

محاسبه تلفات هسته موتور القایی به روش اجزاء محدود با در نظر گرفتن اثر شارهای گردشی و هارمونیکهای چکالی شار

حمید فتحی
استادیار

بهرنگ پورکاوه
دانشجوی کارشناسی ارشد

جواد شکراللهی مغانی
استادیار
دانشکده برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

آنچه در این مقاله ارائه می‌شود محاسبه تلفات هسته ماشین القایی سه فاز بوسیله تحلیل آن به روش اجزاء محدود می‌باشد. برای محاسبه از مدل سه جمله ای تلفات که تلفات هسته را به سه بخش تلفات هیستریزس، تلفات جریانهای گردابی و تلفات اضافی جدا می‌کند استفاده شده است. اثر شارهای گردشی که در بعضی از نواحی هسته وجود دارند و همچنین نقش هارمونیکهای چکالی شار که ناشی از ماهیت غیر خطی هسته و چرخش روتور می‌باشند نیز در نظر گرفته شده‌اند. در انتها نتیجه حاصل از محاسبات با نتیجه بدست آمده از آزمایش عملی مقایسه شده است.

کلمات کلیدی

موتور القایی، تلفات هسته، اجزاء محدود، شار گردشی، هارمونیک

Induction Motor Core Loss Calculation Using Finite Element Method Considering Rotational Fluxes and Flux Harmonics

B. Pourkaveh
M. Sc. Student

H. Fathi
Assistant Professor

J. S. Moghani
Assistant Professor

Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

This paper presents core loss calculation of 3-phase induction motor using finite element method. Three term iron loss model which separates total core loss into hysteresis, eddy currents and excess losses is used. Effect of rotational flux density which exists in some regions of core and flux density harmonics due to nonlinear behaviour of core materials and motion of rotor are also included. At the end the calculated and experimental results are compared.

Keywords

Induction motor, Core loss, Finite element, Rotational flux, Harmonic

محاسبه دقیق تلفات در هسته ماشینهای الکتریکی گردان برای سازندگان و طراحان این ماشینها دارای اهمیت می باشد. مقایسه تلفات هسته حاصل از آزمایش با تلفات محاسبه شده به کمک منحنیهایی که سازندگان ورقهای فرو مغناطیس ارائه می دهند اختلاف بسیار زیادی را نشان می دهد. زیرا سازندگان، ورقهای خود را تحت چگالی شار کاملاً سینوسی با فرکانس معین آزمایش می کنند در حالیکه در ماشینهای الکتریکی، حتی اگر تغذیه سینوسی باشد به علت وجود قسمت گردان و همچنین پدیده اشباع، تغییرات چگالی شار در هسته کاملاً سینوسی نخواهد بود. در ضمن در بعضی نواحی هسته، بردار چگالی شار به صورت گردشی می باشد که منجر به تلفات بیشتر در آن نواحی می گردد. برای رفع این مشکل، سازندگان و طراحان ماشینهای الکتریکی با کمک ضرائب تجربی، تلفات هسته محاسبه شده از منحنیهای مذکور را تصحیح می کنند که البته این کار با توجه به ساختارها و طراحی های متنوعی که برای ماشینهای الکتریکی وجود دارد همیشه نتایج دقیق و قابل قبولی را بدست نمی دهد.

با پیشرفت کامپیوترهای دیجیتال در دهه اخیر و ارائه نرم افزارهایی که توانایی مدلسازی ماشینهای الکتریکی به روش اجزاء محدود را دارند، محققین به فکر استفاده از این ابزار برای محاسبه دقیق تلفات هسته در ماشینهای الکتریکی افتادند. محاسبه تلفات در دو مرحله انجام می شود. در ابتدا توزیع مکانی چگالی شار مغناطیسی در هسته ماشین به همراه تغییرات زمانی آن تعیین می شود، سپس تلفات هسته بر اساس تغییرات مکانی و زمانی چگالی شار محاسبه می گردد. مرحله اول به کمک مدلسازی ماشین به روش اجزاء محدود انجام می شود، در این تحقیق از نرم افزار PC-OPERA 8.51 برای این منظور استفاده شده است. در مرحله دوم، تلفات هسته به کمک روابطی که چگالی تلفات آهن را بر حسب تغییرات زمانی چگالی شار بیان می کنند، محاسبه می گردد. محاسبات این قسمت توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

۱- روش محاسبه تلفات هسته

معمولاً برای محاسبه تلفات هسته در ماشینهای الکتریکی از مدل سه جمله ای تلفات استفاده می شود. به این صورت که کل تلفات به سه بخش تلفات هیستریزس، تلفات ناشی از جریانهای گردابی و تلفات اضافی تقسیم می گردد [۱]. تلفات هیستریزس برابر با سطح داخلی منحنی هیستریزس می باشد. در حالیکه چگالی شار شامل هارمونیکهایی باشد که حلقه های فرعی در داخل حلقه اصلی هیستریزس ایجاد کنند سطح داخلی حلقه های فرعی نیز به تلفات هیستریزس اضافه می شوند. برای محاسبه تلفات هیستریزس با در نظر گرفتن اثر حلقه های فرعی، رابطه زیر پیشنهاد شده است [۲]، [۳]، [۴]:

$$P_{\text{hyst}} = K_h f B_p^\alpha \left[1 + \frac{0.65}{B_p} \sum_{i=1}^n \Delta B_i \right] \quad (\text{w/kg}) \quad (1)$$

که در آن K_h و α ضرائب تلفات هیستریزس، B_p پیک چگالی شار، f فرکانس و ΔB_i تغییر چگالی شار در حلقه فرعی i ام و n تعداد حلقه های فرعی می باشد. برای تعیین n و ΔB_i ها از الگوریتمی به نام Rain-Flow استفاده شده است. این روش قادر به تشخیص حلقه های فرعی که در داخل حلقه های فرعی دیگر واقع شده اند نیز می باشد [۵]. تلفات ناشی از جریانهای گردابی در مقطع ورقه ها برای هر چگالی شار با تغییرات دلخواه از رابطه زیر محاسبه می گردد [۶].

$$P_{\text{eddy}} = \frac{\sigma d^2 f}{12\rho} \int_T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (\text{w/kg}) \quad (2)$$

که در آن d ضخامت، σ هدایت الکتریکی و ρ چگالی وزنی ورقه ها می باشند. رابطه اخیر بر حسب مؤلفه های فرکانسی چگالی شار به فرم زیر می باشد.

$$P_{\text{eddy}} = \frac{\pi^2 d^2 \sigma}{6\rho} f^2 \sum_{k=1}^{\infty} k^2 B_k^2 \quad (\text{w/kg}) \quad (3)$$

که در آن دامنه مؤلفه فرکانسی k ام می‌باشد.

بخش دیگر از تلفات هسته را تلفاتی موسوم به تلفات اضافی تشکیل می‌دهد. همانطور که می‌دانیم جریانهای گردابی با ایجاد شاری مخالف با شار اصلی مقداری از آنرا خنثی می‌کنند. بطوریکه شار منتهی به از کل شاری که توسط حوزه‌های مغناطیسی تولید شده است کمتر می‌باشد. از آنجائیکه تلفات هیستریزیس به ازای شار منتهی محاسبه می‌گردد، تلفات ناشی از چرخش حوزه‌های مغناطیسی که در تولید آن بخش از شار خنثی شده دخالت دارند در نظر گرفته نمی‌شود. این بخش از تلفات، تلفات اضافی نامیده می‌شود. در حالتیکه تغییرات چگالی شار سینوسی کامل با دامنه B و فرکانس f باشد، تلفات اضافی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱]:

$$P_{\text{exc}} = K_{\text{exc}} (fB)^{1.5} \quad (\text{w/kg}) \quad (4)$$

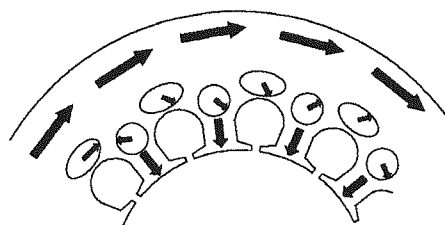
که در آن K_{exc} ضریب تلفات اضافی می‌باشد. فرم کلی رابطه تلفات اضافی برای هر چگالی شار با تغییرات دلخواه بصورت زیر می‌باشد [۷]:

$$P_{\text{exc}} = \frac{K_{\text{exc}}}{8.7634} \frac{1}{T} \int \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (\text{w/kg}) \quad (5)$$

انتگرال اخیر به صورت تحلیلی قابل محاسبه نیست و باید به روش عددی محاسبه شود.

۲- تلفات هسته ناشی از شارهای گردشی

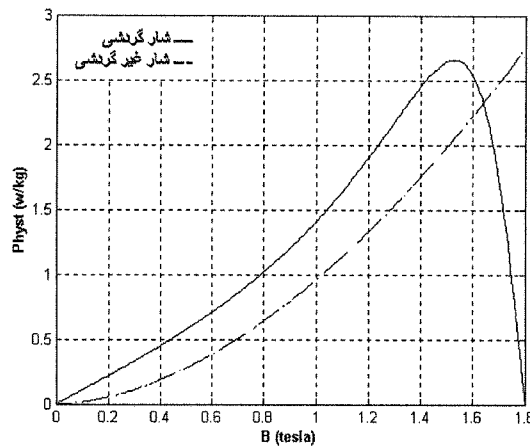
تاکنون آنچه در مورد تلفات هسته مطرح شد با فرض ثابت ماندن راستای بردار چگالی شار بود. توجه به این نکته حائز اهمیت است که در بعضی نواحی هسته ماشینهای الکتریکی راستای بردار چگالی شار تغییر می‌کند. این وضعیت بخصوص در محل اتصال سه شاخه ترانسفورماتورهای سه فاز و همچنین در محل اتصال دندانه‌ها به یوغ استاتور در ماشینهای الکتریکی با میدان گردان رخ می‌دهد. شکل (۱) نحوه تغییرات بردار چگالی شار را در مناطق مختلف هسته استاتور ماشین القائی سه فاز نشان می‌دهد. به این ترتیب برای محاسبه دقیق تلفات هسته در ماشینهای الکتریکی باید به طریقی اثر شارهای گردشی را نیز در نظر گرفت. در این حالت برای محاسبه تلفات ناشی از جریانهای گردابی و تلفات اضافی کافیسیت آنها را در دو راستای عمود بر هم مانند راستای شعاعی و مماسی محاسبه کنیم. اما رفتار مواد فرومغناطیس از نظر تلفات هیستریزیس ناشی از شارهای گردشی با حالت غیر گردشی متفاوت است.



شکل (۱) مکان هندسی تغییرات بردار چگالی شار در هسته.

شکل (۲) تلفات هیستریزیس را برحسب اندازه بردار چگالی شار، در دو حالت گردشی و غیر گردشی برای یک قطعه نمونه از ورقه‌های فرو مغناطیس نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود برای چگالی شار تا ۱/۵ تسلا، تلفات هیستریزیس گردشی

از تلفات هیستریزیس غیرگردشی بیشتر است ولی با نزدیک شدن به اشباع به مقدار پیک خود رسیده سپس به طور سریع کاهش یافته و در اشباع کامل به صفر می‌رسد، زیرا با نزدیک شدن به اشباع تعداد حوزه‌های مغناطیسی کم می‌شوند بطوریکه در اشباع کامل این حوزه‌ها به یک حوزه واحد تبدیل می‌شوند و در نتیجه تلفات هیستریزیس گردشی به صفر می‌رسد.



شکل (۲) تلفات هیستریزیس گردشی و غیر گردشی بر حسب چگالی شار.

در حالت کلی می‌توان گفت مکان هندسی بردار چگالی شار در هسته ماشین القائی، بیضوی می‌باشد و دو حالت شار گردشی و غیر گردشی تنها دو حالت خاص می‌باشند. رابطه‌ای که می‌تواند تلفات هیستریزیس را در حالت کلی بر حسب تلفات در دو حالت خاص اخیر بیان می‌کند به فرم زیر می‌باشد [۸] و [۹]:

$$P_h = R P_{cr} + (1 - R)^2 P_{alt} \quad (۶)$$

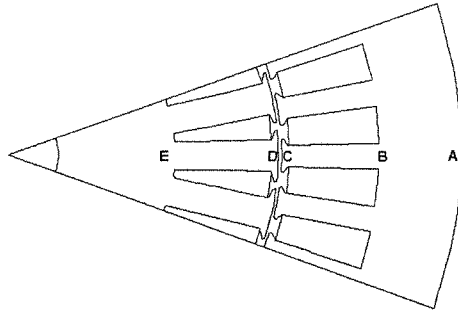
که در آن P_{cr} تلفات هیستریزیس گردشی (حالتیکه مکان هندسی بردار چگالی شار دایره‌ای باشد)، P_{alt} تلفات هیستریزیس غیر گردشی (حالتیکه مکان هندسی بردار چگالی شار بصورت خط باشد) و R نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ مکان هندسی بیضوی می‌باشند. بنابراین با در دست داشتن منحنیهای P_{cr} و P_{alt} بر حسب اندازه بردار چگالی شار می‌توان تلفات هیستریزیس را برای هر شار گردشی با مکان هندسی دلخواه محاسبه نمود.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این تحقیق، یک موتور القائی سه فاز قفس سنجابی، ۴ قطب، ۵۰ هرتز با قدرت ۲/۲ کیلووات، ساخت شرکت موتوژن با روش اجزاء محدود دو بعدی شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی در لغزش نامی ۰/۰۶۳ (معادل با سرعت ۱۴۰۵ دور بر دقیقه) و با گام زمانی ۰/۲ میلی‌ثانیه انجام شده است به این صورت که در هر گام زمانی روتور به مقدار معین چرخانده می‌شود و معادلات الکترومغناطیسی حاکم بر سیستم به روش اجزاء محدود حل می‌گردند. به این ترتیب شکل موجهای زمانی حاصل از حل معادلات به صورت گسسته با فواصل زمانی ۰/۲ میلی‌ثانیه می‌باشند. بعبارت دیگر می‌توان گفت این شکل موجها نمونه‌هایی از شکل موج پیوسته می‌باشند که با فرکانس ۵ کیلوهرتز نمونه‌برداری شده‌اند، بنابراین طبق قضیه نمونه‌برداری طیف فرکانسی گسسته آنها، تا فرکانس ۲/۵ کیلوهرتز را پوشش می‌دهد.

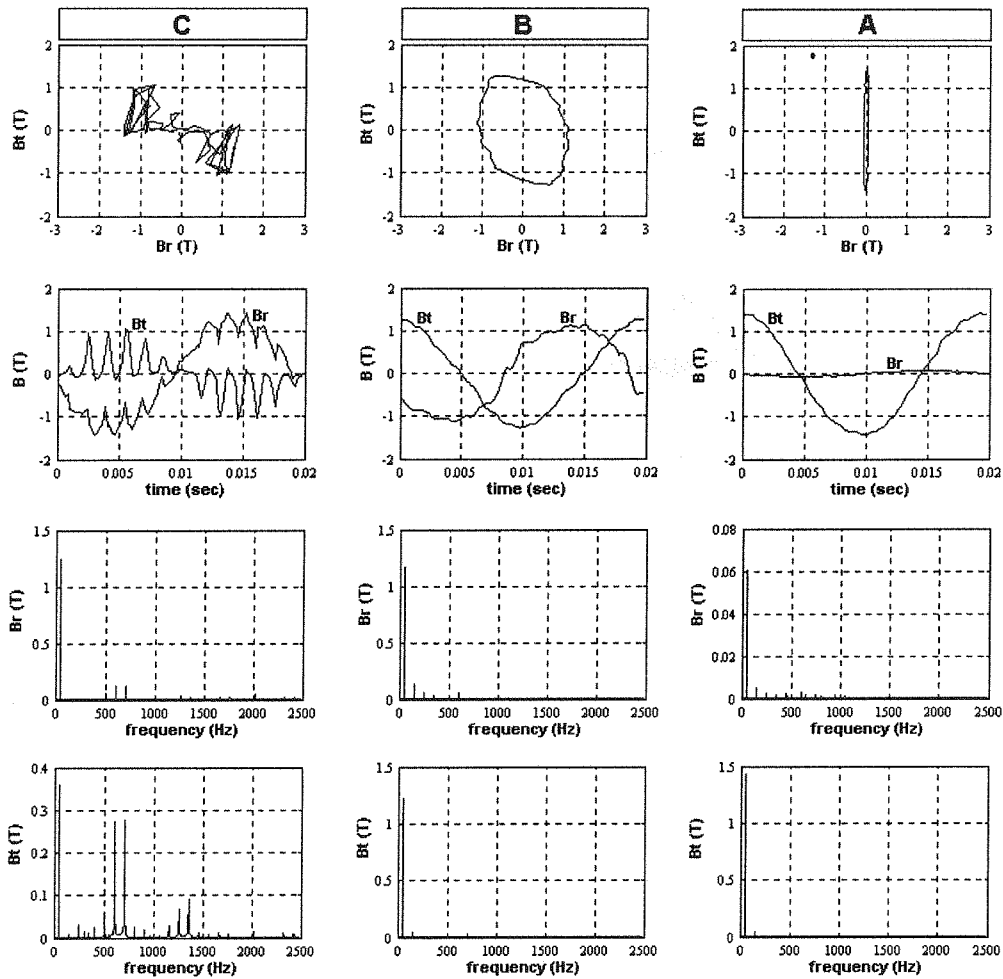
شکل (۳) موقعیت سه نقطه دلخواه A و B و C واقع بر استاتور و نقاط D و E واقع بر روتور ماشین شبیه‌سازی شده را نشان

می‌دهد.



شکل (۳) موقعیت نقاط A، B، C، D، E روی هسته ماشین شبیه‌سازی شده.

شکل (۴) مکان هندسی بردار چگالی شار به همراه تغییرات زمانی مؤلفه‌های شعاعی (Br) و مماسی (Bt) آن و طیف فرکانسی آنها را در سه نقطه A و B و C نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود ماهیت غیرخطی هسته و همچنین چرخش روتور باعث ایجاد اعوجاج در مؤلفه‌های چگالی شار شده‌است. اثر عبور شیارهای روتور از مقابل دندانه‌های استاتور در نواحی نزدیک به نوک دندانه استاتور مانند نقطه C کاملاً واضح است.



شکل (۴) مکان هندسی بردار چگالی شار، تغییرات زمانی مؤلفه‌های شعاعی و مماسی و طیف فرکانسی آنها در نقاط A، B، C.

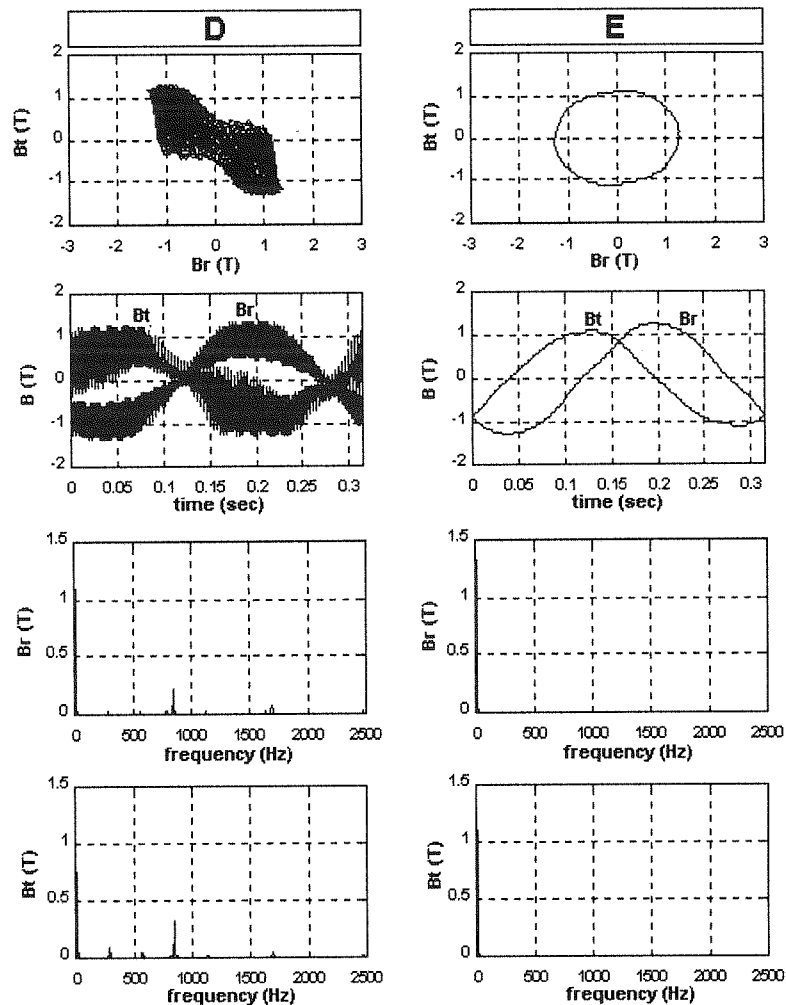
بطور کلی فرکانس هارمونیکهای اخیر از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$f_s = \left[\frac{N_r}{p} (1-s) \pm 1 \right] f \quad (7)$$

که در آن N_r تعداد شیارهای روتور، p تعداد زوج قطب، s لغزش و f فرکانس تغذیه می‌باشد. با توجه به اینکه موتور ذکر شده ۲۸ شیار در روتور دارد، هارمونیکهای اخیر دارای فرکانسهای ۶۰۵/۹ و ۷۰۵/۹ هرتز می‌باشند. شکل (۵) موارد مذکور در شکل (۴) را برای نقاط E و D نشان می‌دهد. در اینجا نیز چرخش روتور منجر به هارمونیکهایی در مؤلفه‌های شعاعی و مماسی چگالی شار می‌شود. این هارمونیکها به داخل هسته روتور نفوذ نمی‌کنند و در نوک دندانه‌ها متمرکز می‌باشند. اگر تعداد شیارهای استاتور N_s باشد، فرکانس این هارمونیکها از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_r = \left[\frac{N_s}{p} (1-s) \pm s \right] f \quad (8)$$

چون تعداد شیارهای استاتور در اینجا ۳۶ می‌باشد هارمونیکهای اخیر دارای فرکانسهای ۸۴۰/۱۵ و ۸۴۶/۴۵ هرتز می‌باشند.



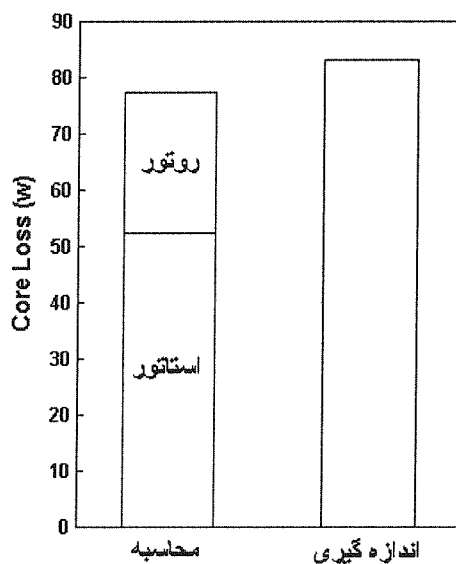
شکل (۵) مکان هندسی بردار چگالی شار، تغییرات زمانی مؤلفه‌های شعاعی و مماسی و طیف فرکانسی آنها در نقاط D و E.

با داشتن یک سیکل از تغییرات زمانی مؤلفه‌های شعاعی و مماسی بردار چگالی شار در هسته استاتور و روتور و با استفاده از روابط (۱) و (۳) و (۵) و با لحاظ کردن اثر شارهای گردشی توسط رابطه (۶)، تلفات در هر نقطه از هسته قابل محاسبه

می‌باشد. ضرائب موجود در روابط (۱) و (۵) با اعمال روش تطبیق منحنی با حداقل مجموع مربعات خطا روی منحنی تلفات آهن، ارائه شده توسط کارخانه سازنده بدست آمده‌اند. با در نظر گرفتن تعداد مناسبی نقطه با توزیع مکانی یکنواخت روی هسته ماشین و محاسبه متوسط تلفات در آنها، تلفات کل هسته بر حسب (W/Kg) بدست می‌آید که با ضرب آن در وزن هسته تلفات کل هسته ماشین حاصل می‌شود.

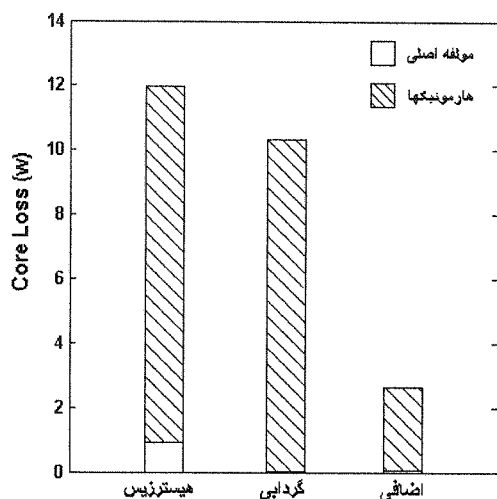
برای مقایسه نتیجه حاصل از محاسبات با نتیجه آزمایشگاهی، آزمایشی مطابق با استاندارد IEEE-112 انجام شده است. در این آزمایش موتور القایی در حالت بی‌بار از طریق یک اتوترانس تغذیه می‌گردد و یک دستگاه اندازه‌گیر ولتاژ، جریان و توان در مسیر تغذیه موتور قرار داده می‌شود. با کم کردن تلفات مسی و تلفات مکانیکی (اصطکاک و تهویه) از توان ورودی موتور در حالت تغذیه نامی، تلفات هسته حاصل می‌شود. اگر موتور بی‌بار باشد تلفات مسی در میله‌های روتور ناچیز بوده و می‌توان کل تلفات مسی را در سیم پیچی استاتور در نظر گرفت. برای محاسبه تلفات مکانیکی، ولتاژ تغذیه را توسط اتوترانس بطور تدریجی کم کرده و در هر مرحله مقادیر ولتاژ، جریان و توان ورودی را یادداشت می‌کنیم. عمل کاهش ولتاژ را تا زمانی ادامه می‌دهیم که سرعت موتور به طور ناگهانی افت کرده و جریان بر خلاف روند قبلی خود رو به افزایش گذارد. با کم کردن تلفات مسی از توان ورودی در هر مرحله و رسم منحنی آن بر حسب مجذور ولتاژ تغذیه، یک منحنی که بسیار نزدیک به خط راست می‌باشد حاصل می‌گردد. اگر منحنی اخیر را امتداد دهیم تا محور عمودی را قطع نماید، محل تقاطع که متناظر با ولتاژ صفر است برابر با تلفات مکانیکی می‌باشد [۱۰]. به این ترتیب با معلوم بودن تلفات مسی و تلفات مکانیکی و توان ورودی در شرایط تغذیه نامی، تلفات هسته بدست خواهد آمد.

نمودار شکل (۶) تلفات هسته محاسبه شده به‌طور مجزا برای استاتور و روتور و تلفات هسته حاصل از آزمایش مذکور روی موتور را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود نتیجه حاصل از محاسبات تطابق قابل قبولی با نتیجه بدست آمده از آزمایش دارد.

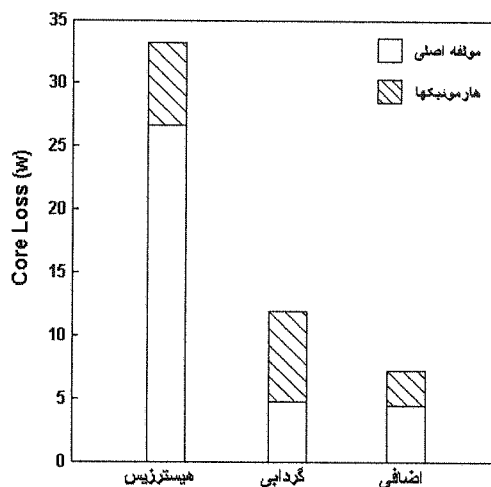


شکل (۶) مقایسه تلفات هسته محاسبه شده و اندازه‌گیری شده از آزمایش.

نمودارهای شکل‌های (۷) و (۸) به ترتیب سهم هر بخش از تلفات را در تلفات کل هسته استاتور و روتور نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود تلفات هیستریزس بخش قابل توجهی از تلفات هسته استاتور را تشکیل می‌دهد، در حالیکه در هسته روتور تلفات جریانهای گردابی نیز قابل توجه است. زیرا پایین بودن فرکانس مولفه اصلی چگالی شار باعث می‌شود هارمونیکها نقش اصلی را در تلفات روتور داشته باشند و چون تلفات جریانهای گردابی با مجذور فرکانس متناسب است، سهم آنها در تلفات هسته روتور در مقایسه با هسته استاتور بیشتر می‌باشد.



شکل (۸) مقایسه انواع تلفات در هسته روتور.



شکل (۷) مقایسه انواع تلفات در هسته استاتور.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تلفات هسته موتور القایی سه فاز با استفاده از روش اجزاء محدود محاسبه شده است. با تحلیل ماشین با روش اجزاء محدود، تغییرات زمانی چگالی شار به طور دقیق در تمام نواحی هسته مشخص می‌گردد، بنابراین می‌توان تلفات هسته را با دقت بسیار خوبی تعیین کرد. نزدیکی نتیجه محاسبات با نتیجه عملی، صحت روش ارائه شده در این مقاله برای محاسبات را تایید می‌کند. همانطور که ملاحظه می‌شود هارمونیکها سهم قابل توجهی در تلفات هسته دارند بخصوص در هسته روتور می‌توان کل تلفات را به هارمونیکها نسبت داد زیرا تلفات ناشی از مولفه اصلی چگالی شار بعلت کم بودن فرکانس آن در روتور بسیار ناچیز است. به علت عدم نفوذ هارمونیکهای چگالی شار در روتور، کل تلفات روتور به صورت موضعی در نوک دندانهای آن متمرکز می‌باشد. در پایان می‌توان گفت دقت خوب این روش، زمینه را برای انجام مطالعات بیشتر نظیر بررسی اثر تغذیه اینورتری روی تلفات هسته، بررسی تغییر شکل شیارها در تلفات هسته و بهینه سازی موتور، فراهم می‌سازد.

مراجع

- [1] G.Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 24, pp. 621-630, Jan. 1988.
- [2] M.A.Mueller, S.Williamson, T.J.Flack, K.Atallah, B.Baholo, D.Howe, and P. H. Mellor, "Calculation of iron losses from time stepped finite element models of cage induction machines," *IEE Electrical Machine and Drive Conference proceedings*, no. 412, pp.88-92, September 1995.
- [3] J.D.Lavers, P.P.Biringer, H.Hollitscher, "A simple method of estimating the minor loop hysteresis loss in thin laminations," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 14, no. 5, pp. 386-388, September 1978.
- [4] M.V.Ferreira da Luz, N.J.Batistela, N.Sadowski, R.Carlson, J.P.A.Bastos, "Calculation of iron losses in induction motors using the finite element method", in *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM '2000)*, Espo, Finland, Aug. 2000, pp. 1512-1515.
- [5] N.Sadowski, M.Lajoie-Mazenc, J.P.A.Bastos, M.V.Ferreira da Luz, P.kuo-Peng, "Evaluation and analysis of iron losses in electrical machines using the Rain-Flow method", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 36 no. 4, July 2000.
- [6] A.K.Sawhney. "A course in electrical machine design", fifth Edition 1984, Dehli.
- [7] J.G.Zhu, V.S.Ramsden, and P.A.Watterson, "Finite element calculation of core losses in motors with nonsinusoidal fields," *Proc. Int. Conf. Elect. Mach. (ICEM'92)*, Manchester, U.K., pp. 1182-1186.
- [8] J.G.Zhu, V.S.Ramsden, J.D.Sievert, "Prediction of core loss with elliptical flux from measurements with alternating and circular fluxes in electrical steel sheets", *Proc. Int. Symp. Advanced Computational Design Techniques in Appl. Electromag. Syst. (ISEM '94)*, Seoul, Korea 1994, pp. 675-678.
- [9] J.G.Zhu, V.S.Ramsden, "Improved formulating for rotational core losses in rotating electrical machines", *IEEE. Trans. on Mag.* vol. 34, no. 4, July 1998.
- [10] "IEEE Standard test procedure for polyphase induction motors and generators" *IEEE Std 112-1996*.