

مدل سازی عملکرد حالت دائمی موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی با استفاده از روش اجزاء محدود

احمد دارابی^۱، استاد؛ علی بهنیافار^۲، دانشجوی دکتری؛ حامد طحانیان^۳، دانشجوی دکتری؛ هاشم یوسفی^۴، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - darabi@shahroodut.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - ali_behniafar@yahoo.com

۳- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - h.tahanian@hotmail.com

۴- دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران - hy_javid@yahoo.com

چکیده: در این مقاله یک الگوریتم تکراری جدید برای مدل‌سازی موتور هیستریز استوانه‌ای طرح معکوس (با روتور بیرونی) شارمحیطی با استفاده از روش اجزاء محدود ارائه شده است. در این الگوریتم به ازای هر ولتاژ ترمینال موردنظر، از دو حلقه تکرار، یکی برای یافتن جریان تحریک سیم‌پیچی استاتور و دیگری برای پیدا کردن ولتاژ فاصله هوایی استفاده می‌شود. به دلیل چندمقداره بودن مشخصه هیستریز و در نتیجه عدم امکان معرفی مستقیم آن به اکثر نرم‌افزارهای اجزاء محدود رایج، از تزویج یک محیط برنامه‌نویسی و یک نرم‌افزار اجزاء محدود بهره گرفته شده است. با برقراری این تزویج، در هر یک از تکرارهای داخلی الگوریتم، معرفی حلقه هیستریز به مدل اجزاء محدود موتور از طریق اعمال جریان به سیم‌پیچ‌های استاتور و توزیع فضایی مغناطیس‌شوندگی به رینگ هیستریز انجام می‌شود. همچنین، به منظور فراهم آمدن امکان مقایسه نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود، یک الگوریتم مدل‌سازی تکراری بر پایه روابط تحلیلی نیز برای این موتور ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی‌ها به هر دو روش اجزاء محدود و تحلیلی با دقت مناسبی به یکدیگر نزدیک می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: موتور هیستریز، طرح معکوس، شارمحیطی، مدل‌سازی، روش اجزاء محدود.

Finite Element Modeling of an Inversed Design Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor in Steady State Condition

A. Darabi¹, Professor; A. Behniafar², PhD Student; H. Tahanian³, PhD Student; H. Yoosefi⁴, PhD Student

1, 2, 3, 4- Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, Email:

1- darabi@shahroodut.ac.ir, 2- ali_behniafar@yahoo.com, 3- h.tahanian@hotmail.com, 4- hy_javid@yahoo.com

Abstract: This paper presents a new iterative algorithm for finite element modelling of an inversed design (outer rotor) circumferential flux cylindrical hysteresis motor. Proposed algorithm consists of two iteration loops for each input voltage, one to find the exciting current of the stator winding and the other for the air-gap voltage. Due to hysteresis characteristic being multi-valued which leads to the impossibility of direct introduction to the most of common finite element software, coupling a programming environment and the finite element software is employed. Employment of this coupling in each one of the interior iterations, the hysteresis loop is introduced to the finite element model of the motor via applying exciting current to the stator windings and spatial distribution of magnetization to hysteresis ring. Also, in order to create comparison possibility of the finite element results, an iterative modeling algorithm based on analytical equations is presented. It is shown that the results of both modeling methods are closed to each other with good accuracy.

Keywords: Hysteresis motor, inversed design, circumferential flux, modeling, finite element method.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۲۲

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹

نام نویسنده مسئول: احمد دارابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شاهرود - بلوار دانشگاه - دانشگاه صنعتی شاهرود - پردیس علم و فناوری - دانشکده مهندسی برق و رباتیک.

۱- مقدمه

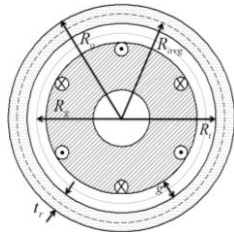
موتورهای هیستریز یا پسماند موتورهای سنکرون خودراه‌اندازی هستند که برای اولین بار در سال ۱۹۰۰ میلادی توسط آقای اشتینمتر معرفی شدند [۱]. در این موتورها مشابه با موتورهای سنکرون و آسنکرون یک جریان متناوب چندفاز به سیم‌پیچ‌های استاتور اعمال می‌گردد تا یک میدان دوار در فاصله هوایی ایجاد شود. روتور ماشین‌های هیستریز از یک ماده با خاصیت هیستریز مغناطیسی قابل توجه ساخته می‌شود. این موتورها، که در توان‌های کمتر از یک اسب بخار کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند، از ویژگی‌های منحصربه‌فردی برخوردار هستند که از آن جمله می‌توان به ساختار ساده و مستحکم، مشخصه گشتاور سرعت ثابت، عملکرد بسیار نرم و بدون نویز و همچنین، جریان راه‌اندازی پایین اشاره کرد [۲]. این مشخصه‌های عملکردی، باعث توسعه کاربرد موتورهای هیستریز نسبت به موتورهای مغناطیسی دائم در بسیاری از سیستم‌های سرعت بالا به‌ویژه سانتریفیوژها و ژيروسکوپها شده است. لازم به ذکر است که موتورهای مغناطیسی دائم به دلیل حذف سیم‌پیچ تحریک، دارای بازده و چگالی توان بالایی می‌باشند [۳]، اما در کاربردهایی که نیاز به سرعت زیاد و نویز کم است، مناسب نخواهند بود. به‌رحال راندمان و ضریب توان نسبتاً کم از معایب ذاتی موتورهای هیستریز به‌شمار می‌آیند که در بعضی از کاربردها به‌عنوان یک موضوع منفی و محدودکننده مطرح می‌شوند [۴]. پدیده هانتینگ یا نوسانات فرکانس پایین سرعت روتور حول سرعت سنکرون از دیگر معایب موتورهای هیستریز به‌شمار می‌آید که در پارامترهای از مواقع اتفاق می‌افتد و مدت‌زمان نسبتاً طولانی برای میراشدن آن نیاز است [۵].

موتورهای هیستریز نیز همانند اکثر ماشین‌ها از نقطه‌نظر ساختار کلی به دو گروه موتورهای استوانه‌ای و موتورهای تخت (دیسکی) دسته‌بندی می‌شوند. در مرجع [۶] مزایا و معایب هریک از ساختارهای استوانه‌ای و تخت به تفصیل بیان شده است. بسته به جهت عبور شار مغناطیسی در ماده هیستریز روتور می‌توان موتورهای هیستریز استوانه‌ای را به دو گروه شارمحیطی و شار شعاعی دسته‌بندی کرد. همچنین، این موتورها بر اساس موقعیت قرارگیری روتور نسبت به استاتور به دو دسته روتور داخلی و روتور خارجی یا معکوس قابل تقسیم‌بندی هستند. ساخت موتورهای هیستریز استوانه‌ای به‌صورت شارمحیطی اقتصادی‌تر است و نوع معکوس این موتورها نیز می‌تواند ممان اینرسی بالاتری فراهم کند که در برخی از کاربردها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به مدل‌سازی موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی پرداخته می‌شود.

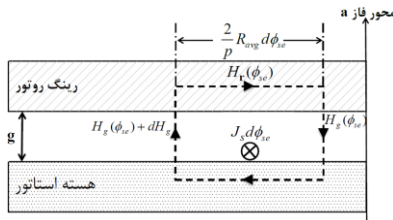
تاکنون مراجع متعددی به مدل‌سازی موتورهای هیستریز استوانه‌ای در شرایط عملکرد حالت دائمی پرداخته‌اند که به برخی از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود. در [۷] با استفاده از روش جابه‌جایی و کار مجازی، رابطه‌ای کلی برای محاسبه گشتاور لحظه‌ای ایجادشده در

ماشین‌های هیستریز ارائه شده است. البته، استفاده از این رابطه نیاز به آگاهی از توزیع دقیق میدان مغناطیسی در ماده هیستریز دارد که به‌کارگیری آن را پیچیده می‌کند. مراجع [۸، ۹] با استفاده از تقریب متوازی‌الاضلاع مشخصه هیستریز به استخراج مدار معادل الکتریکی حالت دائمی برای موتورهای هیستریز استوانه‌ای شار شعاعی و شارمحیطی پرداخته‌اند. همچنین، در [۱۰] با استفاده از تقریب بیضوی مشخصه هیستریز یک مدار معادل الکتریکی کلی برای تحلیل عملکرد حالت دائمی موتور هیستریز استوانه‌ای در هر دو شرایط آسنکرون و سنکرون ارائه شده است. در مراجع مذکور از یک سری فرضیات ساده‌کننده استفاده شده است که می‌تواند دقت نتایج مدل‌سازی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، روش‌های تحلیلی ارائه شده در مقالات، عموماً به استخراج مدار معادلی با عناصر ثابت برای موتور هیستریز ختم شده‌اند. در این مقالات الگوریتمی برای نحوه به‌کارگیری مدار معادل هنگامی که پارامترهای آن وابسته به ورودی‌ها و نقطه کار می‌باشند، ارائه نشده است. بنابراین استفاده از مدار معادل در این مقالات به شرایطی محدود شده است که پارامترها ثابت و ورودی مشخص باشند. تجربیات ما نشان می‌دهند که چنین مدل‌سازی دقت کافی را در اغلب موارد ندارند. در [۱۱] با استفاده از تقریب بیضوی مشخصه هیستریز و به‌کمک حل تحلیلی معادلات ماکسول، توزیع میدان در بخش‌های مختلف موتور هیستریز استوانه‌ای شارمحیطی به دست آمده است. اگرچه دقت روش به‌کاررفته در این مرجع نسبت به کارهای گذشته بیشتر است، اما این روش به استخراج یک مدار معادل الکتریکی منجر نشده است. طبق بررسی‌های انجام شده توسط نویسندگان مقاله پیش‌رو، به نظر می‌رسد در بین مراجع موجود به زبان انگلیسی بحث مدل‌سازی موتورهای هیستریز به‌کمک روش اجزاء محدود برای اولین بار در [۱۲] مطرح شده است. به‌رحال در این مقاله یک موتور ترکیبی هیستریز-رلوکتانس از نوع شار شعاعی در نظر گرفته شده است و فقط نحوه محاسبه گشتاور رلوکتانسی ارائه شده است و متأسفانه هیچ‌گونه توضیحی در مورد الگوریتم مدل‌سازی پدیده هیستریز و محاسبه گشتاور هیستریز ارائه نشده است. مراجع [۱۳-۱۵] با استفاده از مدل‌هایی بر پایه مدل پریساج پدیده هیستریز به مدل‌سازی اجزاء محدود موتور هیستریز استوانه‌ای شارمحیطی پرداخته‌اند. با توجه به این نکته که مدل‌سازی‌های ارائه‌شده در این مقالات از نوع حالت دائمی و در شرایط حداکثر گشتاور هستند، استفاده از مدل‌های پیچیده و زمان‌بر پریساج تقریباً توجیهی ندارد. همچنین، به‌نظر می‌رسد در الگوریتم‌های مدل‌سازی این مقالات به تعیین محل حداکثر شدن مغناطیس‌شوندگی در ماده هیستریز روتور توجهی نشده است. به‌علاوه، خروجی این الگوریتم‌ها فقط شامل مشخصه گشتاور-جریان ماشین هیستریز است و از سایر مشخصه‌های عملکردی مهم دیگر غفلت شده است. مرجع [۱۶] یک مدل اجزاء محدود حالت دائمی برای محاسبه گشتاور حداکثر موتور هیستریز استوانه‌ای ارائه کرده است که در آن برای مدل‌سازی

- (۵) شدت میدان و چگالی شار در فاصله هوایی فقط دارای مؤلفه شعاعی و در رینگ هیستریز فقط دارای مؤلفه محیطی است.
 - (۶) هارمونیک‌های مرتبه بالای توزیع میدان در رینگ هیستریز با فرض حلقه‌های هیستریز با مجموعه‌ای از بیضی‌های متحدالمرکز چشم‌پوشی می‌شوند.
 - (۷) اثر دندانه‌ها و شیارهای استاتور با اعمال ضریب کارتر و محاسبه فاصله هوایی مؤثر منظور می‌شود.
 - (۸) نفوذپذیری مغناطیسی هسته استاتور ابتدا بی‌نهایت فرض شده و سپس افت نیروی محرکه مغناطیسی در آهن استاتور با محاسبه یک ضریب در محاسبه راکتانس مغناطیس‌کننده منظور می‌شود.
- شکل ۱ سطح مقطع و همچنین نمای گسترده ماشین هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی را نشان می‌دهد که ابعاد اساسی ماشین در این شکل مشخص شده‌اند.
- با توجه به فرض ۱ می‌توان چگالی جریان در واحد زاویه حول محیط استاتور J_s (که تابعی از زمان نیز است) را به صورت زیر محاسبه کرد:



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف) سطح مقطع ماشین هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی، ب) نمای گسترده ماشین هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی

$$J_s(\phi_{se}, t) = \left(\frac{m}{2}\right) \left(\frac{N_s}{p}\right) \left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right) \sin(\omega_e t - \phi_{se}) \quad (1)$$

که در آن ω_e ، a ، I_s ، p ، N_s ، m ، t ، ϕ_{se} به ترتیب عبارت‌اند از زاویه الکتریکی حول محیط استاتور (از مبدأ محور فاز 'a')، زمان، تعداد فازها، تعداد دور سیم‌پیچی سینوسی معادل هر فاز، تعداد قطب‌ها، مقدار مؤثر جریان تحریک هر فاز، تعداد مسیره‌های موازی جریان هر فاز و فرکانس زاویه‌ای جریان هر فاز.

با اعمال قانون مداری آمپر به مسیر دیفرانسیلی نشان داده‌شده در شکل ۱-ب معادله زیر نتیجه می‌شود:

پدیده هیستریز از یک تنسور نفوذپذیری با عناصر ثابت استفاده شده است که این کار می‌تواند خطای قابل‌توجهی به همراه داشته باشد. به این نکته باید اشاره کرد که رفتار موتورهای هیستریز استوانه‌ای در شرایط راه‌اندازی و یا در رژیم عملکرد آسنکرون به کمک روش اجزاء محدود در مراجعی نظیر [۱۷، ۱۸] مورد مطالعه قرار گرفته است. موتورهای هیستریز نوع تخت نیز مورد بررسی و تحلیل مراجع قرار گرفته‌اند که در ادامه به بررسی اجمالی برخی از آن‌ها پرداخته می‌شود. در مرجع [۱۹] حل معادله لاپلاس در دستگاه مختصات کارتزین دوبعدی برای یافتن توزیع میدان مغناطیسی در بخش‌های مختلف موتور هیستریز تخت تک‌استاتور-تک‌روتوره شارمحیطی با هسته استاتور شیاردار ارائه شده است و با استفاده از آن رابطه جریان-گشتاور موتور نیز به دست آمده است. در [۲۰] روشی برای استخراج رابطه جریان-گشتاور این موتور به کمک تحلیل اجزاء محدود معرفی شده است. تأثیر تغییرات فاصله هوایی بر روی عملکرد این موتور در [۲۱] مورد مطالعه قرار گرفته است. مرجع [۲۲] نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با اتصال یک لایه مسی با اندازه مناسب به سطح دیسک هیستریز، گشتاور راه‌اندازی این موتور را افزایش داد. در [۲۳] یک موتور هیستریز با هسته استاتور شیاردار که به صورت ترکیبی از موتورهای هیستریز تخت و استوانه‌ای شارمحیطی می‌باشد معرفی شده است.

پیش از ارائه روش مدل‌سازی اجزاء محدود، یک روش تحلیلی برای مدل‌سازی موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی در بخش دوم مقاله تشریح می‌شود. بخش سوم به معرفی الگوریتم جدید مدل‌سازی این موتور با استفاده از روش اجزاء محدود اختصاص داده شده است. نتایج حاصل از پیاده‌سازی این دو روش مدل‌سازی و مقایسه آن‌ها برای یک موتور نمونه در بخش چهارم ارائه می‌گردد.

۲- مدل‌سازی تحلیلی موتور در شرایط عملکرد حالت دائمی

در این بخش مدل تحلیلی موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی با به‌کارگیری قانون مداری آمپر و قانون القای فارادی به دست می‌آید. این مدل برای هر فاز از موتور هیستریز یک مدار معادل ارائه می‌دهد که پارامترهای این مدار معادل با توجه به ابعاد ماشین، مشخصات مواد به‌کاررفته در آن و ولتاژ اعمالی قابل‌محاسبه هستند.

در ابتدا یک سری فرضیات به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

- (۱) یک مجموعه جریان‌های سه‌فاز متعادل در سیم‌پیچی‌های توزیع‌شده سینوسی سه‌فاز استاتور جاری است.
- (۲) تغییرات مقاومت سیم‌پیچی‌های استاتور ناچیز است.
- (۳) موتور در سرعت سنکرون و در حداکثر گشتاور خود کار می‌کند.
- (۴) توزیع میدان مغناطیسی در سرتاسر رینگ هیستریز وابسته به موقعیت شعاعی و محوری نقاط مختلف رینگ نیست.

$$B_m = \frac{\left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)}{\sqrt{\left(\frac{g p t_r}{2\mu_0 R_g}\right)^2 + \left(\frac{2R_{avg}}{p\mu}\right)^2 + 2\frac{g t_r R_{avg}}{\mu_0 \mu R_g} \cos\alpha}} \quad (9)$$

با داشتن توزیع چگالی شار فاصله هوایی از رابطه (۴)، شار پیوندی

فاز 'a' به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_a = \frac{\pi N_s L_e t_r B_m}{2a} \sin(\omega_e t + \phi_0) \quad (10)$$

که در آن L_e طول محوری ماشین است. طبق قانون القای فارادی ولتاژ تحریک القایی در فاز 'a' برابر است با:

$$e_f = \frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{\pi \omega_e N_s L_e t_r B_m}{2a} \cos(\omega_e t + \phi_0) \quad (11)$$

با استفاده از معادله (۷) می‌توان جریان تحریک فاز 'a'، یعنی i_e

را به دو مؤلفه i_h و i_g تجزیه کرد به طوریکه:

$$i_g = \frac{g a t_r B_m p^2}{\mu_0 R_g m N_s} \cos(\omega_e t + \phi_0 - \frac{\pi}{2}) \quad (12)$$

$$i_h = \frac{4a R_{avg} B_m}{m \mu N_s} \cos(\omega_e t + \phi_0 + \alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

به کمک روابط (۱۱)، (۱۲) و (۱۳) می‌توان راکتانس مغناطیس کننده X_g و امپدانس هیستریزیس Z_h را به صورت زیر تعریف کرد:

$$X_g = \frac{1}{K_r} \left| \frac{\hat{E}_f}{\hat{I}_g} \right| = \frac{m \mu_0 N_s^2 L_e R_g \pi \omega_e}{2K_r g a^2 p^2} \quad (14)$$

$$Z_h = \frac{\hat{E}_f}{\hat{I}_h} = \frac{m \mu \pi \omega_e L_e t_r N_s^2}{8 R_{avg} a^2} \angle \frac{\pi}{2} - \alpha = R_h + jX_h \quad (15)$$

ضریب K_r بیانگر افزایش جریان مغناطیس کننده ماشین به دلیل افت نیروی محرکه مغناطیسی در هسته استاتور است.

با توجه به روابط به دست آمده می‌توان یک مدار معادل الکتریکی

برای هر فاز از ماشین هیستریزیس استوانه‌ای شارمحیطی به صورت

نشان داده شده در شکل ۲ در نظر گرفت. در این شکل پارامترهای R_c

استاتور، مقاومت اهمی سیم‌پیچ، راکتانس پراکندگی کل سیم‌پیچ و

راکتانس پراکندگی شار سیم‌پیچ انتهایی. از آنجا که جزئیات محاسبه

پارامترهای مذکور از حوصله این بحث خارج است، لذا نحوه انجام این

محاسبات به مراجع [۲۴] و [۲۵] ارجاع داده می‌شود. متذکر می‌شود

که با توجه به [۲۶]، مطابق شکل ۲ راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ

انتهایی از راکتانس پراکندگی کل برای حصول نتایج دقیق‌تر جدا شده

است. \hat{E}_a در مدار معادل شکل ۲ ولتاژ فاصله هوایی نامیده می‌شود و

با رابطه زیر به \hat{E}_f و \hat{I}_e مرتبط می‌شود:

$$\hat{E}_a = \hat{E}_f + j(X_{ls} - X_{le})\hat{I}_e \quad (16)$$

بسیاری از مقالات به وابستگی شدید پارامترهای مدار معادل

ماشین هیستریزیس به نقطه کار به خصوص به سطح ولتاژ تغذیه اشاره

نکرده‌اند در صورتی که این چشم‌پوشی در مواردی می‌تواند به نتایج

$$J_s(\phi_{se}, t) = -\frac{2}{p} R_{avg} H_r(\phi_{se}) + g \frac{dH_g(\phi_{se})}{d\phi_{se}} \quad (2)$$

که در آن H_g ، H_r ، R_{avg} ، g و H_g به ترتیب عبارت‌اند از شعاع متوسط

رینگ هیستریزیس، شدت میدان مغناطیسی در رینگ هیستریزیس،

طول مؤثر فاصله هوایی و شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی.

لازم به ذکر است که ارتباط بین طول واقعی فاصله هوایی g_{act} و طول

مؤثر آن به صورت زیر است:

$$g = K_C g_{act} \quad (3)$$

که در این معادله K_C ضریب کارتر نامیده می‌شود که به شکل و ابعاد

شیار وابسته است و نحوه محاسبه آن برای انواع شیارها در [۲۴] به

تفصیل ارائه شده است. با استفاده از اصل پیوستگی شار می‌توان میان

چگالی شار مغناطیسی رینگ هیستریزیس B_r و چگالی شار در فاصله

هوایی B_g رابطه زیر را برقرار کرد:

$$B_g(t, \phi_{se}) = \frac{p t_r}{2R_g} \frac{dB_r(t, \phi_{se})}{d\phi_{se}} \quad (4)$$

که در آن t_r و R_g به ترتیب ضخامت شعاعی رینگ هیستریزیس و

شعاع متوسط فاصله هوایی می‌باشند. با توجه به تقریب بیضوی

مشخصه‌های هیستریزیس می‌توان توزیع مؤلفه‌های محیطی چگالی شار

مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی رینگ هیستریزیس را به صورت

زیر در نظر گرفت:

$$B_r(t, \phi_s) = B_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} + \phi_0) \quad (5)$$

$$H_r(t, \phi_s) = H_m \cos(\omega_e t - \phi_{se} + \phi_0 + \alpha) =$$

$$= \frac{B_m}{\mu} \cos(\omega_e t - \phi_{se} + \phi_0 + \alpha) \quad (6)$$

پارامترهای μ و α به ترتیب نفوذپذیری مغناطیسی رینگ

هیستریزیس و زاویه تأخیر هیستریزیس آن هستند که تابعی از اندازه

شدت میدان مغناطیسی می‌باشند و از تقریب بیضوی مشخصه

هیستریزیس به دست می‌آیند.

با قرار دادن روابط (۱)، (۴)، (۵) و (۶) در معادله (۲)، رابطه زیر

به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{m}{2}\right)\left(\frac{N_s}{p}\right)\left(\frac{\sqrt{2}I_s}{a}\right)\sin(\omega_e t - \phi_{se}) \\ &= -\frac{2B_m R_{avg}}{p\mu} \cos(\omega_e t - \phi_{se} + \phi_0 + \alpha) - \\ & \frac{g p t_r B_m}{2\mu_0 R_g} \cos(\omega_e t - \phi_{se} + \phi_0) \end{aligned} \quad (7)$$

با استفاده از (۷) می‌توان زاویه ϕ_0 و دامنه چگالی شار B_m را

به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\phi_0 = \tan^{-1} \left(\frac{2R_{avg} \cos\alpha + \frac{g p t_r}{2\mu_0 R_g}}{\frac{2R_{avg}}{p\mu} \sin\alpha} \right) \quad (8)$$

شکل ۲ در شکل ۳ ارائه شده است. روند کلی این الگوریتم به این صورت است که به ازای یک ولتاژ ترمینال ورودی مشخص، یک حلقه هیستریزس اولیه انتخاب می‌شود و با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در ابتدای این بخش مقادیر عناصر مدار معادل و همچنین جریان تحریک محاسبه می‌شوند. سپس با انتخاب فازور جریان تحریک به عنوان فازور مبنا، مدار معادل شکل ۲ تحلیل شده و در نتیجه ولتاژ ترمینال به ازای این حلقه هیستریزس محاسبه می‌شود.

چنانچه اختلاف نسبی اندازه‌های ولتاژهای ترمینال ورودی و محاسبه شده از یک مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر باشد، حلقه هیستریزس انتخاب‌شده همان حلقه کاری موتور در ولتاژ ورودی مورد نظر است و در غیر این صورت حلقه هیستریزس انتخاب شده آنقدر تغییر داده می‌شود تا اختلاف نسبی ولتاژها از مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر شود.

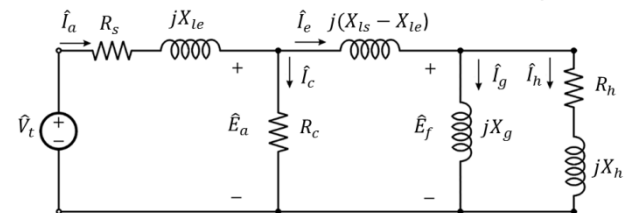
۳- مدل‌سازی عملکرد حالت دائمی به روش اجزاء محدود

در مدل‌سازی تحلیلی موتور هیستریزس با استفاده از قانون مداری آمپر و قانون القای فارادی و با در نظر گرفتن چند فرض ساده‌کننده، روابطی برای محاسبه ولتاژ القایی \hat{E}_a و جریان تحریک \hat{I}_e به دست می‌آید.

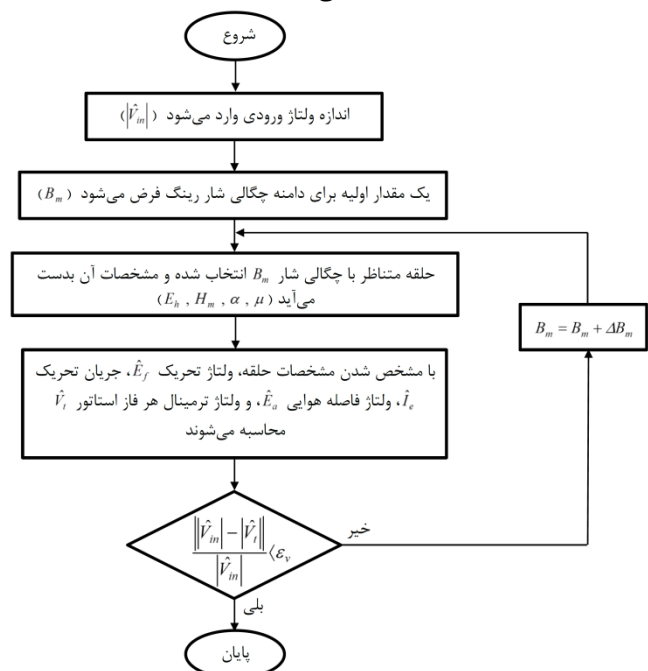
به منظور افزایش دقت نتایج مدل‌سازی می‌توان \hat{E}_a و \hat{I}_e را با استفاده از مدل اجزاء محدود محاسبه کرد. در این صورت مدار معادل هر فاز موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی مطابق شکل ۴ خواهد شد.

لازم به ذکر است که نرم‌افزارهای اجزاء محدود رایج از قبیل JMag، Maxwell و Flux نمی‌توانند با فرض مشخص بودن ولتاژ تغذیه ماشین، با جستجو در فضای حلقه‌های هیستریزس، حلقه هیستریزس عملکردی متناظر با آن ولتاژ را شناسایی کنند. در واقع برای پیاده‌سازی حلقه هیستریزس با این نرم‌افزارها می‌توان جریان ورودی و اطلاعات حلقه هیستریزس مشخصی را به آن معرفی کرد. بر اساس این اطلاعات، نرم‌افزار توزیع چگالی شار ماشین را محاسبه می‌کند. برخی از نرم‌افزارهای اجزاء محدود قابلیت اتصال به نرم‌افزارهای دیگر را دارند و بعضی از آن‌ها محیط برنامه‌نویسی خوبی را برای کاربر فراهم می‌نمایند. در این صورت این امکان وجود دارد که بعضی اهداف خاص را با تدوین روش و الگوریتم مناسب در محیط نرم‌افزار اجرا نمود. با این توصیف در مقاله حاضر به دلیل قابلیت بالای نرم‌افزار Comsol نسبت به دیگر نرم‌افزارهای اجزاء محدود و متداول بودن و قابلیت‌های ویژه محیط Matlab به ویژه توانایی‌های تحلیل گذرای آن از تزویج این دو نرم‌افزار استفاده شده است. البته لازم به ذکر است که برای اهدافی مانند مدل‌سازی‌های تحلیلی موتور هیستریزس و یا طراحی ماشین شاید نیاز چندانی به چنین تزویج نرم‌افزارها با زمان اجرای طولانی وجود نداشته باشد. معمولاً در روش‌های مدل‌سازی و یا طراحی مرسوم که متکی بر روابط تحلیلی

غیرواقعی منجر شود. این تغییرات شدید بعضی از پارامترهای مدار معادل به دلیل وابستگی این عناصر به پارامترهای تقریب بیضوی مشخصه هیستریزس (μ و α) است که خود توابعی از چگالی شار روتور و در نتیجه ولتاژ ترمینال می‌باشد. به بیان دیگر، طبق روابط تحلیلی (۸) تا (۱۶) \hat{E}_a و \hat{I}_e در مدار معادل شکل ۲ توابعی از پارامترهای مشخصه هیستریزس رینگ روتور (μ و α) هستند و از آنجاکه خود این پارامترها توابعی از \hat{V}_t هستند، \hat{E}_a و \hat{I}_e نیز توابعی از \hat{V}_t خواهند بود که این موضوع تحلیل مدار معادل شکل ۲ را پیچیده می‌کند.



شکل ۲: مدار معادل مستخرج از مدل‌سازی تحلیلی برای هر فاز موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی در شرایط عملکرد حالت دائمی



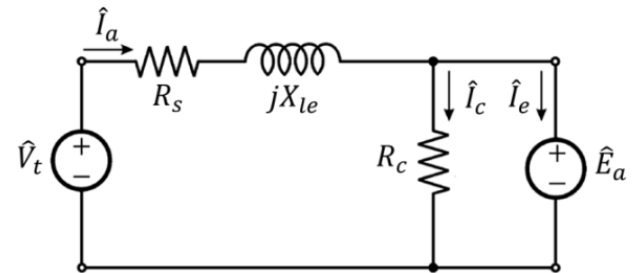
شکل ۳: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی مدل‌سازی تحلیلی موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی

با توجه به عدم وجود روابط تحلیلی برای برقراری ارتباط بین μ و α با \hat{V}_t ، ناگزیر باید از یک روش تکراری برای یافتن \hat{E}_a و \hat{I}_e به صورت توابعی از \hat{V}_t و در نتیجه تحلیل مدار معادل شکل ۲ و به دست آوردن مشخصه‌های عملکردی مختلف موتور استفاده نمود. الگوریتم پیشنهادی این مقاله برای تحلیل رفتار حالت دائمی موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی با استفاده از مدار معادل

محاسبه شده و جریان تحریک انتخابی به مدل اجزاء محدود، مقدار حداکثر مؤلفه محیطی شدت میدان در رینگ هیستریزس از مدل اجزاء محدود به دست می‌آید. چنانچه اختلاف نسبی دامنه شدت میدان متناظر با حلقه انتخابی و دامنه شدت میدان به‌دست‌آمده از مدل اجزاء محدود از یک مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر باشد، جریان تحریک انتخاب‌شده همان جریان تحریک کاری موتور به ازای حلقه انتخابی موردنظر است و در غیر این صورت جریان تحریک آنقدر تغییر داده می‌شود تا اختلاف نسبی مقادیر حداکثر شدت میدان از مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر شود. پس از تعیین جریان تحریک، موج اصلی تغییرات شار پیوندی هر فاز به ازای یک دوره تناوب الکتریکی از مدل اجزاء محدود محاسبه می‌شود و در نتیجه ولتاژ فاصله هوایی موتور در حلقه انتخابی نیز به دست می‌آید. با داشتن ولتاژ فاصله هوایی و جریان تحریک، و با در نظر گرفتن فازور جریان تحریک به‌عنوان فازور مبنا، ولتاژ ترمینال به ازای حلقه انتخاب‌شده از مدار معادل شکل ۴ محاسبه می‌شود. چنانچه اختلاف نسبی اندازه‌های ولتاژهای ترمینال ورودی و محاسبه‌شده از یک مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر باشد، حلقه هیستریزس انتخاب‌شده همان حلقه کاری موتور در ولتاژ ورودی موردنظر است و در غیر این صورت حلقه هیستریزس انتخاب‌شده آنقدر تغییر داده می‌شود تا اختلاف نسبی ولتاژها از مقدار حداکثر خطای مجاز کم‌تر شود.

می‌باشند با تعیین حلقه هیستریزس نامی برای ماشین، کلیه پارامترهای آن از طریق روابط تحلیلی قابل دستیابی هستند. علت اصلی تزویج نرم‌افزارها نیازمندی تحلیل‌های عددی دقیق و ناتوانی نرم‌افزارهای اجزاء محدود در پیاده‌سازی دقیق حلقه‌های هیستریزس می‌باشند.

نکته مهم دیگر آن است که به‌منظور کاهش زمان محاسبات در این مقاله از مدل اجزاء محدود دوبرعده موتور هیستریزس استفاده می‌شود.

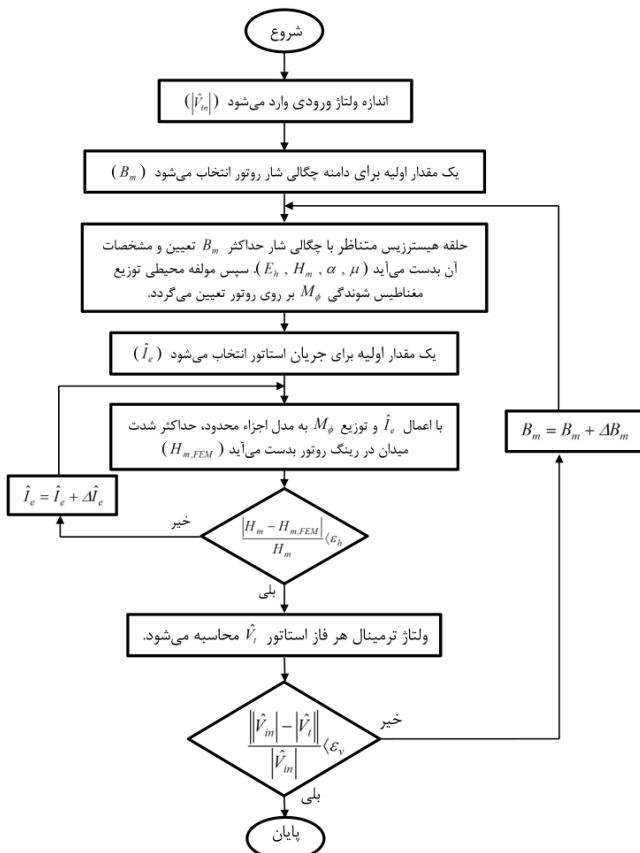


شکل ۴: مدار معادل هر فاز موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی در شرایط عملکرد حالت دائمی که در آن \hat{E}_a و \hat{I}_e از مدل اجزاء محدود موتور به‌دست می‌آیند

بنابراین، به جز راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی X_{le} سایر مؤلفه‌های پراکندگی شار در درون مدل اجزاء محدود موتور نهفته هستند و در مدار معادل شکل ۴ ظاهر نمی‌شوند. پارامترهای R_c و R_s همانند مدل تحلیلی به ترتیب بیانگر مقاومت معادل تلفات آهن استاتور و مقاومت اهمی سیم‌پیچ هستند.

در مدار معادل شکل ۴ نیز جریان تحریک \hat{I}_e و ولتاژ فاصله هوایی \hat{E}_a تابعی از پارامترهای مشخصه هیستریزس رینگ روتور (μ و α) هستند، ضمن آنکه \hat{E}_a خود به نحوی به \hat{I}_e وابسته است. همچنین با توجه به وابستگی حلقه هیستریزس و پارامترهای آن به ولتاژ ترمینال، \hat{I}_e و \hat{E}_a تابعی از \hat{V}_t خواهند بود و به دلیل عدم وجود روابط تحلیلی برای بیان این وابستگی‌ها باید از روش‌های تکراری برای تحلیل مدار معادل شکل ۴ استفاده کرد. از طرف دیگر، برخلاف روش تحلیلی، در مدل‌سازی اجزاء محدود به ازای یک حلقه هیستریزس دلخواه امکان محاسبه \hat{I}_e و \hat{E}_a از روابط ریاضی وجود ندارد و باید ارتباط این دو کمیت با حلقه هیستریزس را از طریق محاسبات اجزاء محدود برقرار کرد که برقراری این ارتباط خود نیازمند بهره‌گیری از یک روش تکراری دیگر خواهد بود.

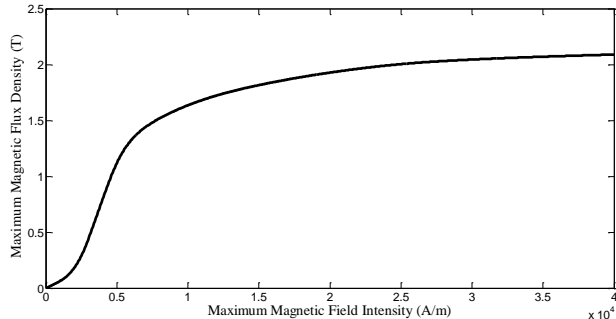
الگوریتم پیشنهادی این مقاله برای مدل‌سازی اجزاء محدود موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی در شرایط عملکرد حالت دائمی با استفاده از مدار معادل شکل ۴، در شکل ۵ ارائه شده است. روند کلی پیاده‌سازی این الگوریتم به این صورت است که به ازای یک ولتاژ ورودی مشخص یک حلقه هیستریزس اولیه در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این حلقه توزیع مؤلفه محیطی مغناطیس‌شوندگی در رینگ هیستریزس محاسبه می‌شود. سپس یک جریان تحریک اولیه انتخاب می‌شود. با اعمال توزیع مغناطیس‌شوندگی



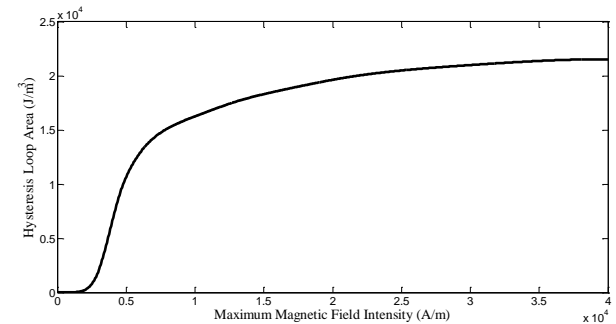
شکل ۵: فلوچارت الگوریتم پیشنهادی مدل‌سازی اجزاء محدود موتور هیستریزس استوانه‌ای معکوس شار محیطی برای شرایط عملکرد حالت دائمی

۴- نتایج شبیه‌سازی

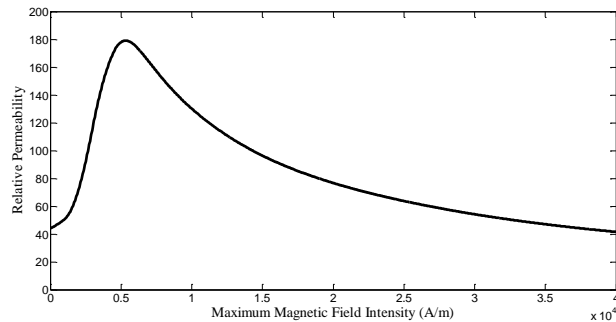
از شکل ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شود که برای هر دو مدل تحلیلی و اجزاء محدود، با افزایش ولتاژ ورودی مقادیر حداکثر چگالی شار و حداکثر شدت میدان نیز افزایش می‌یابد. همچنین اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده توسط هر دو مدل اجزاء محدود و تحلیلی به‌ویژه در ولتاژهای پایین ناچیز است.



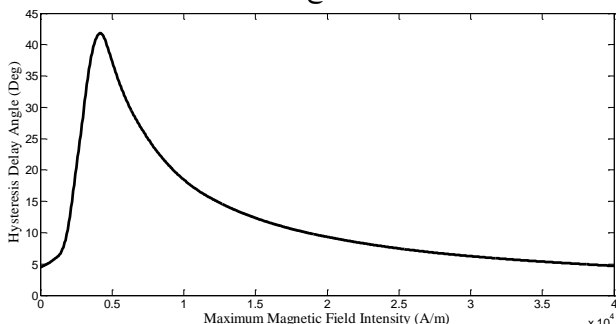
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۶: مشخصات حلقه‌های هیستریزاس ماده سازنده رینگ هیستریزاس موتور تحت مطالعه برحسب حداکثر شدت میدان مغناطیسی حلقه؛ (الف) حداکثر چگالی شار مغناطیسی حلقه، (ب) مساحت حلقه، (ج) نفوذپذیری مغناطیسی نسبی حلقه، (د) زاویه تأخیر هیستریزاس حلقه

به‌منظور پیاده‌سازی الگوریتم‌های مدل‌سازی تحلیلی و اجزاء محدود ارائه شده در بخش‌های قبل، یک نمونه موتور هیستریزاس استوانه‌ای معکوس شارمحیطی انتخاب شده است که اطلاعات طراحی آن در جدول ۱ و سایر مشخصات آن در جدول ۲ داده شده است. رینگ هیستریزاس این موتور از آلیاژ Fe-Cr-Ni-Mo-C ساخته شده است که پس از یک عملیات حرارتی ویژه، مشخصات حلقه‌های هیستریزاس آن به‌صورت نشان داده شده در شکل ۶ در آمده است. مشخصه‌های عملکردی موتور نمونه با پیاده‌سازی الگوریتم‌های مدل‌سازی به ازای ولتاژهای خط ورودی بین ۱۰ تا ۴۰ ولت به دست آمده است که در ادامه ارائه می‌شوند.

جدول ۱: اطلاعات طراحی موتور هیستریزاس استوانه‌ای معکوس

شارمحیطی تحت مطالعه

مقدار	نام
۳	تعداد فازها
۴۰۰ هرتز	فرکانس نامی
۲۴ ولت	ولتاژ خط ورودی
۲۴	تعداد شیارهای استاتور
۲	تعداد قطب‌ها
۸	تعداد کلاف‌های هر فاز
۵۰	تعداد دور سیم در هر کلاف
۲/۵ میلی‌متر	شعاع داخلی استاتور
۹ میلی‌متر	شعاع خارجی استاتور
۰/۱۹ میلی‌متر	ضخامت دیسک هیستریزاس
۰/۵ میلی‌متر	طول فاصله هوایی
۲/۵ میلی‌متر	ضخامت یوغ استاتور
۴ میلی‌متر	ارتفاع دندان استاتور
۰/۶۲۵ میلی‌متر	عرض دندان استاتور
۰/۵ میلی‌متر	عرض دهانه شیار
ستاره	اتصال سیم‌پیچی استاتور
دوطبقه روی هم	نوع سیم‌پیچی
دو شیار کوتاه شده	گام سیم‌پیچی

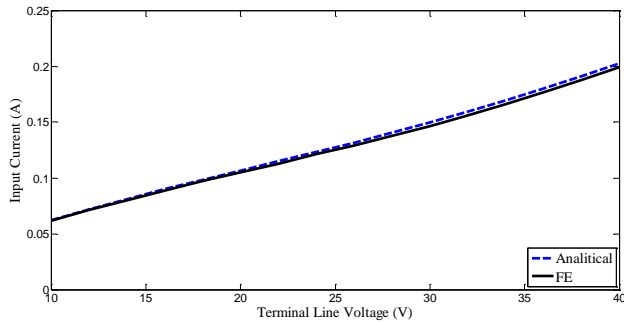
جدول ۲: برخی از پارامترهای الکتریکی موردنیاز در مدل‌سازی‌های

تحلیلی و اجزاء محدود موتور هیستریزاس استوانه‌ای معکوس

شارمحیطی تحت مطالعه

مقدار	نام
۷۶/۵۸ اهم	مقاومت اهمی هر فاز در فرکانس نامی
۹/۱۶ اهم	راکتانس پراکندگی کل هر فاز در فرکانس نامی
۳/۸۸ اهم	راکتانس پراکندگی سیم‌پیچ‌های انتهایی هر فاز در فرکانس نامی
۸۰۶۰ اهم	مقاومت معادل تلفات آهن هر فاز در ولتاژ و فرکانس نامی

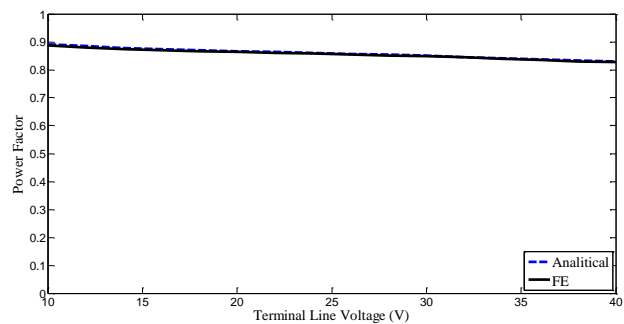
ارتباط بین ولتاژ ورودی با حداکثر چگالی شار مغناطیسی در رینگ هیستریزاس در شکل ۷ به نمایش درآمده است. شکل ۸ نیز نحوه تغییرات مقدار حداکثر شدت میدان مغناطیسی در رینگ هیستریزاس را با افزایش ولتاژ نشان می‌دهد.



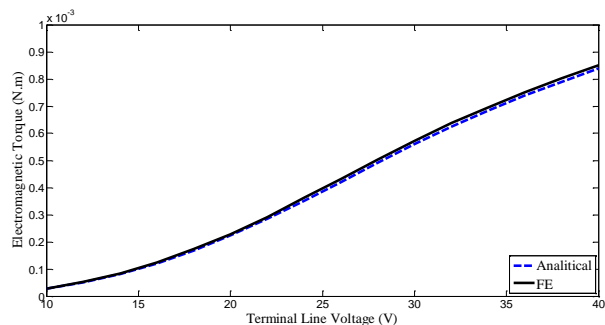
شکل ۹: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات جریان ورودی به موتور برحسب ولتاژ خط ترمینال

شکل ۱۲ منحنی‌های تغییرات توان ورودی سه فاز موتور برحسب ولتاژ خط را برای هر دو مدل نشان داده است. این منحنی‌ها نشان می‌دهند که با افزایش ولتاژ ترمینال، توان ورودی به موتور افزایش می‌یابد و تطابق منحنی‌ها در ولتاژهای پایین عالی است اما در ولتاژهای میانی و بالا مقدار توان ورودی پیش‌بینی‌شده توسط مدل اجزاء محدود نسبت به مدل تحلیلی اندکی کم‌تر است.

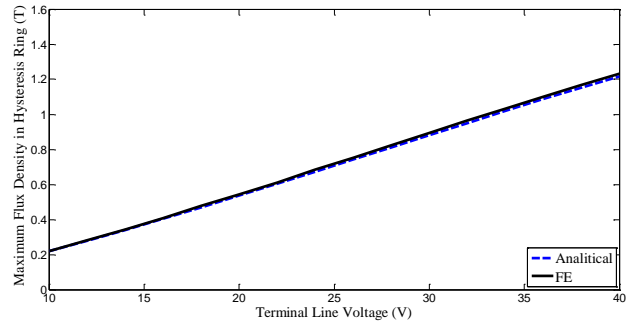
منحنی‌های تغییرات تلفات موتور برحسب اندازه ولتاژ خط ترمینال در شکل ۱۳ برای هر دو مدل نشان داده شده‌اند. در شکل ۱۳-الف منحنی‌های تلفات اهمی سیم‌پیچ‌ها و در شکل ۱۳-ب منحنی‌های تلفات هسته استاتور ترسیم شده‌اند. از این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که تلفات اهمی و تلفات آهن استاتور، و در نتیجه تلفات کل، با بالا رفتن ولتاژ افزایش می‌یابند.



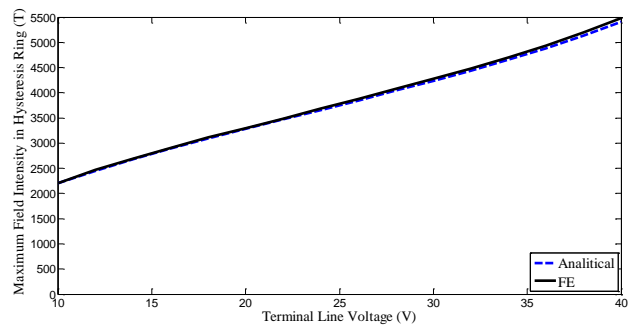
شکل ۱۰: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات ضریب توان موتور برحسب ولتاژ خط ترمینال



شکل ۱۱: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی برحسب ولتاژ خط ترمینال



شکل ۷: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای حداکثر مؤلفه محیطی چگالی شار مغناطیسی در رینگ هیستریز به ازای ولتاژهای مختلف

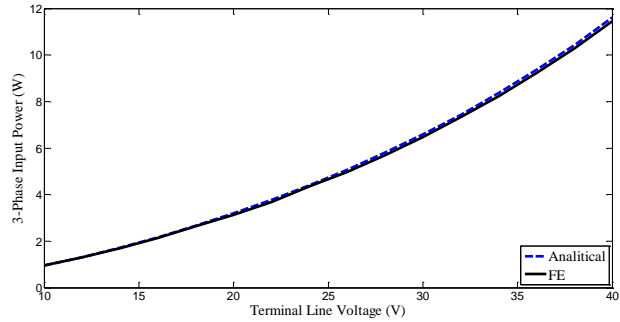


شکل ۸: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای حداکثر مؤلفه محیطی شدت میدان مغناطیسی در رینگ هیستریز به ازای ولتاژهای مختلف

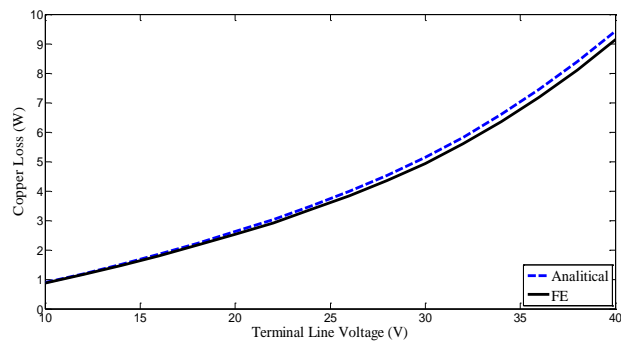
نحوه تغییرات اندازه جریان ورودی موتور برحسب اندازه ولتاژ خط ترمینال برای هر دو مدل در شکل ۹ نشان داده شده است. این شکل نیز نشان می‌دهد که در هر دو مدل با افزایش ولتاژ ترمینال، جریان موتور افزایش می‌یابد و در هر نقطه، به‌ویژه در ولتاژهای بالا، مقدار جریان پیش‌بینی‌شده توسط مدل اجزاء محدود مقداری کوچک‌تر از مدل تحلیلی است. شکل ۱۰ نتایج تغییرات ضریب توان ورودی برحسب اندازه ولتاژ خط ترمینال برای هر دو مدل تحلیلی و مدل اجزاء محدود را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای هر دو مدل تحلیلی و اجزاء محدود، با افزایش ولتاژ ورودی، ضریب توان با یک شیب کوچک کاهش می‌یابد. همچنین، با توجه به این شکل می‌توان گفت که اختلاف ضریب توان پیش‌بینی‌شده توسط دو مدل بسیار ناچیز است.

برای هر دو مدل تحلیلی و مدل اجزاء محدود، منحنی تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی ماشین برحسب ولتاژ خط در شکل ۱۱ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که برای هر دو مدل تحلیلی و اجزاء محدود، با افزایش ولتاژ ورودی اندازه گشتاور الکترومغناطیسی زیاد می‌شود. این موضوع کاملاً بدیهی است زیرا با افزایش ولتاژ چگالی شار حداکثر رینگ هیستریز زیادتر و سطح حلقه هیستریز که بیانگر گشتاور ماشین است بزرگ‌تر می‌شود. همچنین، گشتاور حاصل از مدل اجزاء محدود نسبت به مدل تحلیلی اندکی بیش‌تر است که این اختلاف در ولتاژهای بالا نمایان‌تر است.

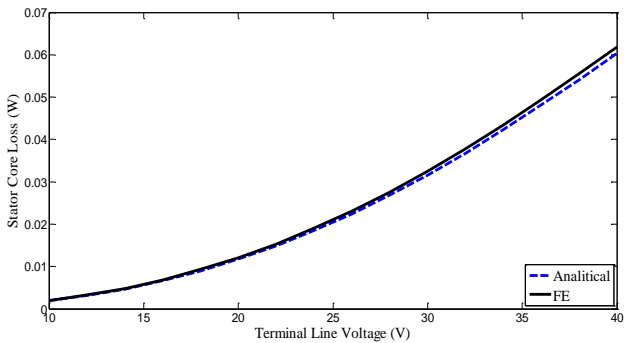
استاتور و توزیع سیم‌پیچی آن می‌باشد. توزیع مؤلفه محیطی چگالی شار مغناطیسی B_ϕ و موج اصلی آن حول رینگ هیستریز و در شعاع متوسط رینگ نیز به ازای ولتاژ نامی ترمینال در شکل ۱۸ ترسیم شده است. برخلاف H_ϕ ، تابع B_ϕ برحسب ϕ_{se} نزدیک به موج سینوسی خالص است که دلیل اصلی این موضوع سینوسی بودن توزیع مغناطیس‌شوندگی حول رینگ هیستریز می‌باشد. اگر پارامتر ϕ_{se} بین دو شکل ۱۷ و شکل ۱۸ حذف شود و تغییرات مؤلفه محیطی چگالی شار برحسب مؤلفه محیطی شدت میدان مغناطیسی حول رینگ هیستریز ترسیم شود، حلقه هیستریز کاری موتور در ولتاژ نامی به صورت نشان داده شده در شکل ۱۹ به دست می‌آید.



شکل ۱۲: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات توان ورودی سه‌فاز برحسب ولتاژ خط ترمینال



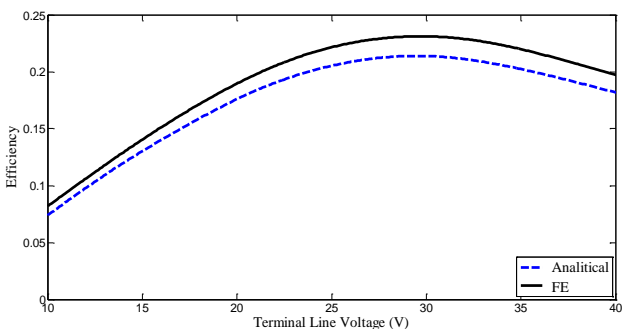
(الف)



(ب)

شکل ۱۳: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات تلفات موتور برحسب ولتاژ خط ترمینال؛ (الف) تلفات اهمی

سیم‌پیچ‌های استاتور، (ب) تلفات هسته استاتور



شکل ۱۴: نتایج مدل‌سازی‌های تحلیلی و اجزاء محدود برای تغییرات بازده برحسب ولتاژ خط ترمینال

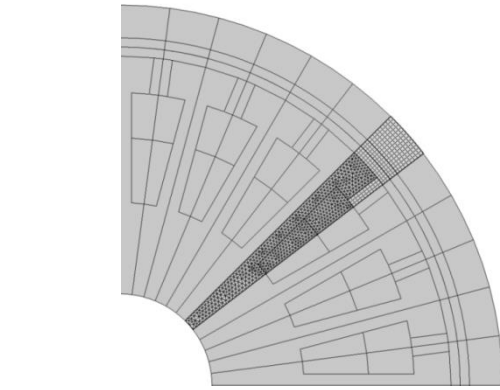
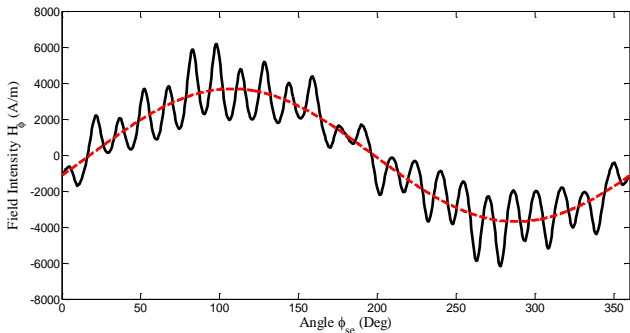
همچنین با توجه به پایین بودن دامنه چگالی شار در هسته استاتور کلیه موتورهای هیستریز شار محیطی، تلفات هسته استاتور در برابر تلفات اهمی ناچیز است. با توجه به این شکل‌ها در هر ولتاژی تلفات اهمی به دست آمده از مدل اجزاء محدود تا حدودی کمتر از نتایج مدل تحلیلی است اما این موضوع در مورد تلفات هسته بالعکس می‌باشد.

شکل ۱۴ تغییرات بازده موتور را برحسب اندازه ولتاژ خط برای هر دو مدل تحلیلی و مدل اجزاء محدود نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که برای هر دو مدل با بالا رفتن ولتاژ، بازده ابتدا افزایش می‌یابد و پس از تجربه یک مقدار حداکثر، روند کاهشی به خود می‌گیرد. همچنین مشاهده می‌شود که بازده پیش‌بینی شده توسط مدل اجزاء محدود نسبت به مدل تحلیلی بزرگ‌تر است.

اکنون مناسب است تا کمی عمیق‌تر به بررسی نتایج حاصل از مدل اجزاء محدود در ولتاژ نامی موتور یعنی ۲۴ ولت پرداخته شود. مش بندی موتور به این صورت انجام شده است که ابتدا یک مش برای نیمی از یک گام شیار تعریف شده است و برای بقیه ساختار این مش تکرار شده است. این مش بندی در شکل ۱۵ نشان داده شده است. از این شکل مشخص می‌شود که هسته استاتور و کلاف‌ها با اجزاء مثلی مش بندی شده‌اند و برای بقیه بخش‌ها از عناصر چهاروجهی استفاده شده است. شکل ۱۶ توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار در ولتاژ نامی را به صورت طیف رنگی برای موتور تحت مطالعه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که وجود پدیده هیستریز باعث شده است که خطوط شار در حین عبور از فاصله هوایی دچار یک انحراف زاویه شوند. همان‌طور که می‌دانیم همین انحراف شار در فاصله هوایی است که گشتاور ماشین‌های الکتریکی را شکل می‌دهد. همچنین، بیش‌ترین چگالی شار مربوط به رینگ هیستریز است و چگالی شار در استاتور بسیار پایین است.

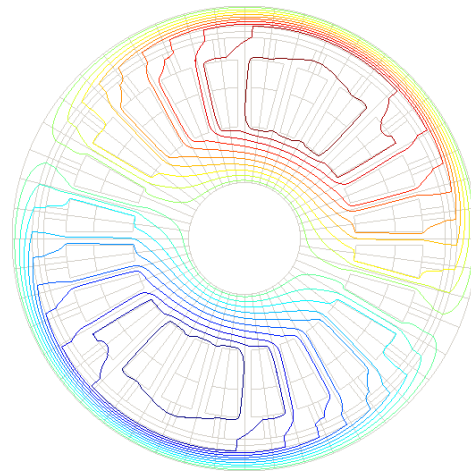
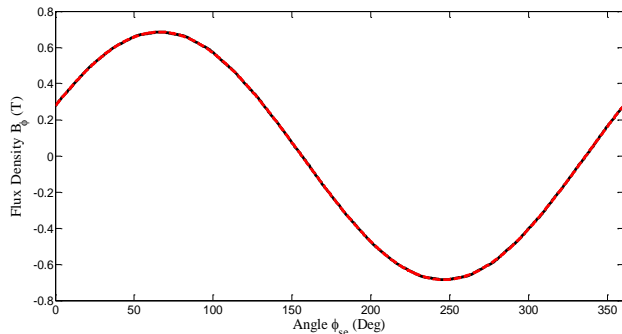
توزیع مؤلفه محیطی شدت میدان مغناطیسی H_ϕ و موج اصلی آن حول رینگ هیستریز و در شعاع متوسط رینگ به ازای ولتاژ نامی ترمینال در شکل ۱۷ ترسیم شده است. مشاهده می‌شود که H_ϕ دارای یک سری نوسانات پریودیک نسبتاً شدید است. اعوجاجات موجود روی شکل موج H_ϕ عمدتاً به دلیل وجود شیارهای نیمه‌باز

دیگر نیز به دست آورد که در شکل ۲۰ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از این شکل مشخص می‌شود، با تغییر ولتاژ ترمینال، حلقه هیستریزس و پارامترهای آن تغییر می‌کنند.

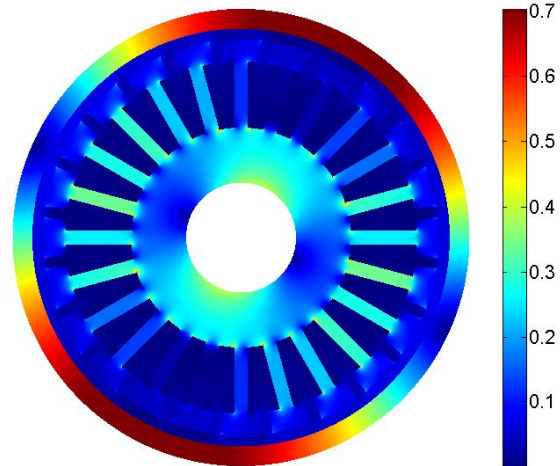
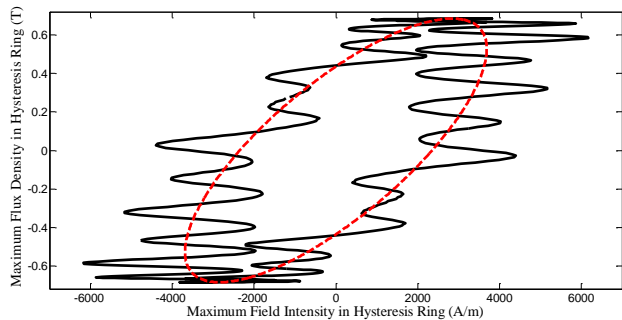


شکل ۱۵: نحوه مش‌بندی موتور بر اساس تکرار مش مربوط به نیمی از یک گام شیار

شکل ۱۷: مؤلفه محیطی شدت میدان مغناطیسی H_ϕ و موج اصلی آن حول رینگ هیستریزس و در شعاع متوسط رینگ در ولتاژ نامی

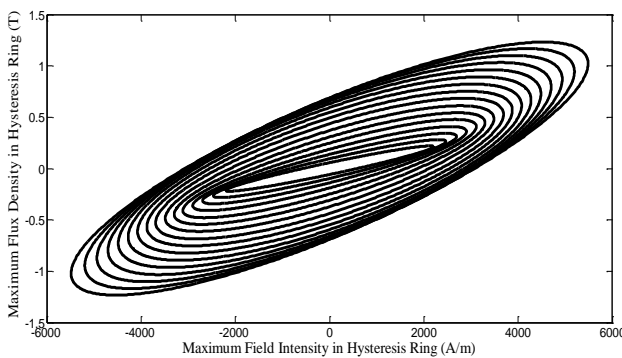


شکل ۱۸: مؤلفه محیطی چگالی شار مغناطیسی B_ϕ و موج اصلی آن حول رینگ هیستریزس و در شعاع متوسط رینگ در ولتاژ نامی



شکل ۱۶: توزیع چگالی شار مغناطیسی و خطوط شار در ولتاژ نامی

شکل ۱۹: حلقه هیستریزس موتور در ولتاژ نامی



شکل ۲۰: حلقه‌های هیستریزس بیضوی شکل در ولتاژهای مختلف

حلقه ترسیم‌شده به صورت یکپارچه با در نظر گرفتن توزیع‌های واقعی H_ϕ و B_ϕ به دست آمده است و نوسانات H_ϕ روی آن به وضوح مشخص است. حلقه ترسیم‌شده به صورت خط‌چین با در نظر گرفتن موج‌های اصلی H_ϕ و B_ϕ به دست آمده است و کاملاً بیضوی است. به‌رحال، حلقه بیضوی شکل به‌خوبی حلقه واقعی را تقریب می‌زند. به‌صورت مشابه می‌توان حلقه‌های هیستریزس بیضوی را برای ولتاژهای

۵- نتیجه‌گیری

موتورهای هیستریز به دلیل مشخصات منحصربه‌فرد خود در کاربردهای سرعت بالا جایگاه ویژه‌ای دارند. به‌رحال به دلیل پیچیدگی‌های ذاتی پدیده هیستریز، مدل‌سازی این موتورها همواره به‌عنوان یک چالش بزرگ تلقی می‌شود. در این مقاله یک الگوریتم تکراری جدید برای مدل‌سازی موتور هیستریز استوانه‌ای با استفاده از تحلیل اجزاء محدود معرفی شد. برای پیاده‌سازی این الگوریتم از تزویج محیط برنامه‌نویسی Matlab و نرم‌افزار اجزاء محدود COMSOL Multiphysics استفاده گردید. دلایل اصلی تزویج نرم‌افزارها، نیازمندی تحلیل‌های عددی دقیق و ناتوانی نرم‌افزارهای اجزاء محدود در پیاده‌سازی حلقه‌های هیستریز می‌باشند. به نظر نویسندگان مقاله حاضر هنگامی که فقط تحلیل رفتار حالت دائمی ماشین هیستریز موردنظر باشد استفاده از مدل‌سازی‌های پیچیده و زمان‌بر نباشد بر مدل پرسیاچ توجه کافی را ندارد و روش مدل‌سازی ارائه‌شده در مقاله فعلی خواسته‌های پیش‌بینی عملکرد حالت دائمی موتور هیستریز را در یک زمان کوتاه‌تر و با یک دقت کافی ارائه می‌نماید. همچنین، به‌منظور فراهم آمدن امکان مقایسه نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود، یک الگوریتم مدل‌سازی تکراری دیگر بر پایه روابط تحلیلی نیز برای این موتور ارائه گردید. از این الگوریتم‌ها برای مدل‌سازی عملکرد حالت دائمی یک موتور هیستریز استوانه‌ای معکوس شارمحیطی نمونه استفاده شد. مشخصات عملکردی مهم موتور از جمله جریان ورودی، ضریب توان، تلفات اهمی، تلفات آهنی و بازده در ولتاژهای مختلف ترمینال با استفاده از هر دو روش مدل‌سازی به دست آمد. همچنین، توزیع فضایی کمیت‌های مختلف میدان مغناطیسی و حلقه هیستریز کاری موتور به‌کمک مدل‌سازی اجزاء محدود ارائه گردید. نتایج مدل‌سازی‌های اجزاء محدود و تحلیلی به‌صورت رضایت‌بخشی به یکدیگر نزدیک بوده و هر دو روش، عملکرد موتور را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کنند.

سپاس‌گزاری

در این کار از داده‌ها و امکانات مرکز پژوهشی پیش‌ران‌های شناور دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شده است. در این جا لازم می‌دانیم از همه حمایت‌های این مرکز کمال تشکر و قدردانی را به‌عمل آوریم.

مراجع

- [1] C. P. Steinmetz, *Theory and Calculation of Electrical Apparatus*, 2nd ed., New York, McGraw, 1900.
- [2] A. Darabi, T. Ghanbari and M. Sanati-Moghadam, "Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation," *IET Electrical Power Application*, vol. 3, no. 5, pp. 491-501, 2009.
- [3] مهرداد جعفربلند، مرتضی میخک بیرانوند و محمدهادی ریسمانی، «ارائه روشی جهت انتخاب گام آهنربا برای موتور BLDC نوع IPM برای دستیابی به مشخصات مطلوب موتور»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۳، صفحه ۲۷-۳۴، ۱۳۹۴.
- [4] A. Darabi, M.H. Sadeghi and A. Hassannia, "Design optimization of multistack coreless disk-type hysteresis motor," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 26, no. 4, pp. 1081-1087, 2011.
- [5] S. T. Clurman, "On hunting in hysteresis motors and new damping techniques new damping techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 7, no. 3, pp. 512-517, 1971.
- [6] حجت حاتمی، محمدباقر بناشرفیان و محمدرضا فیضی، «ارائه روش جدید طراحی بهبودیافته ماشین‌های مغناطیس دائم شارمحوری سرعت پایین مورد استفاده در خودروهای هیبریدی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۲، صفحه ۵۱-۶۴، ۱۳۹۴.
- [7] H. Hatami¹, M. B. Bannae Sharifian and M .R. Feyzi, "A new method for improved design of low speed axial flux permanent magnet machines used in HEV," *Tabriz Journal of Electrical Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 51-64, 2015.
- [8] B. R. Teare, "Theory of hysteresis motor torque," *AIEE*, vol. 59, pp. 907-912, 1940.
- [9] M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of hysteresis motor: I-analysis of the idealized machine," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, no. 65, pp. 34-42, 1963.
- [10] M. A. Copeland and G. R. Slemon, "An analysis of hysteresis motor: II-the circumferential flux machine," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 83, no. 6, pp. 619-625, 1964.
- [11] T. Kataoka, "Unified analysis of solid rotor induction and hysteresis motors," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 95, no. 3, pp. 60-67, 1975.
- [12] F. Zaher, "An analytical solution for the field of a hysteresis motor based on complex permeability," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, no. 1, pp. 156-163, 1990.
- [13] G. Wakui, K. Kurihara and T. Kubota, "Radial flux type hysteresis motor with reaction torque-numerical analysis of hysteresis Motor using finite element," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vols. MAG-23, no. 5, pp. 3845-3852, 1987.
- [14] K. Hong-Kyu, J. Hyun-Kyo and H. Sun-Ki, "Finite element analysis of hysteresis motor combined with magnetization-dependent model," in *Electric Machines and Drives Conference Record, IEEE International*, pp. MC1/2.1 - MC1/2.3, 1997.
- [15] H. Kim, H. Jung and S. Hong, "Finite element analysis of hysteresis motor using the vector magnetization-dependent model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3495-3498, 1998.
- [16] H. Kim, S. Hong and H. Jung, "Analysis of hysteresis motor using finite element method and magnetization-dependent model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 4, pp. 685-688, 2000.
- [17] H. Lee, S. Hahn, G. Park and K. Lee, "Torque computation of hysteresis motor using finite element analysis with asymmetric two dimensional magnetic permeability tensor," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3032-3035, 1998.
- [18] M. Jagiea, J. Bumby and E. Spooner, "Time-domain and frequency-domain finite element models of a solid-rotor induction/hysteresis motor," *Electric Power Applications, IET*, vol. 4, no. 3, pp. 185-197, 2010.

- Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 252-257, 2010.
- [23] M. Modarres and K. Byung-il, "Rotor design to improve dynamic performance of axial flux hysteresis motors," *IET Electric Power Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 44-49, 2015.
- [24] R. Nasiri-Zarandi, M. Mirsalim, and A. Tenconi, "A novel hybrid hysteresis motor with combined radial and axial Flux rotors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 3, pp. 1684-1693, 2016.
- [25] J. Pyrhonen, T. Jokinen and V. Hrabovcova, *Design of Rotating Electrical Machines*, 2nd ed., Wiley, 2014.
- [26] J. F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, 3rd ed., CRC Press, 2010.
- [27] M. A. Rahman, "Analytical models for polyphase hysteresis motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, no. 1, pp. 237-242, 1973.
- [19] M. Repetto and P. Uzunov, "Analysis of hysteresis motor starting torque using finite element method and scalar static hysteresis model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 5, pp. 2405-2408, 2013.
- [20] R. Nasiri-Zarandi and M. Mirsalim, "Analysis and torque calculation of an axial flux hysteresis motor based on hyperbolic model of hysteresis loop in cartesian coordinates," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 7, pp. 1-9, 2015.
- [21] R. Nasiri-Zarandi and M. Mirsalim, "Finite element analysis of an axial flux hysteresis motor based on complex permeability concept considering the saturation of the hysteresis loop," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 2, pp. 1390-1397, 2016.
- [22] M. Modarres, A. Vahedi, and M. Ghazanchaei, "Study on axial flux hysteresis motors considering airgap variation,"