



جداسازی شاخص خطای عدم تقارن رتور در ماشین‌های القایی از طریق قاب مرجع چرخان مبتنی بر تابع علامت و الگوریتم گورتزل

محمد حسین تبارمرزبالی^{۱*}

^۱ استادیار دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، شاهرود

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۱۴؛ تاریخ بازنگری: -/-؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۶

چکیده

تشخیص خطای عدم تقارن در ماشین‌های القایی بر اساس جریان استاتور به جهت حضور نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار منجر به هشدارهای نادرست می‌شود؛ در نتیجه جداسازی عدم تقارن رتور از نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار می‌تواند عملکرد سیستم پایش وضعیت را بهبود بخشد. روش‌هایی که در گذشته ارائه شده است، عموماً به جریان‌های سه فاز و در برخی روش‌ها به ولتاژهای سه فاز و سرعت گردش رتور نیازمند است. در این مقاله، روشی جدید بر اساس داده‌های یک فاز ماشین ارائه شده است. در این رابطه، قاب مرجع چرخان مجازی مبتنی بر تبدیل هیلبرت ارائه شده است که به فرکانس منبع ورودی نیازی ندارد. برای بهبود وضوح طیف خروجی و کاهش محاسبات، روش ارائه شده با روش گورتزل ترکیب شده است. روش ارائه شده به وسیله‌ی داده‌های خودساخته و همچنین داده‌های عملی مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که این روش مشخصه‌ی خطای عدم تقارن را از مشخصه‌ی نوسانات فرکانس پایین رتور به خوبی جدا می‌کند.

کلمات کلیدی: تشخیص خطا؛ ماشین‌های القایی؛ خطای عدم تقارن رتور؛ پایش وضعیت.

Isolation of Rotor Asymmetry Fault in Induction Machines through Sign-based Rotating Reference Frame and Generalized Goertzel Algorithm

M. Hoseintabar-Marzabali¹

¹ Assist. Prof., Elec. Eng., Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran

Abstract

Detection of rotor asymmetry faults (RAFs) in induction machines (IMs) based on stator current signature of machine due to the presence of low-frequency load torque oscillation (LTOs) can cause false alarm (FM). Therefore, isolating the RAFs from the LTOs can improve the condition-based monitoring system. The methods discussed in the past generally require three-phase current and voltage of stator windings information along with machine angular velocity. In this paper, a new method based on single phase machine data is presented. In this regard, a virtual rotating reference frame based on Hilbert transform is provided which do not need the supply frequency of machine. In order to improve the output spectrum resolution and low computational cost, the proposed method is combined with the Gortzel algorithm. The proposed method is tested and evaluated by synthetic data and then evaluated by means of experimental results. The results show that this method can isolate the RAFs indices from LTOs, effectively.

Keywords: Fault diagnosis; Induction machine; Rotor asymmetry fault; Condition monitoring.

۱- مقدمه

ماشین های القایی در بسیاری از کاربردهای صنعتی مانند سیستم های کششی و توربین های بادی مورد استفاده قرار گرفته اند [۱] و [۲]. از آنجائیکه این ماشین ها اغلب در مناطق دور افتاده و در شرایط سخت جغرافیایی مورد استفاده قرار می گیرند، نیاز به نظارت بر وضعیت آنها امری ضروری و اجتناب ناپذیر است [۳]. ماشین القایی رتور سیم پیچی شده و ماشین های القایی قفس سنجایی به دلیل ساختار رتور با خطاهای مختلف الکتریکی و مکانیکی مواجه خواهند بود [۴] و [۵]. بخش عمده عیوب ماشین های القایی مربوط به خطای عدم تقارن رتور است که بصورت اتصال حلقه به حلقه در ماشین های القایی رتور سیم پیچی شده و میله شکسته در ماشین های القایی قفس سنجایی نمود پیدا می کند. تشخیص و تعمیر برنامه ریزی شده، هزینه های بهره برداری از این ماشین ها را کاهش داده و از خرابی ناخواسته جلوگیری می کند [۶].

روش های مختلفی برای پایش وضعیت ماشین های الکتریکی با استفاده از سیگنال های الکتریکی و مکانیکی به دست آمده از حسگرهای الکتریکی و مکانیکی در سال های اخیر پیشنهاد شده است [۷] و [۸]. در میان آنها، تجزیه و تحلیل جریان الکتریکی استاتور ماشین (MCSA) به دلیل مقرون به صرفه بودن و سادگی آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۹] و [۱۰].

تشخیص عدم تقارن در مدار رتور در ماشین های القایی رتور سیم پیچی شده به دلیل نوسانات گشتاور فرکانس پایین دشوار است، به طوری که نوسانات گشتاور فرکانس پایین باعث ایجاد هشدارهای نادرست خطای عدم تقارن رتور می شوند [۱۱]. به عبارت دیگر فرکانس مشخصه ناشی از خطای عدم تقارن رتور به مشخصه نوسانات گشتاور فرکانس پایین نزدیک است، بنابراین همپوشانی این دو مشخصه منجر به هشدارهای نادرست خواهد شد. در این راستا روش های مختلفی برای تفکیک این دو ویژگی ارائه شده است تا هشدارهای غیر ضروری حذف شوند. تشخیص خطاهای میله رتور شکسته از نوسانات گشتاور فرکانس پایین در محرکه های ماشین های القایی گشتاور مستقیم (DTC) در مرجع [۱۱] ارائه شده است که در آن محورهای dq ولتاژها و جریان های استاتور سه فاز برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته است.

به طور کلی، برای تشخیص خطای عدم تقارن رتور در جریان استاتور، دامنه های شاخص های مشخصه خطا که به عنوان فرکانس های باند جانبی در اطراف فرکانس منبع تغذیه - ی موتور ظاهر می شوند، ارزیابی می شوند [۱۲] و [۱۳]. از آنجائیکه امکان ایجاد هشدارهای کاذب با حضور نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار وجود دارد، فرکانس های مبنای $(2-3s)$ و $(4-3s)$ در جریان استاتور و طیف ولتاژ توالی صفر ماشین های القایی به عنوان شاخص خطای عدم تقارن معرفی شده اند (s: لغزش و f: فرکانس تغذیه). اشکال اصلی این روش این است که به دلیل اندازه ای اینرسی ماشین، دامنه های هارمونیک های بالاتر شاخص های خطا در جریان استاتور به طور قابل توجهی کاهش می یابند. برخی از روش ها از جریان و ولتاژ سه فاز استاتور برای جداسازی شاخص های عدم تقارن رتور از نوسانات فرکانس پایین گشتاور استفاده می کنند [۱۴]. در این راستا از توالی های مثبت و منفی جریان استاتور استفاده شده است. نشان داده شده است که در جریان محور d قاب مرجع دوآر، فرکانس مشخصه عدم تقارن از نوسانات فرکانس پایین گشتاور جدا شده است. اشکال اصلی این روش مربوط به وابستگی به فرکانس منبع تغذیه و حسگرهای جریان سه فاز است که هزینه سیستم اندازه گیری را افزایش می دهد. روشی مبتنی بر تجزیه و تحلیل شار فاصله ای هوایی از طریق ولتاژ سیم پیچ جستجوگر در هنگام راه اندازی برای طبقه بندی عدم تقارن رتور و نوسانات فرکانس پایین گشتاور معرفی شد. این روش نیاز به سیم پیچ های جستجوگر شار شکاف هوایی داخلی دارد که پیاده سازی این روش را پیچیده می کند [۱۵] و [۱۶]. اثرات توان اکتیو و راکتیو لحظه ای برای تشخیص میله های شکسته ی رتور از نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار مکانیکی در ماشین القایی سه فاز معرفی شد. این روش نیاز به اطلاعات ولتاژها و جریان های سه فاز استاتور ماشین القایی دارد در نتیجه استفاده از این روش پیچیده و پرهزینه خواهد بود [۱۷]. یکی از اهداف عیب یابی در ماشین های الکتریکی، تشخیص عیب در کوتاه ترین زمان ممکن با کمترین حجم محاسبات است. برای کاهش حجم محاسباتی، محاسبه طیف در یک باند کوچک از کل محدوده از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. برخی از روش های مورد استفاده مانند Pruned-FFT و ZFFT به دلیل ویژگی های تقسیم پذیری تعداد سبدهای فرکانسی و طول سیگنال نمی توانند رفتار صحیح شاخص های خطا را در

به جهت حضور جعبه‌دنده و یا اجزای کاهنده‌ی سرعت در پیش‌راشه ماشین القایی رخ می‌دهد. نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار بر روی سرعت چرخشی ماشین و به تبع آن جریان فاز ماشین به علت تغییر بر شکل شار فاصله هوایی اثر می‌گذارد. به بیان دیگر نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار به صورت تغییرات سینوسی فاز همانطور که در رابطه (۱) نشان داده شده است، در فرکانس‌های نزدیک به مشخصه‌ی نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار نمایان می‌شود. در این راستا β و f_{LTO} به ترتیب شدت نوسانات گشتاور بار و نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار است.

۲-۲- قاب مرجع ایستای $\alpha\beta$ بر اساس تبدیل هیلبرت و داده‌های یک فاز

تبدیل هیلبرت یک تابع دلخواه، پیچش دو تابع است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(g(t)) = g(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(t-\tau)}{\tau} d\tau. \quad (2)$$

با در نظر گرفتن تبدیل فوریه توابع $1/\pi t$ و $g(t)$ به ترتیب به صورت $-j \times \text{sgn}(f)$ و $G(f)$ ، تبدیل فوریه‌ی هیلبرت تابع مذکور $FT(H(g(t)))$ را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$FT(H(g(t))) = -j \text{sgn}(f) G(f) \quad (3)$$

توصیف تبدیل فوریه در حوزه فرکانس نتایج جذابی را ارائه می‌دهد. تبدیل هیلبرت یک تابع در حوزه فرکانس نشان می‌دهد که دامنه تابع تغییر نمی‌کند، در حالی که فاز به اندازه‌ی $\pm 90^\circ$ درجه بر مبنای علامت فرکانس تغییر می‌کند. اگر فرکانس بزرگتر از صفر باشد، اندازه فاز به مقدار $+90^\circ$ درجه پیش می‌افتد، در حالی که اگر فرکانس منفی باشد، مقدار فاز به اندازه‌ی -90° درجه عقب می‌افتد. در این مقاله یک قاب مرجع مجازی ارائه شده است که از یک و تنها یک فاز جریان ماشین القایی منتج شده است (۴). بر اساس قاب مرجع ایستای ارائه شده سیگنال زمانی را می‌توان به دو سیگنال که 90° درجه از منظر فاز از یکدیگر مجزا شده‌اند، تبدیل کرد. برای این

طیف باند کوچک مورد علاقه نشان دهند [۱۰] و [۱۸]. در این راستا از الگوریتم گورتزل تعمیم یافته (GGA) برای این منظور برای کاهش هزینه محاسباتی داده‌های ورودی واقعی استفاده شده است. تحقیقات قبلی نشان می‌دهد که GGA در تشخیص شاخص‌های خطا در مقایسه با تبدیل $\text{chirp } z$ (CZT) و تبدیل فوریه سریع اولویت دارد.

در این مقاله، ترکیب یک روش جدید مبتنی بر داده‌های یک فاز جریان استاتور به کمک قاب مرجع چرخان مجازی به همراه روش گورتزل پیشنهاد شده است. بر اساس روش پیشنهادی، می‌توان فرکانس ویژگی‌های عدم تقارن رتور را از نوسانات فرکانس پایین بار با وضوح طیفی بالا و حجم محاسباتی کم تفکیک کرد.

۲- توصیف روش پیشنهادی

۲-۱- سیگنال خودساخته با در نظر گرفتن اثرات خطای

عدم تقارن رتور و نوسانات فرکانس پایین بار

سیگنال خودساخته جریان استاتور که می‌تواند به سادگی رفتار عدم تقارن بار و نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار را توصیف نماید را می‌توان در جریان استاتور ماشین القایی به صورت زیر توصیف نمود:

$$i_{s_RAF_LTO}(t) = I_s \cos(2\pi f_s t) + \frac{\gamma}{\gamma} I_s \cos(2\pi f_s (1-\gamma_s)t) + \frac{\gamma}{\gamma} I_s \cos(2\pi f_s (1+\gamma_s)t) + I_r \cos(\omega_r t + \beta \sin(2\pi f_{LTO} t)), \quad (1)$$

همان طور که در مقالات گذشته گزارش شده است، عدم تقارن رتور منجر به مدولاسیون دامنه در جریان استاتور ماشین القایی می‌شود که در سیگنال خودساخته بوسیله‌ی ضرب یک تابع سینوسی با فرکانس مشخصه‌ی خطای عدم تقارن f_{RAF} با شدت γ در تابع سینوسی تغذیه با فرکانس f_s و دامنه‌ی I_s مدل شده است. با بسط دادن سیگنال خودساخته، سه عبارت سینوسی اول رابطه (۱) بدست می‌آیند که به صورت نوارهای جانبی خطای عدم تقارن در کنار فرکانس تغذیه به خوبی قابل مشاهده است؛ همچنین در این رابطه s مقدار لغزش ماشین القایی است.

عدم تقارن رتور به جهت دلایل متفاوتی همچون شکستگی میله، اتصالات با مقاومت بالا و خطای اتصال کوتاه حلقه به حلقه رخ می‌دهد؛ همچنین نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار

روش ارائه شده می‌تواند مشخصه‌ی خطای عدم تقارن را از مشخصه‌ی نوسانات فرکانس پایین گشتاور به کمک جریان‌های محورهای i_d و i_q داده شده در رابطه‌ی (۷) جدا نماید. روش ارائه شده به اطلاعات مربوط به سرعت چرخش ماشین نیاز ندارد، از آنجائیکه توابع علامت را به راحتی می‌توان به کمک عملگر ریاضی محاسبه کرد؛ در نتیجه روش ارائه شده ویژگی‌های منحصربفردی در قیاس با روش‌های گذشته دارد. برای اثبات و ساده‌سازی رابطه (۵) کافی است که هارمونیک اول مربوط به هر تابع علامت در نظر گرفته شود و سپس به کمک ماتریس ارائه شده به راحتی می‌توان به معادلات ساده شده داده شده در رابطه‌های (۶) و (۷) رسید.

۲-۴- الگوریتم گورتزل تعمیم یافته^۱

در جریان استاتور دم‌دوله شده‌ی محورهای dq ارائه شده به کمک روش این مقاله، خطای مشخصه‌ی عدم تقارن در اطراف جزء DC طیف جریان استاتور ظاهر می‌شود. از آنجائیکه مشخصه‌ی فرکانسی خطای عدم تقارن رتور به صورت نوارهای جانبی در اطراف فرکانس تغذیه بصورت $(1 \pm 2ks)f_s$ ظاهر می‌شود، مشخصه‌ی خطا در جریان دم‌دوله شده i_d در فرکانسی برابر $2ksf_s$ قابل مشاهده است. با توجه به اینکه سرعت ماشین القایی متصل به شبکه در مد کاری بی باری ($s=0$) تا بار کامل ($s=s_n$) تغییر می‌کند، محدوده‌ی فرکانسی شاخص خطای عدم تقارن در بازه‌ی $[0, 2s_n f_s]$ خواهد بود. لازم به ذکر است که تبدیل فوریه سریع اندازه‌ی همه‌ی فرکانس‌های در دسترس در کل محدوده‌ی $[0, f_s/2]$ جایی که $(f_s \gg 2s_n f_s)$ بدست می‌دهد. به بیان دیگر تبدیل فوریه سریع اطلاعات طیفی بیش از حد درشتی ارائه می‌دهد؛ در نتیجه روشی که بتواند همانند الگوریتم گورتزل تعمیم یافته در فرکانسی خاص یا در محدوده‌ای خاص باند فرکانسی مقدار اندازه‌ی هارمونیک محاسبه نماید بسیار جذاب خواهد بود. تبدیل فوریه‌ی زمان-فرکانس گسسته را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\hat{i}(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} i[n]e^{-j\omega n}, \quad (8)$$

منظور از سیگنال زمانی فاز (i_a) و همچنین تبدیل هیلبرت آن برای تبدیل یک فاز به قاب مرجع ایستای $\alpha\beta$ استفاده شده است.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ H(i_a) \end{bmatrix} \quad (4)$$

۲-۳- قاب مرجع مجازی چرخان dq مبتنی بر تابع علامت

واضح است که بر اساس قابل مرجع ایستای معرفی شده، مشخصه‌های نوسانات فرکانس پایین گشتاور و عدم تقارن رتور را می‌توان در هر دو محور α و β مشاهده کرد. در واقع تبدیل هیلبرت تابع زمانی جریان فاز ماشین، سیگنالی با همان خصوصیات ولی با اختلاف فازی به اندازه ۹۰ درجه خواهد بود. به منظور جداسازی اثرات مشخصه‌ی عدم تقارن رتور از نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار، قاب مرجع مجازی زیر ارائه شده است (۵).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{sgn}(i_\alpha) & -\operatorname{sgn}(i_\beta) \\ -\operatorname{sgn}(i_\beta) & -\operatorname{sgn}(i_\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

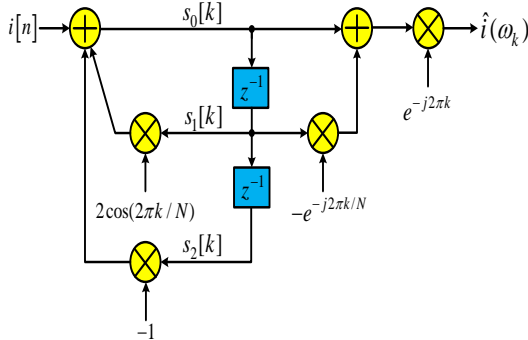
بر اساس قاب‌های مرجع ایستا و چرخان مجازی dq ارائه شده بر اساس تابع علامت در روابط (۴) و (۵)، جریان فاز ماشین القایی را می‌توان به دو محور چرخان dq به صورت زیر انتقال داد.

$$\begin{cases} i_d = I_s + \gamma I_s \cos((\gamma s f_s) t) + I_r \cos(\theta \sin(\gamma \pi f_{LT} t)) \\ i_q = -I_r \sin(\theta \sin(\gamma \pi f_{LT} t)) \end{cases}, \quad (6)$$

تبدیل مرجع جریان استاتور از $\alpha\beta$ به dq منجر به جداسازی مشخصه‌ی شاخص خطای عدم تقارن از نوسانات فرکانس پایین گشتاور می‌شود. در این رابطه، محور d قاب مرجع چرخان مشخصه‌ی شاخص خطای عدم تقارن را از فرکانس تغذیه دم‌دوله می‌کند. از آنجائیکه، اندازه $\beta \ll 1$ و $|\sin(2\pi f_{LT} t)| \leq 1$ رابطه‌ی (۶) را می‌توان به صورت زیر ساده‌سازی کرد:

$$\begin{cases} i_d \approx I_s + I_r + \gamma I_s \cos((\gamma s f_s) t) \\ i_q \approx -I_r \beta \sin(\gamma \pi f_{LT} t) \end{cases}, \quad (7)$$

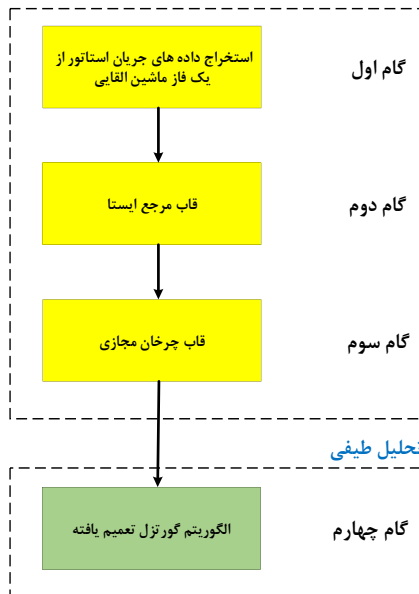
¹ Generalized Goertzel Algorithm



شکل ۱- الگوریتم گورتزل تعمیم یافته

سپس به کمک قاب مرجع چرخان ارائه شده در این مقاله خطای عدم تقارن رتور را می‌توان در دو محور قاب مرجع چرخان (i_q و i_d) محاسبه می‌نماید.

گام های پیش پردازش



شکل ۲- روندنمای روش ارائه شده

از آنجائیکه پیش‌رانه‌ی سیستم مورد مطالعه دارای جزء کاهنده‌ی سرعت همانند جعبه دنده نیست، به جای در نظر گرفتن مشخصه‌ی عدم تقارن رتور ماشین القایی، فرکانس چرخش مکانیکی ماشین (f_r) در نظر گرفته شده است که انعکاس دهنده نوسانات گشتاور مکانیکی بار در جریان استاتور ماشین در فرکانس ($f_s \pm f_r$) خواهد بود. در این روش می‌توان

با در نظر گرفتن $\omega_k = 2\pi k/N$ و $k \in \mathbb{R}$ ، تبدیل فوریه‌ی زمان-فرکانس گسسته را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\hat{i}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} i[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (9)$$

با بسط رابطه‌ی (۹) با ضرب واحد به صورت $e^{j(\pi k \pi N M)}$ رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\hat{i}(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} i[n] e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \left(e^{j \frac{2\pi k N}{N}} \cdot e^{-j \frac{2\pi k N}{N}} \right), \quad (10)$$

$$\hat{i}(\omega_k) = e^{-j 2\pi k} \left[\sum_{n=0}^{N-1} i[n] \left(e^{-j 2\pi k \frac{n-N}{N}} \right) \right], \quad (11)$$

معادله‌ی (۱۱) را می‌توان به صورت پیچش دو تابع به صورت زیر بازنویسی کرد:

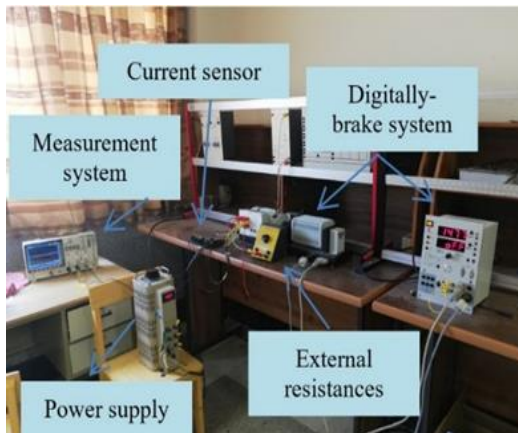
$$\hat{i}(\omega_k) = e^{-j 2\pi k} \left[i[n] * e^{j \frac{2\pi nk}{N}} \right]_{n=N}, \quad (12)$$

تبدیل Z معادله‌ی (۱۲) را می‌توان به صورت زیر نوشت (شکل ۱)

$$i[n] \rightarrow \frac{(1 - e^{-j 2\pi k/N}) \cdot z^{-1} e^{-j 2\pi k}}{1 - 2 \cos(2\pi k/N) \cdot z^{-1} + z^{-2}} \rightarrow \hat{i}(\omega_k) \quad (13)$$

۲-۵- روندنمای روش پیشنهادی

روندنمای روش پیشنهادی در شکل ۲ داده شده است. در ابتدا، سیگنال جریان یک فاز ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده به کمک حسگر جریان دریافت می‌شود و سپس بوسیله‌ی تبدیل هیلبرت، قاب مرجع ایستا با محورهای α و β تعریف شده است که مقادیر محورهای آن‌ها دارای خصوصیات سیگنال جریان یک فاز (دارای مشخصه‌ی شاخص خطا) با اختلاف فازی به اندازه‌ی ۹۰ درجه هستند.



شکل ۳- سیستم تست مورد مطالعه برای تشخیص خطای عدم تقارن رتور در ماشین القایی رتور سیم پیچی شده با توان ۰/۲۷ کیلووات

به منظور تجزیه و تحلیل جریان استاتور، سه حسگر تکفاز برای دریافت داده‌های سه فاز ماشین القایی مورد استفاده واقع شده است.

شاخص خطای عدم تقارن ماشین را از نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار مجزا کرد. سپس به منظور کاهش حجم محاسبات روش ارائه شده، الگوریتم گورتزل تعمیم یافته مورد استفاده قرار گرفته است. لازم به ذکر است با توجه به فرایند جداسازی و دمدوله شدن که بطور همزمان در سیگنال جریان اعمال می‌شود، مشخصه‌ی خطا در بازه‌ی محدودی قابل رویت خواهد بود و این موضوع کمک می‌کند تا به جای اینکه از تبدیل فوریه سریع استفاده شود که نیاز به حجم محاسبات بالایی دارد، از روش گورتزل استفاده کرد که در بازه‌ی مشخصی از طیف فرکانسی نسبت به تبدیل فوریه سریع، دارای حجم محاسبات کمتر و سرعت بیشتری است؛ در نتیجه روش ارائه شده که دارای سه گام محاسبات، قاب مرجع ایستا، قاب مرجع چرخان و تبدیل گورتزل است، منجر به تشخیص مشخصه‌ی خطای عدم تقارن ماشین همزمان با حذف مشخصه‌ی مربوط به نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار در محدوده‌ی فرکانسی کوچک در اطراف فرکانس DC می‌شود.

۳- نتایج

نتایج بدست آمده از ارزیابی روش ارائه شده در این بخش توضیح داده شده است. برای این منظور، در ابتدا، سیستم عملی مورد استفاده همراه با نحوه‌ی اعمال خطا بر روی ماشین القایی رتور سیم پیچی شده توضیح داده شده است. سپس، روش ارائه شده بوسیله‌ی سیگنال خودساخته معرفی شده در رابطه‌ی (۱) مورد ارزیابی قرار گرفته است. نهایتاً، داده‌های عملی گرفته شده از جریان استاتور ماشین به کمک حسگر جریان برای ارزیابی روش ارائه شده مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- سیستم تست مورد مطالعه

اجزای سیستم تست مورد استفاده برای ارزیابی خطای عدم-تقارن رتور در شدت‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. موتور مورد استفاده یک موتور القایی رتور سیم پیچی شده ۴ قطب با توانی به میزان ۰/۲۷ است که در فرکانس ۵۰ هرتز و ولتاژی به میزان ۴۰۰ ولت کار می‌کند، به منظور بررسی ماشین در لغزش‌های مختلف یک سیستم ترمزی که بر مبنای کنترل سرعت و یا کنترل گشتاور سرعت ماشین را کنترل می‌نماید به محور ماشین متصل شده است.

جدول ۱- مشخصات موتور القایی رتور سیم پیچی شده

پارامترها	یکای اندازه گیری	مقادیر
ولتاژ نامی	(V)	۴۰۰
توان نامی	(W)	۲۷۰
فرکانس منبع	(Hz)	۵۰
قطب	-	۴
مقاومت سیم پیچ استاتور	(Ω)	۳۴/۷۳
مقاومت سیم پیچ رتور	(Ω)	۳۲/۱۲
اندوکتانس متقابل	(H)	۱/۳۳۹
اندوکتانس خودی استاتور	(H)	۰/۱۳۹
اندوکتانس خودی رتور	(H)	۰/۱۵۹
ممتن اینرسی	Kg.m ²	۰/۰۰۱۶۱

تست اعمال شده است. این موضوع در واقع از آن جایی نشئت می گیرد که خطای حلقه به حلقه در مدار رتور به مرور زمان منجر به نامتعادلی مدار رتور می شود.

۳-۲- نتایج تحلیلی

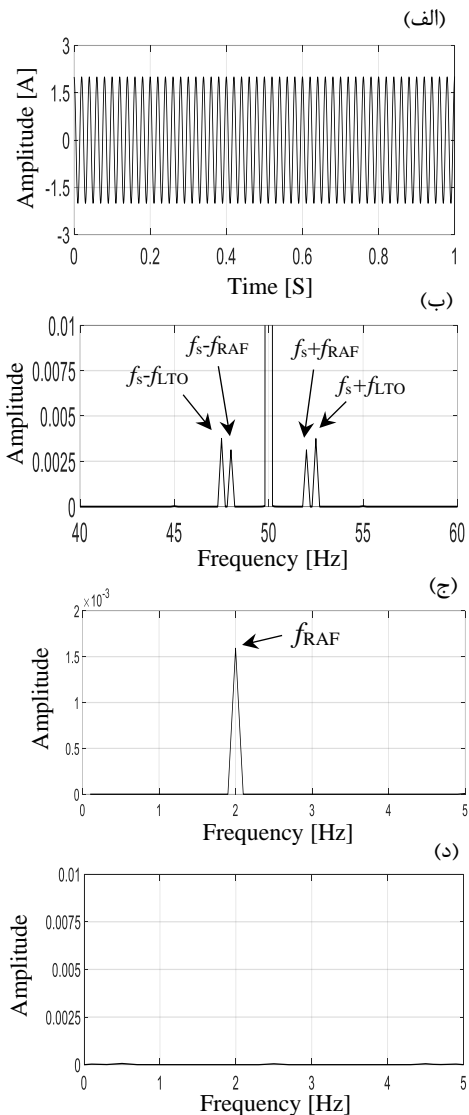
به همین خاطر برای مدل کردن این خطا یک مقاومت خارجی در مدار رتور قرار داده شده است تا بتوان رفتار عدم تعادل ماشین را تقلید کرد. پارامترهای ماشین مورد مطالعه در جدول ۱ داده شده است. برای بررسی تحلیل روش ارائه شده در این مقاله، این روش با استفاده از سیگنال خودساخته مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۳-الف). اندازه‌ی پارامترها به گونه‌ای انتخاب شده است که مشخصه‌ی خطا و مشخصه‌ی عدم تقارن دارای اثرات مشابهی باشند تا به نوعی اثرات همپوشانی در طیف فرکانسی مشهود باشد تا اعتبار روش مذکور مورد ارزیابی قرار گیرد.

در ابتدا به کمک قاب مرجع ایستای مطرح شده، دو سیگنال از جریان استاتور فاز بوسیله‌ی تبدیل هیلبرت تولید شده است که ۹۰ درجه از همدیگر اختلاف فاز دارند و سپس بوسیله‌ی قاب مرجع چرخان مبتنی بر تابع علامت، جریان محورهای d و q ساخته می‌شوند. طیف فرکانسی محور d روش ارائه شده نشان می‌دهد که مشخصه‌ی فرکانسی عدم تقارن رتور به خوبی از مشخصه‌ی نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار در سیگنال خودساخته جدا شده است (شکل ۳-ج).

همانطور که از روابط تحلیلی پیداست، جریان محور q دارای اندازه کوچکی از شاخص نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار است؛ در نتیجه در جریان محور q قابل مشاهده نیست (شکل ۳-د). این نکته می‌بایست مورد توجه قرار گیرد که هدف این مقاله جداسازی نوسانات فرکانس پایین گشتاور بار از مشخصه‌ی شاخص خطای عدم تعادل است که این مهم بطور مشهود در سیگنال‌ها مشهود است.

۳-۳- نتایج عملی

طیف جریان استاتور بدست آمده از حسگر جریان نشان می‌دهد که مشخصه‌ی فرکانسی عدم تقارن که با قرار دادن مقاومت خارجی در مدار سیم‌پیچ رتور ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده ایجاد می‌شود، را می‌توان به صورت نوارهای جانبی در نزدیکی فرکانس تغذیه مشاهده کرد (شکل ۴-الف).



شکل ۳- تحلیل روش ارائه شده به کمک سیگنال خودساخته -الف) سیگنال زمانی -ب) طیف سیگنال خودساخته بر اساس تحلیل فوریه سریع [۴۰Hz ۶۰Hz] -ج) طیف جریان محور d سیگنال خودساخته بر اساس روش ارائه شده و تبدیل فوریه سریع [۰Hz ۵Hz] -د) طیف جریان محور q بر اساس روش ارائه شده و تبدیل فوریه سریع [۰Hz ۵Hz]

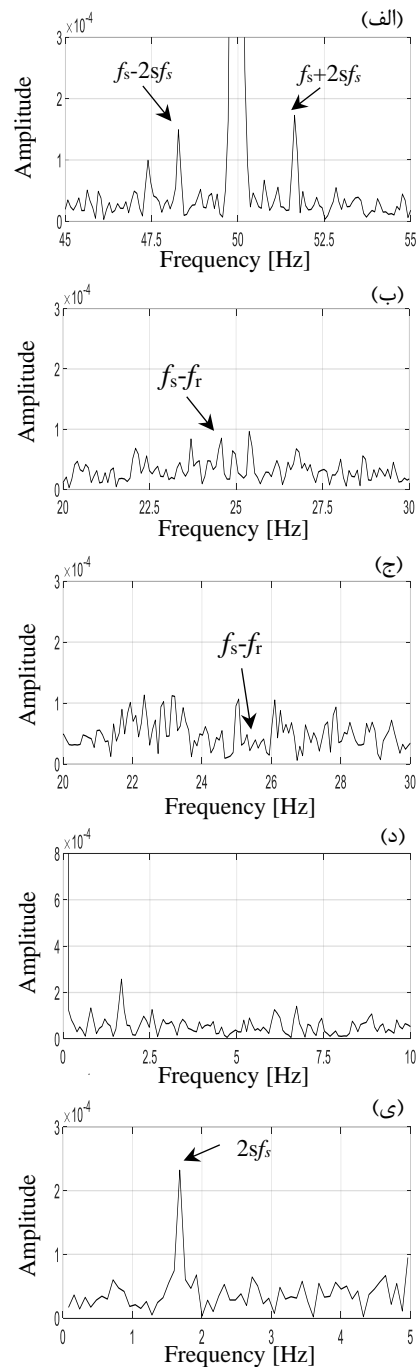
تغییرات شاخص‌های خطا در حالت سالم و با تغییر شدت خطا به کمک چندین تست عملی در نقاط کاری متفاوت ماشین مورد ارزیابی قرار گرفته است. خطای عدم تقارن به وسیله‌ی قرار دادن مقاومت خارجی در مدار رتور به سیستم

سریع [۲۰Hz ۳۰Hz] - (د) طیف جریان محور d بر اساس روش ارائه شده و تبدیل فوریه سریع [۱۰Hz] - (د) طیف جریان محور d بر اساس روش ارائه شده و گورتزل تعمیم یافته [۱۰Hz].

به جهت عدم حضور جزء کاهنده سرعت در پیشرانه‌ی سیستم تست مورد مطالعه همانند جعبه دنده، به جای شاخص نوسانات فرکانس پایین گشتاور، فرکانس چرخش ماشین (f_r)، که به جهت ناهم محوری ذاتی ماشین متناسب با مدولاسیون فاز است، در نظر قرار گرفته است (شکل ۴-ب). این شاخص‌ها را می‌توان به صورت ($f_s \pm f_r$) در طیف جریان استاتور مشاهده کرد. طیف جریان استاتور بر اساس روش ارائه شده در این مقاله، نشان می‌دهد که روش ارائه شده به خوبی می‌تواند شاخص نوسانات فرکانس پایین گشتاور را در حالی که فرکانس مشخصه‌ی عدم تقارن را نگه می‌دارد، حذف نماید (شکل ۴-ج و شکل ۴-د). لازم به ذکر است، روش مذکور می‌تواند علاوه بر حذف شاخص نوسانات فرکانس پایین، فرکانس مشخصه‌ی شاخص خطا را از هارمونیک اصلی منبع دمدوله کند. این موضوع منجر به کاهش اثرات نشتی فرکانس تغذیه به ویژه در لغزش‌های کم می‌شود. به منظور کاهش حجم محاسبات و کار با داده‌های درشت که ناشی از استفاده از FFT می‌شود (شکل ۴-الف، شکل ۴-ب، شکل ۴-ج و شکل ۴-د)، الگوریتم گورتزل تعمیم یافته برای بهینه‌سازی روش ارائه شده مورد استفاده واقع شده است. کاملاً مشهود است که اثرات مشخصه‌ی عدم تقارن رتور به خوبی در طیف جریان محور d روش ارائه شده قابل مشاهده است (شکل ۴-ی).

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی نوین برای تشخیص و جداسازی مشخصه-ی خطای عدم تقارن رتور از نوسانات فرکانس پایین گشتاور ارائه شده است. در این راستا، یک فاز جریان استاتور اندازه‌گیری شده است تا قاب مرجع ایستا با استفاده از تبدیل هیلبرت ساخته شود. سپس ماتریس علامت ارائه شده، قاب مرجع چرخان تعریف شده است که می‌تواند به طور موثر دو شاخص را از یکدیگر مجزا سازد. از آنجائیکه شاخص خطا به کمک روش مذکور از سیگنال تغذیه دمدوله شده است تا اثرات نشتی کاهش یابد، روش گورتزل تعمیم یافته معرفی شده است تا



شکل ۴- تحلیل روش ارائه شده به کمک داده‌های عملی بدست آمده از جریان استاتور ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده- (الف) طیف جریان بر اساس FFT [۴۵Hz ۵۵Hz] - (ب) طیف جریان بر اساس FFT [۲۰Hz ۳۰Hz] - (ج) طیف جریان محور d بر اساس روش ارائه شده و تبدیل فوریه

- [9] Batista FB, Lamim Filho PCM, Pederiva R, Silva VAD (2016) An Empirical Demodulation for Electrical Fault Detection in Induction Motors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 65.
- [10] Martinez-Roman J, Puche-Panadero R, Terron-Santiago C, Sapena-Bano A, Burriel-Valencia J, Pineda-Sanchez M (2021) Low-Cost Diagnosis of Rotor Asymmetries of Induction Machines at Very Low Slip with the Goertzel Algorithm Applied to the Rectified Current. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 70, 1-11.
- [11] Goktas T, Arkan M (2018) Discerning broken rotor bar failure from low-frequency load torque oscillation in DTC induction motor drives. *Trans. Inst. Meas. Control.* 40(1):279-86.
- [12] Hou Z, Huang J, Liu H, Ye M, Liu Z, Yang J (2017) Diagnosis of broken rotor bar fault in open and closed-loop controlled wye-connected induction motors using zero-sequence voltage. *IET Electr. Power Appl.* 11(7), 1214-23.
- [13] Kim H, Lee SB, Park S, Kia SH, G. Capolino (2016) Reliable detection of rotor faults under the influence of low-frequency load torque oscillations for applications with speed reduction couplings. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 52(2)1460-1468.
- [14] Guellout O, Rezig A, Touati S, Djerdir A (2020) Elimination of broken rotor bars false indications in induction machines. *Math. Comput. Simul.*, 167, 250-266.
- [15] Park Y, Choi H, Shin J, Park J, Lee SB, Jo H (2020) Airgap Flux Based Detection and Classification of Induction Motor Rotor and Load Defects During the Starting Transient. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67(12) 10075-10084.
- [16] Park Y, Choi H, Lee SB, Gyftakis KN (2020) Search coil-based detection of nonadjacent rotor bar damage in squirrel cage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 56(5):4748-57.
- [17] De Angelo CH, Bossio GR, Garcia GO (2010) Discriminating broken rotor bar from oscillating load effects using the instantaneous active and reactive powers. *IET electr. power appl.*, 4(4), 281-290.
- [18] Rajmic P, Prusa Z, Wiesmeyr C (2014) Computational cost of chirp Z-transform and generalized goertzel algorithm. 22nd European Signal Processing Conference (EUSIPCO) 1004-1008.

اندازه حجم محاسبات کاهش و سرعت محاسبات افزایش یابد. داده‌های عملی و تجزیه و تحلیل سیگنال خودساخته نشان می‌دهد که روش ارائه شده به خوبی شاخص خطا را از نوسانات فرکانس پایین گشتاور تشخیص می‌دهد.

مراجع

- [1] Marzembali MH, Kia SH, Henao H, Capolino GA, Faiz J (2016) Planetary gearbox torsional vibration effects on wound-rotor induction generator electrical signatures. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 52 (6): 4770-4780.
- [2] Marzembali MH, Faiz J, Capolino GA, Kia SH, Henao H (2018) Planetary gear fault detection based on mechanical torque and stator current signatures of a wound rotor induction generator. *IEEE Trans. Energy Convers.* 33 (3), 1072-1085.
- [3] Soualhi, A, Razik H (2020). *Electrical Systems 2: From Diagnosis to Prognosis*. John Wiley & Sons.
- [4] Abolghasemi V, Marzembali MH, Ferdowsi S (2021) Recursive Singular Spectrum Analysis for Induction Machines Unbalanced Rotor Fault Diagnosis. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3129492>.
- [5] Kia SH, Hajjaji AEI, Marzembali MH (2019) Planetary gear tooth fault detection using stator current space vector analysis in induction machine-based systems. 23rd International Conference on Mechatronics Technology (ICMT), 1-6.
- [6] Puche-Panadero R, Martinez-Roman J, Sapena-Bano A, Burriel-Valencia J (2019) Diagnosis of rotor asymmetries faults in induction machines using the rectified stator current. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 35(1), 213-221.
- [7] Tang X, Hu B, Wen H (2021) Fault Diagnosis of Hydraulic Generator Bearing by VMD-Based Feature Extraction and Classification. *Iran J Sci Technol Trans. Electr. Eng.* 45, 1227-1237 <https://doi.org/10.1007/s40998-021-00421-0> . (3) 559-569.
- [8] Balakrishna P, Khan U (2021) An Autonomous Electrical Signature Analysis-Based Method for Faults Monitoring in Industrial Motors. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70, 1- 8.