

بدست آوردن تلفات هیستریزیس برای موتور سوئیچ رلوکتانس با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی

مرتضی طهماسبیان^۱، بهروز رضایی علم^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
morteza.tahmasebian@gmail.com

^۲ استادیار، دانشکده فنی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد
rezaee.bh@lu.ac.ir

چکیده

در مدل سازی اجزا محدود ماشین‌های الکتریکی معمولاً فرض بر یکنواختی مشخصه‌های مغناطیسی و تلفات هسته است. در پژوهش‌های قبلی، تلفات هسته اندازه‌گیری شده در ماشین‌های الکتریکی بالاتر از تلفات محاسبه شده است. به خوبی مشخص است که فشارهای مکانیکی ناشی از نیروهای مغناطیسی (نظیر گشتاور) باعث تغییر مشخصه‌های مغناطیسی و در نتیجه آن تغییر تلفات هیستریزیس می‌شود. در این مقاله تلفات هیستریزیس برای موتور سوئیچ رلوکتانس بدون در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی و نیز با در نظر گرفتن آن و با تحلیل گذرا اجزا محدود نرم افزار COMSOL محاسبه شده است که هنگامی که اثر فشار مکانیکی لحاظ شده تلفات هیستریزیس افزایش یافته است. تلفات هیستریزیس محاسبه شده با مقدار تلفات اندازه‌گیری شده مقایسه شده که نشان می‌دهد تلفات محاسبه شده بسیار نزدیک به تلفات اندازه‌گیری شده است.

کلمات کلیدی

تلفات هیستریزیس، موتور سوئیچ رلوکتانس، فشار مکانیکی، COMSOL

روش‌های متعددی برای محاسبه تلفات هسته موتور سوئیچ رلوکتانس ارائه شده است. فیض و همکاران در [4] شبیه‌سازی موتور را با استفاده از روش اجزا محدود محاسبه و تلفات را براساس معادلات اصلاح شده استاینمتر^۲ محاسبه کرده‌اند. هایاشی^۳ و میلر^۴ در [5] شکل موج چگالی شار نواحی مختلف موتور سوئیچ رلوکتانس را در فرم ماتریسی نشان داده و تلفات جریان گردابی و هیستریزیس را به طور جداگانه با استفاده از رابطه استاینمتر محاسبه کرده‌اند.

در این مقاله، در بخش بعدی به بررسی اثر فشار مکانیکی بر روی منحنی‌های مغناطیسی پرداخته شده و در بخش سوم روش محاسبه تلفات هیستریزیس و جریان گردابی توضیح داده شده، در بخش چهارم به توضیح نتایج بدست آمده از تحلیل نرم افزار پرداخته شده و تلفات هیستریزیس بدست آمده با مقادیر اندازه‌گیری شده آن مقایسه شده‌اند و در بخش آخر نیز نتیجه گیری آورده شده است.

۱- مقدمه

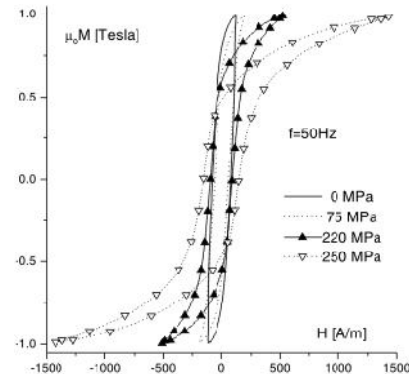
مواد موجود در ساختار ماشین‌های الکتریکی، مواد فرومغناطیس است. طبق اثر ویلاری^۱ اعمال فشار مکانیکی به مواد مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی باعث تغییر در مشخصه‌های مغناطیسی آن مواد می‌شود. در [1] نشان داده شده که مشخصه‌های مغناطیسی یک استیل سیلیکونی تحت فشار مکانیکی تغییر کرده و با اعمال تنش مکانیکی، تلفات هسته آن افزایش یافته است. در [2] اثر فشار مکانیکی بر عملکرد موتور سوئیچ رلوکتانس مورد بررسی قرار گرفته که هر چند از بررسی فشار بر روی تلفات هیستریزیس صرفه نظر شده ولی با اعمال فشار مکانیکی بر موتور سوئیچ رلوکتانس، چگالی شار مغناطیسی و نفوذپذیری مغناطیسی مواد آن تغییر داشته‌اند.

۲- اثر فشار مکانیکی بر مشخصه‌های مغناطیسی

اثر فشار مکانیکی بر مشخصه‌های مغناطیسی با استفاده از تجهیزات ساخته شده در [3] مورد بررسی قرار داده شده که متشکل از یک دستگاه مخصوص است که تنش‌های فشاری و کششی به یک ورقه اعمال شده است.

۱-۲- تأثیر بر حلقه مغناطیس‌شوندگی^۵

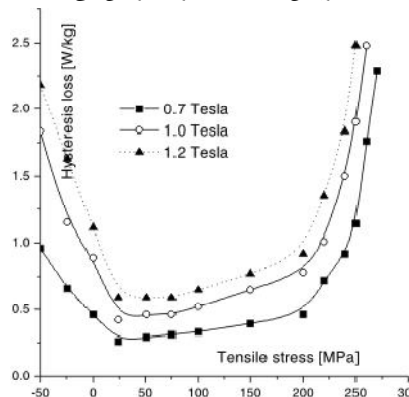
به طور کلی شکل حلقه مغناطیس‌شوندگی در طول اعمال فشار مکانیکی در حال تغییر است. همان‌گونه که در شکل ۱ مشخص است میدان مغناطیسی با اعمال فشار افزایش یافته و نفوذپذیری مغناطیسی در حال کاهش است.



شکل ۱: تغییر حلقه‌های مغناطیس‌شوندگی تحت فشار مکانیکی در [3]

۲-۲- تأثیر بر تلفات هیستریزس

شکل ۲ تلفات هیستریزس را به عنوان تابعی از تنش کششی برای سطوح مختلف مغناطیس‌شوندگی (۰/۷، ۱/۰، ۱/۲ برحسب تسلا) در فرکانس ۵۰ هرتز نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، اگر تنش به صورت کشیده شدن باشد تلفات هیستریزس تا مرز تقریبی ۲۰ مگاپاسکال کاهش می‌یابد و بعد از آن با افزایش تنش تلفات نیز افزایش می‌یابد ولی اگر تنش به صورت فشرده شدن باشد تلفات هیستریزس با شیب بیشتری افزایش می‌یابد.



شکل ۲: تغییر تلفات هیستریزس به عنوان تابعی از فشار مکانیکی در [3]

۳- محاسبه تلفات هیستریزس و جریان گردابی

در این مقاله برای محاسبه تلفات هیستریزس از رابطه زیر استفاده شده است.

$$P_{loss} = \frac{1}{t} \int_0^t (H \cdot \frac{\partial B}{\partial t}) dt \quad (1)$$

که در آن H میدان مغناطیسی و B چگالی شار مغناطیسی است. پس از آن که هندسه موتور سوئیچ رلوکتانس در نرم افزار در نظر گرفته شد و تنظیمات نرم افزار انجام شد، روی سطحی که باید تلفات هیستریزس آن محاسبه شود معادله $H \cdot \frac{\partial B}{\partial t}$ لحاظ می‌شود. سپس با انتگرال‌گیری در بازه زمانی مورد نظر با توجه به رابطه بالا مقدار تلفات بدست می‌آید که با ضرب مقدار بدست آمده در طول و فرکانس موتور الکتریکی مقدار تلفات هیستریزس در نقطه کار مورد نظر (در ادامه داده شده) بدست می‌آید.

تلفات جریان گردابی نیز با توجه به رابطه داده شده در [6] محاسبه شده است. گنجی و همکاران در [6] برای محاسبه تلفات جریان گردابی از رابطه زیر استفاده کرده‌اند.

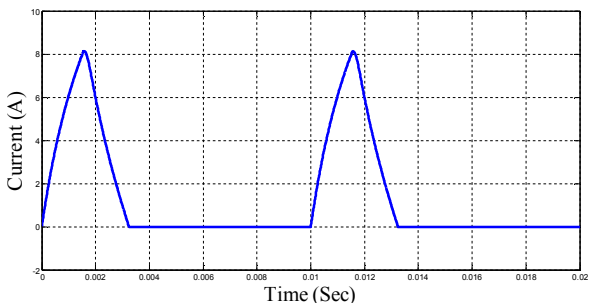
$$P_e = C_e f^2 B_{max}^2 \quad (2)$$

که در آن C_e ثابت استاینمتر و f فرکانس و B_{max} چگالی شار مغناطیسی ماکزیمم است. که مقدار C_e با توجه به ورقه‌های به کار رفته در موتور واقعی مقدار ثابت ۰/۰۰۰۲ در نظر گرفته شده است.

۴- نتایج شبیه‌سازی

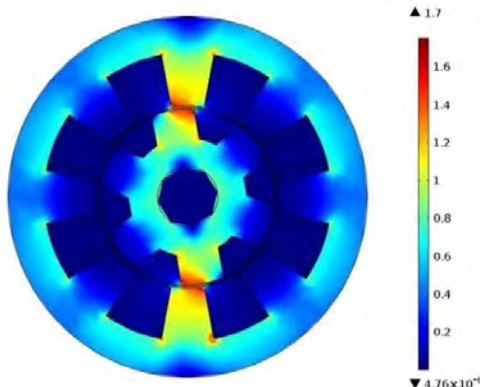
تلفات هیستریزس و جریان گردابی برای موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز ۱ kW و ۱۵۰۰ rpm با مشخصات داده شده در جدول ۱ محاسبه شده است. نقطه کار این مرحله عبارت است از: ولتاژ فاز = ۹۳ V ، سرعت = ۱۰۰۰ rpm ، زاویه روشن شدن = ۱۰° و زاویه خاموش شدن = ۲۰° که موتور در حالت کنترل تک پالس است. زوایای روشن و خاموش شدن در این مقاله در درجه‌های مکانیکی وارد شده است در حالی که صفر مرجع موقعیت بی‌طرف^۶ است. باید به این نکته اشاره کرد که در هر مرحله، موتور سوئیچ رلوکتانس شامل دو سیم‌پیچ است که به صورت موازی بهم متصل شده است.

نمودار شکل موج جریان فاز اول موتور الکتریکی ذکر شده در دو دوره زمانی از تحلیل نرم‌افزار بدست آمده که در شکل ۳ آورده شده است. این شکل موج بسیار نزدیک به شکل موج جریان اندازه‌گیری شده موتور الکتریکی در [6] است.



شکل ۳: شکل موج جریان فاز

داده شده است. که با توجه به این که جهت چرخش رتور ساعت‌گرد است، هنگامی که قطب رتور به قطب استاتور نزدیک می‌شود (قطب رتور و استاتور بالای شکل) قسمت سمت راست قطب رتور میل به کشیده شدن و قسمت سمت چپ آن میل به فشرده شدن دارد و هنگامی که قطب رتور از قطب استاتور دور می‌شود عکس حالت نزدیک شدن است. برای قطب استاتور هنگامی که قطب رتور به آن نزدیک می‌شود، قسمت سمت چپ آن میل به کشیده شدن و قسمت سمت راست آن میل به فشرده شدن دارد و هنگامی که قطب رتور از قطب استاتور دور می‌شود عکس حالت نزدیک شدن است. همان‌طور که در شکل ۴ و ۵ مشخص است توزیع تنش مکانیکی در یوغ استاتور و هسته رتور بسیار کمتر از قطب استاتور و قطب رتور است. در شکل ۶ نیز توزیع چگالی شار برای حالتی که اثر فشار در نظر گرفته شده، نشان داده شده است.



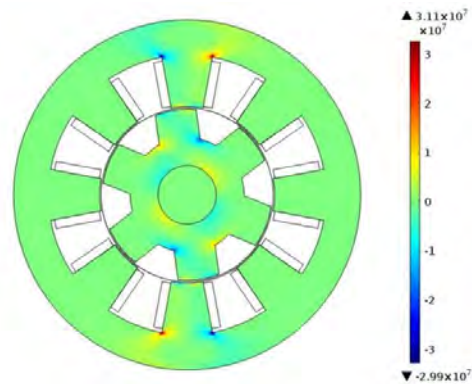
شکل ۶: توزیع چگالی شار مغناطیسی برای حالتی که اثر فشار مکانیکی لحاظ شده

با توجه به توضیحات داده شده و شکل ۲، مشخص است که با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی تلفات هیستریزس افزایش می‌یابد. اگر در حالتی اثر فشار برای نقطه کار داده شده در نظر گرفته نشود، در این حالت تلفات هیستریزس با توجه به روش گفته شده در بخش قبل برابر با $13/22 \text{ W}$ و مقدار محاسبه شده تلفات جریان گردابی با روش گفته شده در بخش قبل برابر با $9/42 \text{ W}$ است. که در این صورت تلفات هسته موتور سوئیچ رلوکتانس $22/64 \text{ W}$ است که مقدار تلفات هسته اندازه‌گیری شده برای این موتور الکتریکی در [6] برابر $25/5 \text{ W}$ است. حال اگر اثر فشار مکانیکی در نظر گرفته شود مقدار تلفات هیستریزس محاسبه شده برابر با $15/92 \text{ W}$ است که نسبت به حالت قبل افزایش یافته است. مقدار تلفات جریان گردابی از آن جا که C_e برابر مقدار ثابتی است و فرکانس نیز ثابت است و با توجه به شکل ۱ و نتایج شبیه‌سازی در [2] مقدار چگالی شار مغناطیسی ماکزیمم با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی نیز نسبت به حالتی که اثر فشار مکانیکی در نظر گرفته نشده، تغییر خاصی نداشته است، در نتیجه مقدار آن همان مقدار قبلی بدست آمده است. با این توضیحات، با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی مقدار تلفات هسته برابر با $25/34 \text{ W}$ برآورد شده است که به مقدار اندازه‌گیری شده آن بسیار نزدیک است.

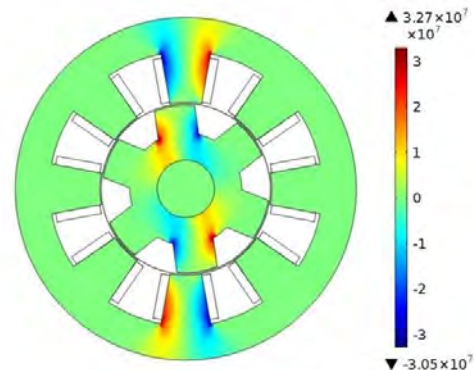
برای سرعت 1200 rpm و گشتاورهای خروجی متفاوت ($0/2$ ، $0/4$ ، $0/6$ ، $0/8$ ، 1 ، $1/2$ برحسب نیوتن متر) تلفات هیستریزس برای موتور سوئیچ رلوکتانس مذکور حساب شده و با مقادیر اندازه‌گیری شده آن در [6] مقایسه

جدول ۱: مشخصات موتور در [6]

4	no. of phases
8/6	no. of stator/rotor poles
125	stator outer diameter, mm
100	stator slot-bottom diameter, mm
63	rotor outer diameter, mm
41	rotor slot-bottom diameter, mm
0.35	air gap length, mm
21	shaft diameter, mm
90	stack length, mm
21	stator pole arc, deg
21	rotor pole arc, deg
124	turns per coil
0.69	resistance at 20°C , ohm
1500	rated speed of motor, rpm



شکل ۴: توزیع تنش مکانیکی بر روی سطح موتور بر حسب مؤلفه X



شکل ۵: توزیع تنش مکانیکی بر روی سطح موتور بر حسب مؤلفه Y

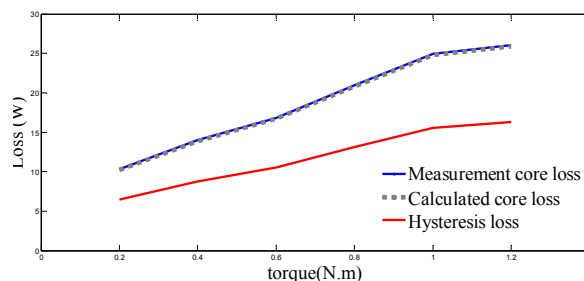
در شکل ۴ مؤلفه X توزیع تنش مکانیکی بر روی سطح موتور سوئیچ رلوکتانس و شکل ۵ توزیع مؤلفه Y تنش مکانیکی برای فاز اول آن نشان

- [5] Hayashi, Y., Miller, TJE., "A new approach to calculating core losses in the SRM", IEEE Transactions on Industry Applications., 31(5), 1039–1045, 1995.
- [6] Ganji, B., Faiz, J., Kasper, K., Carstensen, CE., De Doncker, RW., "Core loss model based on finite-element method for switched reluctance motors", IET Electr. Power Appl., vol. 4, Iss. 7, pp. 569–577, August 2009.

زیر نویس ها

- ¹ Villari effect
² Steinmetz
³ Hayashi
⁴ Miller
⁵ magnetization
⁶ unaligned

شده که منحنی حاصل از آن در شکل ۷ آورده شده است. همان گونه که در این شکل نشان داده شده تلفات هسته محاسبه شده با لحاظ کردن اثر فشار مکانیکی به روشی که گفته شد بسیار نزدیک به تلفات هسته اندازه گیری شده برای آن موتور الکتریکی است که اختلاف آن می تواند بدلیل خطای اندازه گیری یا محاسباتی باشد و یا ممکن است بدلیل تغییر دمای موتور باشد که در تحلیل های انجام شده در این مقاله فرض بر یکنواختی دما شده است. منحنی تلفات هیستریزیس رسم شده نیز با افزایش گشتاور افزایش یافته است که به خاطر این است که با افزایش گشتاور، فشار مکانیکی ناشی از آن نیز افزایش می یابد که با افزایش فشار تلفات هیستریزیس نیز افزایش می یابد.



شکل ۷: مقایسه نتایج محاسبه شده با نتایج اندازه گیری شده

۵- نتیجه گیری

تلفات هیستریزیس برای موتور سوئیچ رلوکتانس چهار فاز با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی ناشی از نیروهای مغناطیسی با آنالیز روش اجزا محدود محاسبه شد که مشاهده شده وقتی اثر فشار مکانیکی بر عملکرد موتور در نظر گرفته شده، تلفات هیستریزیس آن افزایش یافته است. در پژوهش های به عمل آمده قبلی تلفات هسته موتور سوئیچ رلوکتانس از تلفات اندازه گیری شده آن کمتر بود ولی در این جا نشان داده شده که با در نظر گرفتن اثر فشار مکانیکی تلفات محاسبه شده بسیار نزدیک به تلفات اندازه گیری شده است.

مراجع

- [1] Fujisaki, K., Satoh, S., "Numerical calculations of electromagnetic fields in silicon steel under mechanical stress", IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 4, pp. 1820–1825, July 2004.
- [2] Bernard, L., Mininger, X., Daniel, L., Krebs, G., Bouillault, F., Gabsi, M., "Effect of stress on Switched Reluctance Motors: A magneto-elastic finite-element approach based on multiscale constitutive laws", IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 9, pp. 2171–2178, September 2011.
- [3] Permiakov, V., Pulnikov, A., Dupré, L., DeWulf, M., Melkebeek, J., "Magnetic properties of Fe-Si steel depending on compressive and tensile stresses under sinusoidal and distorted excitations", J. Appl. Phys., **93**, p.6689-6691, 2003.
- [4] Faiz, J., Ganji, B., Carstensen, CE., De Doncker, RW., "Loss prediction in switched reluctance motors using finite element method", European Transactions on Electrical Power., 19(5), 731–748, 2008.