

تشخیص خطا در سیم پیچی استاتور موتور القایی با استفاده از مشاهده گر مرتبه کسری بهره بالا

فائزه مژدی^۱، احمد حاجی پور^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، f.majdi.hsu@gmail.com
^۲ استادیار، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ahmad.hajipoor@gmail.com

چکیده

وجود خطا در سیستم‌ها منجر به مصرف بیشتر انرژی، افزایش حرارت، افزایش تلفات و کاهش بازده موثر می‌شود. از آنجایی که در محیط‌های صنعتی بیشتر از موتورهای القایی به خاطر ویژگی‌هایی مانند استحکام بالا همراه با ساختار ساده، عملکرد خوب در شرایط مختلف و قابلیت اطمینان بالا استفاده می‌شود، در نتیجه این موتورها بیشتر در معرض تنش‌های الکتریکی و مکانیکی هستند و دچار انواع خرابی‌ها می‌شوند. در نتیجه تشخیص به موقع خطا از هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری و ضررهای اقتصادی ناشی از عدم کارکرد جلوگیری می‌کند. در این مقاله روش پیشنهادی برای تشخیص خطا، طراحی مشاهده گر بهره بالا می‌باشد. مشاهده گر لیونبرگر بصورت غیرخطی و به کمک محاسبات کسری طراحی شده است. سپس پایداری مشاهده گر اثبات شده است. جریان‌های استاتور و سرعت موتور القایی، سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در طراحی می‌باشند. شبیه‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار متلب عملکرد مناسب مشاهده گر لیونبرگر در تشخیص خطا موتور القایی را نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی

موتور القایی، تشخیص خطای استاتور، مشاهده گر مرتبه کسری

مقدمه

با توجه به افزایش تقاضا در قسمت‌های مختلف صنعت، حضور موتور- القایی به عنوان گرداننده چرخ صنعت غیرقابل انکار است. ویژگی‌هایی از قبیل ساختار ساده با استحکام بالا، عملکرد خوب در شرایط مختلف با کنترل آسان، هزینه نگه داری کم با قابلیت اطمینان بالا باعث شده موتورهای القایی، اکثر بارهای صنعتی را تشکیل می‌دهند. اما به دلیل کار در محیط‌های صنعتی در معرض انواع تنش‌های الکتریکی و مکانیکی هستند و در نتیجه دچار انواع خطاها می‌شوند. [۱، ۲]

از جمله خطاهای متداول، می‌توان به خطای اتصال کوتاه در سیم- پیچ استاتور، شکست میله‌های روتور، شکست رینگ‌ها، گریز از مرکز روتور و خطای یاتاقان‌ها اشاره کرد که سبب مصرف بیشتر انرژی،

افزایش حرارت، افزایش تلفات و کاهش بازده موثر در موتور القایی می‌شوند. در نتیجه سرویس، نگهداری و تشخیص به موقع خطا باعث می‌شود که عمر مفید قطعات و اجزای آن‌ها افزایش یابد. [۳، ۴]

تحقیقات نشان می‌دهند در بین خطاهای ذکر شده خطای اتصال کوتاه در سیم پیچ استاتور بخش مهمی از خطاهای الکتریکی موتور القایی را تشکیل می‌دهد، که بدلیل شکست عایقی رخ می‌دهد. [۵] معمولا شکست عایقی به دلیل نامتعادلی در ولتاژ و جریان، نوسانات در گشتاور، رطوبت، استرس مکانیکی و حرارتی ایجاد می‌شود. خطای داخل استاتور با یک اتصال کوتاه کوچک شروع شده و باعث ایجاد گرما و در نهایت منجر به خطای فاز به فاز و یا فاز به زمین می‌شود. گرمای حاصل از این اتصال منجر به تولید گرمای شدید و شکست عایقی، ایجاد جریان گردشی بزرگ در ناحیه اتصال کوتاه شده و در نهایت تخریب کامل استاتور را در پی دارد [۶].

در نتیجه تشخیص به موقع این خطا در مراحل اولیه و تعمیر سیم‌بندی قسمت اتصال کوتاه شده، سلامت طولانی مدت موتور القایی را تضمین کرده و از توقف ناگهانی خط تولید، افزایش هزینه مربوط به تعمیر و کاهش بهره‌وری جلوگیری می‌کند.

اخیرا تحقیقات زیادی برای توسعه روش‌های تشخیص خطا انجام شده است. در زمینه تشخیص خطا در سیم پیچ استاتور روش‌های گوناگون، مبتنی بر متغیرها و پارامترهای موتور شامل گشتاور، توان، امیدانس، جریان، لرزش و تخلیه الکتریکی [۷] و یا مبتنی بر متغیرها و پارامترهای الکتریکی مانند تحلیل طیف جریان موتور و امیدانس توالی [۸] و یا روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی [۹، ۱۰] استفاده می‌شود.

معمولا برای پیاده‌سازی خطا از مدل سیستم استفاده می‌کنند. (مانند استفاده از مشاهده‌گرها). مرسوم ترین روش جهت تخمین همزمان پارامترها و متغیرهای حالت، روش طراحی فیلترهای غیرخطی است. در [۷] پارامترها و متغیرهای حالت موتور القایی با هدف شناسایی تغییرات در پارامترها به دلیل بروز خطا، با استفاده از

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} D^\alpha i_{qs} \\ D^\alpha i_{ds} \\ D^\alpha \lambda_{qr} \\ D^\alpha \lambda_{dr} \\ D^\alpha \omega_r \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r}{L_\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{L_m R_r}{L_\sigma L_r^2} & \frac{L_m}{L_\sigma L_r} n_p \omega_r & 0 \\ 0 & -\left(\frac{R_s}{L_\sigma} + \frac{L_m^2 R_r}{L_\sigma L_r}\right) & -\frac{L_m}{L_\sigma L_r} n_p \omega_r & \frac{L_m R_r}{L_\sigma L_r^2} & 0 \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & \frac{R_r}{L_r} & -n_p \omega_r & 0 \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -\frac{R_r}{L_r} & -n_p \omega_r & 0 \\ -\frac{2n_p L_m}{3J} \lambda_{dr} & -\frac{2n_p L_m}{3J} \lambda_{qr} & n_p \omega_r & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} T_L \\
 \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \\ \omega_r \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

در رابطه بالا i_{qs} ، i_{ds} به ترتیب جریانهای استاتور و λ_{qr} ، λ_{dr} به ترتیب شارهای روتور در مرجع dq ایستا هستند. $L_\sigma(L_r)$ اندوکتانس خودی استاتور (روتور)، L_m اندوکتانس متقابل استاتور و روتور می‌باشند. مقدار L_σ از رابطه $L_\sigma = \sigma L_\Sigma$ بدست می‌آید و مقدار σ از رابطه (۱) محاسبه خواهد شد.

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_\Sigma L_r} \quad (1)$$

۳- مشاهده گر لیونبرگر غیرخطی مرتبه کسری [۲۰]

سیستم غیرخطی مرتبه کسری زیر را در نظر می‌گیریم:

$$\begin{aligned}
 D^\alpha x &= A x + B u(t) + f_{nl}(x, u) \\
 y &= C x + D u(t)
 \end{aligned} \quad (2)$$

D^α مشتق کسری کاپوتو، α نشانگر درجه تناسب کسری است، x بردار حالت، y بردار خروجی‌های اندازه‌گیری شده سیستم A ، B ، C ماتریس واقعی ثابتی هستند که با توجه به معادلات اصلی سیستم بدست آمده‌اند. $f_{nl}(x, u)$ بردار غیرخطی مداومی است که در ناحیه D به صورت محلی لپشیتز است یعنی برای همه x_1 و x_2 ثابت مثبت Y وجود دارد طوری که:

$$\|f(x_1) - f(x_2)\| \leq Y \|x_1 - x_2\| \quad (3)$$

فیلترهای غیرخطی تخمین زده شده‌اند. در [۱۱] از مشاهده گر لیونبرگر که پایداری آن به کمک شرط لپشیتز اثبات شده است، جهت تشخیص خطا استفاده شده است. در [۱۲] مشاهده گر لیونبرگر که نسبت به نویز در سیستم مقاوم بوده است، با فرض اغتشاش در سیستم طراحی شده است. در [۱۳] با استفاده از مشاهده گر تطبیقی که تحت شرایط لپشیتز بدست آمده، تشخیص و تخمین عیب پارامترها در سیستم‌های غیرخطی بررسی شده است. در [۸] جهت عیب‌یابی در سیستم‌های کنترلی، کاربرد مشاهده گر لیونبرگر به صورت تئوری بررسی شده است و روابط و قضایای مربوط به این روش بیان شده است.

با توجه به اینکه مدلسازی دقیق سیستم‌ها به دلیل طبیعت غیرخطی و تغییرپذیر با زمان بسیار مشکل است، اخیراً در بیشتر زمینه‌های تئوری کنترل، عملگر مشتق و انتگرال کسری که مفهومی جدید از مشتق و انتگرال از مرتبه دلخواه هستند برای مدلسازی بسیاری از سیستم‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. چرا که محاسبات کسری به خوبی می‌تواند حافظه و ویژگی‌های ذاتی سیستم را توصیف کند و در نتیجه محاسبات کسری مدل دقیق‌تری از سیستم ارائه می‌دهند. در [۱۴] مزیت مشاهده گر مرتبه کسری نسبت به مشاهده گر مرتبه صحیح بررسی شده است. در [۱۵، ۱۶] برای سیستم‌های مرتبه کسری غیرخطی لپشیتز، مشاهده گرهای مرتبه کامل و کاهش یافته ارائه شده است. در [۱۷، ۱۸] برای سیستم‌های مرتبه کسری، شرایط کافی برای ثبات کنترل‌کننده‌ها بر اساس مشاهده گر بررسی شده است. در [۱۹] برای سیستم‌های مرتبه کسری با استفاده از LMI مشاهده گر غیرخطی طراحی شده است.

هدف این مقاله تشخیص خطا در سیم‌پیچی استاتور موتور القایی به کمک مشاهده گر لیونبرگر است، که باعث کاهش تاخیر فاز و بهبود عملکرد عملگرها می‌شود. همچنین به خاطر دقت و انعطاف‌پذیری بیشتر مشاهده گر با مدل واقعی و ماهیت غیرخطی سیستم، مشاهده گر لیونبرگر به صورت غیرخطی و با استفاده از محاسبات کسری طراحی می‌شود.

ادامه مقاله بصورت زیر بخش بندی می‌شود.

در بخش ۲ مدل دینامیکی موتور القایی معرفی می‌شود. در بخش ۳ مشاهده گر لیونبرگر غیرخطی مرتبه کسری معرفی شده و اثبات شرایط پایداری مشاهده گر بیان شده است. در بخش ۴ مشاهده گر پیشنهادی برای موتور القایی طراحی شده سپس در نتایج حاصل از شبیه سازی بررسی می‌شود و آخرین بخش شامل نتیجه‌گیری است.

۲- مدل دینامیکی موتور القایی

با توجه به [۱۸] مدل دینامیکی موتور القایی در مرجع dq معرفی شده است:

۳- در صورتی که ماتریس A یک ماتریس هرویتز با مقادیر ویژه مختلف باشد، $(\lambda_i(A) \neq \lambda_j(A))$ تبدیل خطی V به گونه‌ای وجود دارد که

$$D = V^{-1}AV = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

و در آن ماتریس V به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V := \begin{pmatrix} 1 & \lambda_1 & \dots & \lambda_1^{n-1} \\ 1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_2^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \lambda_n & \dots & \lambda_n^{n-1} \end{pmatrix}$$

۴- p یک ماتریس جایگشت است، که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 0 \end{pmatrix}$$

در صورتی که مشاهده گر پیشنهادی به سیستم اعمال شود خطای تخمین حالت‌های سیستم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$e = x - \hat{x} \quad (7)$$

با مشتق گیری از آن خواهیم داشت:

$$D^\alpha e = D^\alpha x - D^\alpha \hat{x}$$

$$D^\alpha e = (A - LC) e - (f_{nl}(\hat{x}, u) - f_{nl}(x, u))$$

$$D^\alpha e = \bar{A} e - (f_{nl}(\hat{x}, x, u)) \quad (8)$$

با استفاده ماتریس‌های V و P خواهیم داشت:

$$e_v = P V e \\ e = P V^{-1} e_v$$

رابطه (۸) را می‌توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$D^\alpha e_v = P V D^\alpha e = V P \bar{A} P V^{-1} e_v - V P f_{nl}(\hat{x}, x, u) \\ = D e_v - \bar{B} f_{nl}(\hat{x}, x, u) \quad (9)$$

که $\bar{B} = (1 \dots 1)^T \in R^n$ ، ازین رو خواهیم داشت:

$$D^\alpha e_{v_i} = \lambda_i e_{v_i} - f_{nl}(\hat{x}, x, u) \quad (10)$$

از طرفی داریم:

$$e_{v_i} = e_{v_i,0} E_{\alpha,1}(\lambda_i D^\alpha t) - \int_0^t (t-\tau)^{\alpha-1} E_{\alpha,\alpha}(\lambda_i (t-\tau)^\alpha) f_{nl}(\hat{x}, x, u) d\tau$$

با توجه به رابطه دوم و از آنجایی که $f_{nl}(0)$ محدود است، یعنی:

همانطور که گفته شد هدف از طراحی رویتر رسیدن مقدار تخمین متغیرهای فضای حالت به مقدار واقعی است. در صورتی که تفاوت میان مقدار تخمین زده شده و مقدار واقعی از مقدار از پیش تعیین شده بیشتر باشد، خطا رخ داده است. مشاهده گر طراحی شده جهت تشخیص خطا، مشاهده گر لیونبرگر است چرا که باعث کاهش تاخیر فاز و بهبود عملکرد عملگرها می‌شود.

معادله فضای حالت مشاهده گر لیونبرگر غیرخطی مرتبه کسری برای سیستم (۲) بصورت زیر است:

$$D^\alpha \hat{x} = A \hat{x} + B u(t) + f_{nl}(\hat{x}, u) + k (y - \hat{y}) \quad (4) \\ \hat{y} = C \hat{x} + D u(t)$$

که در آن بردار تخمین زده شده از متغیرهای حالت سیستم می‌باشند، A, C ماتریس‌های ثابت، y بردار خروجی سیستم، \hat{y} تخمین بردار خروجی و L ماتریس بهره مشاهده گر با فرض اینکه $\bar{A} = (A - LC)$ یک ماتریس هرویتز است و $\lambda_i(\bar{A}) \neq \lambda_j(\bar{A})$ و $i \geq 1, j \leq n, i \neq j$ می‌باشد.

بررسی پایداری مشاهده گر لیونبرگر غیرخطی مرتبه کسری: برای اثبات پایداری مشاهده گر مرتبه کسری از اصول زیر استفاده شده است:

۱- در طراحی مشاهده گر از تعریف مشتق کسری کاپوتو می‌شود. مشتق کسری کاپوتو به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$D^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-\alpha)} \int_0^t \frac{df(\tau)/d\tau}{(t-\tau)^{\alpha-n+1}} d\tau \quad (5) \\ , n-1 < \alpha < n$$

که $n \in \mathbb{N}$ و $\alpha \in R^+$ و $\Gamma(0)$ تابع گاما که از مهم‌ترین توابع در زمینه حساب کسری است که با عمومیت بخشیدن به تابع فاکتوریل باعث می‌شود n هر مقدار دلخواه از جمله مقادیر غیر صحیح و مقادیر مختلط را شامل شود. تابع گاما با توجه به رابطه (۶) تعریف می‌شود.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty e^{-t} t^{z-1} dt \quad (6)$$

۲- خروجی y و مشتقات کسری آن محدود است، یعنی

$$\exists M_i \in R^+$$

به گونه ای که

$$\|D^\alpha x_i\| \leq M_i$$

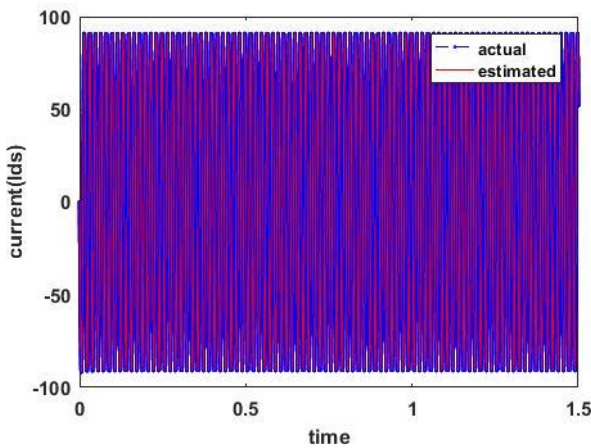
$$f_{nl}(x(t)) = \begin{bmatrix} -\frac{L_m}{L_\sigma L_r} n_p x_5(t) x_4(t) \\ \frac{L_m}{L_\sigma L_r} n_p x_5(t) x_3(t) \\ n_p x_5(t) x_4(t) \\ -n_p x_5(t) x_3(t) \\ \frac{3 n_p L_m}{2 J L_r} (x_4(t) x_1(t) - x_3(t) x_2(t)) \end{bmatrix}$$

شبيهه‌سازی در نرم‌افزار متلب بر روی یک موتور القایی با پارامترهایی که در جدول ۱ آورده شده است، انجام شد.

جدول ۱ پارامترهای موتور القایی

$R_s(\text{ohm})$	۲/۲۸۳
$R_r(\text{ohm})$	۲/۱۳۳
$L_s(\text{mh})$	۰/۲۳۱۱
$L_r(\text{mh})$	۰/۲۳۱۱
$L_m(\text{mh})$	۰/۲۲
n_p	۲
J	۰/۰۰۶
f_{rated}	۵۰

شکل‌های (۱) تا (۳) تخمین جریان استاتور و سرعت موتور توسط مشاهده گر لیونبرگر غیرخطی مرتبه کسری را نشان می‌دهند. واضح است که مشاهده گر مرتبه کسری توانسته متغیرهای حالت سیستم را پس از حالت گذرا بخوبی تخمین بزند



شکل ۱ تخمین جریان d توسط مشاهده گر لیونبرگر مرتبه کسری

$$\|f_{nl}(0)\| \leq N$$

خواهیم داشت:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |e_{v_i}(t)| \leq |e_{v_i}(t)| \lim_{t \rightarrow \infty} E_{\alpha,1}(\lambda_i t^\alpha) + N \lim_{t \rightarrow \infty} t^\alpha E_{\alpha,\alpha+1}(\lambda_i t^\alpha) = -\frac{N}{\lambda_i}$$

از آنجایی که:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e_V(t)\|_\infty \leq N \max \left\{ \left| \frac{1}{\lambda_1} \right|, \dots, \left| \frac{1}{\lambda_n} \right| \right\}$$

پس

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e\|_\infty \leq N \|PV^{-1}\|_\infty \max \left\{ \left| \frac{1}{\lambda_1} \right|, \dots, \left| \frac{1}{\lambda_n} \right| \right\}$$

در نتیجه مشاهده گر ورودی ناشناخته غیرخطی مرتبه کسری پایدار می‌باشد.

۴- طراحی مشاهده گر ورودی ناشناخته غیرخطی مرتبه کسری برای موتور القایی

هدف این قسمت طراحی مشاهده گر پیشنهادی برای موتور القایی است. در ابتدا قسمت خطی و غیر خطی موتور باید از هم جدا شوند. معادلات حالت مدل دینامیکی غیرخطی موتور القایی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$D^\alpha x(t) = A_M x(t) + B_M u(t) + f_{nl}(x(t))$$

$$y = C x(t)$$

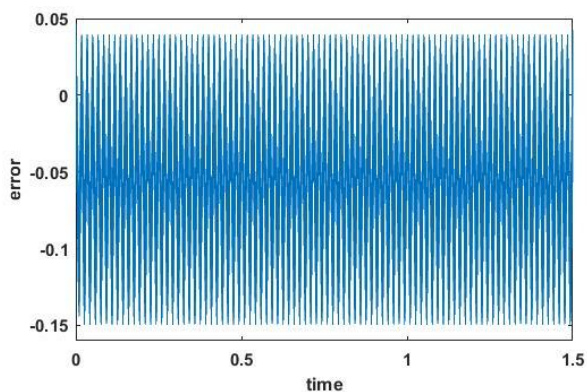
$$x(t) = [i_{qs} \quad i_{ds} \quad \lambda_{qr} \quad \lambda_{dr} \quad \omega_r]^T$$

ماتریس‌های A_M ، B_M ، $f_{nl}(x(t))$ از روابط (۴) تا (۶)

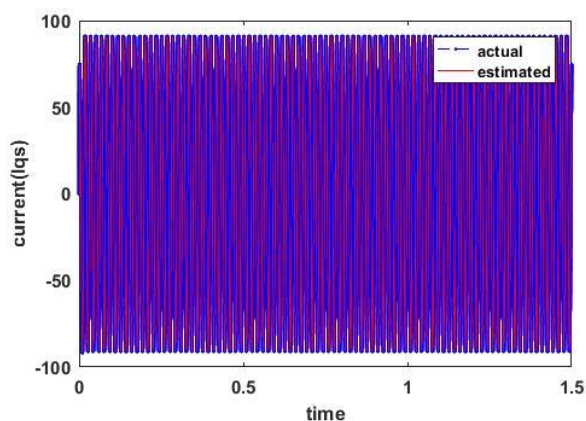
بدست می‌آیند.

$$A_M = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s + L_m^2 R_r}{L_\sigma + L_\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{L_m R_r}{L_\sigma L_r^2} & 0 & 0 \\ 0 & -\left(\frac{R_s + L_m^2 R_r}{L_\sigma + L_\sigma L_r}\right) & 0 & \frac{L_m R_r}{L_\sigma L_r^2} & 0 \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

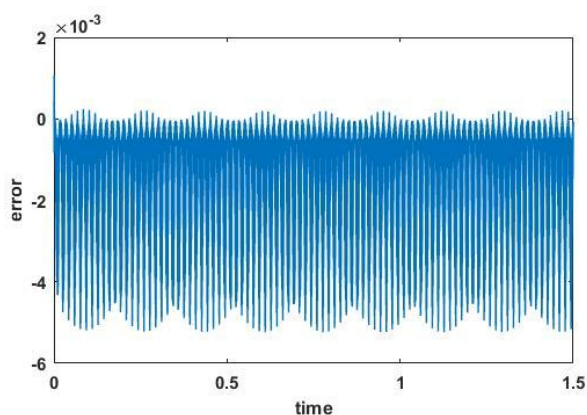
$$B_M = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$



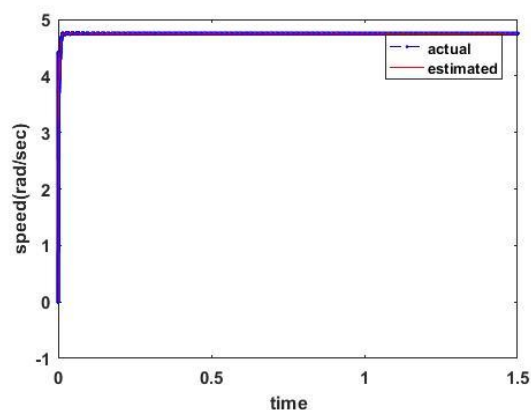
شکل ۵ باقیمانده مربوط به جریان q استاتور



شکل ۶ تخمین جریان q توسط مشاهده گر لیونبرگر مرتبه کسری



شکل ۷ باقیمانده مربوط به سرعت موتور



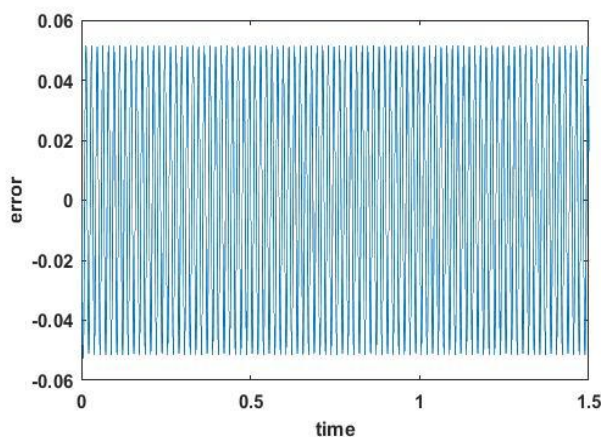
شکل ۸ تخمین سرعت موتور توسط مشاهده گر لیونبرگر مرتبه کسری

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید برای تشخیص خطا در سیم پیچی موتور- القایی با استفاده از مدل سیستم ارائه شده است. مشاهده گر پیشنهادی، مشاهده گر لیونبرگر است که باعث کاهش تاخیر فاز و بهبود عملکرد عملگرها می شود. از آنجایی که مدل دینامیکی موتور بصورت غیرخطی است، و به منظور داشتن دقت بالا و انعطاف پذیری بیشتر مشاهده گر با سیستم، مشاهده گر مذکور بصورت غیرخطی و با استفاده از محاسبات کسری طراحی شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مشاهده گر پیشنهادی می تواند بخوبی وجود خطا در سیم پیچ استاتور را تشخیص دهد.

مراجع و منابع

- [1] M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, and G.-A. Capolino, "Advances in electrical machine, power electronic, and drive condition monitoring and fault detection: state of the art," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 1746-1759, 2014.
- [2] P. Zhang, Y. Du, T. G. Habetler, and B. Lu, "A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors," *IEEE Transactions on*



شکل ۹ باقیمانده مربوط به جریان d استاتور

- nonlinear systems using observers," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 342, pp. 725-736, 2005.
- [14] Y. Chen, H.-S. Ahn, and I. Podlubny, "Robust stability check of fractional order linear time invariant systems with interval uncertainties," in *IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005*, 2005, pp. 210-215-
- [15] D.-Y. Liu and T.-M. Laleg-Kirati, "Robust fractional order differentiators using generalized modulating functions method," *Signal Processing*, vol. 107, pp. 395-406, 2015.
- [16] I. N'Doye and T.-M. Laleg-Kirati, "Fractional-order adaptive fault estimation for a class of nonlinear fractional-order systems," in *2015 American Control Conference (ACC)*, 2015, pp. 3804-3809.
- [17] Y.-H. Lan and Y. Zhou, "Non-fragile observer-based robust control for a class of fractional-order nonlinear systems," *Systems & Control Letters*, vol. 62, pp. 1143-1150, 2013.
- [18] I. B. A. Bazine, S. Tnani, T. Poinot, G. Champenois, and K. Jelassi, "On-line detection of stator and rotor faults occurring in induction machine diagnosis by parameters estimation," in *8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics & Drives*, 2011, pp. 105-112.
- [19] L. M. R. Baccharini, B. R. de Menezes, and W. M. Caminhas, "Fault induction dynamic model, suitable for computer simulation: Simulation results and experimental validation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, pp. 300-311, 2010.
- [20] R. Martínez-Guerra and C. A. Pérez-Pinacho, "Estimators for a Class of Commensurate Fractional-Order Systems with Caputo Derivative," in *Advances in Synchronization of Coupled Fractional Order Systems*, ed: Springer, 2018, pp. 71-83.
- Industry Applications*, vol. 47, pp. 34-46, 2010.
- [3] D. Campos-Delgado, D. Espinoza-Trejo, and E. Palacios, "Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, pp. 121-134, 2008.
- [4] A. Bellini, F. Filippetti, C. Tassoni, and G.-A. Capolino, "Advances in diagnostic techniques for induction machines," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 55, pp. 4109-4126, 2008.
- [5] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, pp. 719 ,729-.2005
- [6] A. Gandhi, T. Corrigan, and L. Parsa, "Recent advances in modeling and online detection of stator interturn faults in electrical motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1564-1575, 2010.
- [7] H. Abdallah and K. Benatman, "Stator winding inter-turn short-circuit detection in induction motors by parameter identification," *IET Electric Power Applications*, vol. 11, pp. 272-288, 2017.
- [8] A. Siddique, G. Yadava, and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 20, pp. 106-114, 2005.
- [9] R. M. Tallam, S. B. Lee, G. C. Stone, G. B. Kliman, J. Yoo, T. G. Habetler, *et al.*, "A survey of methods for detection of stator-related faults in induction machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, pp. 920-933, 2007.
- [10] P. Ewert, "Application of Neural Networks and Axial Flux for the Detection of Stator and Rotor Faults of an Induction Motor," *Power Electronics and Drives*, vol. 1, 201.9
- [11] H. Khan, S. C. Abou, and N. Sepehri, "Nonlinear observer-based fault detection technique for electro-hydraulic servo-positioning systems," *Mechatronics*, vol. 15, pp. 1037-1059, 2005.
- [12] G. Besançon, "High-gain observation with disturbance attenuation and application to robust fault detection," *Automatica*, vol. 39, pp. 1095-1102, 2003.
- [13] B. Jiang and F. N. Chowdhury, "Parameter fault detection and estimation of a class of