Archvie of SID

آزمایش یک موتور القایی سه فاز جدید و کاهش چشمگیر نیروهای محوری موتور

دکتر همایون مشگین کلک مهندس علی امتی
دانشگاه تفرش
دانشکده مهندسی برق
Email: meshgin@aut.ac.ir
#

کلمات کلیدی : موتور القایی ، نیروهای محوری، نا هم محوری

چکیده :

موتورهای القایی قفس سنجابی تکفاز و سه فاز از انواع بسیار قدیمی و پرکاربرد موتورهای الکتریکی در صنعت می باشند. با پیشرفت تکنولوژی مواد ، هر چند در ساخت این موتورها به مرور زمان بهینه سازی هایی صورت گرفته است ، با اینحال ساختار این موتورها در دهه های اخیر بدون تغییر مانده است. در آزمایشگاه تحقیقاتی ماشینهای الکتریکی پردیس تفرش دانشگاه صنعتی امیرکبیر، یک موتور القایی سه فاز نمونه آزمایشگاهی و جدید ساخته شده است و در این مقاله ، با ارائه چند آزمایش انجام شده بر روی آن ، با برخی ویژگی های آن از جمله کاهش چشمگیر نیروهای محوری آشنا خواهیم شد. کاهش نیروهای محوری در افزایش عمر مفید بلبرینگ ها اثرگذار است.

مقدمه :

ساختار رتور موتورهای القایی در دو نوع با شیارهای مورب و غیر مورب وجود دارد. در ساختار غیر مورب ، که بیشتر در موتورهای با توان بالا استفاده می شود، گشتاور موتور در حداکثر مقدار خود قرار می گیرد، با اینحال ، گشتاور موتور به غیر از گشتاور متوسط و مفید، با هارمونیک های نسبتا قوی همراه است . چنانچه ممان اینرسی موتور بزرگ نباشد ، این گشتاورهای هارمونیکی ، لرزش و نویز صوتی را بدنبال خواهد داشت و این لرزش ها هم به نوبه خود سبب خستگی قطعات مکانیکی در موتور می شوند. از طرف دیگر ، غیر مورب بودن شیارها ، سبب می شود که با عبور دندانه های رتور از مقابل دندانه های استاتور صدای " هوم مغناطیسی " و "سوت" از موتور شنیده شود. این نویزهای صوتی در محیط کار مزاحمت ایجاد می کنند. برای کاهش این نویزهای صوتی، عموما،شیارهای رتور به اندازه یک گام شیارهای رتور مورب می شوند. با تورب این شیارها، از گشتاور متوسط و راه انداز کاسته می شود.

با مورب شدن شیارها بدلیل تغییر میدان مغناطیسی در امتداد محور ماشین ، نیروهایی در جهت محور ماشین ایجاد می شوند که سبب اعمال نیرو در جهت محوری به بلبرینگها و خستگی آنها می شود.

www.SID.ir

Archvie of SID

از طرف دیگر، عدم تقارن در فاصلهٔ هوایی یکی از موارد بسیار جدی در عملکرد موتورهای الکتریکی است و حتی در موتورهای نو نیز وجود دارد که این امر به دلیل وجود تولرانس ذاتی در قطعات مختلف موتور (همچون شفت، بلبرینگ‌ها، و دیگر قطعات) و نحوهٔ مونتاژ این قطعات به یکدیگر می‌باشد. خستگی بلبرینگ‌ها (که عمده‌ترین اشکال در موتورهای القایی است) نیز عموماً منجر به عدم تقارن در فاصلهٔ هوایی می‌شود. بطور کلی می‌توان گفت که رتور یک ماشین الکتریکی هیچگاه بطور کامل با استاتور آن هم راستا نیست و یا اینکه محور آنها بر روی یکدیگر قرار ندارند. این وضعیت را خروج از مرکزیت می‌نامیم. در اثر خروج از مرکزیت، فاصلهٔ هوایی بین استاتور و رتور نامتقارن می‌شود. خروج از مرکزیت یک منبع ایجاد نیروی شعاعی، لرزش، و نویز است و بایستی توجه خاص به آن نمود. وجود عدم تقارن در فاصله هوایی و مورب بودن شیارها ، سبب تشدید نیروهای محوری و خستگی بیشتر بلبرینگها می شود.

مرجع [۱] ، به وجود نیروهای محوری در موتور بدون حضور خروج از مرکزیت اشاره کرده است. با اینحال روابط ارائه شده دارای تقریب هستند و مقدار نیرو را بزرگتر از آنچه که هست می دهند. در مرجع [۲]، بیان شده است که بغیر از مولفه ثابت، هارمونیکهایی با فرکانس $2f$ (که f فرکانس تغذیه است) در نیروهای محوری در اثر مورب بودن میله های رتور وجود دارد. اثر مورب بودن میله های رتور در ایجاد نیروهای محوری با استفاده از روش عددی اجزاء محدود و بدون حضور خروج از مرکزیت رتور در مرجع [۳] مطالعه شده و نتایج محاسبات به صورت مختصر ارائه شده است.

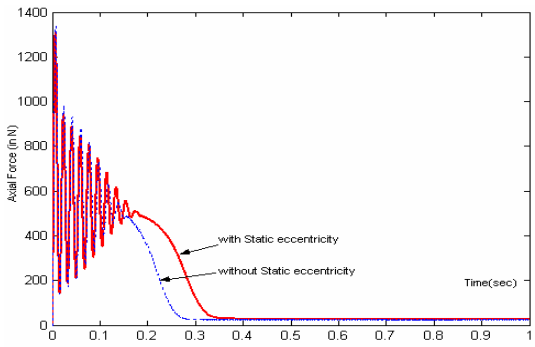
در مقاله حاضر، به تحلیل برخی نتایج آزمایشگاهی بر روی یک موتور القایی سه فاز نمونه جدید و یک موتور القایی مشابه که از بازار داخل کشور تهیه شده است ، پرداخته می شود. در موتور جدید ، در حالیکه در نیروهای محوری کاهش چشمگیری حاصل شده ، نویز صوتی افزایش نیافته است. لازم به ذکر است که این موتور با امکانات بسیار محدود و نه پیشرفته ساخته شده است و هم اکنون تحت آزمایش قرار دارد. در اینجا به ساختار این موتور اشاره ای نمی شود.

نیروها و حرکت محوری رتور

از تئوری الکترومغناطیس، می دانیم که به سیم حامل جریان در میدان مغناطیسی نیرو وارد می شود. در ماشین القایی قفس سنجابی با قرار گرفتن میله های حامل جریان رتور در میدان مغناطیسی استاتور که به صورت شعاعی ، از فاصله هوایی عبور می کند و به صورت عمود با سطح بیرونی رتور به رتور و میله های آن تلاقی پیدا می کند نیروهایی ایجاد می شوند . اگر فاصله هوایی ماشین متقارن باشد و میله های رتور مورب نباشند، فقط نیروی مماسی ایجاد می شود. مولفه های مماسی سبب حرکت چرخشی رتور میشوند. ولی چنانچه میله ها مورب باشند ، حاصلضرب خارجی میدان استاتور و جریان میله های رتور علاوه بر مولفه های مماسی دارای مولفه هایی در جهت محور ماشین نیز می باشد و هر چه میزان تورب میله ها بیشتر باشد اندازه این مولفه ها نیز بیشتر می شود.

از طرف دیگر، پس از تغذیه موتور ، رتور در امتداد محوری ، در مکانی قرار می گیرد که رلوکتانس فاصله هوایی بین استاتور و رتور به حداقل برسد. بعبارت دیگر نیرویی بین استاتور و رتور پدید می آید که هسته رتور مقابل هسته استاتور قرار گیرد. برآیند این نیرو و نیروی محوری ناشی از تورب میله ها ، تعیین کننده موقعیت محوری رتور است.

وجود هر نوع عدم تقارن در فاصلهٔ هوایی نیز بر برآیند این نیروها اثر می گذارد. شکل ۱ نمودارهای نیروی محوری بر حسب زمان در یک موتور القایی سه فاز سه اسب نمونه برای دو حالت سالم و حالت ۵۰ درصد خروج از مرکزیت استاتیک را نشان میدهد.این نمودارها با استفاده از شبیه سازی بدست آمده اند .



شکل ۱ نیروهای محوری برای یک موتور القایی نمونه که از شبیه سازی بدست آمده اند.

www.SID.ir

Archvie of SID

نتایج آزمایشگاهی که در ادامه می آیند نشان میدهند که زاویه داشتن امتداد محور رتور نسبت به محور استاتور (misalignment) ، اثر قابل توجهی بر اندازه نیروهای محوری ناشی از مورب بودن میله ها دارد.

اجرای آزمایش بر روی یک موتور القایی متداول در بازار

برای آزمایش پدیدهٔ فوق، یک موتور سه فاز القایی قفس سنجابی از بازار داخل کشور تهیه شد. تغییراتی در محل بلبرینگهای این موتور داده شد بنحوی که رتور آن به آزادی بتواند در امتداد محورش حرکت نماید. در نتیجه، برآیند نیروهای اشاره شده در بالا، تعیین کنندهٔ موقعیت رتور در امتداد محورش می باشد.

در آزمایشها ، برای آنکه بتوان میزان عدم تقارن فاصله هوایی را با دقت بهتری کنترل نمود، فاصله هوایی ماشین با عملیات تراشکاری از مقدار ۰/۳ میلیمتر به ۰/۵ میلیمتر افزایش داده شد[۴].

دو آزمایش ترتیب داده شد. در آزمایش اول ، یک طرف محور رتور به اندازه ای پائین آورده شد که با راه اندازی موتور، رتور باز هم بطور آزادانه و بدون درگیری با استاتور حرکت نماید. بنابراین ، محور رتور با محور استاتور به اندازه قابل ملاحظه ای زاویه دار شد. با تغذیه این موتور با ولتاژ نامی و در حالت بی باری، موقعیت محوری رتور تعیین شد. در شکل ۲ تصویر مربوط به این آزمایش نشان داده شده است. ساعتی که برای اندازه گیری موقعیت محوری رتور استفاده شده است نیز مشاهده می شود. توالی فاز ماشین عوض شد و محل جدید محور رتور با همان ساعت اندازه گیری شد. تصویر شکل ۳ بیانگر آنست که رتور نسبت به آزمایش قبلی در حدود ۲/۶ میلیمتر به بیرون حرکت کرده است. علت تفاوت میزان حرکت محوری رتور با تغییر جهت حرکت موتور ، ناشی از زاویه دار بودن محور رتور نسبت به محور استاتور (misalignment) است.

شکل ۲ تعیین موقعیت محوری رتور

شکل ۳ تعیین موقعیت محوری رتور

آزمایش دوم ترتیب داده شد. یک طرف محور رتور بنحو مناسبی بالاتر برده شد تا در آزمایش، حالت زاویه دار بودن محور رتور نسبت به محور استاتور نسبت به موقعیت رتور در آزمایش قبل کمتر شود . آزمایش انجام شد و سپس با عکس کردن توالی فاز آزمایش تکرار شد. اینبار مقدار جابجایی رتور با عکس شدن توالی فاز حدود ۰/۴۵ میلیمتر است. همچنین نسبت به آزمایش های تصاویر شکلهای ۲ و۳ ، مقدار بیرون آمدن محور رتور از محل تکیه گاه آن کمتر بود.

همچنین مشاهده شد که در تمام آزمایش های فوق، هستهٔ رتور هیچگاه بطور کامل با هستهٔ استاتور منطبق نگردید و لذا نیروهای محوری در این آزمایشها آنقدر قوی هستند که بر نیروی الکترومغناطیسی که سعی در حداقل نمودن رلوکتانس بین هستهٔ رتور و استاتور و انطباق آنها در مقابل هم دارند، اثر بگذارند. نتیجه دیگر آنست که میزان زاویه بین محور استاتورو رتور در اندازهٔ نیروی محوری اثر قابل ملاحظه دارد.

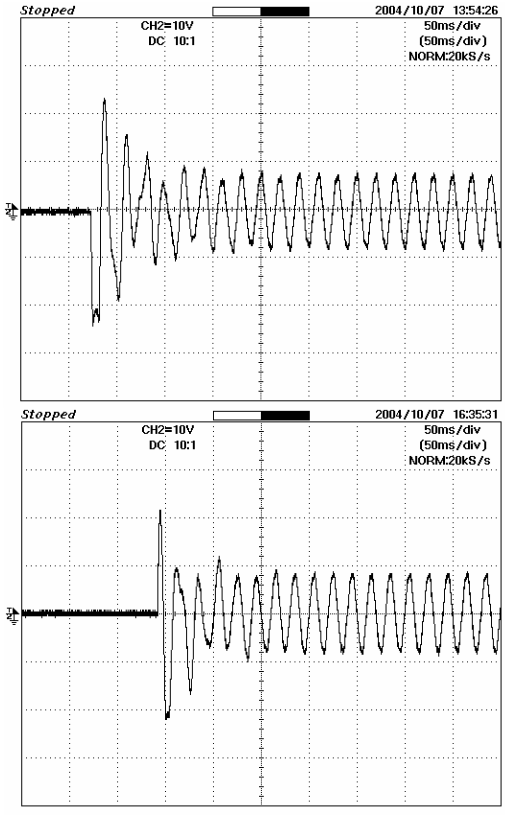
www.SID.ir

Archvie of SID

نتایج چند آزمایش بر روی موتور القایی جدید

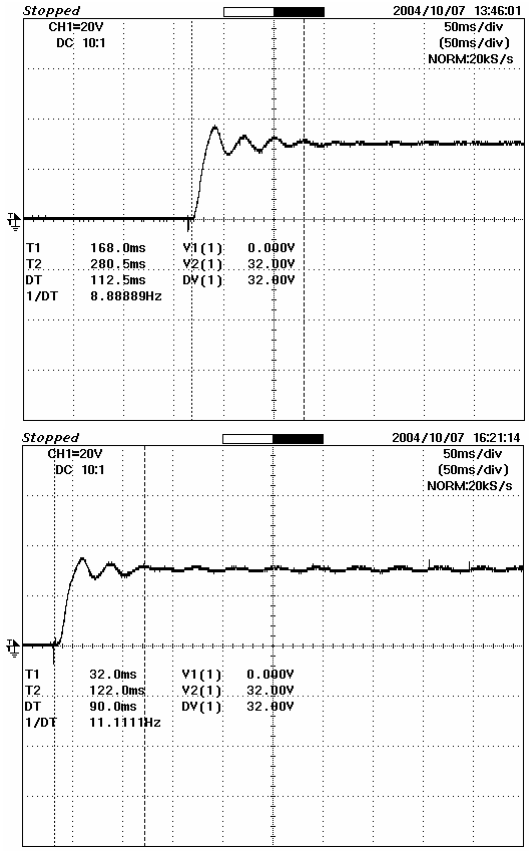
آزمایشهای فوق بر روی موتور القایی ساخته شده با طرح جدید نیز تکرار شد. فاصلهٔ هوایی ماشین جدید در دو آزمایش سوم و چهارم ، بترتیب مشابه دو آزمایش اول و دوم تنظیم شد. در فاصلهٔ هوایی تقریبا مشابه با آزمایش اول ، جابجایی رتور ۱ میلیمتر و در فاصلهٔ هوایی مشابه با آزمایش دوم میزان جابجایی محور رتور ۰/۲ میلیمتر اندازه گیری شد. مشاهده شد که در موتور جدید انطباق هستهٔ رتور و استاتور به مراتب بیش از موتور اول است که موید آنست که نیروهای محوری در موتور جدید کاهش چشمگیری دارند.

برای بررسی موتور القایی جدید، چند آزمایش دیگر بر روی آن انجام شد. در یک آزمایش بی باری ، از جریان هر دو موتور نمونه برداری شد. چون فاصلهٔ هوایی هر دو موتور یکسان است ، انتظار میرفت که جریان بی باری آنها یکسان باشد. شکل ۴ جریان بی باری این دو موتور را نشان میدهد. مشاهده می شود که برای موتور تهیه شده از بازار، دامنه جریان در حالت دائمی نسبت به موتور ساخته شده نمونه۴ درصد کمتر است. با این حال دامنه جریان راه اندازی دو موتور تقریبا مشابه است.



شکل ۴ نمودار جریان– زمان در راه اندازی در حالت بی باری (بالا) موتور تهیه شده از بازار(پائین) برای موتور ساخته شده نمونه

برای مقایسه گشتاور راه اندازی دو ماشین ، منحنی سرعت – زمان هر دو موتور در یک راه اندازی بدون بار بدست آمد. شکل ۵ منحنی ها را نشان میدهد. مشاهده می شود که موتور جدید دارای مدت زمان راه اندازی کوتاهتر نسبت به موتور دیگر است که این امر موید آنست که گشتاور راه اندازی آن بزرگتر است. از آنجائیکه دامنه جریان راه اندازی دو ماشین تقریبا مشابه است ، نتیجه گرفته شد که بزرگتر بودن گشتاور موتور ساخته شده نمی تواند بدلیل بزرگتر بودن مقاومت رتور آن باشد.



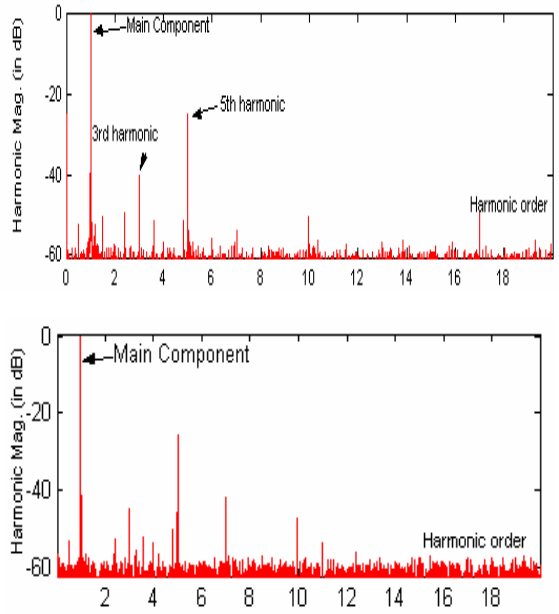
شکل ۵ نمودار سرعت زمان در راه اندازی با ولتاژ نامی برای موتور (بالا) تهیه شده از بازار ، (ب) ساخته شده نمونه

برای بررسی کیفیت رتور ساخته شده نسبت به رتور موتور متداول ، طیف های فرکانسی جریان ماشینها در حالت بی باری محاسبه گردیدند. در شکل ۶ این طیفها دیده می شوند و شباهت بسیاری دارند. وجود هارمونیک مرتبه ۵ قابل ملاحظه در این دو طیف ناشی از هارمونیکهای منبع سه فاز است.

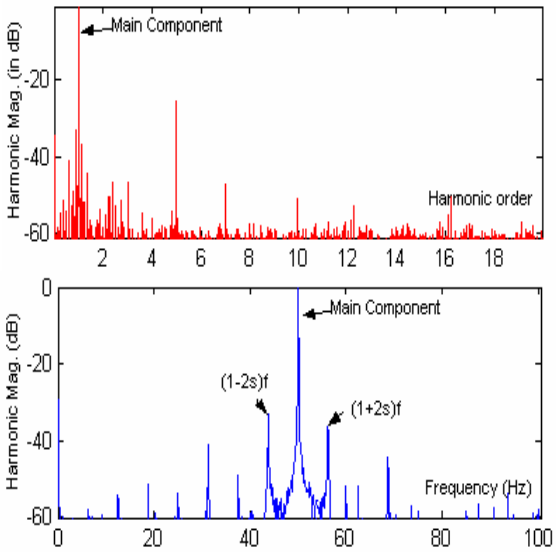
www.SID.ir

Archvie of SID

طیف فرکانسی جریان موتور جدید در حالت بارداری در شکل ۷ نشان داده شده است. وجود مولفه های فرکانسی $(1\pm 2s)f$ در این طیف بیانگر عدم تقارنهایی در قفس رتور موتور نمونه است که ناشی از روش ساخت رتور آنست. چنانچه امکان استفاده از دستگاههای مناسب تزریق آلومینیم جهت ساخت رتور آن باشد ، این مولفه ها بسیار کوچکتر خواهند شد.



شکل ۶ طیف های فرکانسی جریان ماشین در حالت بی باری برای موتور (بالا) تهیه شده از بازار و (پائین) ساخته شده نمونه



شکل ۷ طیف های فرکانسی جریان موتور جدید در حالت بارداری تا هارمونیک ۲۰ (بالا) و در اطراف هارمونیک ۵۰ هرتز(پائین)

ذکر نکاتی در مورد موتور جدید

توان موتور جدید با موتور دیگر برابر است. ازیک استاتور برای انجام تمام آزمایشها استفاده شد. چون وزن دو رتور یکسان و شعاع آنها نیز کاملا یکسان است، لذا ممان اینرسی آنها مشابه است. در ساختار رتور جدید سعی شده است که بر میزان گشتاور راه اندازی و حالت دائمی موتور افزوده شود و در عین این افزایش، نرمی حرکت موتور لحاظ شود. برای داشتن حرکت نرم در حالت دائمی ، بایستی در توابع اندوکتانس بین حلقه های رتور و سیم بندی های استاتور، از پرشها پرهیز شود چراکه مشتق این اندوکتانسهای متقابل در تولید گشتاور موتور نقش اصلی را دارند. از طرفی برای حذف یا کاهش نیروهای محوری بایستی عوامل ایجاد آنها را حذف نمود که ساده ترین راه آن ، رتوری با شیارهای بدون تورب است که این امر با نرمی حرکت موتور در تضاد است. هر چند در این مقاله ، جزئیات ماشین جدید بیان نشده است با اینحال، این عوامل مد نظر قرار گرفته اند.

نتیجه گیری

بر اساس آزمایشهای انجام شده بر روی یک موتور متداول تهیه شده از بازار داخل کشور، و یک موتور نمونهٔ جدید با ولتاژ و توان مشابه، نشان داده شد که میزان خروج از مرکزیت رتور بر روی نیروها و حرکت محوری ماشین موثر هستند. در موتور نمونهٔ جدید این نیروها و حرکت محوری بسیار کوچکتر هستند و لذا می توان ساختار ماشین های القایی سه فاز را دچار تغییرات نمود و امید است که موتور نمونه پس از انجام آزمایش های کامل ، بطور فراگیر قابل استفاده در صنعت باشد.

مراجع

1) C.E. Bradford and R.G. Rhudy,” Axial magnetic forces on induction machine rotors”,AIEE Technical Paper,1953, pp.488-492.
2) C.J. Slavik,”Axial Magnetic Forces in Induction Machines at Twice Line Frequency.pp.237 -240.

www.SID.ir

Archvie of SID

3) H.Kometani ,“ 3-D Electro-magnteic Analyses of A Cage Induction Motor with Rotor Skew”, IEEE Trans. On E.C. Vol. 11, No. 2, June 1996, pp. 331- 337
4) A. C. Smith, D. G. Dorrell, “ Calculation and measurement of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with eccentric rotors Part 2: Experimental investigation ”, *IEE Proc. Elec. Power Appl.*, Vol. 143, No. 3, 1996, pp. 202-210.

www.SID.ir