

ارزیابی شاخصهای تشخیص خطای ناهم مرکزی در ماشینهای القایی به روش المان محدود با وجود اثر اشباع

سید جلال الدین حسینی^۱، جلال نظرزاده^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه شاهد تهران، sjhb1366@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشگاه شاهد تهران، nazarzadeh@shahed.ac.ir

چکیده

افزایش ناهم مرکزی در فاصله هوایی ماشینهای الکتریکی دوار به دلیل احتمال برخورد رتور به استاتور و همچنین ایجاد مشکل در یاتاقانها هزینه تعمیرات و نگهداری را مخصوصاً در موتورهای بزرگ افزایش می دهد فلذا تشخیص به موقع از این موارد جلوگیری می نماید. در این مقاله با استفاده از نرم افزار Maxwell مدل دقیقی از موتور سه فاز القایی قفس سنجایی ارائه شده است. در ادامه مدل مذکور در شرایط مختلف فاصله هوایی طراحی و مورد شبیه سازی و تحلیل قرار می گیرد. یکی از رایج ترین روشها برای تشخیص ناهم مرکزی، تحلیل طیف جریان استاتور موتور (MCSA)^۱ می باشد که تحلیل فوریه (FFT) از ساده ترین روشها برای پیاده سازی MCSA می باشد. با استفاده از روش آنالیز فوریه جریان استاتور در شرایط حالت دائم مقدار ناهم مرکزی مشخص شده و در صورت افزایش ناهم مرکزی ماشین معیوب تشخیص داده می شود. در نتایج شبیه سازی ها حاکی از آن است که بکارگیری مدل المان محدود به خوبی میتواند اثرات اجزاء ماشین نظیر دندانه ها و هادی های توزیع یافته رتور را بطور جدی مورد ارزیابی قرار دهد. روش دیگری که در شرایط حالت دائم جریان استاتور برای تشخیص خطای ناهم مرکزی کاربرد دارد روش دیگرام فضایی است که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور از پارامترهای یک موتور القایی قفس سنجایی ۱۰۱ kw واقعی استفاده شده است. این مقاله اثرات انواع ناهم مرکزی را در ماشین مذکور با در نظر گرفتن اشباع مورد ارزیابی قرار می دهد.

واژه های کلیدی

روش المان محدود، موتور القایی قفس سنجایی، اشباع، ناهم مرکزی، روش آنالیز فوریه جریان استاتور، MCSA.

مقدمه

در سالهای اخیر روش هایی برای مدلسازی ماشینهای القایی قفس سنجایی ارائه شده است و بسته به کاربرد، از جزئیات بیشتری همچون اشباع در مدل لحاظ شده است. تحقیقات نشان می دهد، خطای شبیه سازی مقالاتی که اثرات غیر خطی مغناطیسی را در مدل وارد نمودند به زیر ۵ درصد کاهش یافته است [۱]. از جمله روش های مدلسازی روش دو محوری، المان محدود، تابع سیم بندی و مدار معادل مغناطیسی می باشند. روش دو محوری ساده و دارای تقریب زیادی است و کاربردهای کنترلی دارد. روش المان محدود مدلی با دقت بالا نسبت به روش های دیگری همچون تابع سیم بندی است [۲] ولی این روش به خصوص وقتی که نامتقارنی در مدل باشد، سرعت تحلیل پایین می باشد [۱،۳]. در این روش پیاده سازی هیستریزس امکان پذیر است [۴،۲]. روش تابع سیم بندی تمام هارمونیک های سیم بندی را در نظر می گیرد ولی Skew (مورب بودن دندانه های رتور) و افت MMF در مسیر شار کمتر در نظر گرفته شده است [۳]. به دلیل ویژگی ها و نقاط قوت روش مدار معادل مغناطیسی، از جمله در نظر گرفتن تمام هارمونیک های فضایی سیم بندی های ماشین، و اثر مورب بودن شیارها [۵] و همچنین سرعت محاسبات بالا روشی مناسب برای مدلسازی ماشین های الکتریکی می باشد ولی دقت برای تشخیص ناهم مرکزی در شرایط ابتدایی به وجود آمدن این خطا بسیار مورد اهمیت است لذا در این مقاله روش المان محدود برای مطالعه موتورهای القایی که کاربرد وسیعی در صنعت دارد، به کار گرفته شده است.

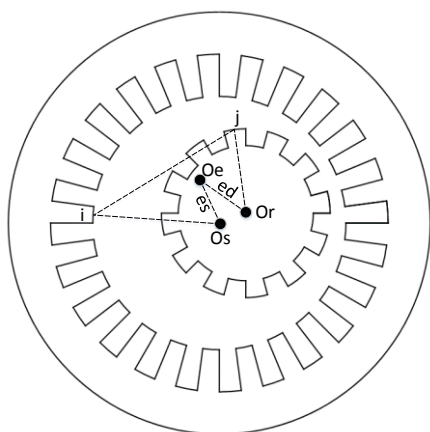
از سوی دیگر افزایش ناهم مرکزی استاتیکی به دلیل موقعیت نادرست مونتاژ هسته استاتور یا مراکز بلبرینگ ها در کارخانه اتفاق می افتد، که اگر این ناهم مرکزی زیاد باشد منجر به ناهم مرکزی دینامیکی شده و در ادامه به دلیل احتمال برخورد رتور به استاتور و همچنین ایجاد مشکل در یاتاقانها هزینه تعمیرات و نگهداری را مخصوصاً در موتورهای بزرگ افزایش می دهد [۶]. از این رو تشخیص خطای ناهم مرکزی استاتیکی که موجب نامتعارف شدن حرکت رتور می گردد، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد.

^۱ Motor Current Signature Analysis

راندمان و افزایش حرارت در قسمت های مختلف ماشین و در نهایت باعث خرابی کلی در ماشین القایی می گردد. بنابراین تشخیص به موقع و سریع این درجه از خطاها در ماشین سبب پیشگیری در تخریب کلی ماشین خواهد شد.

جدول ۱: درصد انواع خطاها در ماشین القایی [۱۱]

نوع خطا	درصد وقوع
خرابی یاتاقان ها	۵۰-۶۰
خرابی عایق استاتور	۳۰-۴۰
خرابی قفسه رتور	۵-۱۰



شکل ۱: محل قرارگیری مراکز رتور و استاتور در شرایط مختلف ناهم مرکزی

به منظور مدل سازی حرکت در یک ماشین الکتریکی لازم است نحوه ی قرارگیری مراکز رتور و استاتور در شرایط مختلف ناهم مرکزی تعریف شوند. برای عدم تقارن فاصله هوایی مصور در شکل (۱) محورهای رتور و استاتور موازی اند. در حالت استاتیکی محور رتور در فاصله ثابتی (e_s) از محور استاتور قرار دارد و به دور خود می چرخد ولی در حالت دینامیکی محور رتور در فاصله ثابتی (e_d) از محور استاتور قرار دارد و علاوه بر آنکه به دور خود می چرخد به دور محور استاتور نیز می چرخد و در ناهم مرکزی ترکیبی رتور دور مرکزی (O_e) غیر از مراکز استاتور (O_s) و رتور (O_r) می چرخد.

اندازه فاصله هوایی از رابطه ذیل قابل بیان می باشد:

$$|\vec{ij}| = |\vec{O_s i}| - |\vec{O_s O_e}| - |\vec{O_e O_r}| - |\vec{O_r j}| \quad (3)$$

تشخیص خطای ناهم مرکزی به روش آنالیز فوریه جریان استاتور [۱۲]:

برای تشخیص خطای ناهم مرکزی ترکیبی با استفاده از روش MCSA مناسب است که مهندسان در صنعت به آموزش گام به گام زیر توجه نمایند. این روش مبتنی بر سه مرحله است و با استفاده از داده های تجربی جدول (۳)، مقدار ناهم مرکزی به صورت تقریبی تشخیص داده می شود:

از جمله روشهای تشخیص خطای ناهم مرکزی استاتیکی در شرایط حالت دائم (steady state) روش آنالیز فوریه (FFT) جریان استاتور می باشد.

با جستجو در مراجع [۷-۸] مشخص می گردد که فرکانسهای تشخیص خطا در این روش از رابطه زیر به حاصل می شود.

$$f_{ec} = f_1 [kR \frac{(1-s)}{p} \pm n_{ws} \pm 2n_{sd}] \pm n_d f_1 \frac{(1-s)}{p} \quad (1)$$

در رابطه فوق f_1 فرکانس منبع تغذیه، s لغزش، R تعداد میلله های رتور، p تعداد جفت قطب، k هر عدد صحیحی، $n_{ws} = 1, 3, 5, \dots$ ، $n_{sd} = 0$ یا 1 که صفر و یک به ترتیب برای ناهم مرکزی استاتیکی و دینامیکی می باشند.

در ناهم مرکزی ترکیبی^۲ فرکانسهای جریان ناشی از این پدیده با فرمول زیر بیان می شوند [۹-۱۰]:

$$f_{ec} = f_1 \pm k f_r, k = 1, 2, 3, \dots; f_r = \frac{(1-s)}{p} f_1 \quad (2)$$

بنابراین در این مقاله به منظور ارزیابی دقیق تشخیص خطای ناهم مرکزی در ماشین های القایی و بررسی کیفی روش فوریه در نتایج حاصل، ابتدا مدل سازی دقیقی از یک ماشین القای سه فاز با ناهم مرکزی استاتیکی و دینامیکی ارائه می شود. سپس با تحلیل المان محدود با دقت بالا، کلیه متغیرهای دقیق ماشین شناسایی شده و تحلیل تبدیل فوریه سریع FFT در آن صورت می پذیرد. با استفاده از فرکانس های تشخیص معرفی شده در مراجع مختلف، ارزیابی در خصوص دقت سنجش هریک معرفی و در نهایت مقایسه ی کیفی میان نتایج صورت می پذیرد. و همچنین لزوم شبیه سازی اشباع هسته مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و بر وجود آن تاکید می گردد.

مدل حرکت رتور در شرایط ناهم مرکزی:

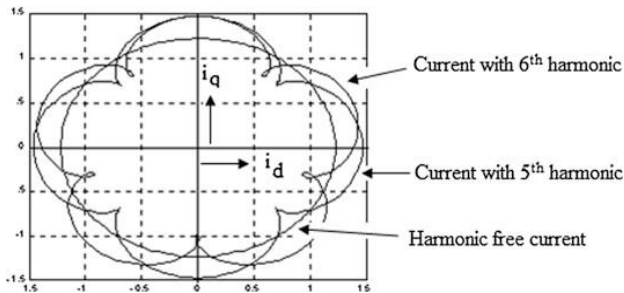
مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۱، درصد عمده ی از خطاهای مکانیکی در ماشین های القایی مربوط به ناهم مرکزی است [۱۱] و این خرابی ناشی از خرابی در ریخته گری هادی های رتور و یا ضعیف بودن نقاط جوشکاری شده می باشد. بنابراین خطا بسته به نوع ساختمان ماشین در اثر تنش های حرارتی، دینامیکی و... پدید می آید و این عیب اغلب در ماشین هایی با زمان کارکرد بالا ایجاد می شود. با فرسودگی ماشین، فونداسیون نشست کرده، قطعات تغییر شکل داده و تغییرات جزئی در خصوصیات دینامیکی ماشین شروع به بروز نمودن می کند. این عملکرد نامتقارن در فاصله هوایی ماشین القایی، شکل موج شار بر اثر میلله های رتور نسبت به حالت سالم تغییر می کند و در نتیجه هارمونیکهایی را در جریان خط ایجاد کرده و موجب افزایش تلفات و کاهش گشتاور متوسط در ماشین می شود و باعث کاهش

^۲ Mixed Eccentricity

یکی دیگر از روشهای تشخیص خطای ناهم مرکزی در شرایط حالت دائم^۴ روش دیاگرام فضایی می باشد. در این روش که به پایه کنکوردیا^۵ معروف است، جریان استاتور در فرم دو محوری طبق رابطه (۸) بیان می شود و سپس i_d بر حسب i_q رسم می گردد.

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (8)$$

با در نظر گرفتن مرجع ساکن استاتور می توان برای سهولت کار $\theta = 0$ فرض کرد. در حالت سالم نمودار i_d بر حسب i_q تقریباً بیضی شکل است ولی در حالت ناسالم به دلیل فرکانسهایی که در جریان استاتور ایجاد می گردد فرورفتگیهایی در نمودار مذکور پدید می آید که نشان از ناسالمی موتور دارد.



شکل ۳: نمودار i_d - i_q برای تشخیص فرکانسهای جریان

مثلا در شکل بالا برای جریان هارمونیک ششم، ۵ شکاف و برای جریان هارمونیک پنجم، ۴ شکاف در نمودار وجود دارد، یعنی افزایش فرورفتگیها نشان از افزایش هارمونیک نسبت به شرایط عادی و در نتیجه تشخیص وجود خطا در ماشین را در نگاه اول میسر می سازد.

نتایج شبیه سازی:

به منظور ارزیابی روشهای تشخیص معرفی شده، از پارامترهای درج شده در جدول (۳) که متعلق به یک ماشین سه فاز ۱.۱ کیلو واتی می باشد، استفاده شده است.

جدول ۳: مشخصات موتور مورد مطالعه

قدرت خروجی (KW)	۱.۱	تعداد فاز	۳
ولتاژ نامی	۳۸۰ V/Δ۲۲۰	ممان اینرسی	۰.۰۰۰۸۸۹
جریان نامی	۲.۶۵ Y/Δ۴.۶	تعداد شیار رتور	۱۸
راندمان (%)	۷۷	تعداد شیار استاتور	۲۴
سرعت در بار نامی (RPM)	۲۸۲۵	فرکانس (Hz)	۵۰
گشتاور نامی (N.M)	۳.۷۲	تعداد قطب	۲
ضریب قدرت	۰.۸۲	فاصله هوایی (mm)	۰.۵

^۴ Steady State

^۵ Concordia based

قدم اول: فرکانسهای عبور شیار رتور (PSH)^۳ را محاسبه می کنیم:

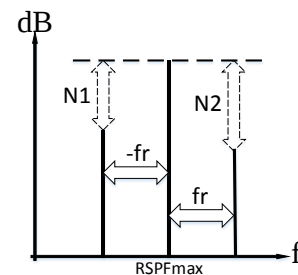
$$PSH = f_1 [R \frac{(1-s)}{p} \pm n_{ws}] \quad (4)$$

قدم دوم: فرکانسهای ناشی از خطای ناهم مرکزی (f_r) را محاسبه می کنیم:

$$f_r = f_1 \frac{(1-s)}{p} \quad (5)$$

قدم سوم: دامنه فرکانسها مختلف را بر حسب فرمول $20 \cdot \text{Log}[v/v_{ref}]$ محاسبه می نماییم. بزرگترین فرکانس را انتخاب نموده و طبق شکل زیر مقدار N_{ec} را مشخص کرده و برای تشخیص درصد ناهم مرکزی به جدول (۲) مراجعه شود.

$$N_{ec} = \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (6)$$



شکل ۲: مقدار فرکانس در LSB و RSB

جدول ۲: بررسی تشخیص مقدار ناهم مرکزی [۱۲]

$N_{ec} > 40 \text{ dB}$	ناهم مرکزی ۵ درصدی
$N_{ec} = 35-40 \text{ dB}$	ناهم مرکزی ۱۰ درصدی
$N_{ec} = 25-35 \text{ dB}$	ناهم مرکزی بیش از ۱۰ الی ۱۵ درصدی
$N_{ec} = 15-25 \text{ dB}$	ناهم مرکزی بیش از ۱۵ الی ۲۰ درصدی
$N_{ec} \leq 15 \text{ dB}$	ناهم مرکزی بیش از ۲۰ درصد و لزوم ارجاع به تعمیرگاه

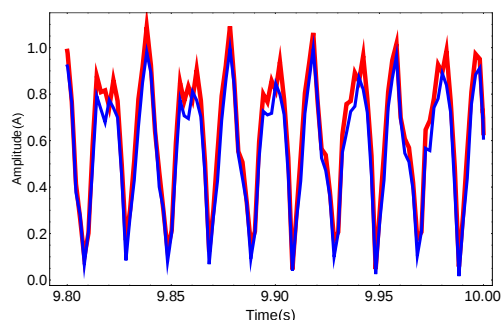
اگر در ماشین مورد مطالعه رابطه (۷) حاکم باشد یعنی تعداد میله های رتور (R) مضربی از تعداد قطبها ($2p$) باشد ممکن است هارمونیکها به اندازه کافی افزایش نیابند [۱۳] و تشخیص درصد ناهم مرکزی طبق جدول و مراحل ذکر شده بالا نا ممکن است. به همین دلیل در ادامه روش دیاگرام فضایی مورد بحث و بررسی قرار می گیرد.

$$R = 2p[3(m \pm q) \pm r], m \pm q = 0, 1, 2, 3, \dots, r = 0 \text{ or } 1 \quad (7)$$

مراحل تشخیص خطای ناهم مرکزی به روش دیاگرام فضایی [۱۶-۱۴]:

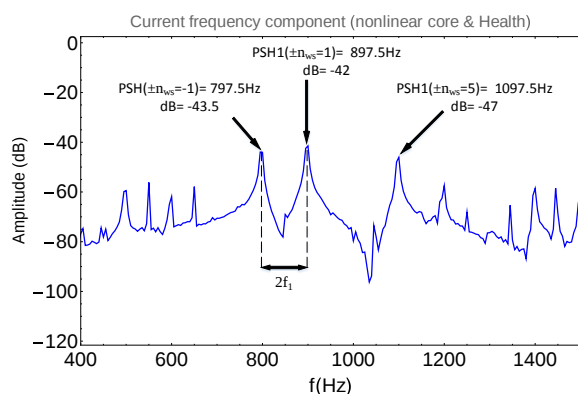
^۳ Principal Slot Harmonics

چگالی شار در نقطه‌ای ثابت از فاصله هوایی ماشین در دو حالت فاصله هوایی ثابت و ناهم‌مرکزی ترکیبی مقایسه شده‌اند که نتیجه را در شکل (۷) ملاحظه می‌فرمایید.



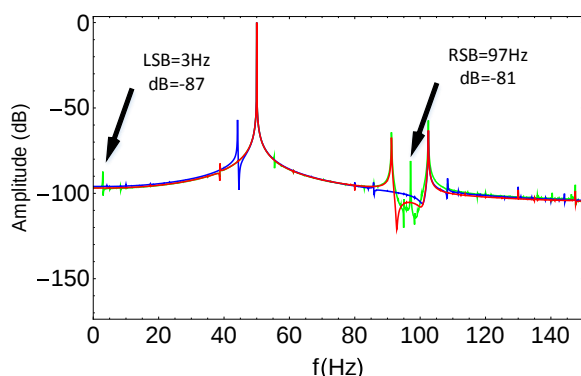
شکل ۷: مقایسه چگالی شار در نقطه‌ای ثابت از فاصله هوایی در شرایط هسته غیر خطی: سالم (آبی) - ناهم‌مرکزی ترکیبی شامل ۴۰ درصد استاتیکی و ۴۰ درصد دینامیکی (قرمز)

شکل (۸) نشان می‌دهد که شبیه سازی المان محدود توانسته فرکانسهای اصلی ناشی از شیارهای (PSH) رتور را به خوبی نشان دهد.

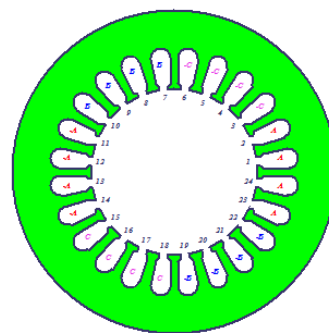


شکل ۸: طیف فرکانسی جریان استاتور در شرایط هسته غیر خطی و سالم

در شکل (۹) شکل طیف جریان در حالت هسته خطی ترسیم شده است و در ناهم‌مرکزی ترکیبی فرکانسهای (Left) LSB و (Right SideBand) RSB تحریک شده و اندازه آنها نمایش داده می‌شود:

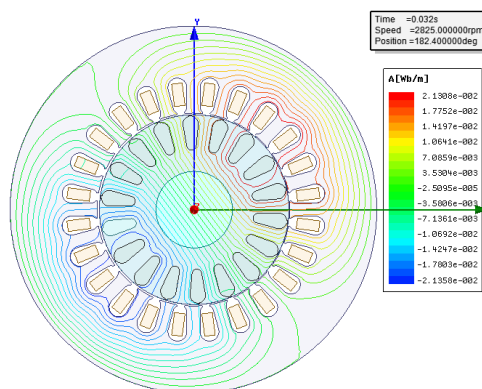


شکل ۹: مقایسه طیف جریان در شرایط هسته خطی: سالم (آبی) - ۴۰ درصد ناهم‌مرکزی استاتیکی (قرمز) - ناهم‌مرکزی ترکیبی شامل ۴۰ درصد استاتیکی و ۴۰ درصد دینامیکی (سبز)



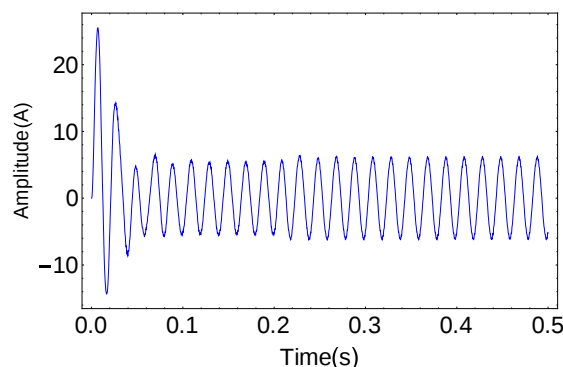
شکل ۴: توپولوژی سیم بندی موتور مورد مطالعه

سیم بندی ماشین مورد مطالعه در شکل (۴) به تصویر کشیده شده است و موتور را در شرایط ولتاژ و سرعت نامی شبیه سازی نموده و FFT جریان نرمالایز و لگاریتمی شده در شرایط مختلف فاصله هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. خطوط میدان در شرایط ناهم‌مرکزی استاتیکی و هسته غیر خطی را در شکل (۵) می‌توانید ببینید:



شکل ۵: خطوط میدان در شرایط ناهم‌مرکزی استاتیکی و هسته غیر خطی

در شکل (۶) جریان فاز A استاتور از لحظه راه‌اندازی تا زمان ۰.۵ ثانیه ترسیم شده است به طوری در ابتدا ماشین با بار یک نیوتن متری راه‌اندازی می‌شود و در لحظه $t=0.2s$ بار به مقدار $3.72 N.m$ افزایش می‌یابد:



شکل ۶: جریان فاز A استاتور در شرایط سالم و هسته غیر خطی

جدول ۵: مقدار و دامنه فرکانس RSB در شرایط مختلف

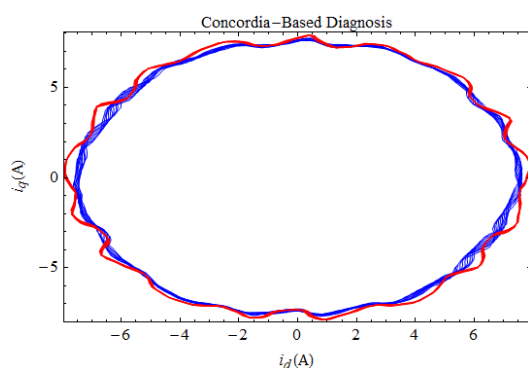
شرایط فاصله هوایی	مقدار فرکانس RSB		دامنه فرکانس RSB	
	خط هسته	خط غیر هسته	خط هسته	خط غیر هسته
سالم	*	۹۷.۵	*	-۵۰
ناهم مرکزی استاتیکی	*	۹۷.۵	*	-۴۶
ناهم مرکزی دینامیکی	۹۷	۹۷.۵	-۸۱	-۴۶.۳

بنابراین در نظر گرفتن اشباع در شبیه‌سازیها برای تشخیص ناهم‌مرکزی الزامی است.

طبق رابطه (۷) به ازای $m \pm q = 3$ و $r = 0$ می‌توان به عدد ۱۸، یعنی تعداد میله‌های رتور ماشین تحت مطالعه مقاله رسید. این نکته به انضمام نتایج به دست آمده، نشان می‌دهد که تشخیص ناهم‌مرکزی و درصد آن از روی طیف جریان برای ماشین مورد مطالعه مقاله تقریباً ناممکن است. به طور مثال با توجه به شکل (۹) $N_{ec} = 58$ می‌گردد در صورتی که ناهم‌مرکزی ترکیبی شامل ۴۰ درصد استاتیکی و ۴۰ درصد دینامیکی است و بایستی $N_{ec} \leq 15$ dB باشد که این مورد به دلایل فوق برآورده نمی‌شود.

فلذا در ادامه جهت بررسی‌های بیشتر روش دیاگرام فضایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

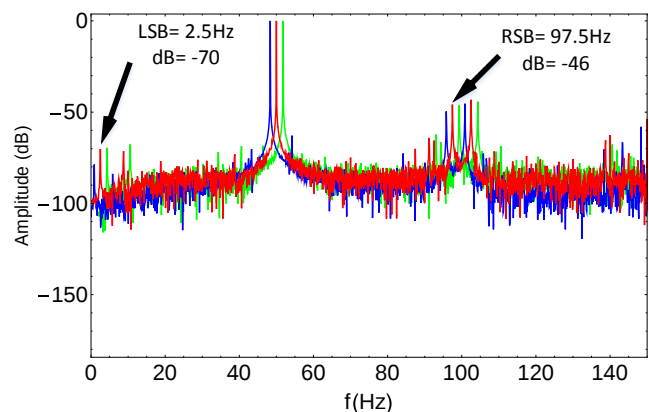
با توجه به شکل (۱۱) وقتی ناهم‌مرکزی استاتیکی در فاصله هوایی رخ دهد شکل نمودار i_d - i_q از تعداد شکافهایی و اعوجاجهای بیشتری برخوردار است.



شکل ۱۱: مقایسه نمودار جریانهای دو محوری نسبت به هم در شرایط سالم (آبی) و ناهم‌مرکزی استاتیکی (قرمز)

در شرایط ناهم‌مرکزی ترکیبی نتایج به صورت زیر استخراج شده است:

اما همین بازه فرکانسی برای هسته غیر خطی (با اشباع) شبیه‌سازی شده است و خروجی را در شکل (۱۰) می‌بینید:



شکل ۱۰: مقایسه طیف جریان در شرایط هسته غیر خطی: سالم (آبی) - ۴۰ درصد ناهم‌مرکزی استاتیکی (قرمز) - ناهم‌مرکزی ترکیبی شامل ۴۰ درصد استاتیکی و ۴۰ درصد دینامیکی (سبز)

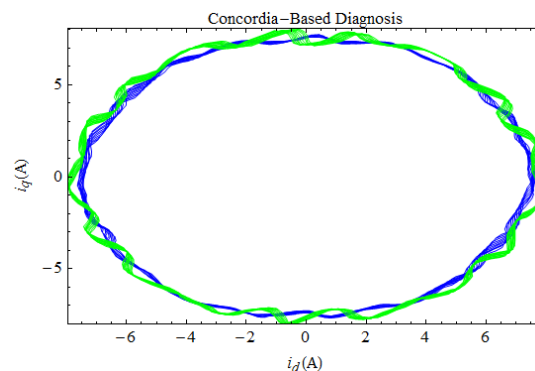
قابل توجه است در شکل (۱۰) برای سهولت در تشخیص طیف‌های جریان در شرایط مختلف، طیف‌های شرایط سالم و ناهم‌مرکزی ترکیبی نسبت به طیف ناهم‌مرکزی استاتیکی شیفت داده شده‌اند. پر واضح است که وجود اشباع باعث شده است که فرکانسهای LSB و RSB در شرایط سالم و ناهم‌مرکزی استاتیکی تحریک شده‌اند و دامنه ایشان نسبت به زمانی که هسته خطی بود، افزایش پیدا کرده است. همچنین طبق شکل‌های ۹ و ۱۰ مقدار فرکانس باندهای چپ و راست نیز تغییر کرده است. جدول‌های (۴) و (۵) مقدار فرکانس LSB و RSB و دامنه ایشان را در شرایط مختلف هسته و فاصله هوایی نشان می‌دهد.

جدول ۴: مقدار و دامنه فرکانس LSB در شرایط مختلف

شرایط فاصله هوایی	مقدار فرکانس LSB		دامنه فرکانس LSB	
	خط هسته	خط غیر هسته	خط هسته	خط غیر هسته
سالم	*	۲.۵	*	-۷۸.۷
ناهم مرکزی استاتیکی	*	۲.۵	*	-۷۰
ناهم مرکزی دینامیکی	۳	۲.۵	-۸۷	-۶۹

Transactions on Energy Conversion, Dec, pp. ۳۴۷-۳۵۷.

- [۷] S.J. Yang, ۱۹۸۱, "Low Noise Electric Motors," *Monographs in Electrical and Electronic Engineering*, IEE, Savoy Place, London, England.
- [۸] A. J. Ellison and S. J. Yang, ۱۹۷۱ "Effects of rotor eccentricity on acoustic noise from induction machines", *Proceedings of the IEE*, January ,pp. ۱۷۴-۱۸۴.
- [۹] S. Nandi, R. Bharadwaj, and H.A. Toliyat, ۲۰۰۲, "Performance analysis of a three phase induction motor under incipient mixed eccentricity condition," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, September, pp. ۳۹۲-۳۹۹.
- [۱۰] D.G. Dorrell, W.T. Thomson, and S. Roach, ۱۹۹۷. "Analysis of air-gap flux, current, vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in ۳-phase induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. ۲۴-۳۴.
- [۱۱] J. Faiz, B.M. Ebrahimi, B. Akin and H.A. Toliyat, ۲۰۰۹. "Comprehensive Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motors Using Finite Element Method". *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, MARCH, pp. ۱۷۶۴ - ۱۷۶۷.
- [۱۲] W.T. Thomson and I. Culbert, ۲۰۱۶. *Current Signature Analysis for Condition Monitoring of Cage Induction Motors: Industrial Application and Case Histories*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [۱۳] H.A. Toliyat, S. Nandi, S. Choi, H.M. Kelk, ۲۰۱۳. *Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. CRC Press, an imprint of Taylor & Francis Group.
- [۱۴] S. Chattopadhyay, S. Karmakar, M. Mitra and S. Sengupta, ۲۰۱۲. "Radar analysis of stator current Concordia for diagnosis of unbalance in mass and cracks in rotor bar of an squirrel cage induction motor". *Int J Model Meas Control Gen Phys Electr Appl*, AMSE.
- [۱۵] S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, ۲۰۰۷, "Harmonic analysis in a three-phase system using park transformation technique". *Modeling-A. AMSE Int J Model Simul*, France.
- [۱۶] S. Chattopadhyay, M. Mitra and S. Sengupta, ۲۰۱۱, *Electric power quality*. First edn, Springer.
- [۱۷] J. Cusido, J. Rosero, E. Aldabas, J.A. Ortega and L. Romeral, ۲۰۰۶, "New fault detection techniques for induction motors". *Electr Power Quality Utilisation*, Magazine II. January.



شکل ۱۲: مقایسه نمودار جریانهای دو محوری نسبت به هم در شرایط سالم (آبی) و نا هم مرکزی ترکیبی (سبز)

با استفاده از این روش وجود مشکل در موتور تشخیص داده می شود ولی درصد و نوع آن برای ماشین مورد مطالعه قابل تعقیب نیست.

نتیجه گیری و جمع بندی

با توجه به شبیه سازیها مشخص است که حتی در روش FEM با دقت زیاد محاسبات، انتخاب روش MCSA در شرایط حالت دائم نمی تواند به خوبی خطای ناهم مرکزی را تشخیص دهد [۱۷] و روش دیاگرام فضایی نیز از جامعیت خوبی برخوردار نیست. فلذا پیشنهاد می گردد روشهای دیگر تشخیص خطا من جمله روش جدید آنالیز صوت برای موتورهای کوچکی که تعداد میله های رتور آنها طبق رابطه (۷) به دست می آید را به کار برد.

مراجع و منابع

- [۱] M. Yilmaz and P. T. Krein, ۲۰۰۸. "Capabilities of Finite Element Analysis and Magnetic Equivalent Circuits for Electrical Machine Analysis and Design". *Power Electronics Specialists*, June.
- [۲] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi and Hamid A. Toliyat, ۲۰۰۹. "Effect of Magnetic Saturation on Static and Mixed Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motor". *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, AUGUST.
- [۳] H. Meshgin-Kelk, Hamid A. Toliyat and J. Milimonfared, ۲۰۰۳. "A Comprehensive Method for the Calculation of Inductance Coefficients of Cage Induction Machines". *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, JUNE.
- [۴] T. Chevalier, A. Kedous-Lebouc and B. Cornut, ۲۰۰۰. "A method to evaluate effects of eccentricity and anisotropy on iron losses of electrical machine Application to an induction motor". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, June, pp. ۶۰۴-۶۰۶.
- [۵] H. Meshgin-kelk, ۲۰۰۴. "Asymmetrical magnetic forces calculation in squirrel-cage induction machine by static eccentricity". *the ۱۹th International power system conference, Iran, PSC ۲۰۰۴*.
- [۶] W.T. Thomson and A. Barbour, ۱۹۹۸. "On-line current monitoring and application of a finite element method to predict the level of static airgap eccentricity in three-phase induction motors". *IEEE*