

بررسی پدیده فرورزناس در حضور محدودکننده جریان خطای مغناطیسی با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس

بهرز رضایی علم^{۱*}، بهزاد نوروزی^۲
^۱دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

¹Rezaee.bh@lu.ac.ir, ²Behzad_noroozi@yahoo.com

چکیده - فرورزناس یک پدیده غیرخطی است که بین خازن شبکه و اندوکتانس غیرخطی ترانسفورماتور رخ می‌دهد. عنصر غیرخطی می‌تواند اندوکتانس غیرخطی راکتور یا ترانسفورماتور باشد. مشخصه‌های هسته مغناطیسی در وقوع پدیده فرورزناس نقش مهمی را ایفا می‌کند. در این مقاله علاوه بر منحنی اشباع، اثر تلفات حلقه هیستریزیس در نظر گرفته شده است. از روش جایز-آرتون (Jiles-Atherton) برای مدل‌سازی حلقه هیستریزیس استفاده شده است. در این مقاله پدیده فرورزناس در حضور یک محدودکننده جریان خطای مغناطیسی (FCL) بررسی شده است. با استفاده از مدل اجزا محدود به کمک نرم‌افزار COMSOL Multiphysics محدودکننده جریان خطای مغناطیسی را در فضای دوبعدی شبیه‌سازی نموده و نتایج حاصله برای دو حالت کاری عادی و با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس مقایسه شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که جهت تحلیل پدیده فرورزناس، هسته مغناطیسی در حد امکان باید دقیق مدل‌سازی شود و هیستریزیس هسته باید در مدل‌سازی لحاظ شده باشد.

کلیدواژه - تلفات هیستریزیس - فرورزناس - محدودکننده جریان خطا - COMSOL Multiphysics-FCL

در بخش ۲ نحوه عملکرد محدودکننده جریان خطای مغناطیسی پس‌یو که شامل هسته آهنی (ورق مغناطیسی) و آهنربا است، توضیح داده شده است. در بخش ۳ توضیح مختصری از طریقه در نظر گرفتن اثر هیستریزیس با استفاده از روش جایز-آرتون و نحوه محاسبه تلفات هیستریزیس ارائه شده است. در بخش ۴ به معرفی نرم‌افزار COMSOL Multiphysics پرداخته شده و نتایج شبیه‌سازی‌های کامپیوتری آورده شده است.

۲- نحوه عملکرد محدودکننده جریان خطا

محدودکننده جریان خطا مطابق شکل (۱) به صورت سری در مدار قرار می‌گیرد و نحوه عملکرد آن در شکل (۲) نمایش داده شده است. مقادیر نامی افت ولتاژ روی محدودکننده ناچیز است. اما در صورت رخ دادن فرورزناس، امپدانس محدودکننده به صورت آبی زیاد شده و جریان را محدود می‌کند. محدودکننده با ساختار موازی در شکل (۳) نشان داده شده است. آهنربای نصب شده در ساق وسط برای ایجاد میدان مغناطیسی قوی در هسته آهنی است. به طوری که در حالت عادی هسته محدودکننده در اشباع مغناطیسی قرار دارد. همچنین دو ساق جانبی به صورت تناوبی در دو نیم سیکل مثبت و منفی، برای محدود کردن جریان ناشی از فرورزناس به کار گرفته می‌شوند. در شرایط کار عادی، میدان مغناطیسی تولیدی توسط سیم‌پیچ‌های روی ساق‌های جانبی به اندازه کافی قوی نیست و هسته آهنی در اشباع باقی می‌ماند. در نتیجه محدودکننده همانند یک سیم‌پیچ با هسته توخالی (هوا) خواهد بود که امپدانس متناظر آن خیلی کوچک است. اما در لحظه وقوع فرورزناس ساق‌های جانبی محدودکننده به صورت تناوبی در نیم سیکل‌های مثبت و منفی از اشباع خارج شده و امپدانس بزرگی را در مسیر جریان قرار می‌

۱- مقدمه

فرورزناس یک پدیده غیرخطی است که بین خازن شبکه و اندوکتانس غیرخطی تجهیزات نظیر راکتور ترانسفورماتورها رخ می‌دهد. در شرایط بی‌باری یا کم‌باری، با بروز اغتشاشات سیم‌پیچ ترانسفورماتور از طریق خازن خطوط و سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور مدار رزونانس تشکیل می‌دهد و با اشباع شدن هسته ترانسفورماتور، فرورزناس تحقق می‌یابد [۱]. در نقاطی که فرورزناس رخ می‌دهد، جریان عبوری دارای پیک‌های تند می‌گردد که نشان‌دهنده اشباع زیاد هسته است. در حالت فرورزناس رابطه ولتاژ و جریان علاوه بر فرکانس به عوامل دیگری نظیر ولتاژ، شرایط اولیه و تلفات مدار وابسته است [۲]. یکی از این عوامل مهم وجود اثرات تلفات هیستریزیس است که نقش مهمی را در رفتار فرورزناسی ایجاد می‌کند [۳]. از یک محدودکننده جریان خطای پس‌یو که به صورت سری در مدار قرار می‌گیرد، برای بررسی این پدیده استفاده شده است. تجهیزات محدودکننده جریان خطا جهت حفاظت در مقابل اضافه‌جریان و همچنین جریان اتصال کوتاه به کار برده می‌شوند [۴].

امروزه محاسبه تلفات هیستریزیس به روش اجزا محدود بیش از پیش توسط علوم کامپیوتری مورد توجه قرار گرفته است [۵]. روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی تلفات هیستریزیس ارائه شده است که در این بین مدل جایز-آرتون [۶] (Jiles-Atherton) و مدل پریزاک [۷] (Preisach) مدل‌های دقیقی از تلفات هیستریزیس را فراهم می‌کند. در این مقاله از روش جایز-آرتون برای مدل‌سازی تلفات هیستریزیس استفاده شده است. مزیت استفاده از این روش پیاده‌سازی آسان نسبت به روش‌های قبلی، همچنین دقت بالا در برآورد حلقه هیستریزیس می‌باشد.

که در آن M مغناطیس شوئنگی ماده و M_{rev} مغناطیس شوئنگی برگشت پذیر و M_{irr} مغناطیس شوئنگی برگشت ناپذیر ماده است. معادلات مربوطه با استفاده از [۶] به صورت زیر است:

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{rev}) \quad (2)$$

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

$$\frac{dM_{irr}}{dH_e} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{k\delta} \quad (4)$$

که M_s و k, c, a (اشباع مغناطیسی) پارامترهایی از حلقه هیستریزس هستند که به صورت تجربی تعیین خواهند شد. δ یک پارامتر جهت دار است که مقدار آن +۱ است اگر $\frac{dH}{dt} > 0$ و -۱ است اگر $\frac{dH}{dt} < 0$ باشد. H_e میدان مؤثر است که از حاصل جمع میدان خارجی اعمال شده و میدان مولکولی به دست می آید:

$$H_e = H + \alpha M \quad (5)$$

که در آن ضریب α به صورت تجربی به دست می آید. معادلات (۱) و (۲) را می توان به صورت زیر در آورد:

$$M = M_{irr} + c(M_{an} - M_{irr}) \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dH} = \frac{dM_{irr}}{dH} + c \left(\frac{dM_{an}}{dH} - \frac{dM_{irr}}{dH} \right) \quad (7)$$

با توجه به [۶] روابط نهایی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c) \frac{dM_{irr}}{dH_e} + c \frac{dM_{an}}{dH_e}}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e} - \alpha(1-c) \frac{dM_{irr}}{dH_e}} \quad (8)$$

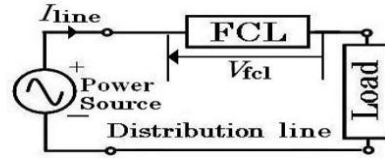
$$M_{an} = \begin{cases} M_s H / \tau a & |H_e| < 0.1 \\ M_s \left(\coth \frac{|H_e|}{a} - \frac{a}{|H_e|} \right) \frac{H_e}{|H_e|} & |H_e| > 0.1 \end{cases} \quad (9)$$

با اعمال روابط بالا به روش اجزا محدود می توان منحنی هیستریزس را برای نقاط مختلف از هسته ترانسفورماتور به دست آورد. این منحنی را می توان برای یک نقطه در شکل (۶) مشاهده نمود.

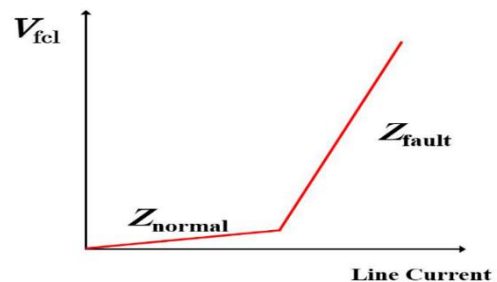
تلفات هیستریزس را می توان به کمک معادله (۱۰) محاسبه نمود. با توجه به اینکه عملیات در فضای دوبعدی صورت گرفته است حاصل انتگرال گیری از ضابطه $H \frac{dB}{dt}$ در یک بازه زمانی مشخص را در فرکانس منبع و ضخامت هسته ضرب نموده تا مقدار تلفات محاسبه گردد.

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

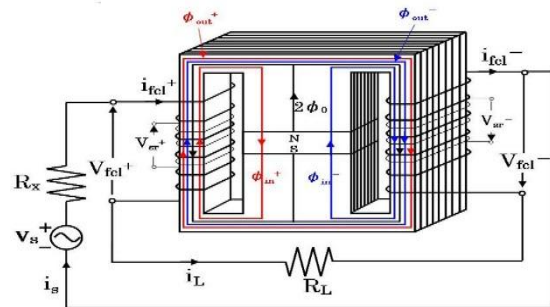
دهد که مانع از اوج گرفتن جریان خطا می گردد. البته اگر جریان خطا همچنان افزایش یابد و به سطح خیلی بالایی برسد این احتمال وجود دارد که هسته آهنی به اشباع معکوس برود و محدودکننده جریان قابلیت محدودکنندگی خود را از دست بدهد.



شکل ۱: محدودکننده جریان خطا در مسیر جریان مصرف کننده



شکل ۲: مشخصه امپدانس محدودکننده جریان خطا

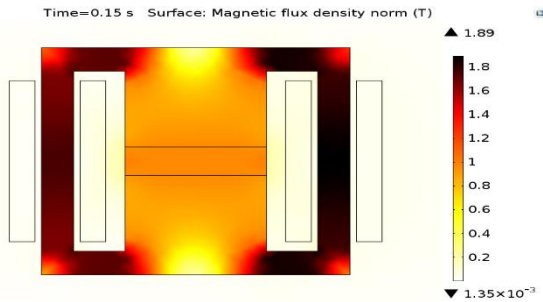


شکل ۳: ساختار محدودکننده جریان خطا

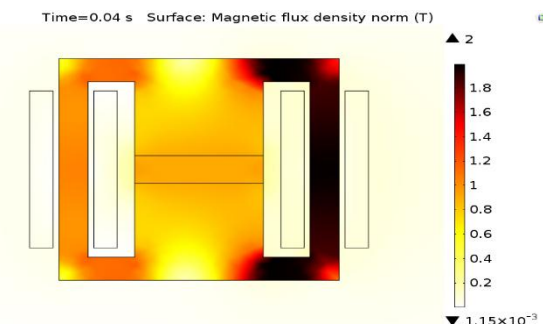
۳- روش محاسبه تلفات هیستریزس

با پیشرفت فناوری امکان این که مدل مغناطیسی مواد کامل تر در نظر گرفته شود ایجاد شده است. شاخص ترین رفتاری که مواد مغناطیسی از خود نشان می دهند رفتار هیستریزس است که در ساده ترین حالت موجب می شود مسیر بدون مغناطیسی شدن ماده از مسیر مغناطیسی شدن آن تفاوت پیدا کند. در این مقاله برای مدل کردن پدیده هیستریزس از مدل جایلز-آرتون استفاده شده است. این مدل مبنی بر تغییرات برگشت پذیر و برگشت ناپذیر دیواره حوزه مغناطیسی بنا شده است.

$$M = M_{rev} + M_{irr} \quad (1)$$



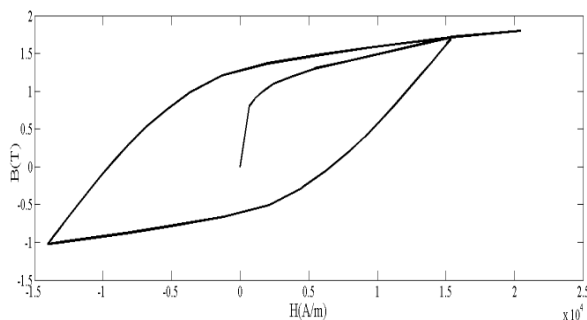
شکل ۵الف: توزیع چگالی شار قبل از وقوع فرورزناس بدون در نظر گرفتن هیستریزیس (دوبعدی)



شکل ۵ب: توزیع چگالی شار بعد از وقوع فرورزناس بدون در نظر گرفتن هیستریزیس (ساق سمت راست در اشباع)

وجود خازن سری در مدار موجب افزایش ظرفیت خط انتقال و تنظیم پخش توان اکتیو و راکتیو می‌شود، اما در صورتی که ظرفیت خازنی سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور، خط انتقال و یا بار متصل به محدودکننده اثر سلف درون سیم‌پیچی‌های ترانسفورماتور را خنثی کند، فرورزناس اتفاق افتاده و باعث ایجاد جریان‌های بزرگ می‌شود. در صورتی که این جریان‌های بزرگ به سطوح بالاتر افزایش یابند، هسته آهنی محدودکننده جریان خطا در حالت اشباع معکوس قرار می‌گیرد و خاصیت خود را از دست می‌دهد. این امر موجب ایجاد خسارات شدید به شبکه و تجهیزات می‌شود.

با در نظر گرفتن منحنی هیستریزیس برای محدودکننده جریان خطای مغناطیسی می‌توان مسیر مغناطیسی هر نقطه از هسته را به دست آورد. شکل (۶) مسیر حرکت شار مغناطیسی را بر روی یک نقطه از هسته محدودکننده جریان خطا را نشان می‌دهد. مقدار تلفات هیستریزیس محاسبه شده با پارامترهای روش جایلز-اترتون برابر ۲۶،۶۵ وات محاسبه شده است.



شکل ۶: منحنی مغناطیسی

پارامترهای در نظر گرفته شده برای هسته آهنی با کربن ۰،۲۵٪ به صورت زیر است:

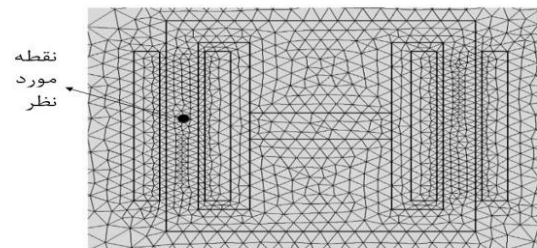
- $M_s = 1.6 \times 10^6$
- $\alpha = 1.6 \times 10^{-3}$
- $a = 1100$
- $k = 400$
- $c = 0.2$

۴- مدل سازی به روش اجزا محدود

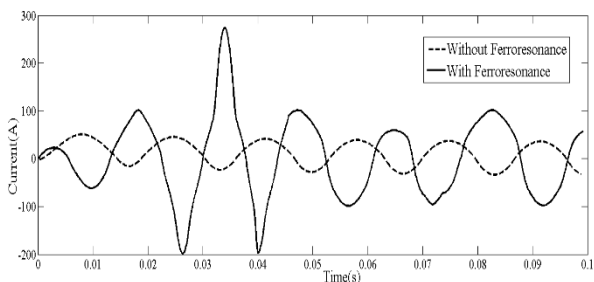
از روش اجزا محدود در فضای دوبعدی به کمک نرم افزار COMSOL Multiphysics جهت شبیه سازی کامپیوتری استفاده شده است [۹]. این نرم افزار معادلات دیفرانسیل سیستم های غیر خطی را توسط مشتقات جزئی با حضور میدان های الکترومغناطیسی و ... را حل می نماید. همچنین در آن امکان تعریف مدارات الکتریکی نظیر منبع، بار، مقاومت، سلف، خازن و ... به همراه میدان مغناطیسی وجود دارد.

۴-۱- نتایج مدل سازی و شبیه سازی

محدودکننده جریان خطای استفاده شده با ولتاژ پایین ۱۰۰ ولت و فرکانس ۶۰ هرتز در مدار مطابق شکل (۱) در مدار قرار گرفته است. ساختار، ابعاد و مشخصات محدودکننده را می توان در [۴] یافت. دستگاه مورد نظر برای محدود کردن جریان در حدود ۸۰ آمپر طراحی شده است. شکل (۴) مدل دوبعدی محدودکننده جریان خطای مغناطیسی را نشان می دهد. شکل (۵الف) توزیع چگالی شار را در هسته محدودکننده جریان خطا را قبل وقوع پدیده فرورزناس بدون در نظر گرفتن هیستریزیس نشان می دهد. در شرایط کار عادی ستون های کناری در حالت اشباع قرار دارند و مقدار اندوکتانس محدودکننده بسیار کم است و تأثیر چندانی بر روی جریان ندارد. هنگام وقوع فرورزناس، با افزایش جریان مدار، جریان سیم پیچی های AC که بر روی ساق های کناری پیچیده شده اند، افزایش یافته و شار ناشی از آن ها باعث می شود تا یکی از ساق های کناری از حالت اشباع خارج شود و ساق دیگر در اشباع عمیق تری قرار گیرد. توزیع چگالی شار برای حالتی که یکی از ساق ها از حالت اشباع خارج می شود، در شکل (۵ب) نمایش داده شده است. منحنی جریان خطا در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل ۴: مدل دوبعدی محدودکننده جریان خطا



شکل ۱۰: منحنی جریان با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس

هدف اصلی از FCL محدود کردن جریان خطای اتصال کوتاه است. اما هنگام وقوع فرورزنانس عملکرد محدودکننده جریان خطا مشابه حالت اتصال کوتاه است. با این تفاوت که در محدودکننده جریان خطا به دلیل وجود آهنربا مقدار بایاس DC در منحنی اشباع و تلفات هسته تأثیرگذار است. با در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس، هسته مغناطیسی در اشباع بیشتری قرار گرفته است. جریان مغناطیسی محدودکننده در این حالت افزایش بیشتری در حین وقوع فرورزنانس دارد.

۵- نتیجه گیری

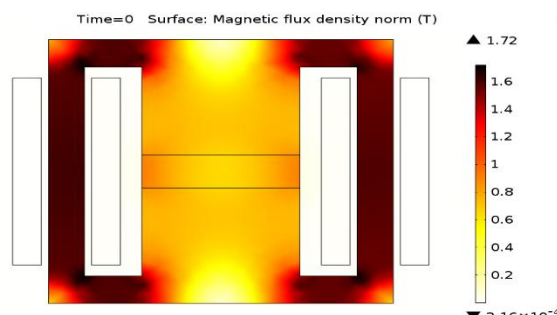
وجود تلفات هیستریزیس نقش اساسی در وقوع پدیده فرورزنانس ایجاد می‌کند. بنابراین پیش‌بینی دقیق رفتار فرورزنانسی مستلزم به‌کارگیری مدل جامع و دقیق برای مواد فرومغناطیسی به‌کاررفته در آن‌ها است. با مدل‌سازی محدودکننده جریان خطای مغناطیسی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics و با استفاده از مدل اجزا محدود نحوه توزیع چگالی شار و ایجاد اندوکتانس مناسب در دو حالت کاری عادی و وقوع پدیده فرورزنانس نشان داده شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد وجود مقدار بایاس DC در محدودکننده جریان خطای مغناطیسی بر اشباع مغناطیسی و تلفات هسته تأثیرگذار است. همچنین حین وقوع پدیده فرورزنانس در حالتی که اثر تلفات هیستریزیس در محدودکننده جریان خطای مغناطیسی لحاظ شود، پیک جریان محدودکننده نسبت به حالتی که اثر تلفات هیستریزیس در نظر گرفته نشود، بیشتر است. لذا مدل استفاده‌شده رفتار دقیق‌تری از مواد فرومغناطیسی را نشان می‌دهد.

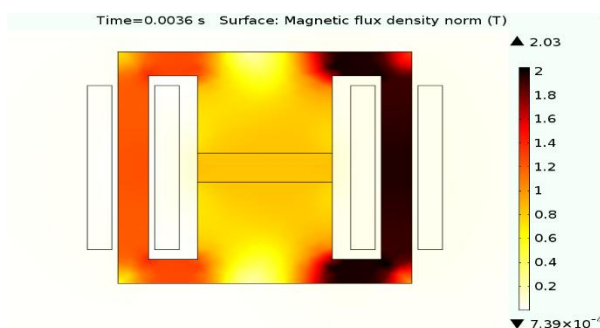
مراجع

- [1] Miroslav Poljak, Tomislav Kelemen, Boris Bojanic, "New experience with ferroresonance", Technical Bulletin of Koncar.
- [2] Tong, Y.K., "NGC experience on ferroresonance in power transformers and voltage transformers on HV transmission systems" IEE Colloquium on, 12 Nov 1997, Page: 4/1-4/3.A.
- [3] R. Javora, M. Iwahara and S. Yamada, "Effect of dynamic core losses on ferroresonance phenomena", Journal of Materials Processing Technology 161 (2005) 156-161.
- [4] B. Rezaeealam, R. Gholamnejad and S. A. R. Muosavi, "Magnetic Fault Current Limiter Operation Analysis Using 3-Dimensional Finite Element Method", The 8th Power Systems Protection and Control Conference, Iran, January 15-16, 2014.
- [5] 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. 48, no. 2, pp. 1023-1026, Feb. 2012.

شکل (۷) و (۸) توزیع چگالی شار با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس برای دو حالت کاری فرورزنانس و بدون فرورزنانس را نشان می‌دهد. منحنی جریان خط در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

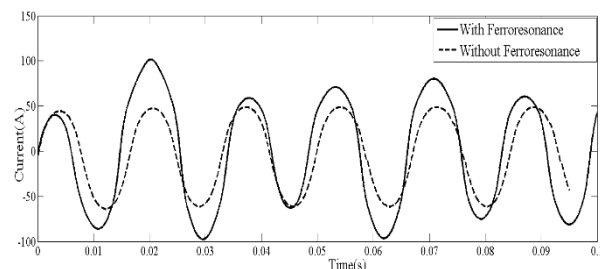


شکل ۷: توزیع چگالی شار قبل از وقوع فرورزنانس با نظر گرفتن هیستریزیس



شکل ۸: توزیع چگالی شار بعد از وقوع فرورزنانس با در نظر گرفتن هیستریزیس

شکل (۹) منحنی جریان خط را برای دو حالت کاری عادی و وقوع فرورزنانس نشان می‌دهد. مشخص است که در هنگام وقوع فرورزنانس جریان به مقدار زیادی افزایش یافته است و این ناشی از خنثی شدن اثر سلف سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور توسط ظرفیت خازنی موجود است.



شکل ۹: منحنی جریان بدون در نظر گرفتن اثر تلفات هیستریزیس

شکل (۱۰) منحنی جریان خط را برای دو حالت کاری عادی و فرورزنانس را با در نظر گرفتن اثر هیستریزیس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در سیکل سوم جریان، مقدار پیک جریان افزایش قابل‌ملاحظه‌ای را دارد. با مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۰) اثر تلفات را در به کار بردن مدل دقیق‌تر هسته می‌توان دید. محاسبات نشان می‌دهد که در ظرفیت خازنی به مقدار ۰.۸ میلی‌فاراد مقدار جریان در بالاترین حد خود قرار دارد.

- [8] 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. 48, no. 2, pp. 1023–1026, Feb. 2012.
- [9] COMSOL, MULTIPHYSICS © (FEMLAB), [online]. <http://www.comsol.com>.
- [6] F. Preisach, "Über die magnetischenachwirkung," *Zeitschrift Phys.*, vol. B 94, pp. 227–302, 1935.
- [7] D. C. Jiles and D. L. Atherton, "Theory of ferromagnetic hysteresis," *JMMM*, vol. 61, pp. 48–60, 1986.