

تخمین سرعت موتورهای القایی به روش EKF با استفاده از شار روتور در مبنای ساکن و بررسی اثر تغییر پارامترها

جعفر میلی منفرد*، کریم عباس زاده**، محمد باقر منهج* و حسین کاظمی**

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۳۷۷/۳/۵ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۷۸/۴/۲۸)

چکیده - سرعت موتور القایی به روشهای گوناگون تاکنون تخمین و از آن در کنترل برداری استفاده شده است. در این مقاله سرعت موتور در مبنای ساکن با استفاده از شار روتور به روش EKF تعیین می شود و برای کنترل موتور به صورت برداری مورد استفاده قرار می گیرد و نشان داده می شود که تخمین سرعت با این روش حتی در سرعت های کم نیز از دقت خوبی برخوردار است. در این مقاله عمل تخمین با توجه به محدودیت زمانی در کلید زنی و نمونه برداری از جریان فازها صورت گرفته است. برای تخمین سرعت از دو فاز جریان نمونه برداری صورت می گیرد و نیازی به سنسورهای دیگر در کنترل برداری موتور و تخمین سرعت نیست، همچنین اثر تغییر هر یک از پارامترهای موتور در تخمین سرعت و کنترل موتور مورد بررسی قرار می گیرد.

Estimation of Induction Motor Speed by EKF In Stationary Frame and Use of Rotor Flux and Study of Parameter Variations

M. Milimonfared, K. Abbaszadeh, M. Menhaj and H. Kazemy

Department of Electrical Engineering, Amir Kabir University

ABSTRACT- This Paper presents a new methods (EKF) for vector control in induction motors. EKF stands for Extended Kalman Filter, which is used in speed estimation in a stationary reference frame. It has been shown that the method works accurately even at low speeds. The estimation method introduced in this paper takes into view such constraints as switching time and sampling limits. The novelty with the method is that samples are taken only from stator phase currents; in other words, there is no need for speed sensors.

۱- مقدمه

استفاده از سنسور است اما در بعضی از شرایط امکان استفاده از سنسورهای سرعت وجود ندارد. بنابراین باید به جستجوی روشی

برای کنترل موتورهای القایی نیاز به اندازه گیری دقیق سرعت با

*-دانشیار **- دانشجوی دکترا

فهرست علائم	
مولفه d جریان استاتور در	ids
مبنای ساکن	ids
مولفه q جریان استاتور در	iqs
مبنای ساکن	iqs
اندوکتانس متقابل	Lm
اندوکتانس روتور	Lr
اندوکتانس استاتور	Ls
مقاومت روتور	Rr
مقاومت استاتور	Rs
مولفه d ولتاژ استاتور در	Vds
مبنای ساکن	Vds
مولفه q ولتاژ استاتور در	Vqs
مبنای ساکن	Vqs
مبنای ساکن	Wr
سرعت زاویه‌ای روتور	Wr
مولفه d شار روتور در	λdr
مبنای ساکن	λdr
مولفه q شار روتور در	λqr
مبنای ساکن	λqr

- تخمین سرعت و اثر تغییر پارامترها.

- نتیجه گیری.

۲- معادله‌های EKF

در فیلتر کالمن برای تخمین پارامترها از معادله‌های فضای حالت سیستم استفاده می‌شود. بنابراین لازم است که سیستم را به شکل فضای حالت تعریف کنیم. در صورتی که معادله‌های بین متغیرهای حالت غیرخطی باشند برای تخمین از روش فیلتر کالمن گسترش یافته EKF استفاده می‌کنیم [۱۰]. معادله‌های EKF باید در هر نمونه برداری توسط پردازشگر حل شوند، بنابراین ابتدا معادله‌های EKF در حوزۀ گسسته تعیین می‌شوند و سپس توسط الگوریتم EKF حالت‌های سیستم تخمین زده می‌شود. معادله‌های غیرخطی فضای حالت رامی توان به صورت معادله‌های (۱) و (۲) نشان داد.

$$X(t) = f[X(t), U(t), t] + W(t) \quad (1)$$

$$Y(t) = f[X(t), t] + V(t) \quad (2)$$

که در آن مدل ماتریسی نویز حالت‌های سیستم و $V(t)$ مدل ماتریسی نویز خروجی سیستم و خطای اندازه‌گیری است، $U(t)$ ، $X(t)$ و $Y(t)$ به ترتیب ورودی، حالتها و خروجیهای سیستم‌اند.

در حل معادله‌های EKF، $W(t)$ ، $V(t)$ از نوع نویز سفید در نظر گرفته می‌شوند و همبستگی بین آنها وجود ندارد. با توجه به اینکه در معادله (۱)، $f[X(t), u(t), t]$ غیر خطی بودن معادله‌ها را نشان می‌دهد، لازم است در هر نمونه برداری از جریانهای فاز

باشیم که با اندازه‌گیری کمیت‌های دیگر مانند ولتاژ و جریان بتوانیم سرعت موتور را تخمین بزنیم. روشهای مختلفی مانند تخمین سرعت لغزش، شارو روش MARS در زمینه تخمین سرعت و کنترل موتور ارائه شده‌اند اما در سرعت‌های کم اکثر این روشها دارای خطایند و به جواب نمی‌رسند [۱-۳].

یکی از روشهای مؤثر در تخمین پارامترها در صنعت فیلتر کالمن است که در سالهای اخیر برای کنترل برداری موتورهای القایی و سنکرون استفاده شده [۳ و ۴]. بعضی از مراجع با استفاده از اندازه‌گیری سه فاز ولتاژ و سه فاز جریان همراه با مؤلفه ساکن ولتاژها و جریانها و نیز با استفاده از فیلتر کالمن توانسته‌اند سرعت را تخمین بزنند [۱۰ و ۱۱]. ایرادی که این روشها دارند، کند بودن عمل تخمین و زمانبر بودن همگرایی تخمینگر سرعت در آنهاست که خود این باعث ناپایداری سیستم می‌شود. در این مقاله معادله‌های مناسب برای تخمین سرعت موتور به نحوی به دست می‌آیند که حتی الامکان از سنسورهای کمتری استفاده شود و فیلتر کالمن قادر به تخمین سرعت حتی در سرعت‌های کم باشد. معادله‌های فیلتر کالمن به صورتی است که با استفاده از نمونه برداری جریان دو فاز استاتور عمل تخمین سرعت صورت می‌پذیرد. همچنین از عوامل مؤثر در خطای تخمینگر سرعت و ناپایداری کنترل موتور، تغییر پارامترهای موتور است که می‌تواند ناشی از خطای اندازه‌گیری، تغییر دما و تغییر شرایط کار موتور باشد. در این مقاله اثر تغییر هر یک از پارامترهای موتور در خطای تخمینگر سرعت و ناپایداری حلقه کنترلی موتور نشان داده می‌شود و موارد زیر بررسی خواهد شد.

- معادله‌های EKF

- تعیین معادله‌های تخمین سرعت.

استاتور، معادله‌ها خطی شوند و سپس حالت‌های مورد نظر تخمین زده شوند. الگوریتم EKF برای تخمین حالت‌های سیستم به صورت زیر است

الف - پیش بینی حالت

$$X(k+1|k) = X(k|k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f[X(t|t_k), U(t), t] dt \quad (3)$$

ب - تخمین ماتریس کوواریانس خطا

$$P(k+1|k) = Q(k+1|k) \cdot P(k|k) \cdot Q^T(k+1|k) + \delta(k) \quad (4)$$

$$Q(k+1|k) = \exp(F(k), Ts) \quad (5)$$

که در آن Ts زمان نمونه برداری است

$$F(k) = \frac{\partial F[X(t), U(t), t]}{\partial t} \quad (6)$$

ج - محاسبه بهره فیلتر کالمن

$$K(k+1) = P(k+1|k) \cdot H^T(k+1) [H(k+1) \cdot P(k+1|k) \cdot H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1} \quad (7)$$

د - محاسبه مجدد ماتریس کوواریانس خطا

$$P(k+1|k) = [I - K(k+1) \cdot H(k+1)] \cdot P(k+1|k) \quad (8)$$

ه - تخمین حالت

$$X(k+1|k+1) = X(k+1|k) + K(k+1) \cdot E(k+1) \quad (9)$$

$$E(k+1) = Z(k+1) - H[X(k+1|k), k+1] \quad (10)$$

در معادله (9)، $E(k+1)$ خطای بین خروجی واقعی سیستم و خروجی تخمین است.

۳ - تعیین معادله‌های تخمین سرعت

برای تخمین سرعت با استفاده از EKF، تعیین معادله‌های موتورالقای در فضای حالت مناسب مطابق معادله‌های (۱) و (۲) که بتوان با آن سرعت موتور رابه خوبی در شرایط مختلف تخمین زد از اهمیت زیادی برخوردار است. در معادله‌های EKF بردار X حالتها، U ورودی و Y خروجیهای سیستم اند. حالتها باید به گونه‌ای انتخاب شوند که فیلتر کالمن بتواند سرعت موتور را به خوبی تخمین بزند. با توجه به اینکه اساس هر تخمینگری روی خطای حاصله بین محاسبه و اندازه‌گیری متغیر با متغیرهای سیستم است، بنابراین معادله‌های حالت موتور باید متغیرهایی را به عنوان خروجی سیستم محاسبه کنند که توسط سنسور می‌توانیم آنها را اندازه‌گیری کنیم.

با توجه به اینکه جریان با ولتاژ سیستم از هر متغیر دیگری به طور ساده اندازه‌گیری می‌شود بنابراین بردار Y را با $[ids, iqs]$ مشخص می‌کنیم که با اندازه‌گیری از جریان دو فاز استاتور و تبدیل پارک، آنها را به سادگی به دست می‌آوریم. بردار U را به عنوان ورودی سیستم با $[vds, vqs]$ مشخص می‌کنیم. با تعیین $[ids, iqs]$ به عنوان خروجی و $[vds, vqs]$ به عنوان ورودی، متغیرهای حالتی که بتوانند معادله‌های (۱) و (۲) را برآورده سازند عبارت خواهند بود از $[Wr(t), \lambda dr, \lambda qr, ids, iqs]$ و دو متغیر حالت دیگر را idr و iqr در نظر گرفتیم تا بتوانیم از آنها در کنترل برداری موتور و تنظیم شار استفاده کنیم و wr را که سرعت موتور است تخمین بزنیم. برای کاهش خطا در تخمین سرعت از مبنای ساکن استفاده شده است، چون در این حالت نیاز به سرعت زاویه‌ای موتور و یا سرعت زاویه‌ای سنکرون برای تعیین متغیرهای ورودی و خروجی نیست. زیرا سرعت زاویه‌ای موتور تخمین زده می‌شود و سرعت زاویه‌ای سنکرون در سرعتهای متفاوت تغییر می‌کند، بنابراین استفاده از آنها باعث ایجاد خطا در کمیت‌های ورودی و خروجی می‌شوند و در نتیجه عمل تخمین سرعت با خطای زیاد همراه خواهد بود، بنابراین با توجه به معادله‌های (۱) و (۲) متغیرهای حالت عبارت اند از

$$X = [ids, iqs, \lambda ds, \lambda qs, wr] \quad (11)$$

$$U = [vqs, vds] \quad (12)$$

کرد ولی در اکثر موارد ماتریس $Q(k)$ نیز به صورت تجربی تعیین می‌شود. این ماتریس بیانگر خطای مدل‌سازی است که به صورت معادله (۲۱-ب) در نظر گرفته شده است.

$$Q(k) = \int Q(t_k, \tau) Q^T(t_r, \tau) d\tau \quad (21-الف)$$

$$Q(k) = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/5 \end{bmatrix} \quad (21-ب)$$

۴- تعیین سرعت و اثر پارامترها

برای تعیین سرعت موتور و کنترل آن فقط احتیاج به اندازه‌گیری جریان دو فاز استاتور داریم. این عمل توسط سنسورهای صورت می‌گیرد و با استفاده از جریان دو فاز می‌توان جریانهای iqs و ids را در مبنای ساکن با استفاده از معادله‌های (۲۲) تا (۲۴) بدست آورد.

$$ids + iqs = \sqrt{\frac{2}{3}} [is - \frac{1}{3}(ib + ic)] + j\sqrt{\frac{2}{3}}(ib - ic) \quad (22)$$

$$ia + ib + ic = 0 \quad (23)$$

$$ids + jiqs = \sqrt{\frac{2}{3}} ia + j\sqrt{\frac{2}{3}}(\frac{ia}{3} + ib) \quad (24)$$

کلید زنی اینورتر بر مبنای روش هیستریزس صورت می‌گیرد و فاصله زمان نمونه برداریها ۵۰ ms و حداکثر فرکانس کلید زنی ۲ KHZ است. نمودار کنترل موتور در شکل (۱) آورده شده است. با توجه به شکل (۱) ابتدا توسط سنسور هال از جریان دو فاز استاتور نمونه‌گیری به عمل می‌آید. سپس با استفاده از معادله‌های (۲۲) تا (۲۴) جریانهای iqs و ids محاسبه می‌شوند. با استفاده از الگوریتم EKF و آخرین وضعیت کلید زنی هر یک از فازهای اینورتر، سرعت موتور تخمین زده می‌شود. با استفاده از سرعت تخمینی W_r و سرعت مبنای W_r ، توسط کنترل کننده PI مقدار جریان iqs تعیین می‌شود و توسط iqs و ids و با در نظر گرفتن ناحیه کار موتور مشخص می‌شود، می‌توان جریانهای هر یک از فازها را تعیین کرد و با استفاده از روش هیستریزس عمل کلید زنی را انجام

$$Z = [iqs, ids] \quad (13)$$

در معادله‌های EKF، بردار $Z(t)$ نیز خروجی سیستم حاصل از اندازه‌گیری توسط سنسور است.

$$Z(t) = [iqs, ids] \quad (14)$$

با استفاده از تبدیل پارک [۹] و تعیین معادله‌های موتور در مبنای ساکن بر اساس متغیرهای حالت ذکر شده، خواهیم داشت

$$F(k) = \begin{bmatrix} -\frac{a_3}{a_1} & 0 & \frac{a_3}{a_1} & -w_r \frac{a_4}{a_1} & -x_r \frac{a_4}{a_1} \\ 0 & -\frac{a_3}{a_1} & \frac{a_4}{a_1} & \frac{a_3}{a_1} & \frac{a_4}{a_1} \\ a_\delta & 0 & -a_6 & w_r & x_r \\ 0 & a_\delta & -w_r & -a_6 & -x_r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$a_1 = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad a_4 = \frac{L_m}{L_r} \quad (16)$$

$$a_3 = R_s + R_r \left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 \quad a_\delta = R_r \frac{L_m}{L_r} \quad (17)$$

$$a_3 = \frac{L_m \times R_r}{L_r^2} \quad a_6 = \frac{R_r}{L_r} \quad (18)$$

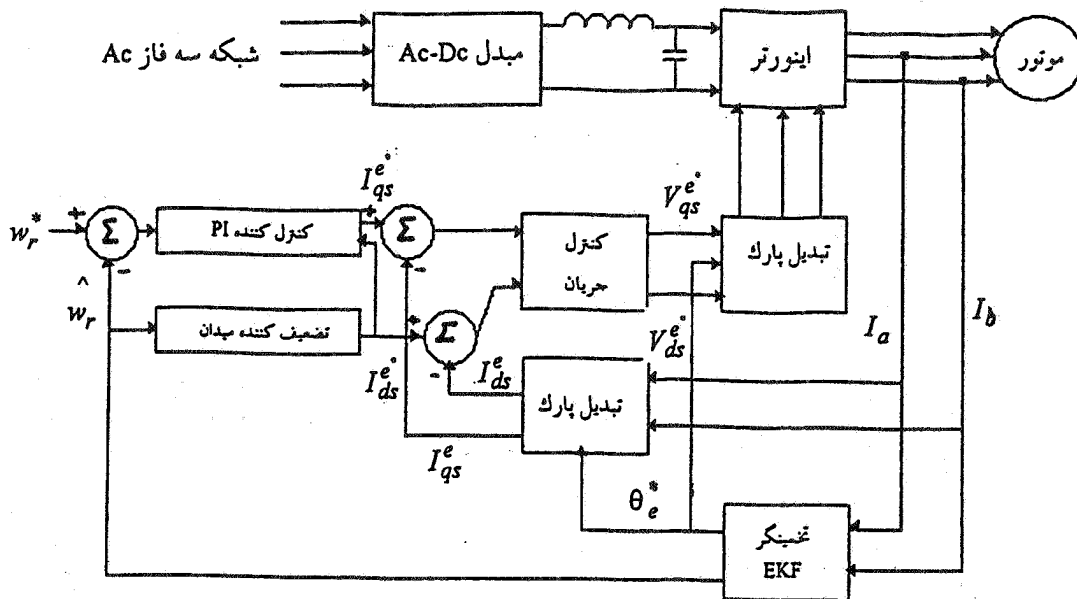
که در آن ماتریس $Q(k+1, k)$ را با استفاده از تقریب دو جمله اول سری تیلور محاسبه می‌کنیم و خواهیم داشت

$$Q(k+1, k) = \exp(F(k), Ts) = I + F(k).Ts \quad (19)$$

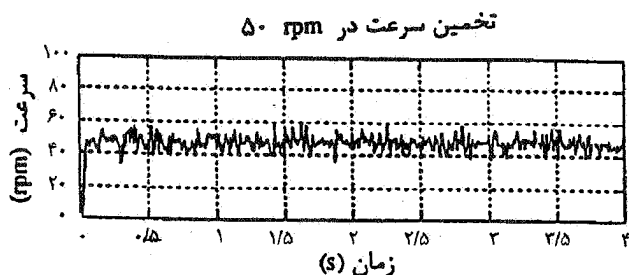
در محاسبه الگوریتم EKF، ماتریس $R(k)$ بیانگر خطای اندازه‌گیری سنسورهای جریان است که به صورت معادله (۱۴) با سعی و خطا مشخصات سنسورهای مورد استفاده تعیین شده است.

$$R(k) = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix} \quad (20)$$

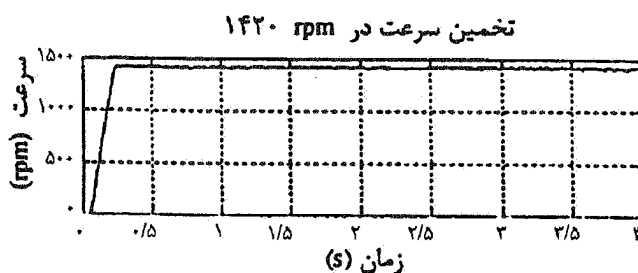
برای تعیین ماتریس $Q(k)$ می‌توان از معادله (۲۱-الف) استفاده



شکل ۱- نمودار کنترل موتور القایی به روش کنترل برداری بدون سنسور



شکل ۳- تخمین سرعت موتور در ۵۰ rpm و گشتاور کامل

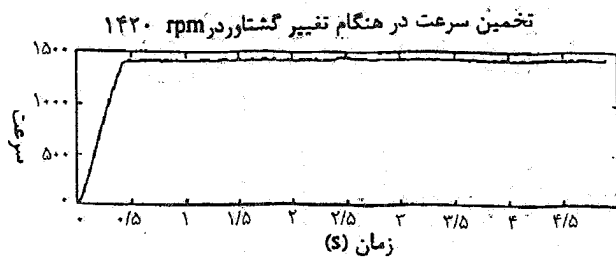


شکل ۲- تخمین سرعت موتور در ۱۴۲۰ rpm و گشتاور کامل

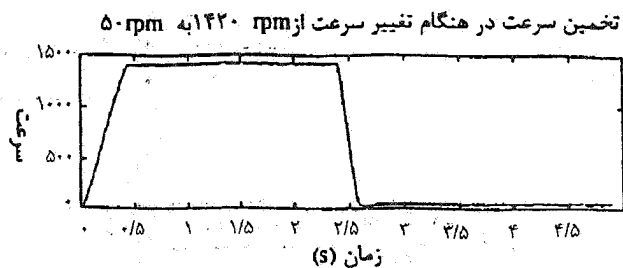
گشتاور کامل را نشان می‌دهد عمل تخمین سرعت در نزدیکی سرعت مینا به خوبی صورت گرفته است. اما دارای نوساناتی است، این نوسانات بیشتر به علت محاسبات ریاضی فیلتر کالمن در شبیه‌سازی است که در عمل با توجه به اینرسی موتور و بار، مقدار نوسانات سرعت بسیار کمتر از مقادیر شبیه‌سازی خواهد بود. برای اطمینان از دقت عملکرد روش پیشنهادی در یک مرحله تغییر سرعتی از ۱۴۲۰ rpm به ۵۰ rpm در گشتاور کامل و دیگری تغییر گشتاور از Tlod به Tlod- در سرعت ۱۴۲۰ rpm به کنترل کننده اعمال شده است. شکل‌های (۴) و (۵) نشان می‌دهند که تخمین سرعت و کنترل موتور بر اساس روش پیشنهادی به خوبی صورت می‌گیرد.

مسئله مهم دیگر در تخمین‌گرهای سرعت، پایداری و دقت تخمین‌گر در هنگام تغییر پارامترهای موتور به علت‌های مختلف

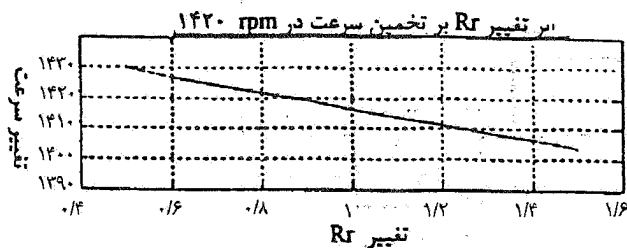
داد و موتور را تحت کنترل در آورد. با توجه به اینکه در بدترین شرایط، حداکثر زمان لازم برای همگرا شدن تخمین‌گر با استفاده از پردازشگر ۴۸۶، ۲۰۰ میکروثانیه است، بنابراین در صورتی که از پردازشگرهای ۴۸۶ یا ۵۸۶ برای پیاده‌سازی استفاده شود، سیستم ساخته شده از پایداری مطلوبی برخوردار خواهد شد و با استفاده از چنین سیستم‌هایی می‌توان به کنترل بلادرنگ (on-line) دسترسی پیدا کرد. شکل‌های (۲) تا (۵) نتایج شبیه‌سازی و کنترل برداری موتور با استفاده از فیلتر کالمن در مینای ساکن را با استفاده از شاروتور نشان می‌دهند. کنترل سرعت موتور در گشتاور نامی و سرعت مینای ۱۴۲۰ rpm در شکل (۲) نشان داده شده است. تخمین سرعت و کنترل موتور در سرعت‌های کم یکی از مهمترین مشکلات تخمین‌گرهای سرعت است که بیانگر دقت تخمین‌گر سرعت است. شکل (۳) تخمین سرعت و کنترل موتور در سرعت کم ۵۰ rpm و



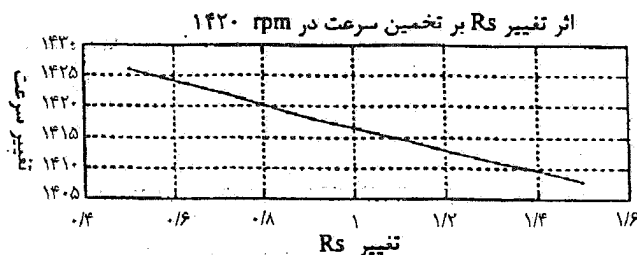
شکل ۵- تخمین و کنترل سرعت موتور در تغییر گشتاور



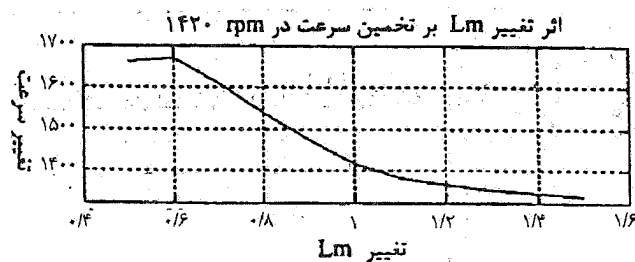
شکل ۴- تخمین و کنترل سرعت موتور در تغییر سرعت



شکل ۷- اثر تغییر Rr بر روی تخمینگر سرعت در 1420 rpm



شکل ۶- اثر تغییر Rs بر روی تخمینگر سرعت در 1420 rpm



شکل ۸- اثر تغییر Lm بر روی تخمینگر سرعت در 1420 rpm

شکل (۸) تغییر L_m و اثر غیر خطی بودن آن را نشان می‌دهد. بنا بر این تعیین دقیق L_m دارای اهمیت بیشتری نسبت به R_s و R_r است. با توجه به معادله‌های (۲۵) و (۲۶)، تغییرات L_s و L_r به L_m وابسته است و در اثر تغییر L_m نظیر اشباع اندوکتانسهای استاتور و روتور نیز تغییر می‌کنند.

$$L_s = L_{l_s} + L_m \quad (25)$$

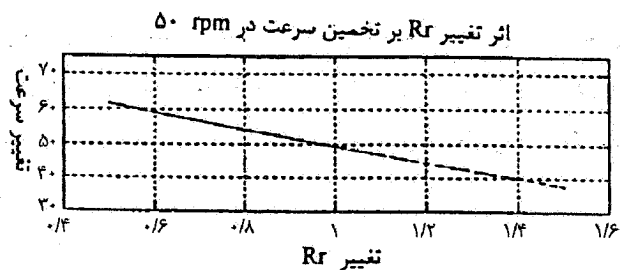
$$l_r = L_{l_r} + L_m \quad (26)$$

که در آن L_{l_r} اندوکتانس پراکنندگی روتور و L_{l_s} اندوکتانس پراکنندگی استاتور که هر دو تقریباً ثابت اند.

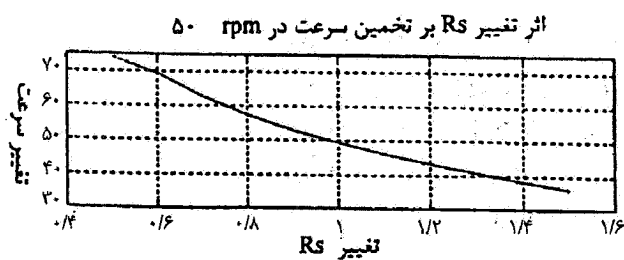
هر چقدر سرعت کمتر شود اثر تغییر پارامترها از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکل‌های (۹) تا (۱۱) اثر تغییرات را در سرعت کم rpm ۵۰ نشان می‌دهند.

مقایسه شکل‌های (۶) تا (۱۱) نشان می‌دهند که هر چقدر سرعت مبنا کاهش یابد اثر R_s به صورت غیر خطی تر در تخمینگر سرعت ظاهر می‌شود ولی اثر تغییر R_r به صورت خطی باقی می‌ماند. تغییرات L_m از دو قسمت تغییرات نمایی و خطی تشکیل یافته است. در

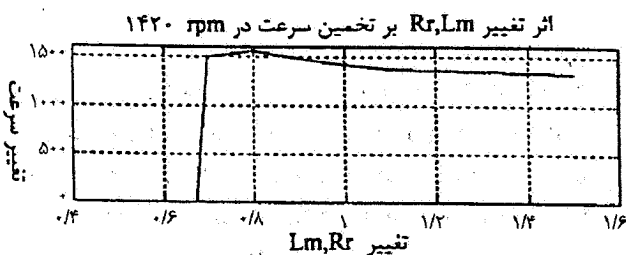
نظیرگرماء، اشباع و یا اندازه‌گیری درست پارامترهاست که این اثرات در سرعت‌های کم از اهمیت بیشتری برخوردار است. شکل‌های (۶) تا (۱۳) اثر تغییر پارامترها در تخمین و کنترل سرعت در روش پیشنهادی را نشان می‌دهند. شکل‌های (۶) تا (۸) نشان دهنده اثر تغییرات R_s ، R_r ، L_m در محدوده ۵۰٪ تا ۱۵۰٪ مقدار نامی در سرعت rpm ۱۴۲۰ و گشتاور بار کامل اند. این شکلها نشان می‌دهند که R_s و R_r بر روی تخمین سرعت موتور به صورت تقریباً خطی اثر می‌گذارند و با افزایش مقادیر R_r و یا R_s سرعت تخمین نسبت به سرعت نامی کمتر می‌شود. اثر R_s و R_r مانند یکدیگر است و دارای تغییرات سرعت تقریباً مشابهی با یکدیگرند، اما تغییرات L_m به صورت غیر خطی و دارای تغییرات بیشتری است.



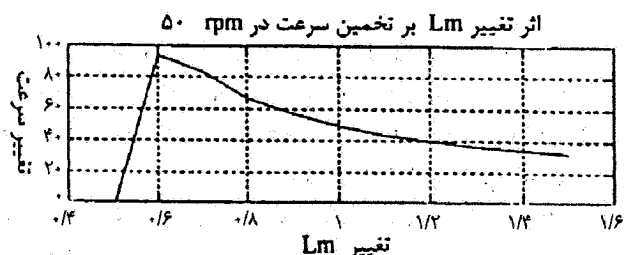
شکل ۱۰- اثر تغییر R_r بر روی تخمینگر سرعت در ۵۰ rpm



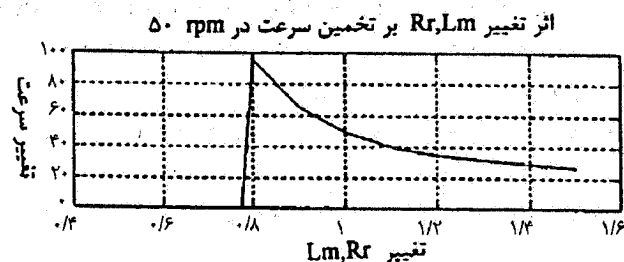
شکل ۹- اثر تغییر R_s بر روی تخمینگر سرعت در ۵۰ rpm



شکل ۱۲- اثر تغییر L_m , R_r بر روی تخمینگر سرعت در ۱۴۲۰ rpm



شکل ۱۱- اثر تغییر L_m بر روی تخمینگر سرعت در ۵۰ rpm



شکل ۱۳- اثر تغییر L_m , R_r بر روی تخمینگر سرعت در ۵۰ rpm

برخوردار است، شکل‌های (۱۲) و (۱۳) اثر تغییر L_m و R_r را با یکدیگر نشان می‌دهند. همان طور که ملاحظه می‌شود، اثر تغییرات L_m نسبت به R_r بیشتر است و تغییرات سرعت تخمینی از دو قسمت نمایی و خطی تشکیل شده است، اثر R_r بیشتر در قسمت خطی قابل ملاحظه است که نسبت به شکل‌های مشابه ناشی از تغییر L_m به تنهایی دارای شیب بیشتری است به طوری که برای تغییرات کمتر از حدود ۷۰٪ تخمینگر ناپایدار شود.

۵- نتیجه گیری

تخمین و کنترل سرعت به روش پیشنهادی دارای دقت مناسبی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که این روش در تغییرات شدید سرعت و گشتاور دارای پایداری و عملکرد دقیقی دارد و در سرعت‌های کم به نحوی مناسبی سرعت موتور را تخمین می‌زند. اثر تغییر پارامترهای R_s و R_r در این روش به صورت تقریباً خطی است و حدود تغییرات سرعت تقریباً مستقل از سرعت مبناست و حتی در سرعت‌های کم نیز تغییرات R_s و R_r باعث ناپایداری موتور و تخمینگر نمی‌شوند. تغییرات L_m به صورت غیر خطی شامل دو قسمت نمایی و خطی روی تخمینگر اثر می‌گذارد و با کاهش

تمام سرعت‌ها قسمت نمایی از ۶۰٪ مقدار نامی شروع می‌شود و هر چقدر سرعت کمتر شود قسمت خطی تغییرات L_m از شیب بیشتری برخوردار خواهد بود.

تغییر سرعت تخمین به ازای تغییرات R_r و R_s تقریباً ۲۰ rpm تا ۳۰ rpm است و مستقل از سرعت مبنای موتور است اما تغییرات سرعت تخمینی نسبت به L_m از تغییرات شدیدتری برخوردار است و هر چقدر سرعت مبنای بیشتر باشد، L_m در قسمت نمایی (بیشتر از ۶۰٪) اثر شدیدتری دارد، اما در قسمت خطی (کمتر از ۶۰٪) هر چقدر سرعت کمتر شود اثر تغییرات L_m بیشتر می‌شود به نحوی که در سرعت ۵۰ rpm تغییر L_m کمتر از ۵۰٪ باعث ناپایداری سیستم کنترلی و تخمینگر می‌شود. با توجه به اینکه تغییرات R_s نسبت به R_r از اهمیت کمتری

پیوست

$$\begin{aligned}R_s &= 0.241\Omega & P_{out} &= 5\text{hp} \\ R &= 0.2849\Omega & V &= 380\text{v} \\ L_m &= 373\text{mh} & P &= 4\text{poles} \\ L_s &= 373\text{mh} & f &= 50\text{HZ} \\ L_v &= 36\text{mh}\end{aligned}$$

سرعت موتور اثر قسمت خطی افزایش و قسمت نمایی کاهش می‌یابد و در سرعت‌های خیلی کم ممکن باعث ناپایداری موتور برای مقادیر کمتر از ۵۰٪ مقدار نامی شود. بنابراین روشن ارائه شده دارای پایداری و دقت مناسبی در سرعت‌های کم و تغییر پارامترهای مختلف است.

مراجع

1. Nakano, H., and Takahashi, I., " Sensorless Field Oriented Control of Induction Motor Using an Instantaneous Slip Frequency Estimation Method," *PESC*, pp. 847-854, 1988.
2. Ohtani, T., Takada, N., and Tanada, K., "Vector Control of Induction Motor Without Shaft," *IEEE IAS Annu. Meet Con. Rec.*, pp 500-507 1989.
3. Scnader," Adaptive Speed Identification for Vector Control of an Induction Motor Without Rotational Transducers, "*IEEE IAS Annu.Meet Conf. Rec.* pp. 493-499, 1989.
4. Zai, L.C., and Lipo, T.A., " An Extended Kalman Filter Approach to Rotor Time Antimeasurement" *IEEE IAS Annual Meet Conf. Rec.*, pp. 177-183, 1987.
5. Atkinson, D.J., Acarnely P.P., and Finch, J.W., "Observer for Induction Motor State and Parameter Estimation," *IEEE Trans. on IAS*, Vol. 27, No. 6, Nov/Dec. 1991.
6. Iwasaki, T., and Kataoka, T., "Application Extended Kalman Filter to Parameter Identification of an Induction Motor, "*IEEE IAS Ann.Meet Conf. Rec*, pp. 177-183, 1987.
7. Dhaouad, R., Mohan N., and Norum, L., " Design and Implementation of an Extended Kalman Filter for the State Estimation of a Permanent Magnet Synchronous motor," *IEEE Tran. on Power Elec.*, Vol. 6, pp. 491-497, july 1991.
8. Henneberrger, G., Brunshbach, B.J., and Klepsch, T.H., "Field Oriented Control of Synchronous and Asynchronous Drive Without Mechanical Sensor Using a Filter, "EPE, Frieenze, PP. 664-671, 1991.
9. Krause, P.C., *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, New York 1989.
10. Kim, Y.R., Sul, S.K., and Park, M.H., "Speed Sensorless Vector Control of an Induction Motor Using an Extended Kalman Filter, "*IEEE Industry Application Society Annual Meeting Conference Record*, 1992.
11. Peng, F.Z., and Fukao, T., "Robust Speed Identification for Speed Sensorless Vector Control of Induction Motors, "*Proceeding of IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, 2-8 oct. 1993.