

تشخیص انواع خطاهای سیم بندی استاتور موتور القایی قفس سنجابی

کریم عباس زاده

دانشجوی دوره دکتری مهندسی برق - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

جعفر میلی منفرد

دانشیار دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

حمید واعظ

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد برق - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(تاریخ دریافت ۸۰/۱۲/۵، تاریخ تصویب ۸۰/۹/۳)

چکیده

تشخیص خطاهای سیم بندی استاتور ممکن است به طرق مختلف انجام گیرد. لیکن آنالیز طیفی جریان خط موتور تا زمانیکه حس کننده های جریان به منظور اهداف کنترلی و حفاظتی در مدار هستند، مؤثرترین روش بلادرنگ تشخیص خطا بشمار می رود. تئوری تابع سیم پیچی مبنای مدلسازی دقیق موتورهای القایی قفس سنجابی تحت شرایط نامتقارنی ایجاد شده بر اثر خطاهای سیم بندی استاتور بحساب می آید. در این مقاله برای تشخیص خطاهایی چون خطای حلقه به حلقه، کلاف به کلاف و فاز به فاز از نتایج حاصل از این مدلسازی استفاده شده است. در این مقاله برای تشخیص این نوع خطاها از روشهای آنالیز طیف هارمونیک جریان خط موتور، قطع موتور در حال کار از تغذیه، معیار جریان توالی منفی و معیار مقدار RMS سرعت استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی و آزمایشگاهی نشان می دهد که روش تحلیل طیف جریان استاتور و روش قطع موتور از تغذیه، مؤثرترین روش جهت تشخیص خطای فاز به فاز می باشد، و مقدار RMS سرعت هم مؤثرترین معیار جهت تشخیص دو خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف از یکدیگر می باشد. نتایج تجربی بدست آمده صحت نتایج شبیه سازی را تأیید می نماید.

واژه های کلیدی: موتورهای القایی، خطاهای سیم بندی استاتور، تشخیص خطا، مدلسازی موتورهای القایی

مقدمه

موتورهای الکتریکی نقش مهمی را در راه اندازی مؤثر ماشینها و پروسه های صنعتی ایفا می کنند. بخصوص موتورهای القایی قفسه سنجابی که بعنوان اسب کاری صنعت می شناسند. بنابراین تشخیص خطاهای این موتورها می تواند فواید اقتصادی فراوانی در پی داشته باشد. از جمله مدیریت کارخانه های صنعتی را آسان می کند، سطح اطمینان سیستم را بالا می برد، هزینه تعمیر و نگهداری پایین می آید و نسبت هزینه به سود بطور قابل توجهی کاهش می یابد.

Soukup و Bonnett برای خرابیهای استاتور

موتورهای القایی سه فاز قفسه سنجابی پنج حالت خرابی مطرح کرده اند که عبارتند از حلقه به حلقه، کلاف به کلاف، قطع فاز، فاز به فاز و کلاف به زمین [۱]. برای

موتورهای قفسه سنجابی خرابیهای سیم پیچی استاتور و یاتاقانها (ساجمه ها) تقریباً $\frac{3}{4}$ کل خرابیها به حساب می آیند. و همچنین اکثر خرابیهای سیم پیچی استاتور موتور از فروپاشی عایقی حلقه به حلقه ناشی می شوند [۵-۲]. برخی از محققین خرابیهای موتور را چنین تقسیم بندی کرده اند: خرابی ساجمه ها (یاتاقانها) ۵۰٪ - ۴۰٪، خرابی عایق استاتور ۴۰٪ - ۳۰٪ و خرابی قفسه رتور ۱۰٪ - ۵٪ [۶] که اگر از خرابی حلقه به حلقه جلوگیری نشود منجر به خطای فاز به زمین یا فاز به فاز می گردد که خطای فاز به زمین شدیدتر است.

در مقاله [۷] نظریه تابع سیم پیچی و کاربرد آن در آنالیز گذرای موتورهای القایی تحت خطا شرح داده شده است. از این نظریه در مدلسازی انواع خطاهای استاتور کمک

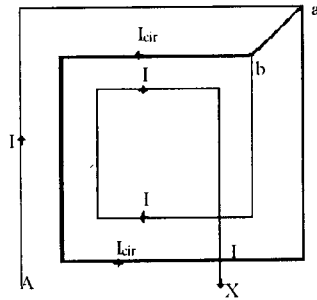
جریان توالی منفی اندازه‌گیری شده می‌شود تا جریان تزریق شده حاصل گردد. این روش تشخیص خطای حلقه به حلقه، تحت بار انجام می‌گیرد و به حالت بی‌باری موتور محدود نمی‌شود.

البته نتایج بدست آمده در این مقاله آزمایشگاهی بوده است و شبیه‌سازی صورت نگرفته است. در [۱۳] یک تکنیک جدید در آشکارسازی خطاهای حلقه به حلقه در یکی از فازهای استاتور ماشین القایی ارائه شده است. در این تکنیک از مجموع جبری سه ولتاژ فاز لحظه‌ای (خط به نول) جهت آشکارسازی خطای حلقه به حلقه استفاده شده است. این تکنیک بر اساس تغییر امپدانس فاز برآیند (عدم تعادل) بر اثر خطای حلقه در هر فاز استاتور می‌باشد. از کمیت $V_{sum,rms}$ نیز می‌توان بجای $V_{sum}(t)$ استفاده کرد. از اشکالات این روش آنست که در یک ماشین واقعی تعادل کامل فاز یعنی $Z_a=Z_b=Z_c$ بنا به دلایل عملی نمی‌تواند برقرار گردد. در عمل و همچنین در موتور تحت بار این روش از دقت پایینی برخوردار است [۸]. در تشخیص خطای حلقه به حلقه در سیم‌پیچی استاتور یک موتور القایی قفس سنجایی با استفاده از آنالیز طیف هارمونیک جریان خط موتور شرح داده شده است. روش دیگر برای تشخیص خطا بصورت بلادرنگ استفاده از روش های شناسایی است [۱۴]. در این روش بر اساس روش های شناسایی (روش بازگشتی) پارامترهای خاصی از قبیل مقاومت میله رتور (R_r) و سرعت موتور (ω_r) تخمین زده می‌شود، البته در این مقاله از کالمن فیلتر جهت تخمین پارامتر استفاده شده است. سپس از روی این پارامترهای تخمینی خصوصیات آماری از قبیل میانگین μ و واریانس (σ^2) بدست آورده می‌شود و با خصوصیات آماری حالت بدون خطای ماشین مقایسه می‌گردد و از آنجا سیگنالهای خطا (F_i) تولید می‌شود و وارد بانک تشخیص خطا می‌شود. این بانک نسبت به تغییرات پارامتر حساس می‌باشد و تصمیم می‌گیرد که خطا از چه نوعی است. اشکال این روش محاسبات فوق العاده زیاد و زمان بر بودن آن است.

روش پیشنهادی در این مقاله جهت تشخیص خطاهای حلقه به حلقه، کلاف به کلاف و فاز به فاز روش آنالیز طیف هارمونیک جریان خط موتور، روش قطع

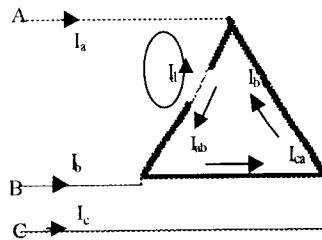
گرفته می‌شود و در مقاله [۸] با معرفی یک فاز جدید بنام فاز اتصال کوتاه شده D و استفاده از روش تابع سیم پیچی، اتصال کوتاه‌های حلقه داخلی مدل می‌گردد. این فاز جدید فقط از طریق پیوند مغناطیسی با سایر فازهای استاتور و رتور ارتباط دارد.

خطای بوجود آمده در استاتور باعث تولید توالی منفی جریان شده و این توالی منفی جریان به بار مکانیکی بستگی ندارد و تابع درصد خطا می‌باشد، از اینرو آن می‌تواند یک پارامتر مفید برای سیستم تشخیص خطا بکار رود [۹]. اولین قدم جهت مشاهده خطای حلقه به حلقه به صورت بلادرنگ بارائه مقاله‌ای توسط Williamson و Mirzoian در سال ۱۹۸۵ انجام گرفت [۱۰]. در آن مقاله یک موتور سه فاز با اتصال ستاره در حالت‌های سالم و خطای حلقه به حلقه در یک فاز، تحت ولتاژ تغذیه متقارن تحلیل گردیده و نتایج تحلیل با نتایج آزمایش مقایسه شده است. این مقاله نشان می‌دهد که حلقه‌های اتصال کوتاه شده اثر اندکی روی جریان توالی مثبت داشته و در عوض مقدار قابل توجهی جریان توالی منفی بوجود می‌آید. اولین کوشش جهت اعمال این نتایج به آشکارسازی خطای حلقه به حلقه بطور عملی با ارایه مقاله‌ای توسط Sottile, Kohler و Trutt در سال ۱۹۹۲ انجام گرفت [۱۱]. ماهیت روش به صورت تعیین کردن سه فیزور جریان و سپس انتقال دادن به مؤلفه‌های متقارن استاندارد می‌باشد تا از آنجا جریان توالی منفی حاصل شود. بعدها دانسته شد که جریان توالی منفی یک مقیاس مناسبی جهت تشخیص خطا نمی‌باشد چونکه منبع ولتاژ سه فاز اغلب نامتعادل می‌باشد. در [۱۱] راه حل پیشنهادی استفاده از امپدانس ظاهری توالی منفی بعنوان مقیاس تشخیص می‌باشد. این امپدانس به صورت نسبت فیزور ولتاژ توالی منفی به فیزور جریان توالی منفی است. در این روش پیشنهادی اندازه‌گیریهای امپدانس توالی منفی به شدت نویز دار می‌باشد و نمی‌توان برای این امپدانس یک عدد مشخصی پیدا کرد و بدین جهت این روش از دقت پایینی برخوردار است. برای اصلاح روش‌های ذکر شده جهت تشخیص خطا در سیم‌پیچی استاتور از جریان توالی منفی باقیمانده استفاده شده است [۱۲]. در این مقاله جریان توالی منفی بر اثر نامتعادل بودن ولتاژ منهای



شکل ۱: اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط a و b.

از روی تئوری ساده‌ای می‌توان دریافت که مسیر A-X به دو مدار مستقل تبدیل می‌شود. در یکی از مدارهای جریان فاز (I) و در دیگری جریان I_{cir} جاری است. همچنانکه از شکل (۱) نیز مشخص است این دو جریان یعنی جریان فاز و جریانی که در اتصال کوتاه جاری می‌شود، MMF های مخالف هم تولید می‌کنند. زیرا طبق قانون لنز جریان I_{cir} در جهتی جاری می‌شود که با عامل بوجود آورنده‌اش که MMF اصلی ناشی از جریان فاز است مخالفت کند. لذا اتصال کوتاه‌های داخلی دارای اثر برآیندی در کاهش MMF در نزدیکی حلقه‌های اتصال کوتاه هستند. هنگامی که یک اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد اولاً تعداد دور سیم‌پیچی فاز کمتر می‌شود و لذا MMF کمتر می‌گردد. ثانیاً MMF ناشی از جریان اتصال کوتاه مخالف MMF ناشی از جریان سیم‌پیچی فاز می‌باشد.



شکل ۲: فرم سیم‌پیچی استاتور اتصال کوتاه داخلی اتفاق افتاده باشد. - اتصال مثلث.

بعنوان یک نتیجه، MMF سیم‌پیچی فاز با بوجود آمدن اتصال کوتاه داخلی تغییر می‌کند و اندوکتانس متقابل بین آن فاز و همه مدارهای دیگر در ماشین تغییر می‌کند. بعلاوه یک فاز جدید که فاز اتصال کوتاه شده D نامیده می‌شود معرفی می‌گردد. این فاز تماس رسانایی با

موتور در حال کار از تغذیه و معیار مقدار rms سرعت می‌باشد. نتایج تجربی و آزمایشگاهی نیز جهت تأیید نتایج شبیه سازی در مقاله آمده است.

مدلسازی انواع خطاهای استاتور

دسته معادلات زیر مدل ریاضی موتور القایی قفس سنجابی سه فاز را تشکیل میدهد [۷].

$$\begin{aligned} V_s &= R_s I_s + \frac{d\lambda_s}{dt} & V_r &= R_r I_r + \frac{d\lambda_r}{dt} \\ \lambda_r &= L_{sr}^T I_s + L_{rr} I_r & T_e &= I_s^T \frac{\partial L_{sr}}{\partial \theta_{rm}} I_r \\ \omega_m &= \frac{d\theta_{rm}}{dt} & \lambda_s &= L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \\ J \frac{d^2 \theta_{rm}}{dt^2} + T_L &= T_e \end{aligned} \quad (1)$$

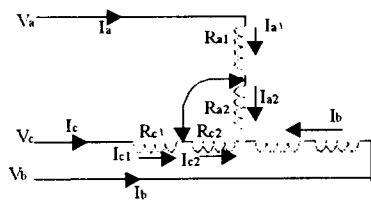
که در این معادلات V_s بردار ولتاژهای سه فاز منبع تغذیه، V_r بردار ولتاژ رتور که همواره برابر صفر است، R_s یک ماتریس 3×3 که ماتریس مقاومت استاتور نام دارد، R_r یک ماتریس $(n+1) \times (n+1)$ که ماتریس مقاومت رتور نام دارد (n تعداد میله های رتور می باشد)، L_{ss} ، 3×3 و ماتریس اندوکتانس استاتور نام دارد، L_{sr} ، $3 \times (n+1)$ و ماتریس اندوکتانس متقابل نام دارد، L_{rr} ، $(n+1) \times (n+1)$ و ماتریس اندوکتانس رتور نام دارد، L_{rs} هم ترانزاند L_{sr} می باشد. T_e گشتاور الکترومغناطیسی موتور و T_L گشتاور بار می باشد. ω_m سرعت مکانیکی موتور، θ_{rm} موقعیت زاویه ای رتور بر حسب رادیان مکانیکی می باشد.

مدلسازی خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف

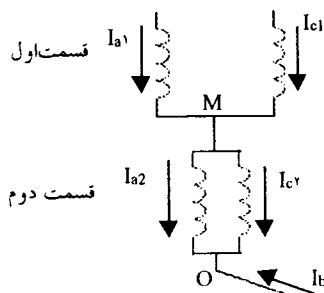
در ابتدای امر ساده‌ترین حالت را که کلاف فقط یک دور دارد را در نظر می‌گیریم و چند نتیجه مهم را از آنجا بدست می‌آوریم. شکل (۱) دیاگرام سیم‌بندی یک فاز با سه کلاف متحدالمرکز یک دوری را نشان می‌دهد. فرض می‌شود که اتصال کوتاه کلاف به کلاف بین نقاط a و b همانطور که در شکل نشان داده شده است اتفاق افتاده باشد. واضح است که مسیر جریان گردشی (I_{cir}) بسته می‌شود.

مدلسازی خطای فاز به فاز

در این نوع خطا فاز D وجود ندارد و در نتیجه بحثی که برای خطاهای قبلی در مورد فاز D داشتیم در اینجا نداریم. وقتی خطای فاز به فاز رخ میدهد فازهایی که بهم اتصال کوتاه شده‌اند هر کدام تبدیل به دو فاز می‌شوند یعنی در مجموع پنج جریان مجهول خواهیم داشت. سیم‌بندی استاتور با وجود خطای فاز به فاز (فاز a و فاز c) در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۵) مدار معادل فازهای a و c بعد از خطا را نشان می‌دهد.



شکل ۴: سیم‌بندی استاتور در حالتیکه خطای فاز به فاز رخ داده باشد



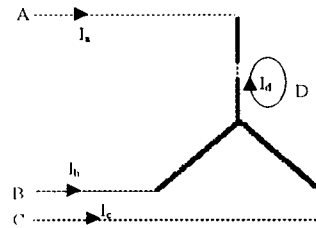
شکل ۵: مدار معادل فازهای a و c بعد از اتصال کوتاه شدن خطای فاز به فاز.

دسته معادلات ولتاژ خط استاتور در حالت خطای فاز به فاز بصورت روابط ۶ و ۷ است.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{ab}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{ca1a1}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{c2a2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{ca} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{a1} & r_{a2} & -r_b \\ -(r_{a1} + r_{c1}) & 0 & -r_{c1} \\ 0 & -(r_{a2} + r_{c2}) & -r_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_b \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ab} \\ \lambda_{ca1a1} \\ \lambda_{c2a2} \end{bmatrix} = L_{ss} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{a2} \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{a1r} + L_{a2r} - L_{br} \\ L_{c1r} - L_{a1r} \\ L_{c2r} - L_{a2r} \end{bmatrix} I_r \quad (۷)$$

فازهای دیگر ندارد اما این فاز با مدارهای روی استاتور و روی رتور بطور متقابل کوپل می‌شود. فاز جدید D بصورت یک مدار مستقل با جریان خطای Id می‌باشد. شکل‌های (۲) و (۳) این مدار مستقل را به ترتیب در اتصال ستاره و اتصال مثلث سیم‌پیچی استاتور نشان می‌دهند.



شکل ۳: فرم سیم‌پیچی استاتور وقتی که اتصال کوتاه داخلی اتفاق افتاده باشد. - اتصال ستاره .

معادلات ولتاژ استاتور در حالت خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف به صورت روابط ۲ و ۳ نوشته می‌شود:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & -R_b & 0 \\ R_r & R_b + R_c & 0 \\ 0 & 0 & R_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{d\lambda_{ab}}{dt} \\ \frac{d\lambda_{bc}}{dt} \\ \frac{d\lambda_d}{dt} \end{bmatrix} \quad (۲)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{ab} \\ \lambda_{bc} \\ \lambda_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} - L_{ba} - L_{ca} + L_{rc} & L_{ab} - L_{rb} - L_{ac} + L_{rc} & L_{ad} \\ L_{ba} - L_{ca} - L_{rc} + L_{cc} & L_{bb} - L_{cb} - L_{bc} + L_{cc} & L_{bd} \\ L_{da} - L_{dc} & L_{db} - L_{dc} & L_{dd} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ar} - L_{rr} \\ L_{br} - L_{rr} \\ L_{dr} \end{bmatrix} I_r \quad (۳)$$

در رابطه (۳) Ldr, Lcr, Lbr, Lar (n+1) بردارهای هستند.

تمامی اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی و اندوکتانس‌های متقابل از تئوری تابع سیم‌پیچی [۸] بدست می‌آیند. اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی سیم‌پیچی mام از رابطه ۴ و اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچی m و n از رابطه ۵ بدست می‌آید.

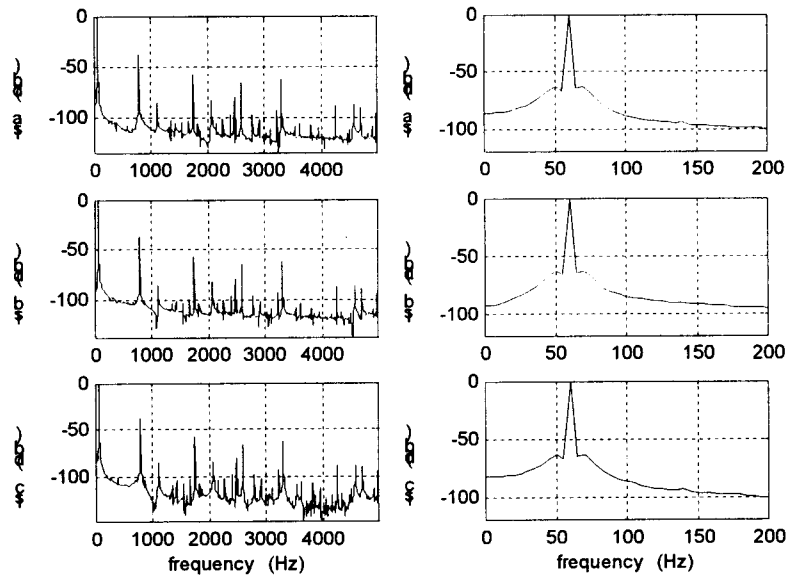
$$L_{mm} = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_m(\varphi) n_m(\varphi) d\varphi = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_m^2(\varphi) d\varphi \quad (۴)$$

$$L_{mn} = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_m(\varphi) n_n(\varphi) d\varphi = \frac{\mu_0 r l}{g} \int_0^{2\pi} N_m(\varphi) N_n(\varphi) d\varphi \quad (۵)$$

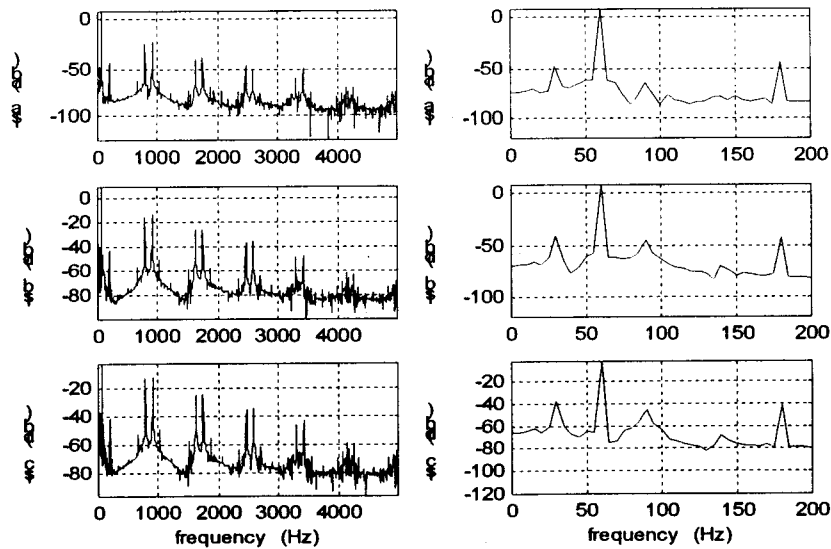
نتایج شبیه سازی

دوری می‌باشد. سیم‌بندی هم دو طبقه پیچیده شده است. از سه جریان بی‌باری خط موتور در حالت سالم ماشین و در حالت‌های خطای استاتور FFT گرفته می‌شود. اشکال (۶) تا (۱۰) طیف سه جریان خط موتور را به ترتیب در حالت‌های سالم، خطای حلقه به حلقه، خطای کلاف به کلاف و خطای فاز به فاز نشان می‌دهند. در این شکل‌ها محور عمودی بر حسب دسی بل و محور افقی بر حسب هرتز می‌باشد.

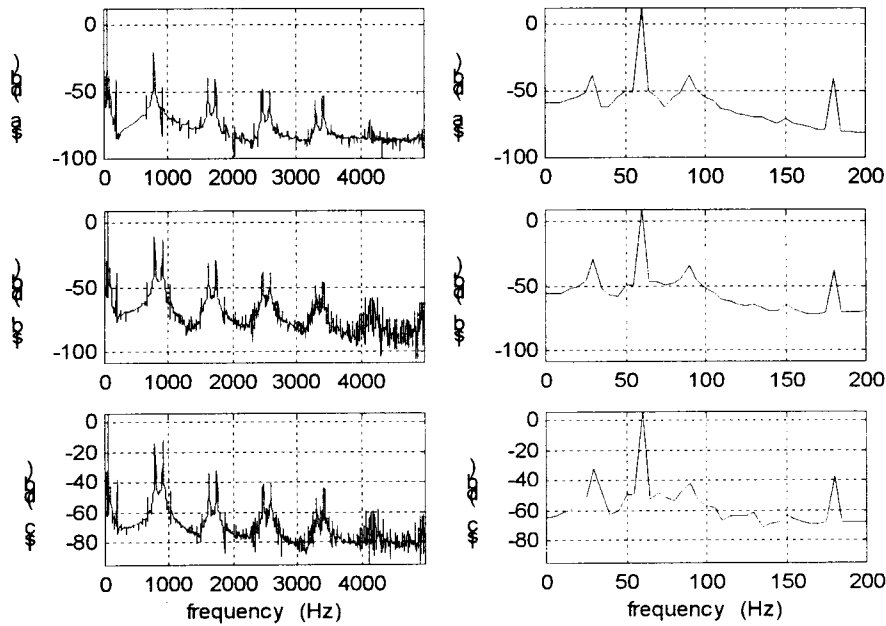
موتور مورد نظر جهت انجام شبیه‌سازی یک موتور ۷/۵ اسب بخار، ۴۶۰ ولت، ۴ قطب و سه فاز اتصال ستاره می‌باشد که فرکانس کاری آن ۶۰ هرتز می‌باشد. استاتور این موتور دارای ۳۶ شیار و رتور آن دارای ۲۸ میله می‌باشد. در سیم‌بندی این ماشین دو کلاف در هر فاز در هر زوج قطب موجود است یعنی چون ماشین چهار قطبی است در هر فاز چهار کلاف وجود دارد. هر کلاف هم N



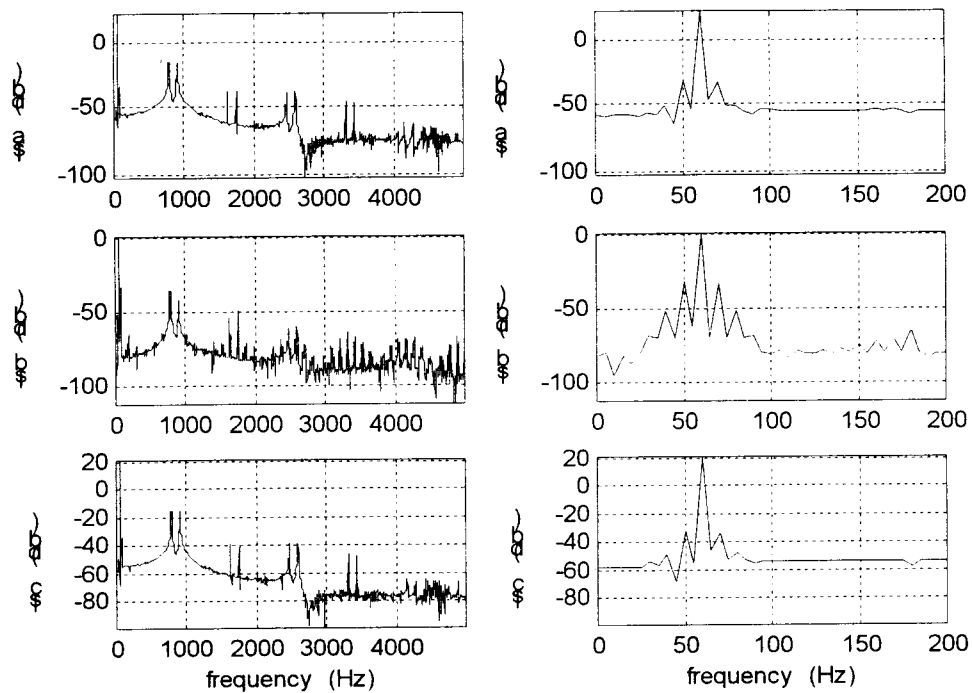
شکل ۶: طیف جریان‌های بی‌باری خط موتور در حالت سالم.



شکل ۷: طیف جریان‌های بی‌باری خط موتور در حالت خطای حلقه به حلقه.



شکل ۸: طیف جریان های بی باری خط موتور در حالت خطای کلاف به کلاف.

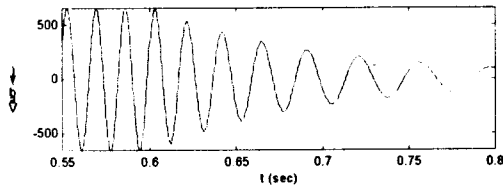


شکل ۹: طیف جریان های خط در حالت بی باری و خطای فاز به فاز.

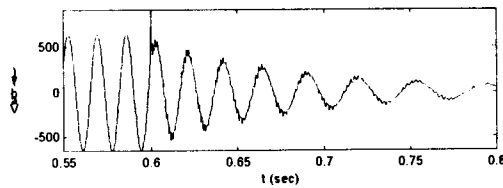
خطای کلاف به کلاف و خطای فاز به فاز نشان می دهد. از روی شکل دیده می شود که هر چه شدت خطا زیاد می شود مقدار توالی منفی جریان هم زیاد می شود. از اینرو جریان توالی منفی براحتی وجود خطا را آشکار می سازد.

جریان توالی منفی به بار مکانیکی بستگی ندارد و تابع درصد خطا می باشد، از اینرو آن می تواند یک پارامتر مفید برای سیستم تشخیص خطا باشد [۹]. شکل (۱۰) جریان توالی منفی را در حالت های سالم، خطای حلقه به حلقه،

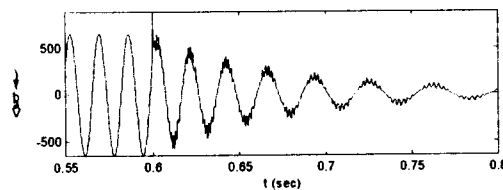
نتایج استفاده از روش قطع موتور در حال کار از تغذیه و مشاهده ولتاژهای القایی روی استاتور [۱۵] در حالت‌های سالم و خطای استاتور در شکل های (۱۲) آمده است. همچنانکه از روی شکلها دیده می شود با این روش براحتی وجود خطا آشکار می شود.



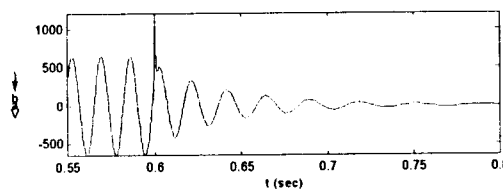
الف



ب



ج



د

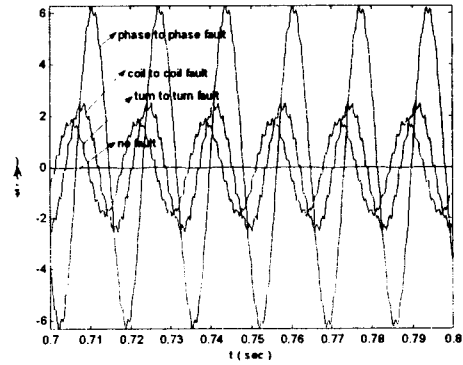
شکل ۱۲: نمودار ولتاژ خط V_{ab} وقتی موتور در حال کار از تغذیه جدا شود.

a - حالت سالم b - حالت خطای حلقه به حلقه c - حالت خطای کلاف به کلاف d - حالت خطای فاز به فاز

معیار تشخیص خطا

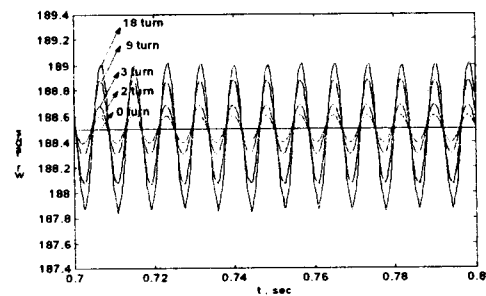
نتایج بررسی طیف هارمونیک جریانه‌های استاتور چنین است:

الف- در خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف هارمونیک سوم (۱۸۰ HZ) وجود دارد (هارمونیک اصلی ۶۰ HZ می‌باشد). اما در خطای فاز به فاز هارمونیک سوم مشاهده نمی‌شود.

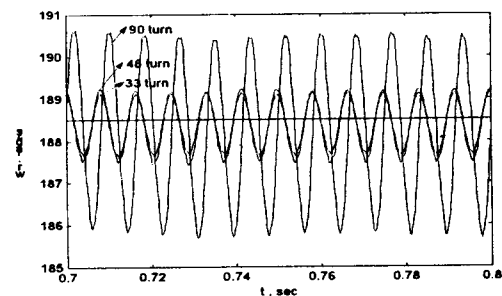


شکل ۱۰: نمودار جریان توانی منفی در حالت‌های سالم، خطای حلقه به حلقه، خطای کلاف به کلاف و خطای فاز به فاز.

با توجه به شکل (۱۱) دیده می‌شود که هر چه درصد خطا در خطاهای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف بالا رود دامنه رایپل سرعت در حالت پایدار ماشین نیز افزایش می‌یابد. از اینرو مقدار rms سرعت را می‌توان بعنوان پارامتری جهت تشخیص دو خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف از یکدیگر بکار برد. مقدار rms سرعت برای خطاهای مختلف در جدولی که در قسمت ۴ آمده نوشته شده است.



الف



ب

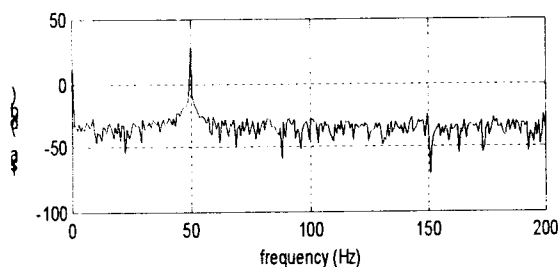
شکل ۱۱: نمودار سرعت موتور در حالت پایدار برای خطاهای مختلف.

a - خطاهای حلقه به حلقه b - خطاهای کلاف به کلاف

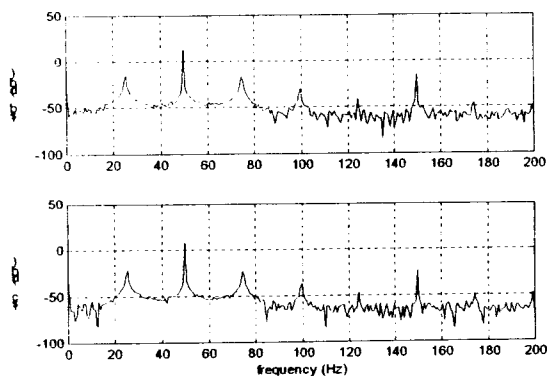
جدول ۱: مقادیر مؤثر سرعت و آنالیز جریانهای استاتور در خطاهای مختلف.

مقدار rms سرعت (rad/s)	مقدار جریان بر حسب db در فرکانسهای هارمونی			فرکانس هارمونیک جریان (HZ)	تعداد دور اتصال کوتاه شده	نوع خطا
	I _c	I _b	I _a			
0.0743	-70.46	-----	-----	30	$\left(\frac{N}{3}\right) 5\%$	حلقه به حلقه
	-80	-----	-----	90		
	-54.89	-57.72	-59.2	180		
0.1342	-60	-----	-----	30	$\left(\frac{N}{3}\right) 10\%$	در فاز c
	-67.96	-----	-----	90		
	-50.46	-50.17	50.46	180		
0.2884	-44.58	-49.89	52.39	30	$\left(\frac{N}{3}\right) 30\%$	
	-52.04	-----	-----	90		
	-47.33	-44.88	-51.1	180		
0.3959	-42.498	46.196	52.04	30	$\left(\frac{N}{3}\right) 60\%$	
	-47.53	-52.04	-70.6	90		
	-45.19	-48.64	46.02	180		
0.5133	-38.42	-31.67	38.78	30	$5\% \left(\frac{2N}{3}\right) + \frac{N}{3}$	کلاف به کلاف
	-38.42	-34.7	38.78	90		
	-39.74	-38.59	44.73	180		
0.5961	-32.54	-30.37	38.42	30	$30\% \left(\frac{2N}{3}\right) + \frac{N}{3}$	در فاز c
	-40.82	-35.92	35.92	90		
	-37.1	-36.25	40.18	180		
1.6748	-37.27	-29.95	32.54	180	100%(N)	
قابل محاسبه نیست	-33.89	-32.58	30.99	50	اتصال در شیار چهارم استاتور رخ داده است	فاز a به
	-35.92	-35.6	30.99	70		
	-17.18	-43.48	18.14	900		
قابل محاسبه نیست.	-44.73	-44.3	42.62	45	اتصال در شیار چهارم استاتور رخ داده است	فاز c
	-42.85	41.514	42.62	75		
	-19.64	-52.77	19.56	900		

دور می‌باشد. بنابراین در هر شیار ۴۴ دور قرار می‌گیرد. آزمایشات در حالت بی‌باری موتور صورت گرفته است. بدین دلیل که برای یک ماشین باردار، تشخیص خطای سیم پیچی استاتور بسیار مشکل است چون با سایر حالات نامتقارنی مثل نامتقارن بودن منبع ولتاژ اشتباه می‌شود [۸]. ابتدا حالت سالم موتور، مورد آزمایش قرار گرفت و سپس با ایجاد خرابی حلقه به حلقه در یکی از کلافهای یکی از فازهای استاتور آزمایشات اتصال کوتاه حلقه به حلقه در حالت بی‌باری روی موتور انجام گرفت و ولتاژ خط اعمالی به موتور، جریان فاز معیوب و جریان اتصال کوتاه و جریان یکی از فازهای سالم موتور اندازه‌گیری شد. از جریان خط موتور در حالت‌های سالم و خطای حلقه به حلقه FFT گرفته شد و نتایج در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) آمده است.



شکل ۱۳: طیف هارمونیک جریان خط بی‌باری موتور در حالت سالم.



شکل ۱۴: طیف هارمونیک جریان‌های خط بی‌باری موتور در حالت خطای حلقه به حلقه.

نتیجه‌گیری

روشهای کلاسیک بکار گرفته شده در این مقاله جهت تشخیص خطا اولاً وجود خطا و ثانیاً انواع خطاهای استاتور را از هم تمیز می‌دهد. با استفاده از تحلیل طیف

ب- در خطای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف، مؤلفه‌های جریان در فرکانس‌های ۳۰ Hz و ۹۰ Hz وجود دارد. هر چه درصد خطا بالا رود مقدار این مؤلفه‌ها افزایش می‌یابد. البته اگر درصد خطا پایین باشد مقدار این مؤلفه‌ها ناچیز خواهد بود.

ج- در خطای فاز به فاز، در فرکانس‌های ۵۰ Hz و ۷۰ Hz مؤلفه جریان وجود دارد و در نوع دیگری از خطای فاز به فاز یعنی با درصد خطای متفاوت با قبلی (خطا در همان شیار چهارم استاتور است) در فرکانس‌های ۴۵ Hz و ۷۵ Hz مؤلفه جریان داریم. در خطای فاز به فاز مؤلفه جریان در فرکانس ۹۰ Hz وجود دارد که در سایر حالت‌های خطا مشاهده نمی‌شود.

د- در حالت سالم بودن ماشین، هارمونیک سوم وجود ندارد و همچنین در هیچ یک از فرکانس‌های ۳۰، ۴۵، ۵۰، ۷۰، ۹۰ و ۹۰۰ هرتز مؤلفه جریان نداریم.

هارمونیک سوم در سایر حالات نامتقارنی مثل نامتقارن بودن منبع ولتاژ هم وجود دارد و نمی‌توان از آن بعنوان وجود خطا کمک گرفت. ولی روی سایر مؤلفه‌های فرکانسی می‌توان تکیه کرد.

با بررسی روشهای بکار گرفته شده جهت تشخیص خطا می‌توان گفت که تمامی این روشها وجود خطا حتی خطای حلقه به حلقه را به آسانی تشخیص می‌دهند. منتها روش طیف هارمونیک جریان و روش قطع موتور از تغذیه خطای فاز به فاز را از دو خطای دیگر تمیز می‌دهد. اما برای تشخیص خطای حلقه به حلقه از کلاف به کلاف تنها می‌توان از معیار مقدار rms سرعت کمک گرفت. در جدول I برای خطاهای مختلف نتایج FFT جریانها و مقادیر مؤثر سرعت آمده است.

نتایج عملی

موتور مورد نظر جهت انجام آزمایش یک موتور القایی قفسه‌سنجایی ۳ اسب بخار، ۳۸۰ ولت، چهار قطب، سه فاز و اتصال ستاره می‌باشد، که فرکانس کاری آن ۵۰ هرتز است. استاتور این موتور دارای ۳۶ شیار و رتور آن دارای ۲۸ میله می‌باشد. سیم‌بندی این موتور به صورت یک طبقه است و برای هر فاز دو کلاف موجود است. کلاف‌ها متحدالمرکز هستند و هر کلاف نیز دارای ۱۳۲

حالت پایدار کمک گرفت.
 نتایج تجربی انجام گرفته برای حالت سالم و حالت خطای
 حلقه به حلقه روش تحلیل طیف جریان موتور را تأیید
 میکند.

جریان استاتور و روش قطع موتور از تغذیه، می توان خطای
 فاز به فاز را از خطاهای حلقه به حلقه و کلاف به کلاف
 تشخیص داد. برای تشخیص خطای حلقه به حلقه از کلاف
 به کلاف تنها می توان از معیار مقدار rms سرعت موتور در

پیوست: پارامترهای ماشین

7.5hp , 460v , 4-pole , 3phase
 JJ=.012;
 L=102.4128*10⁽⁻³⁾;
 g=.456438*10⁽⁻³⁾;
 r=63.2968*10⁽⁻³⁾;
 N=90;
 rs=3.5332;
 ls=.028;
 Rb=68.34e-6;
 Lb=.28e-6;
 Re=1.56e-6;
 Le=.03e-6;

3hp , 380v , 4-pole , 3phase
 JJ=.012;
 L=90*10⁽⁻³⁾;
 g=.456438*10⁽⁻³⁾;
 r=45*10⁽⁻³⁾;
 N=132;
 rs=3.1;
 ls=.028;
 Rb=50.392e-6;
 Lb=.28e-6;
 Re=1.56e-6;
 Le=.03e-6;

مراجع

- 1- Bonnett, A. H. and Soukup, G. G. (1991). "Cause and analysis of stator and rotor failures in 3 phase squirrel cage induction motors." *IEEE*.
- 2 - IEEE Committee Report, (1974). "Report on large motor reliability survey of industrial plants." *Parts I, II and III, IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA - 10(2).
- 3 - Eprireport EI-4286, (1985). "Improved motors for utility applications." *Vol. 1. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Project*, No. 1763-2.
- 4 - Donnel, P. O. and Coordinating author. (1985). "Report on large motor reliability survey of industrial and commercial applications." *Part 1, and 2 IEEE Transactions on Industry Applications*, IA - 21(4).
- 5 - Thorsen, O. V. and DALVA, M. (1997). "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for high voltage motors in petrochemical industry." *Electrical machines and Drives, 8th International Conference*.
- 6 - McCoy, R. M., Albrecht, P. F., Appiaris, J. C. & Owen, E. L. (1985). "Improved Motors for Utility Applications: Volume 1: Industry Assessment Study Update and Analysis." *EPR I*. EL-4286 (Rp-1763-2).
- 7 - Toliyat, H. A. and Lipo, T. A. (1995). "Transient analysis of cage induction machines under stator. rotor bar and end ring faults." *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 10. No. 2.
- 8 - Joksimovic, G. and Penman, J. (1998). "The detection of interturn short circuits in the stator windings of operating motors." *IEEE*.
- 9 - Gentile, G., Ometto, A., Rotondale, N. and Tassoni, C. (1994). "A.C. machine performances in faulted operations." *IEEE*.

- 10 - Williamson, S. and Mirzoian, P. (1985). "Analysis of cage induction motor with stator winding faults." *IEEE Trans. Power APP.*, Vol. 104, No. 7.
 - 11 - Kohler, J. S., Sottile, J. and Trutt, F. C. (1992). "Alternatives for assessing the electrical integrity of induction motors." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No.5, PP. 1101-1117.
 - 12 - Kliman, G. B., Premerlani, W. J., Koegl, R. A. and Hoeweler, D. (1996). "A new approach to on - line turn fault detection in Ac motors." *Conference Record of the IEEE - IAS Annual Meeting*, PP. 687-693.
 - 13 - Alex Cash, M., Habetler, T. G. and Kliman, G. B. (1997). "Insulation failure prediction in induction machines using line - neutral voltages." *IEEE*.
 - 14 - Bucci, G., Cecati, C. and Landi, C. "Special measurement system for on-line fault diagnosis of induction motors." *IEEE*.
 - 15 - Milimonfared, J., Meshgin Kelk, H., Nandi, S., Derminassians, A. and Toliyat, H. A. (1999). "A novel approach for broken rotor bar detection in cage induction motors." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. IA-35, No. 5, PP. 1000-1006.
-