



محاسبه ی تلفات هیستریزیس در موتور القایی خطی یک طرفه به روش اجزا محدود

بهرروز رضایی علم^۱، محمد نظری^۲، بهزاد نوروزی^۳

^۱دانشگاه لرستان، Rezaee.bh@lu.ac.ir

^۲دانشگاه لرستان، Nazari.mo66@gmail.com

^۳دانشگاه لرستان، Behzad_noroozi@yahoo.com

چکیده - موتورهای القایی خطی (Lim) امروزه کاربرد فراوانی در صنعت دارند، بیشتر برای امور حمل و نقل با سرعت بالا طراحی می شوند. موتور خطی برخلاف موتور گردان در مسیر حرکتش یک ابتدا و یک انتها دارد که این خصوصیت تولید اثر انتهایی خواهد کرد. اثر انتهایی تأثیر نامطلوبی در کارایی موتور القایی خطی در سرعت بالا ایجاد می کند. در این مقاله علاوه بر منحنی اشباع، منحنی هیستریزیس هسته نیز در نظر گرفته شده است. از روش جایلز-آرتون (Jiles-Atherton) برای مدل سازی حلقه هیستریزیس استفاده شده است. مدل سازی با استفاده از مدل اجزا محدود به کمک نرم افزار COMSOL Multiphysics در فضای دوبعدی صورت گرفته است. موتور القایی خطی معمولاً شامل یک سیم بندی سه فاز در اولیه (استاتور) است که یک سیستم جریان سه فاز از آن عبور می کند و در نتیجه میدان مغناطیسی سیاری در طول موتور ایجاد می کند که عامل به وجود آورنده ی نیروی رانشی در موتور است. با استفاده از روش اجزا محدود مقدار تلفات هیستریزیس محاسبه شده است. همچنین با استفاده از معادلات حاکم بر موتور خطی نیروی رانش و سرعت ثانویه نیز محاسبه شده است.

کلیدواژه- اجزا محدود، تلفات هیستریزیس، موتور القایی خطی، COMSOL Multiphysics

می کنند. در این مقاله از روش جایلز-آرتون برای

مدل سازی تلفات هیستریزیس استفاده شده است. مزیت استفاده از

این روش پیاده سازی آسان نسبت به روش های قبلی، همچنین دقت بالا در برآورد حلقه هیستریزیس است.

در بخش ۲ به بررسی نحوه ی عملکرد موتور القایی پرداخته شده است. در بخش ۳ توضیح مختصری از طریقه در نظر گرفتن اثر هیستریزیس با استفاده از روش جایلز-آرتون و نحوه محاسبه تلفات هیستریزیس ارائه شده است. در بخش ۴ به معرفی نرم افزار COMSOL Multiphysics پرداخته شده و نتایج شبیه سازی های کامپیوتری آورده شده است.

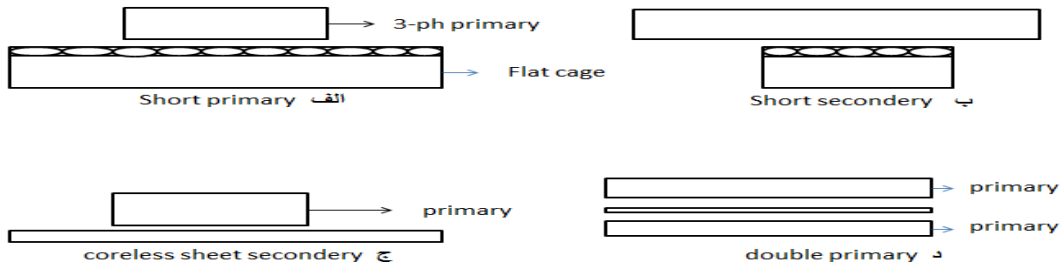
۲- عملکرد موتور خطی

اولیه یک موتور القایی از شبکه سه فاز تغذیه می شو. ثانویه نیز یک سیم پیچی صفحه ای با هسته آهنی یا بدون هسته آهنی است. هر یک از قسمت های اولیه و ثانویه می تواند نقش عضو ثابت یا استاتور را به خود بگیرد. در این صورت قسمت دیگر، عضو متحرک موتور (mover) خواهد بود [۹]. موتورهای القایی خطی به

۱- مقدمه

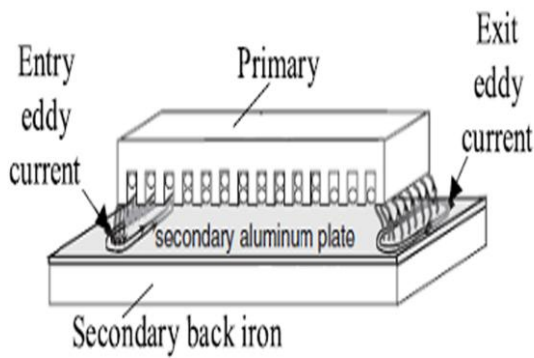
در بسیاری از کاربردها که در آن نیاز به حرکت خطی است، استفاده از محرکه ها و موتورهای خطی نسبت به محرکه های دوار ترجیح داده می شود. دلیل این موضوع عدم نیاز به مبدل های مکانیکی مانند چرخ دنده، تسمه یا زنجیر است. در پی آن راندمان بالاتر، قابلیت اطمینان بیشتر و دینامیک سریع تر محرکه های خطی حاصل می شود [۲]-[۱].

کاربرد ماشین های خطی دارای گستره وسیعی از کاربردهای با توان پایین مانند پمپ قلب های مصنوعی، خود کار سازی کارخانه ها و ژنراتورهای دریایی تا کاربردهای با توان بالا مانند حمل و نقل ریلی است [۵]- [۳]. یکی از عوامل مهم وجود اثرات تلفات هیستریزیس است که نقش مهمی را در رفتار موتورهای خطی ایجاد می کند. امروزه محاسبه تلفات هیستریزیس به روش اجزاء محدود بیش از پیش توسط علوم کامپیوتری مورد توجه قرار گرفته است [۶]. روش های متفاوتی برای مدل سازی هیستریزیس ارائه شده است، که در این بین مدل جایلز-آرتون [۷] و مدل پریزاک [۸] مدل های دقیقی از تلفات هیستریزیس را فراهم



شکل ۱: انواع موتورهای القایی خطی

دستگاه‌های مخصوص کوبیدن میخ است. در کاربردهای مذکور نیروی زیاد اما در زمان کم و به صورت ضربه‌ای به قسمت متحرک اعمال می‌گردد. اما در موتور خطی با کاربرد توان، سرعت و نیرو هر دو نقش مهمی دارند. اما برخلاف کاربرد انرژی که نیروی زیادی در زمان بسیار کم و به صورت ضربه‌ای باید اعمال شود، در این کاربرد باید سرعت به صورت کنترل شده تغییر یابد و تغییرات ناگهانی سرعت و در نتیجه اعمال نیروی زیاد در زمان اندک مطلوب نیست. بارزترین نمونه این کاربرد در سیستم‌های حمل و نقل است.



شکل (۲): ساختار موتور خطی یک طرفه

در موتور خطی با کاربرد نیرو، سرعت نقشی ندارد و خود نیرو مهم است. در این کاربرد سرعت صفر یا ثابت است. به عبارت دیگر نیرو دقیقاً به مقداری اعمال می‌شود که در نهایت برآیند تمام نیروهای اعمالی به جسم متحرک صفر گردد. از نمونه‌های این کاربرد می‌توان به انگشتان بازوی رباتی اشاره کرد که هنگام برداشتن اجسام باید فشار ثابتی را به جسم عمل کند [۱۰].

۳- مدل هیستریزیس

لحاظ نوع اولیه و ثانویه به شکل‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرند، به عنوان مثال در شکل (ا) نوع اولیه کوتاه، ثانویه کوتاه، ثانویه ورقه‌ای بدون هسته آهنی و اولیه‌ی دوتایی نشان داده شده است. موتور با اولیه کوتاه مطابق شکل (۱-الف) در مسیرهای طولانی مناسب‌تر است، زیرا به کارگیری سیم‌پیچی سه فاز در طول یک مسیر بلند، غیراقتصادی است. استفاده از نوع ثانویه کوتاه شکل (۱-ب) به کاربردهای با مسیر حرکت کوتاه محدود می‌شود. در هر دو حالت فوق، ثانویه به صورت قفسه در سطح هسته ثانویه توزیع شده است. موتور القایی خطی با ثانویه از نوع ورقه‌ای بدون هسته آهنی شکل (۱-ج) ارزان قیمت است، ولی چون مدار مغناطیسی آن در محل فاصله هوایی باز است، شکل مغناطیسی در آن چندان منظم نیست. در نتیجه، مسیرهای جریان در ثانویه نیز در محل‌های خاص میدان چندان متمرکز نمی‌گردد و موجب کاهش شدید نیروی رانش می‌شود. علی‌رغم فاصله هوایی طولانی، به منظور حفظ فاصله کافی بین قسمت‌های ثابت و متحرک، با استفاده از اولیه دوتایی شکل (۱-د) می‌توان ضعف‌های فوق را تا حدی برطرف ساخت. اگر دو اولیه واقع در طرفین ثانویه طوری تغذیه شوند، که قطب‌های متقابل، قطبیت مخالف داشته باشند (که عملاً چنین نیز هست) نیروی جاذبه شدیدی بین اولیه به وجود می‌آید، ولی با توجه به ساختمان دستگاه، نگهداری دو قسمت ثابت فوق در فاصله معین از هم چندان مشکل نیست.

شکل (۲) ساختار یک موتور خطی را نشان می‌دهد. موتور خطی از نظر کاربرد بر مبنای اینکه کدام یک از متغیرهای سرعت، نیرو و یا انرژی مهم باشد، و به سه دسته تقسیم می‌شود. در موتور با کاربرد انرژی، یک نیروی رانش بسیار زیاد در زمان بسیار کوتاه به قسمت متحرک اعمال گردد. متداول‌ترین نوع این کاربرد پرتاب‌کننده‌های موشک، دستگاه پرس و



$$M_{an} = \begin{cases} M_s H / 3a & |H_e| < 0.1 \\ M_s \coth\left(\frac{|H_e| - a}{|H_e|}\right) \frac{H_e}{|H_e|} & |H_e| > 0.1 \end{cases} \quad (6)$$

معادله برگشت پذیر حوزه های مغناطیسی به صورت زیر است:

$$M_{rev}(H_e) = c(M_{an}(H_e) - M_{irr}) \quad (7)$$

که در آن c ضریب برگشت پذیری ماده است. با استفاده از (۲)، (۳) و (۷) رابطه مغناطیس شوندگی ماده به صورت زیر به دست می آید:

$$\frac{dM}{dH} = (1-c) \frac{(M_{an}(H_e) - M_{irr})}{k\delta - \alpha(M_{an}(H_e) - M_{irr})} - c \frac{dM_{an}(H_e)}{dH} \quad (8)$$

پارامترهای این روش را می توان به طور خلاصه در جدول (۱) مشاهده نمود:

جدول (۱): پارامترهای مدل J-A

پارامتر	مقدار	واحد
M_s	۱۶۰۰۰۰۰	$[Am^{-1}]$
a	۵۶۰	$[Am^{-1}]$
k	۱۲۰۰	$[Am^{-1}]$
α	۰,۰۰۰۷	-
c	۰,۱	-

۴- مدل سازی و شبیه سازی

در شکل (۳) ساختار موتور القایی خطی یک طرفه که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است. اولیه (استاتور) آن از آهن نرم تشکیل شده است که شامل یک سیم بندی سه فاز در شیارها بوده و ثانویه آن از یک صفحه یکپارچه از آهن نرم و یک لایه مسی فوقانی تشکیل شده است. مشخصات موتور در جدول ۲ نشان داده شده است.

با پیشرفت فناوری امکان در نظر گرفتن مدل کامل تر مواد فرو مغناطیسی ایجاد شده است. شاخص ترین رفتاری که مواد فرو مغناطیسی از خود نشان می دهند، رفتار هیستریزیس است که در ساده ترین حالت موجب می شود مسیر بدون مغناطیسی شدن ماده از مسیر مغناطیسی شدن آن تفاوت پیدا کند. روش جایلز-آرتون (J-A) به دلیل سهولت پیاده سازی همچنین دقت بالا استفاده شده است. این مدل مبنی بر تعادل انرژی در مواد فرو مغناطیس است به طوری که کل انرژی در طول یک دوره به صورت انرژی مغناطیسی ذخیره می شود (W_m) و یا به صورت تلفات هیستریزیس (W_h) تلف می شود.

$$W = W_m + W_h \quad (1)$$

بر اساس این فرض و [۱۰] معادله زیر برای تمام مواد فرو مغناطیس به دست می آید:

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (2)$$

که در آن M مغناطیس شوندگی ماده، M_{rev} مغناطیس شوندگی برگشت پذیر و M_{irr} مغناطیس شوندگی برگشت ناپذیر ماده است.

$$M_{an}(H_e) = M_s \left(\coth\left(\frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e}\right) \right) \quad (3)$$

با توجه به اصلاح تابع لانگکین که برای توصیف رفتار مواد فرو مغناطیسی بیان می شود، به عنوان یک منحنی مغناطیسی ایده آل، M_s اشباع مغناطیسی، a ضریبی برای توصیف دما و H_e اثر میدان مغناطیسی است که به صورت معادله زیر به دست می آید:

$$H_e = H + \alpha M \quad (4)$$

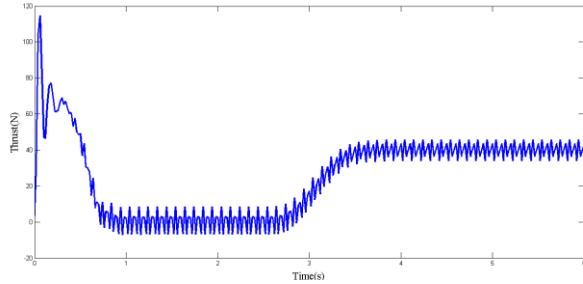
با تغییر میدان مغناطیسی H معادله مشتق شده از حوزه برگشت پذیر به صورت زیر است:

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an}(H_e) - M_{irr}}{k\delta - \alpha(M_{an}(H_e) - M_{irr})} \quad (5)$$

در (۵) k ضریب سختی مواد، α ضریبی برای توصیف اتصال حوزه های مغناطیسی و δ نشان دهنده جهت تغییر میدان مغناطیسی H است. δ یک پارامتر جهت دار بوده که مقدار +1 است اگر $\frac{dH}{dt} > 0$ و -1 است اگر $\frac{dH}{dt} < 0$ باشد.

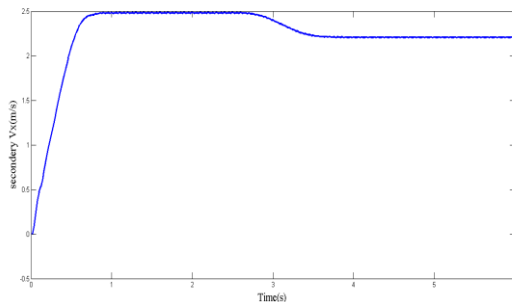


مستقیم توسط میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. شکل (۴) تغییرات نیروی رانشی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. نیروی اصطکاک در ثانیه سوم به بعد در نظر گرفته شده است. با توجه به رابطه (۹) نیرو افزایش یافته است.



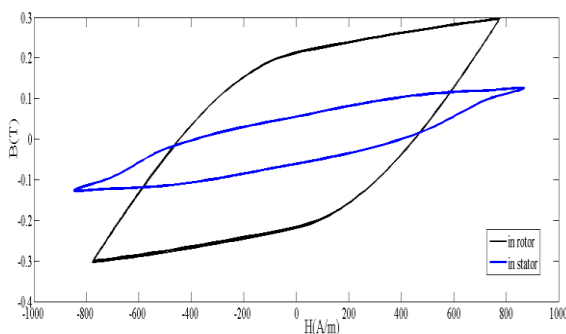
شکل (۴): تغییرات نیروی رانشی

شکل (۵) مشخصه تغییرات سرعت نسبت به زمان را نشان می‌دهد. بر طبق قانون دوم نیوتن سرعت در تقابل با نیرو رابطه معکوس دارد. این امر در مشخصه تغییرات سرعت نمایان است. از ثانیه سوم به بعد سرعت کاهش یافته است.

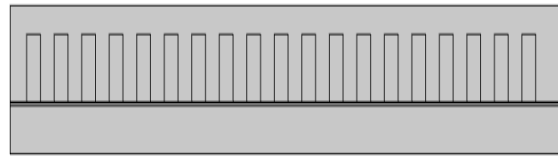


شکل (۵): مشخصه تغییرات سرعت ثانویه

با در نظر گرفتن منحنی هیستریزیس به روش J-A می‌توان مسیر مغناطیسی هر نقطه از هسته موتور را به دست آورد. شکل (۴) مسیر حرکت شار مغناطیسی را برای دونقطه از هسته موتور (ثانویه و استاتور) را نشان می‌دهد.



شکل (۴): منحنی چگالی شار



شکل (۳): مدل دوبعدی موتور القایی خطی

جدول (۲): مشخصات موتور القایی خطی

پارامتر	مقدار
ولتاژ	۳۰ V
فرکانس	۱۰ Hz
طول موتور	۱۰۰ CM
تعداد قطب	۶
تعداد شیار	۱۹
عرض شیار	۲,۵ CM
تعداد شیار زیر هر قطب برای هر فاز	۱
فاصله هوایی	۰,۱ CM

از روش اجزا محدود در فضای دوبعدی به کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics جهت شبیه‌سازی کامپیوتری استفاده شده است [۱۱]. این نرم‌افزار معادلات دیفرانسیل سیستم‌های غیرخطی را توسط مشتقات جزئی با حضور میدان‌های الکترومغناطیسی و ... را حل می‌نماید. همچنین در آن امکان تعریف مدارات الکتریکی نظیر منبع، بار، مقاومت، سلف، خازن و ... به همراه میدان مغناطیسی وجود دارد. معادله دیفرانسیل مورد استفاده برای محاسبه نیرو و سرعت مطابق قانون دوم نیوتن (۹) است، همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر اصطکاک نیز در ثانیه سوم در نظر گرفته شده است.

$$F = ma \quad (9)$$

$$\Rightarrow Thrust \cdot x - m \frac{dv_x}{dt} - friction = 0$$

در موتورهای القایی خطی، نیرو و حرکت خطی به‌طور



۵- نتیجه گیری

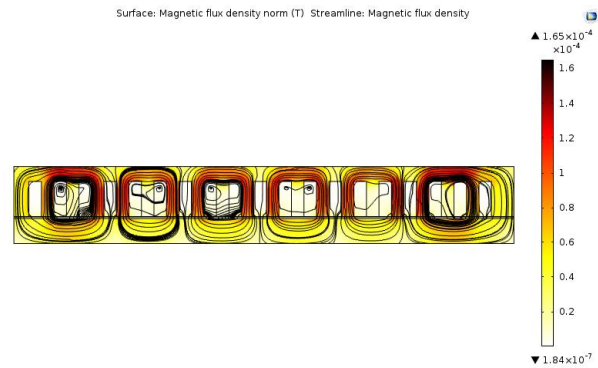
در این مقاله یک موتور القایی خطی یک طرفه با استفاده از روش اجزا محدود شبیه سازی شده است. علاوه بر منحنی اشباع، تلفات هیستریزیس به عنوان یکی از پارامترهای مهم در بررسی موتور القایی خطی در نظر گرفته شده است. تلفات هیستریزیس با استفاده از روش J-A در استاتور و ثانویه محاسبه شده اند.

همچنین با در نظر گرفتن اثر نیروی اصطکاک در ثانیه سوم تغییرات نیرو و سرعت به دست آمده است. با توجه به قانون دوم نیوتون، نیرو و سرعت رابطه عکس داشته و با اعمال اصطکاک مقدار نیرو افزایش و مقدار سرعت کاهش یافته است.

مراجع

- [۱] A. boldea and S. Nasar, *Linear Electromagnetic Devices*. New York: Taylor & Francis, ۲۰۰۱.
- [۲] A. boldea and S. Nasar, *Linear Electric Actuators and Generators*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, ۱۹۹۷.
- [۳] M. Wlada, K. Yanashima, Y. Oishi and D. Ebihara, "Improvement on characteristics of linear oscillatory actuator for artificial hearts", *IEEE Trans, Magn.*, vol. ۲۹, no. ۴, pp. ۳۳۶۱-۳۳۶۳, Nov. ۱۹۹۳.
- [۴] D. Colli et al, "A tubular generator drive for wave energy conversion", *IEEE Trans, Ind. elec.*, vol. ۵۳, no. ۴, pp. ۱۴۵۳-۱۴۵۸, Aug. ۲۰۰۶.
- [۵] A. Cassat and M. Juffer, "MAGLEV project technology aspects and choices", *IEEE Trans, Appl Superconductivity.*, vol. ۱۲, no. ۱, pp. ۹۱۵-۹۲۵, Mar. ۲۰۰۲.
- [۶] Y. Huang, J. Dong, and J. Zhu, "Core loss modeling for permanent-magnet based on flux variation locus and finite-element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. ۴۸, no. ۲, pp. ۱۰۲۳-۱۰۲۶, Feb. ۲۰۱۲.
- [۷] F. Preisach, "Über die magnetische nachwirkung," *Zeitschrift Phys.*, vol. B ۹۴, pp. ۲۲۷-۳۰۲, ۱۹۳۵.
- [۸] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *JMMM*, vol. ۶۱, pp. ۴۸-۶۰, ۱۹۸۶.
- [۹] Tong Yang, Libing Zhou, and Langru Li, Influence of Design Parameters on End Effect in Long Primary Double-Sided Linear Induction Motor, in: *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, VOL. ۳۹, NO. ۱, JANUARY ۲۰۱۱.
- [۱۰] Euler B. dos Santos, Luciano Martins Neto, "A LINEAR INDUCTION MOTOR PARAMETER DETERMINATION METHOD"
- [۱۱] COMSOL, MULTIPHYSICS©(FEMLAB), [online]. <http://www.comsol.com>.

شکل (۵) توزیع چگالی شار را در هسته‌ی موتور با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به علت فاصله هوایی زیاد عمق زیاد شیارهای استاتور و همچنین اثر پوستی شار نشتی در موتور خطی زیاد است.



شکل (۵): توزیع چگالی شار در موتور

با اعمال روابط مدل J-A به روش اجزا محدود می‌توان منحنی هیستریزیس را برای نقاط مختلف از هسته موتور القایی خطی به دست آورد. تلفات هیستریزیس را می‌توان به کمک (۱۰) محاسبه نمود. با توجه به اینکه عملیات در فضای دوبعدی صورت گرفته است، مقدار تلفات هیستریزیس هسته را می‌توان از حاصل ضرب انتگرال ضابطه $H \frac{dB}{dt}$ در یک بازه زمانی مشخص به دست آورد.

$$P_{Loss} = \frac{1}{T} \int_0^T (H \frac{\partial B}{\partial t}) \quad (10)$$

مقدار تلفات هیستریزیس برای استاتور با پارامترهای روش J-A برابر ۳۷,۸۲ وات و مقدار تلفات ثانویه رتور برابر ۹۸,۳۷ وات محاسبه شده است. مقدار تلفات کل هسته موتور از مجموع تلفات هسته استاتور و ثانویه برابر ۱۳۶,۱۹ وات محاسبه شده است.