژگی اصلی کنترل پیش‌بین، استفاده از مدل سیستم برای

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

تخمین رفتارهای آینده متغیرهای کنترلی می‌باشد. کنترل‌کننده از این اطلاعات به منظور دست‌یابی به عملکرد بهینه، مطابق با معیارهای بهینه‌سازی از پیش تعیین‌شده، استفاده می‌کند. به همین دلیل، کنترل پیش بین به عنوان یکی از روش های کنترلی با دامنه وسیع برای مبدل های الکترونیک قدرت مطرح است [۶]. روش کنترل پیش‌بین گشتاور (PTC) یکی از انواع روش‌های کنترل پیش‌بین مدل است که بسیار مورد توجه محققان قرار گرفته است. دلیل این امر کیفیت بالا، پاسخ دینامیکی سریع، کم بودن ریپل گشتاور (بر خلاف روش کنترل مستقیم گشتاور) و کاهش فرکانس کلید زنی است [۷]و[۸].

در زمینه کنترل بدون‌حسگر موتورهای القایی سه‌فاز مراجع متعددی ارائه شده است. برای آدرس دادن این موضوع، مرجع [۹] بصورت مستقیم و با استفاده از بردارهای شار روتور و یا استاتور سرعت را تخمین می زند. این مقاله یک انتگرال‌گیر جدید برای حذف مشکلات ناشی از انتگرال‌گیرهای مرسوم، مثل پدیده راندگی، ارائه می‌دهد. مرجع [۱۰] یک تخمین‌گر سرعت مبتنی بر ریپل شیارهای روتور ارائه می‌دهد. در این نوع تخمین‌گرها با آشکارسازی برخی هارمونیک‌های موجود در سیگنال‌های ولتاژ و جریان موتور، می توان سرعت را محاسبه نمود. مرجع [۱۱] یک روش بدون حسگر مبتنی بر سیستم مدل مرجع وفقی بهبود یافته برای کنترل برداری موتور القایی سه فاز ارائه می دهد. این ساختار بهبود یافته در جهت کاهش خطای سرعت تخمینی و بهبود عملکرد سیستم در سرعت پایین می‌باشد. مراجع [۱۲] و [۱۳] نیز به ترتیب تخمین‌گرهای سرعت مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل لوئنبرگر و فیلتر کالمن پیشنهاد می‌دهند.

این مقاله یک سیستم درایو سرعت متغیر بدون‌حسگر مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی پیشنهاد می‌دهد. استراتژی کنترلی این مقاله مبتنی بر روش کنترل پیش‌بین گشتاور می‌باشد. به منظور بهبود عملکرد سیستم و کاهش وابستگی به پارامترهای استاتور، یک تخمین‌گر مقاومت استاتور طراحی می‌شود. سایر بخش‌های مقاله بصورت مقابل است. در بخش دوم مدل دینامیکی موتور القایی ارائه می‌شود. بخش سوم ساختار مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی را توصیف می‌کند. جزئیات تخمین‌گر مقاومت استاتور در بخش چهارم ارائه می‌شود. روش کنترل پیش‌بین گشتاور در بخش پنجم شرح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در بخش ششم ارائه می‌شود. نهایتاً، بخش هفتم نتایج و دستاوردهای مقاله را نتیجه‌گیری می‌کند.

۲-مدل دینامیکی موتور القایی سه‌فاز

در این مقاله از تئوری دو محوری برای مدلسازی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز استفاده می‌شود. معادلات دینامیکی ولتاژ استاتور و روتور در دستگاه چرخان دلخواه dqo به صورت است [۲]:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} + \omega\lambda_{qs} \quad (۱)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega\lambda_{ds} \quad (۲)$$

$$v_{dr} = 0 = r_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} + (\omega - \omega_r)\lambda_{qr} \quad (۳)$$

$$v_{qr} = 0 = r_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} - (\omega - \omega_r)\lambda_{dr} \quad (۴)$$

روابط شار پیوندی روتور و استاتور بصورت زیر است:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (۵)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (۶)$$

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (۷)$$

$$\lambda_{qr} = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (۸)$$

که در این روابط v_{ds}، v_{qs}، v_{dr}، v_{qr} ولتاژهای محورهای متعامد استاتور و روتور، i_{ds}، i_{qs}، i_{dr}، i_{qr} جریان‌های محورهای متعامد استاتور و روتور، λ_{ds}، λ_{qs}، λ_{dr}، λ_{qr} شارهای محورهای متعامد استاتور و روتور است. همچنین r_s، r_r، L_s، L_r و L_m به ترتیب مقاومت استاتور، مقاومت روتور، اندوکتانس استاتور، اندوکتانس روتور و اندوکتانس مغناطیسی است. پارامترهای ω_r و ω به ترتیب بیانگر سرعت زاویه‌ای روتور و قاب مرجع دلخواه هستند. معادله مکانیکی موتور سه فاز بصورت زیر است:

$$T_e - T_L = \frac{J}{P}\frac{d\omega_r}{dt} \quad (۹)$$

که T_e، T_L، J و P به‌ترتیب بیانگر گشتاور الکترومغناطیسی، گشتاور بار، ممان اینرسی و تعداد جفت قطب‌های ماشین است. گشتاور الکترومغناطیسی نیز برابر است با:

$$T_e = 1.5P\left(\lambda_{qs} i_{ds} - \lambda_{ds} i_{qs}\right) \quad (۱۰)$$

۳-مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی

مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی یکی از روش‌های قدرتمند برای تخمین شار روتور، استاتور و سرعت می‌باشد که کمیت تطبیقی در آن سرعت می‌باشد. این مشاهده‌گر بر اساس شار روتور و خطای جریان استاتور، با تعریف یک سیگنال تنظیم سرعت مبتنی بر روش پایداری لیاپانوف، سرعت را تخمین می‌زند. برای طراحی این نوع مشاهده‌گر، از معادلات فضای حالت موتور القایی استفاده می‌شود. با فرض جریان استاتور و شار روتور به عنوان متغیرهای حالت، با انجام کمی عملیات ریاضی، روابط مرتب‌شده فضای حالت موتور بصورت زیر است:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\left(\frac{r_s}{\sigma L_s}+\frac{1-\sigma}{\sigma\tau_r}\right) & 0 & \frac{L_m}{\sigma L_r L_s \tau_r} & -\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_s} \\ 0 & -\left(\frac{r_s}{\sigma L_s}+\frac{1-\sigma}{\sigma\tau_r}\right) & +\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_r L_s} & \frac{L_m}{\sigma L_r L_s \tau_r} \\ -\frac{L_m}{\tau_r} & 0 & -\frac{1}{\tau_r} & -\omega_r \\ 0 & -\frac{L_m}{\tau_r} & \omega_r & -\frac{1}{\tau_r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \lambda_{dr} \\ \lambda_{qr} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \upsilon_{ds} \\ \upsilon_{qs} \end{pmatrix} \quad (۱۱)$$

که $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$ ضریب نشتی روتور و $\tau_r = L_r / r_r$ ثابت زمانی روتور است. رابطه فوق را می‌توان بصورت زیر بیان کرد:

$$\frac{d}{dt}\begin{vmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\lambda}_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \bar{i}_s \\ \bar{\lambda}_r \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} B_1 \\ 0 \end{vmatrix} \cdot \bar{\upsilon}_s = Ax + B\bar{\upsilon}_s \quad (۱۲)$$

$$\bar{i}_s = \begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} \end{bmatrix}^T$$

$$\bar{\upsilon}_s = \begin{bmatrix} \upsilon_{ds} & \upsilon_{qs} \end{bmatrix}^T$$

$$\bar{\lambda}_r = \begin{bmatrix} \lambda_{dr} & \lambda_{qr} \end{bmatrix}^T$$

که در این رابطه پارامترهای ماتریس حالت و ورودی بصورت زیر هستند:

$$A_{11} = -\left(\frac{r_s}{\sigma L_s}+\frac{1-\sigma}{\sigma\tau_r}\right).I = a_{r11} \cdot I \quad (۱۳)$$

$$A_{12} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}\left(\frac{1}{\tau_r} I - \omega_r I'\right) = a_{r12} \cdot I + a_{i12} \cdot I'$$

$$A_{21} = \frac{L_m}{L_r} I = a_{r21} \cdot I$$

$$A_{21} = -\frac{1}{\tau_r} I + \omega_r I' = a_{r22} \cdot I + a_{i22} \cdot I'$$

$$B_1 = \frac{1}{\sigma L_s} I = b_1 I$$

$$I = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$I' = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$$

خروجی سیستم، بردار جریان استاتور در نظر گرفته می‌شود که با رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\bar{i}_s = C\,x \quad (۱۴)$$

$$C = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix}$$

با توجه به روابط حالت موتور القایی، مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی را می‌توان بصورت زیر طرح‌ریزی کرد[۱۴]:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = \hat{A}\hat{X} + B\hat{V}_s + G\left(\hat{i}_s - i_s\right) \quad (۱۵)$$

در رابطه فوق باید ماتریس G ماتریس بهره مشاهده‌گر می‌باشد و باید به نحوی انتخاب شود که مشاهده‌گر پایدار باشد. با استفاده از روش‌های کنترل کلاسیک، ماتریس بهره مشاهده‌گر بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & g_2 & g_3 & g_4 \\ -g_2 & g_1 & -g_4 & g_3 \end{bmatrix}^T \quad (۱۶)$$

درایه‌های ماتریس فوق تابعی از پارامترهای موتور و سرعت بصورت زیر است:

$$g_1 = (K-1)(a_{r11} + a_{r22}) \quad (۱۷)$$

$$g_1 = (K-1)a_{i22}$$

$$g_1 = -c(K-1)a_{i12}$$

$$g_1 = \left(K^2-1\right)\left(ca_{r11} + a_{r21}\right) - c(K-1)(a_{r11} + a_{r22})$$

$$c = L_{sc}$$

$$a_{r22} = \frac{1}{\tau_r}$$

$$a_{i22} = \hat{\omega}_r`$$

مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی به‌صورت رابطه (۱۷) طراحی می‌شود. برای این کار به ولتاژ و جریان ترمینال موتور نیاز است تا بردار شار روتور و جریان استاتور تخمین زده شوند. سپس با استفاده از سیگنال خطای جریان استاتور و بردار شار روتور با یک مکانیزم تطبیقی از نوع کنترل کننده تناسبی-انتگرالی، سرعت از رابطه زیر تخمین زده می‌شود:

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \mathrm{Im}\, ag\left[\left(i_s - \hat{i}_s\right)\hat{\lambda}_r\right] = \quad (۱۸)$$

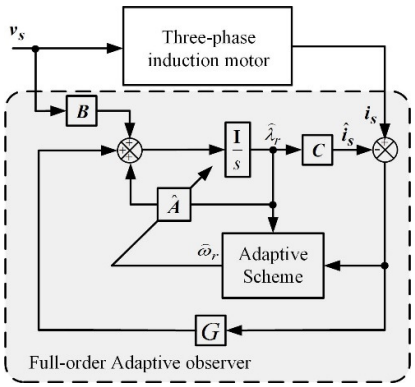
$$\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)\left(\hat{\lambda}_{qr}\, e_{ids} - \hat{\lambda}_{dr}\, e_{iqs}\right)$$

که در این رابطه K_p و K_i بهره‌های تناسبی و انتگرالی هستند. e_{ids} و e_{iqs} به ترتیب خطای سیگنال جریان در راستای محور d و q هستند. بلوک دیاگرام مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی در شکل ۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]



شکل۱: ساختار مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی

۴-تخمین‌گر مقاومت استاتور

پارامترهای موتور القایی، به‌ویژه مقاومت استاتور، نقش بسزایی در عملکرد مشاهده‌گر تطبیقی و همچنین الگوریتم کنترلی PTC دارد. اگر مقاومت استاتور با مقدار واقعی‌اش تفاوت داشته باشد، مقادیر شار استاتور و روتور و در نتیجه سرعت موتور به درستی تخمین زده نمی شود. معمولاً تغییرات مقاومت استاتور، برای یک موتور القایی که مدام تحت بار کار می‌کند اجتناب ناپذیر است. در واقع عنصر تعیین کننده دمای سیم پیچ استاتور است. وقتی موتور زیادی تحت بار قرار می گیرد و دمای سیم پیچ‌های آن افزایش پیدا می کند، به تبع آن مقاومت استاتور نیز افزایش پیدا می کند. حال اگر سیستم کنترلی بر اساس مقاومت استاتور اولیه طراحی شود، افزایش مقاومت استاتور ماشین موجب می‌شود تا شار استاتور و روتور به درستی تخمین زده نشوند. لازم به ذکر است که ثابت زمانی بالای تشخیص مقاومت استاتور یکی از مشکلات اساسی این تخمین گرها می باشد.

اگرچه تغییرات مقاومت استاتور در مقایسه با دینامیک های موتور، بسیار کند است، اما با تخمین مقدار صحیح مقاومت استاتور عملکرد ایمن‌تر سیستم درایو فراهم می گردد. مقاومت استاتور را می توان با استفاده از یک سیگنال خطای مناسب تخمین زد. با استفاده از تئوری های پایداری کلاسیک، سیگنال خطای مقاومت استاتور بصورت زیر قابل اثبات است [۷]:

$$e_{rs} = \left(\lambda_{dr} - \hat{\lambda}_{dr}\right) i_{ds} + \left(\lambda_{qr} - \hat{\lambda}_{qr}\right) i_{qs} \qquad (۱۹)$$

با تعریف سیگنال خطای مقاومت استاتور و بهره گیری از یک کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی (PI)، مقاومت استاتور بصورت زیر تخمین زده می شود:

$$\hat{r}_s = K_{pr_s} e_{rs} + K_{ir_s} \int e_{rs}\, dt \qquad (۲۰)$$

در این رابطه ضرایب K_{pr_s} و K_{ir_s} به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی می باشند که باید به درستی تعیین شوند. بعلاوه، بالانویس " ^ " بیانگر مقاومت تخمین زده شده می باشد.

۵-روش کنترل پیش‌بین گشتاور

ساختار کلی سیستم درایو بدون حسگر مبتنی بر روش کنترل پیش‌بین گشتاور در شکل ۲ نشان داده شده است. ابتدا پارامترهای شار استاتور و روتور در گام kام با استفاده از مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی تخمین زده می‌شوند. پارامترهای تخمین زده شده برای پیش بینی مقدار شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در مرحله k+1 مورد نیاز می‌باشند. در روش کنترل پیش بین گشتاور، ابتدا باید به ازای تمامی حالات ممکن برای اینورتر منبع ولتاژ، مقدار شار استاتور و گشتاور الکترومغناطیسی در گام k+1 پیش بینی شود. برای یک اینورتر دوسطحی سه ساق، مورد مطالعه در این مقاله، جمعا شش حالت کلید زنی فعال و دو حالت کلیدزنی صفر وجود دارد. لذا بردارهای شار استاتور و گشتاور باید به ازای این هشت حالت ممکن محاسبه شوند. در مرحله بعد، با بهینه سازی یک تابع هزینه مناسب مبتنی بر خطای شار و گشتاور، بهترین بردار ولتاژ برای اعمال به اینورتر منبع ولتاژ حاصل می شود. به عبارت دیگر، به ازای تمامی شارها و گشتاورهای پیش بینی شده، یک بهینه سازی صورت می گیرد. در این مقاله تابع هزینه، بصورت حاصل‌مجموع وزن‌دار خطاهای شار و گشتاور پیش بینی شده نسبت به شار و گشتاور مرجع تعریف خواهد شد. آن حالتی از کلید زنی که به ازای آن تابع هزینه کمینه شود، به عنوان بهینه‌ترین حالت کلیدزنی در گام شبیه سازی مربوطه استخراج و به اینورتر منبع ولتاژ اعمال می گردد. این فرآیند در هر گام نمونه برداری ادامه پیدا می کند.

برای طراحی بلوک پیش بین شار و گشتاور از معادلات ولتاژ استاتور و روتور در قاب مرجع ساکن استفاده می‌شود. با استفاده از این روابط و با انجام کمی عملیات ریاضی می توان بردارهای شار استاتور و شار روتور را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{d\lambda_{ds}}{dt} = \frac{-r_s L_r}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{ds} + \frac{r_S L_m}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{dr} + v_{ds} \qquad (۲۱)$$

$$\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = \frac{-r_s L_r}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{qs} + \frac{r_S L_m}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{qr} + v_{qs} \qquad (۲۲)$$

$$\frac{d\lambda_{dr}}{dt} = \frac{r_r L_m}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{ds} - \frac{r_r L_s}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{dr} + \omega_r \lambda_{qr} \qquad (۲۳)$$

$$\frac{d\lambda_{qr}}{dt} = \frac{r_r L_m}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{qs} - \frac{r_r L_s}{L_r L_s - L_m^2}\lambda_{qr} - \omega_r \lambda_{dr} \qquad (۲۴)$$

به منظور پیش بینی گشتاور الکترومغناطیسی و شار استاتور ، گسسته سازی اویلر مستقیم با رابطه زیر استفاده می شود:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \qquad (۲۵)$$

در این رابطه T_s زمان نمونه برداری است. اگر گسسته سازی اویلر مطابق با رابطه مذکور به روابط (۱۱) تا (۱۴) اعمال گردد، روابط زیر برای پیش بینی شار استاتور و روتور حاصل می شود:

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

$$\lambda_{ds}(k+1)=\left(1-\frac{T_s r_s L_r}{L_s L_r-L_m^2}\right)\lambda_{ds}(k)+\frac{T_s r_s L_m}{L_s L_r-L_m^2}\lambda_{dr}(k)+T_s v_{ds}(k) \quad (۲۶)$$

$$\lambda_{qs}(k+1)=\left(1-\frac{T_s r_s L_r}{L_s L_r-L_m^2}\right)\lambda_{qs}(k)+\frac{T_s r_s L_m}{L_s L_r-L_m^2}\lambda_{qr}(k)+T_s v_{qs}(k) \quad (۲۷)$$

$$\lambda_{dr}(k+1)=\frac{T_s r_r L_m}{L_s L_r-L_m^2}\lambda_{ds}(k)+\left(1-\frac{T_s r_r L_s}{L_s L_r-L_m^2}\right)\lambda_{dr}(k)+\omega_r\lambda_{qr}(k) \quad (۲۸)$$

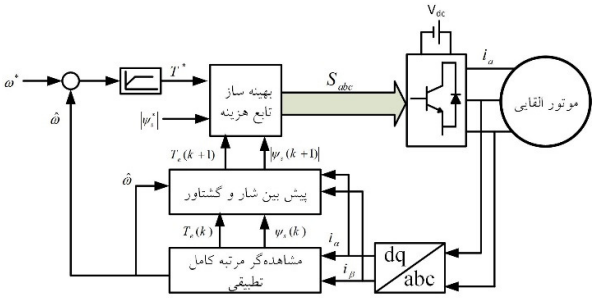
$$\lambda_{qr}(k+1)=\frac{T_s r_r L_m}{L_s L_r-L_m^2}\lambda_{qs}(k)+\left(1-\frac{T_s r_r L_s}{L_s L_r-L_m^2}\right)\lambda_{qr}(k)-\omega_r\lambda_{dr}(k) \quad (۲۹)$$

اندازه شار استاتور برابر است با:

$$\left|\lambda_s(k+1)\right|=\sqrt{\lambda_{ds}^2(k+1)+\lambda_{qs}^2(k+1)} \quad (۳۰)$$

از طرف دیگر رابطه گشتاور پیش بینی شده بصورت زیر است:

$$T_e(k+1)=1.5P\frac{L_m}{L_s L_r-L_m^2}\left(\lambda_{dr}(k+1)\lambda_{qs}(k+1)-\lambda_{qr}(k+1)\lambda_{ds}(k+1)\right) \quad (۳۱)$$



شکل۲: ساختار کلی روش کنترل پیش بین گشتاور بدون‌حسگر

برای پیداکردن بهترین بردار ولتاژ در هر زمان نمونه برداری، می بایست یک تابع هزینه (تابع هدف) مناسب بهینه شود. در حالت کلی، تابع هزینه، می بایست بصورت یک رابطه ریاضی وزن دار بین متغیرهای کنترل شونده موتور از جمله شار و گشتاور انتخاب شود. افزودن قیود مختلف به تابع هدف بستگی زیادی به مبدل الکترونیک قدرت دارد. در این مقاله تابع هزینه بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$g=\left|T_e^{ref}-T_e(k+1)\right|+K_\lambda\left|\lambda_s^{ref}-\lambda_s(k+1)\right| \quad (۳۲)$$

که در این رابطه K_λ ضریب وزنی برای شار استاتور را نشان می دهد.

۶-نتایج شبیه‌سازی

سیستم مورد مطالعه این مقاله بصورت عددی در نرم افزار Matlab/Simulink شبیه سازی شده است. پارامترهای موتور القایی سه‌فاز در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

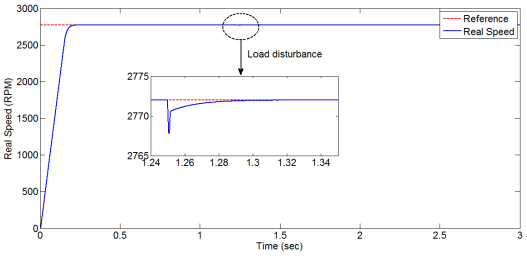
جدول۱: پارامترهای موتور القایی مورد مطالعه

پارامترهای الکتریکی و مکانیکی موتور القایی سه‌فاز		
شرح	نماد	مقدار
توان نامی	$P_n\,(kw)$	2.2
گشتاور نامی	$T_n\,(N.m)$	7.5
سرعت نامی	$n\,(rpm)$	2772
ولتاژ لینک DC	$V_{dc}\,(Volt)$	582
تعداد قطب	p	2
فرکانس نامی	$f\,(Hz)$	50
اندوکتانس استاتور	$L_s\,(mH)$	283.4
اندوکتانس روتور	$L_r\,(mH)$	283.4
اندوکتانس مغناطیسی	$L_m\,(mH)$	275.1
مقاومت استاتور	$R_s\,(\Omega)$	2.68
مقاومت روتور	$R_r\,(\Omega)$	2.13
ممان اینرسی	$J\,(kg.m^2)$	0.005

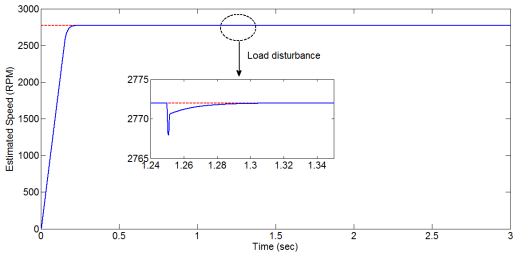
در ابتدا هدف بررسی عملکرد تخمین‌گر سرعت مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی در شرایط عملکردی مختلف است. در آزمایش اول، موتور تحت سرعت نامی ۲۷۷۲ دور بر دقیقه راه اندازی می شود. پس از شتاب‌گیری کامل موتور و رسیدن به شرایط ماندگار، در زمان ۱.۲۵ ثانیه یک گشتاور بار پله ای با دامنه ۶ نیوتون متر به موتور اعمال می گردد. مقدار مرجع شار استاتور ثابت و برابر با ۰.۷۱ وبر اتخاذ می گردد زیرا عملکرد در ناحیه تضعیف شار موضوع مورد بحث این مقاله نیست. شکل۳ و ۴ به ترتیب سرعت واقعی و تخمینی را در این حالت نشان می‌دهند. همانطور که ملاحظه می‌شود، تخمین‌گر سرعت مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی به‌خوبی سرعت موتور را تخمین زده است. از طرف دیگر، هم سرعت تخمینی و هم سرعت واقعی با دقت مناسبی سرعت مرجع را پیگیری کرده‌اند. شکل ۵ مقدار جریان استاتور، گشتاور الکترومغناطیسی، شار استاتور و روتور را برای این آزمایش نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشخص است که شار استاتور به خوبی مقدار مرجع را پیگیری کرده است. این موضوع به همراه کیفیت مناسب پیگیری سرعت مرجع، بیانگر کارایی

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014
[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

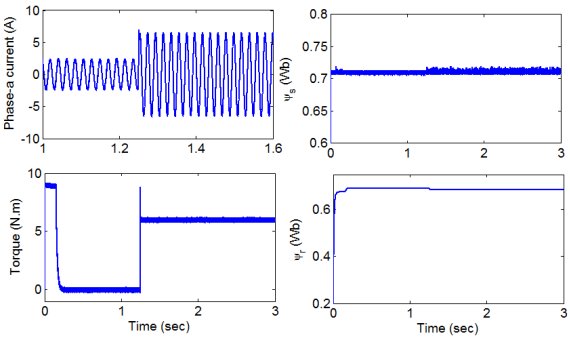
روش کنترل پیش‌بین گشتاور است. در لحظه ۱.۲۵ ثانیه، مقدار دامنه و فرکانس جریان استاتور وابسته به میزان گشتاور بار اعمالی تنظیم می‌شود.



شکل۳: سرعت واقعی موتور در آزمایش اول (سرعت و گشتاور بار نامی)

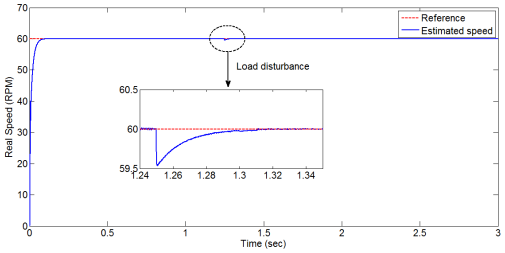


شکل۴: سرعت تخمینی موتور در آزمایش اول (سرعت و گشتاور بار نامی)

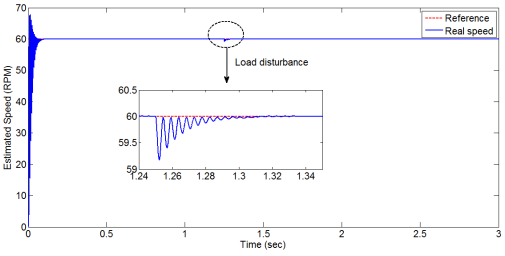


شکل۵: مشخصه‌های کلیدی موتور در آزمایش اول (سرعت و گشتاور بار نامی)

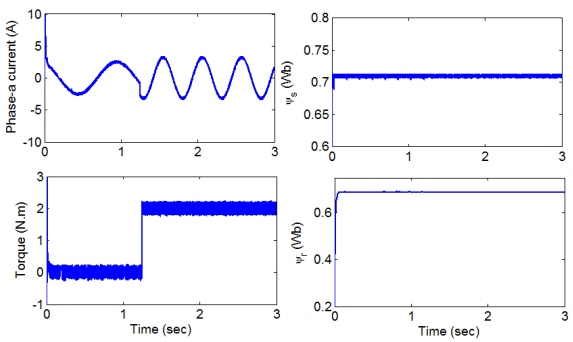
در آزمایش دوم، هدف بررسی عملکرد سیستم درایو بدون‌حسگر در سرعت پایین تحت اعمال گشتاور بار مشخص است. در این آزمایش، سرعت مرجع ثابت و برابر با ۶۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته می شود. در لحظه ۱.۲۵ ثانیه، گشتاور بار پله ای با مقدار ۲ نیوتون متر به موتور اعمال می شود. در سرعت پایین، مجاز نیستیم که گشتاور بار نامی را به موتور اعمال کنیم زیرا ممکن است در این شرایط موتور تحت بار مکانیکی زیاد متوقف شود. مقدار شار استاتور مرجع، همانند آزمایش‌های قبلی، ثابت و برابر با ۰.۷۱ وبر در نظر گرفته می شود. شکل ۶و۷ به ترتیب سرعت واقعی و تخمینی موتور را در این‌حالت نشان می‌دهد. شکل ۸ نیز سایر پارامترهای کلیدی موتور را در این آزمایش نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، سرعت و شار استاتور به‌خوبی مقادیر مرجعشان را پیگیری می‌کنند که این امر، عملکرد مناسب روش کنترل پیش‌بین گشتاور را تصدیق می‌کند. بعلاوه، سرعت تخمینی با دقت مناسبی به سرعت اندازه‌گیری شده نزدیک است که این امر عملکرد صحیح تخمین‌گر سرعت مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی را نشان می‌دهد



شکل۶: سرعت واقعی موتور در آزمایش دوم (سرعت و گشتاور بار پایین)



شکل۷: سرعت تخمینی موتور در آزمایش دوم (سرعت و گشتاور بار پایین)



شکل۸: مشخصه‌های کلیدی موتور در آزمایش دوم (سرعت و گشتاور بار پایین)

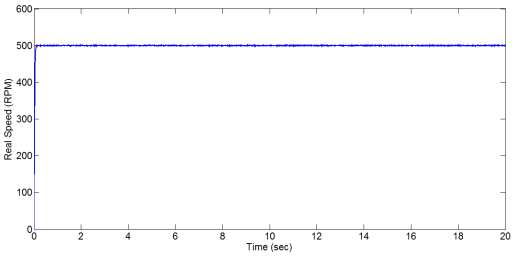
در آزمایش سوم، هدف بررسی عملکرد تخمین‌گر مقاومت استاتور می‌باشد. در حالت کلی، تخمین گر مقاومت استاتور، دارای دینامیک کندی می باشد ولی باید بتواند در هر شرایطی مقدار صحیح مقاومت استاتور را تخمین بزند. برای آزمایش این تخمین‌گر، فرض می شود مقدار مقاومت استاتور در اثر کارکرد مداوم موتور بر اثر گرم شدگی ۳۰ درصد افزایش پیدا کرده است. در نتیجه، مقدار فعلی و واقعی مقاومت موتور $1.3\times2.6=3.3$ می‌باشد. تخمین گر مقاومت استاتور باید بتواند ای موضوع را شناسایی و مقاومت استاتور را به درستی تخمین بزند. در این آزمایش فرض بر این است که موتور در حالت بی باری با سرعت ثابت ۵۰۰ دور بر دقیقه به گردش در می آید. شکل ۹ سرعت واقعی موتور و شکل ۱۰ مقاومت استاتور تخمین زده شده را نشان می دهد. همانطور که مشخص است، تخمین گر مقاومت استاتور، مبتنی بر

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

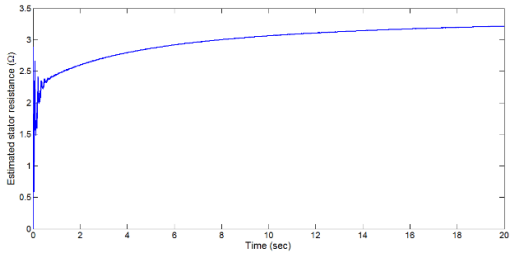
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

کنترل‌کننده PI، مقدار مقاومت استاتور را به درستی، ولی با دینامیک کند، تخمین زده است.



شکل۹: سرعت موتور در آزمایش سوم



شکل۱۰: مقاومت استاتور تخمین‌زده شده

۷-نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله یک سیستم درایو سرعت متغیر مبتنی بر استراتژی کنترل پیش‌بین گشتاور برای موتور القایی سه‌فاز پیشنهاد می‌شود. روش کنترل پیش‌بین گشتاور، ذاتاً یک روش بدون حسگر مکانیکی نیست. وجود این حسگر موجب افزایش هزینه و پیچیدگی سیستم و کاهش قابلیت اطمینان آن می‌شود. برای رفع این مشکل، این مقاله یک تخمین‌گر سرعت مبتنی بر مشاهده‌گر مرتبه کامل تطبیقی پیشنهاد می‌دهد. نوآوری این مقاله، یکپارچه‌سازی عملکرد این نوع تخمین‌گر با روش کنترل پیش‌بین گشتاور می‌باشد. بعلاوه، یک تخمین‌گر مقاومت استاتور با هدف کاهش وابستگی سیستم کنترلی به پارامترهای ماشین بر اساس قواعد پایداری کلاسیک طراحی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در شرایط عملکردی مختلف، کارایی روش پیشنهادی را نشان می دهد.

مراجع

[1] P. Vas. Sensorless Vector and Direct Torque Control. New York: Oxford Univ. Press, 1998.

[2] Ilas, C.; Bettini, A.; Ferraris, L.; Griva, G.; Profumo, F., "Comparison of different schemes without shaft sensors for field oriented control drives," *Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1994. IECON '94., 20th International Conference on*, vol.3, no., pp.1579,1588 vol.3, 5-9 Sep 1994.I.

[3] Saghafinia, A.; Hew Wooi Ping; Uddin, M.N.; Gaeid, K.S., "Adaptive Fuzzy Sliding-Mode Control Into Chattering-Free IM Drive," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.51, no.1, pp.692,701, Jan.-Feb. 2015.

[4] Buja, G.S.; Kazmierkowski, M.P., "Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors - a survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.51, no.4, pp.744,757, Aug. 2004.

[5] M. Bogdan, *The Industrial Electronics Handbook: Power Electronics and Motor Drives*, Taylor and Francis Group, 2011.

[6] Manfred Morari, Jay H. Lee, Model predictive control: past, present and future, Computers & Chemical Engine ering, Volume 23, Issues 4–5, 1 May 1999, Pages 667-682.

[7] Fengxiang Wang; Zhe Chen; Stolze, P.; Stumper, J.-F.; Rodriguez, J.; Kennel, R., "Encoderless Finite-State Predictive Torque Control for Induction Machine With a Compensated MRAS," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol.10, no.2, pp.1097,1106, May 2014.

[8] Rojas, C.A.; Rodriguez, J.; Villarroel, F.; Espinoza, J.R.; Silva, C.A.; Trincado, M., "Predictive Torque and Flux Control Without Weighting Factors," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.60, no.2, pp.681,690, Feb. 2013.

[9] Stojic, D.; Milinkovic, M.; Veinovic, S.; Klasnic, I., "Improved Stator Flux Estimator for Speed Sensorless Induction Motor Drives," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol.30, no.4, pp.2363,2371, April 2015.

[10] Ferrah, A.; Bradley, K.G.; Asher, G.M., "Sensorless speed detection of inverter fed induction motors using rotor slot harmonics and fast Fourier transform," *Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE*, vol., no., pp.279,286 vol.1, 29 Jun-3 Jul 1992.

[11] Benlaloui, I.; Drid, S.; Chrifi-Alaoui, L.; Ouriagli, M., "Implementation of a New MRAS Speed Sensorless Vector Control of Induction Machine," in *Energy Conversion, IEEE* 21-24 Sept. 2014.*Transactions on*, vol.30, no.2, pp.588-595, June 2015.

[12] Chen, B.; Yao, W.; Chen, F.; Lu, Z., "Parameter Sensitivity in Sensorless Induction Motor Drives with the Adaptive Full-Order Observer," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.PP, no.99, pp.1,1, early access.

[13] Alonge, F.; D'Ippolito, F.; Sferlazza, A., "Sensorless Control of Induction-Motor Drive Based on Robust Kalman Filter and Adaptive Speed Estimation," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol.61, no.3, pp.1444,1453, March 2014.

[14] Kubota, K.; Matsuse, K.; Nakano, T., "DSP-based speed adaptive flux observer of induction motor," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol.29, no.2, pp.344,348, Mar/Apr 1993.

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 2-No. 3-Autumn2013& winter 2014

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]

[DOR: 20.1001.1.23222468.1392.2.3.4.7]
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]