

استفاده از مواد نانوبلور در بهینه سازی خطاهای ترانسفورماتور جریان

نتایج حاصل از شبیه سازی های محاسباتی

میثم حمزه لوثی

امور تله متری دیسپاچینگ

برق منطقه ای غرب

کرمانشاه ، ایران

ابزارهای اندازه گیری جریان متصل می شود. مدار ثانویه از طریق امپدانس کوچکی که به آن متصل شده است ، بسته می گردد. در حالت عادی جریان مدار ثانویه به 5A هم می رسد. ولتاژ دو سر ترمینال های ثانویه به واسطه بارها و ابزار آلات اندازه گیری افت می کند و معمولاً تنها چند ولت است. در یک CT ایده آل، جریان ثانویه به طور معکوس متناسب با نسبت تبدیل بوده و در فاز مخالف جریان موثر اولیه است. با این وجود، نسبت معکوس و رابطه فازی به شکل دقیق ممکن نیست به این دلیل که قسمتی از جریان اولیه بایستی برای تحریک ماده مغناطیسی هسته مصرف شود. بنابراین، جریان تحریک بایستی از نظر فازی از جریان اولیه کم شود تا مقدار باقیمانده برای تغذیه مدار ثانویه معلوم گردد. این مقدار اندکی متفاوت از مقداری است که از نسبت تبدیل بدست می آید و به همین خاطر اندکی شیفت در نسبت فازی وجود دارد. این موارد منجر به خطاهای نسبت تبدیل و زاویه فاز در مقایسه با یک CT ایده آل می گردند.

از آنجا که جریان تحریک سبب تغییر نسبت و زاویه فاز جریان های اولیه و ثانویه می گردد، در صورت استفاده از مواد با تلفات مغناطیسی کم و نفوذ پذیری مغناطیسی بالا در ساخت هسته همانند فولاد سیلیکون و آلیاژهای بی شکل، تا حد امکان جریان فوق کوچک خواهد شد. در بسیاری از کاربردهای صنعتی، طراحان نیازمند انتخاب ماده مغناطیسی هسته و شکل آن هستند. هر کاربرد خاص نیازمند توسعه یک شکل خاص هسته است. بنابراین، تمامی آن ها دارای مزایا و معایبی می باشند. به عنوان مثال، هسته های توروییدی، فشرده تر از هسته های E شکل بوده و هزینه تولید مواد آن

چکیده — در این مقاله بر اساس خواص الکتریکی و مغناطیسی ترانسفورماتور جریان¹ همانند اشباع مغناطیسی ، نفوذ پذیری مغناطیسی اولیه و الزام گری هسته ، ملاحظات راجع به امکان پذیری استفاده از آلیاژهای نانوبلور در هسته های ترنوییدی برای ترانسفورماتورهای جریان بیان گردیده است. همچنین در مورد اینکه چگونه ویژگی های مغناطیسی مواد هسته بر روی عملکرد ترانسفورماتور جریان تاثیر می گذارند ، بحث و بررسی شده است. از ویژگی های مغناطیسی و شبیه سازی های عددی با استفاده از روش های المان محدود²، معلوم گردیده است که در یک نمونه CT با چگالی شار مشخص، آلیاژهای نانو بلور موجب تقویت این فرضیه می گردند که استفاده از مواد فوق در CT های با هسته اندازه گیری می تواند خطاهای نسبت تبدیل و زاویه فازی را کاهش داده و از طرفی کلاس دقت آن را نیز بهبود ببخشد.

واژه های کلیدی — آلیاژهای نانوبلور ، هسته های توروییدی ، ترانسفورماتور جریان

۱. مقدمه

ترانسفورماتور جریان ترانسفورماتوری است که به منظور اندازه گیری ، کنترل و حفاظت از جریان الکتریکی طراحی شده است. مدار اولیه آن شامل چندین حلقه بوده، بصورت سری به خط وصل شده و مدار ثانویه آن نیز به

¹ Current Transformer (CT)

² Finite Element Method (FEM)

ها به دلیل تک جزئی بودن و کوپلینگ مغناطیسی محکم تر، پایین تر است [1].

در این مقاله مطالعه ای در خصوص امکان استفاده از آلیاژهای نانو بلور در هسته های توروئیدی برای ترانسفورماتورهای جریان صورت گرفته است.

شکل ۱: هندسه یک هسته توروئیدی

$$A_{mag} = k_g \cdot A_{geo} \quad (1)$$

که در آن A_{geo} مساحت سطح مقطع هندسی است. طول متوسط مدار مغناطیسی بصورت زیر است:

$$l_{mag} = \pi \left(\frac{OD + ID}{2} \right) \quad (2)$$

تعداد دورهای سیم پیچ N است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$N = \frac{V}{k_f \cdot f \cdot B_{m} \cdot A_{mag}} \quad (3)$$

که در آن V ولتاژ rms نامی، f فرکانس و k_f ضریب شکل موج سینوسی و 4 برای شکل موج مربعی است.

مساحت سطح مقطع های سیم پیچ های اولیه A_p و ثانویه A_s با در نظر گرفتن چگالی جریان rms بار کامل در سیم پیچ و کار اسمی ترانسفورماتور، با استفاده از روابط زیر تعیین می گردند:

$$A_p = \frac{S}{J \cdot V_s} \quad (4)$$

$$A_s = \frac{S}{J \cdot V_p} \quad (5)$$

به دلیل تعادل نیروی محرکه الکتریکی ($N_p I_p = N_s I_s$)، هر یک از سیم پیچ های اولیه و ثانویه تقریباً نیمی از ناحیه موجود را اشغال می کنند بگونه ای که جریان پیوندی اولیه برابر $N_p I_p = (1/\sqrt{2}) k_w \cdot A_w \cdot J$ بوده و مقدار rms جریان بصورت زیر داده می شود:

$$I_{rms} = \frac{k_w \cdot A_w \cdot J}{\sqrt{2} N} \quad (6)$$

که در آن A_w مساحت پنجره هسته و k_w ضریب سیم پیچی است. بر اساس قانون فاراده، برای موج سینوسی مقدار rms ولتاژ عبارت است از:

$$V_{rms} = \sqrt{2} f \cdot N \cdot A_{mag} \cdot B_{m} \quad (7)$$

بنابراین چون $V_{rms} = S / I_{rms}$ ولت - آمپر ترانسفورماتور عبارت خواهد بود از:

$$S = \sqrt{2} f \cdot B_{m} \cdot J \cdot k_w \cdot A_w \cdot A_{mag} \quad (8)$$

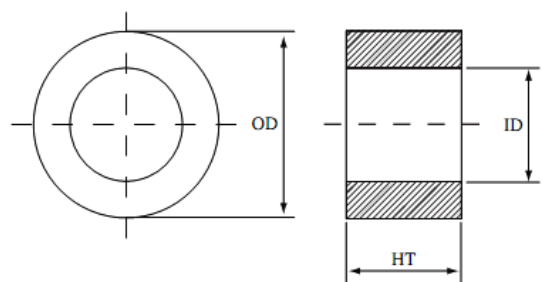
۲. ملاحظات طراحی

یک بخش مهم از طراحی ترانسفورماتور تعیین مساحت سطح مقطع مغناطیسی (A_{mag}) و هادی ها است. این مساحت ها از برآورد مقادیر مناسب برای چگالی شار پیک B_m ، چگالی ریشه متوسط مربع^۳ جریان بار کامل J در سیم پیچ ها که وابسته به روش استفاده از ترانسفورماتور بصورت مداوم یا متناوب می باشد، ضریب فضای سیم پیچی k_w و ضریب انباشتگی k_g بدست می آیند.

سیم پیچ های اولیه و ثانویه بایستی در فضای پنجره A_w جا داده شوند. ضریب فضای سیم پیچی k_w به صورت نسبت بین کل سطح مقطع هادی و مساحت پنجره تعریف می گردد. عایق و فاصله فضایی موجب کاهش ناحیه در دسترس برای سطح مقطع هادی واقعی تا مقدار $k_w \cdot A_w$ می گردند. چگالی جریان rms بار کامل در سیم پیچ ها J توسط اتلاف حرارتی W محدود می گردد. ضریب انباشتگی k_g به عنوان ضریب بین مساحت سطح مقطع مغناطیسی و مساحت سطح مقطع کل هسته تعریف می گردد.

همچنانکه مواد نانولور به شکل نوارهایی تولید می شوند، هسته های توروئیدی امروزه با سطح مقطع مربع یا مستطیل وجود دارند که در شکل ۱ نشان داده شده است.

اندازه گذاری مدار مغناطیسی با تعیین سطح مقطع مغناطیسی به صورت زیر حاصل می گردد:



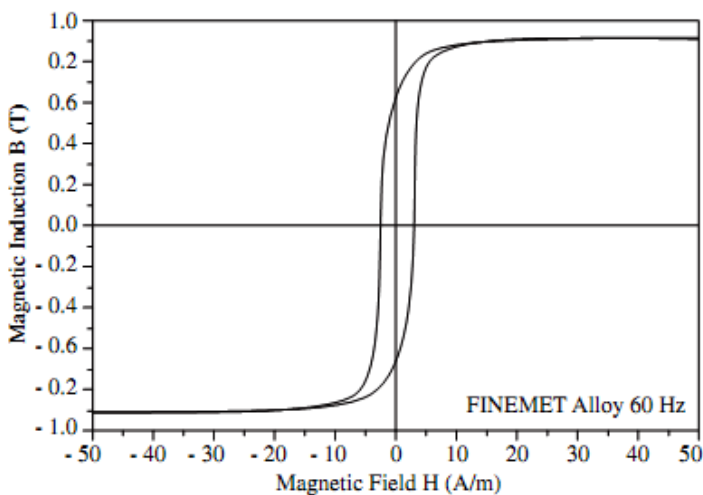
OD: قطر بیرونی ID: قطر داخلی HT: ارتفاع

³ Root Mean Square (rms)

هم خطاهای نسبت تبدیل و هم خطاهای فازی را کاهش داده و از طرفی موجب بهبود کلاس دقت آن گردد.

۵. محاسبه عددی با استفاده از FEMM

در حالیکه روش تحلیلی برای حل بیشتر مشکلات مرتبط با طراحی ترانسفورماتور مفید است، روش های عددی فهم بهتری از رفتار الکترومغناطیسی ترانسفورماتورها ارائه می دهند. در عمل، روش های عددی همانند روش المان محدود اجازه تعیین دقت چگالی های شار را در کل حوزه داده و از طرفی مطالعه پدیده های محلی را نیز امکان پذیر می سازند. در این مقاله، نرم افزار کامپیوتری مبتنی بر روش المان محدود به منظور بدست آوردن چگالی شار در داخل ماده مغناطیسی در هسته تروئیدی CT که قبلاً طراحی شده مورد استفاده قرار گرفته است. این شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار FEMM 3.3 که در فرکانس های پایین مورد استفاده قرار می گیرد، انجام شده است [7].



شکل ۲: منحنی هیستریزیس در فرکانس 60Hz

در معادله (۸) نشان داده شده است که ولت - آمپر اسمی ترانسفورماتور متناسب با حاصلضرب مساحت پنجره در دسترس هسته در مساحت سطح مقطع مغناطیسی است.

با استفاده از قانون آمپر و در نظر گرفتن کل نیروی محرکه الکتریکی برای یک چگالی شار پیک مثل $H_{m} \cdot l_{mag}$ که در آن l_{mag} متوسط طول مسیر شار حول مدار مغناطیسی است، جریان مغناطیس کنندگی I_m در N_1 دور از سیم پیچ اولیه و با صرف نظر کردن از هارمونیک ها بصورت زیر است:

$$I_m = \frac{H_m \cdot l_{mag}}{\sqrt{2} N_1} \quad (9)$$

۳. توسعه آلیاژهای نانوبلور

اولین آلیاژ نانوکامپوزیتی نرم مغناطیسی بر مبنای آلیاژ Fe-Cu-M(-Si)- B (M: Nb, Mo, Ta, W, Zr, ...) توسط Yoshizawa و دیگران بدست آمد [4]. اولین مرحله تولید نوارهای فلزی بی شکل با $20 \mu m$ ضخامت بود. پس از آن نوارهای بی شکل بر روی هسته های تروئیدی پیچانده شد و سپس مواد هسته برای تولید ماده مغناطیسی نرم نانو بلور با اندازه متوسط دانه در حدود $10 nm$ آنیل گردید [5].

پس از گزارش Yoshizawa و همکارانش، مواد نانو بلوری به منظور استفاده در تجهیزات مغناطیسی که هم نیازمند مواد نرم و هم نیازمند مواد سخت مغناطیسی بودند مورد پژوهش قرار گرفتند. به شکل خاص، آلیاژهای نانو بلور و بی شکل به عنوان ماده هسته در تعدادی از تجهیزات الکترومغناطیسی مثل ترانسفورماتورهای توزیع، ترانسفورماتورهای جریان ضربه، ترانسفورماتورهای سوئیچ شونده تامین کننده انرژی و ترانسفورماتورهای جریان مورد استفاده قرار گرفته اند [6].

۴. خواص مغناطیسی

در شکل های ۲، ۳ و ۴ بترتیب منحنی هیستریزیس در فرکانس 60Hz، منحنی نفوذ پذیری مغناطیسی در فرکانس 60Hz و منحنی مغناطیس شونده اولیه در فرکانس 5Hz که از آلیاژ نانو بلور **FINEMET® FT-M** ساخت شرکت هیتاچی ژاپن بدست آمده نشان داده شده است.

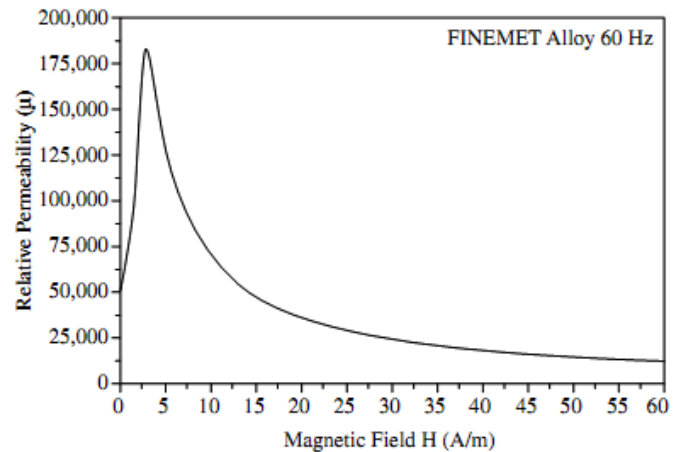
از خواص مغناطیسی معلوم می گردد که در بهره برداری معمول CT با مقدار چگالی شار $0.2T$ ، ویژگی های نانو بلور موجب تقویت این فرضیه می گردند که استفاده از این مواد در هسته CT های اندازه گیری می تواند

Hitachi ساخت شرکت ژاپنی **FINEMENT[®] FT - ۳MF۰۰۲G** Metals Ltd، آلیاژ بی شکل **METGLAS[®] ۲۶۰۵S - ۲** ساخت شرکت آمریکائی **Honywell International**، آلیاژ نانو بلور **NANCFERM[®] M - ۰۳۳ - ۰۳N۱** ساخت شرکت آلمانی **Magnetec GmbH** و در آخر سیلیکون-آهن E-004 با دانه بندی جهت دار ساخت شرکت برزیلی **Acesita** می باشند.

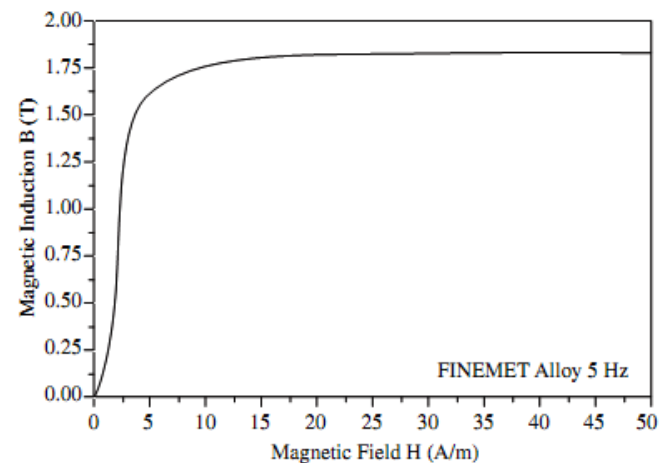
در جدول ۱ چندین ویژگی مغناطیسی مواد مغناطیسی مطالعه شده در شبیه سازی ها آمده است. فولاد سیلیکون به عنوان مثالی از یک ماده مغناطیسی است که به شکل مرسوم در هسته های CT تجاری مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین، شبیه سازی ها می توانند عملکرد بین مواد مرسوم فرولوری و مواد مغناطیسی جدید که در هسته های CT استفاده می شوند را مورد مقایسه قرار دهند. در این جدول، عبارت از چگالی شار اشباع، **H_{max}** مقدار نفوذ پذیری نسبی و **p** مقاومت ویژه ماده است.

یک CT بگونه ای استفاده می شود که اندازه جریان ثانویه دارای تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی اندازه جریان اولیه نداشته باشد. بنابراین، از آنجا که سیم پیچ اولیه انرژی ضروری را برای مغناطیس شوندگی هسته فراهم می کند، تنها یک سیم پیچ در شبیه سازی طراحی شده است. هشت دور آن به شکل یکنواختی در راستای هسته توزیع شده و فقط دو تای آن ها که در یک چهارم ظاهر شده اند در طراحی استفاده شده اند. هادی مورد استفاده در سیم پیچ اولیه از مس ساخته شده و بر اساس محاسبات قبلی دارای قطر 5AWG است. به منظور طراحی هسته، از ابعاد واقعی ماده مغناطیسی و از کپسول ماده غیر مغناطیسی استفاده شده است که شامل هسته **FINEMENT[®] FT - ۳MF۰۰۲G** است.

به منظور تحلیل عملکرد CT، ابعاد و بخش های تشکیل دهنده مسئله همواره در هر شبیه سازی به همان شکل و بدون تغییر باقی گذاشته می شوند و تنها مشخصات ماده مغناطیسی که در حوزه بجای هسته مورد استفاده قرار می گیرد تغییر داده می شود. از نتایج بدست آمده از برنامه، یکسری از اطلاعات برای هر یک از مواد مغناطیسی مطالعه شده جمع آوری گردیده شده است که عبارت از شدت میدان مغناطیسی (**H**) در محل هسته در جاییکه القای مغناطیسی به مقدار مطلوب **۰/۲ T** رسیده است؛ نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی (**μ_r**) و جریان تحریک مورد نیاز برای رسیدن به آن میزان عملکرد القائی می باشند. در جدول ۲ مقادیر بدست آمده برای هر ماده مغناطیسی مطالعه شده آمده است.



شکل ۳: منحنی نفوذ پذیری مغناطیسی در فرکانس 60Hz



شکل ۴: منحنی مغناطیس شوندگی اولیه در فرکانس 5Hz

در شبیه سازی ها، یک چهارم از هسته توروئیدی به عنوان حوزه تحت مطالعه انتخاب شده است بگونه ای که این بخش از کل شکل، تقارنی را در راستای محورهای عمودی و افقی نشان می دهد. این روش کمک می کند تا زمان مورد نیاز پردازش کاهش یابد. برنامه **FEMM 3.3** برای شبیه سازی رفتار CT که مدارهای الکتریکی و مغناطیسی آن قبلاً طراحی شده است بر اساس عملیات تحلیلی، مورد استفاده قرار گرفته است. ۴ شبیه سازی انجام شده است با این هدف که مقایسه ای از عملکرد CT هنگامیکه هسته آن متشکل از ۴ ماده مغناطیسی متفاوت است، صورت پذیرد.

مواد مغناطیسی انتخاب شده که قرار است به عنوان ماده هسته CT با یکدیگر مقایسه شوند عبارت از آلیاژ نانو بلور

نهایت، دیگر آلیاژ نانو بلور **NANOPERM[®] M-0.33-0.3 Ni** اگرچه میزان بسیار پایینی از تلفات مغناطیسی را در فرکانس 60Hz از خود نشان داد اما مقدار نسبتاً بالایی از جریان تحریک را طلب می نمود. این آلیاژ ویژگی های مغناطیسی خوبی را در حالت کلی از خود نشان می دهد اما به طور خاص در چگالی شار **0.7 T** نفوذ پذیری مغناطیسی اش بسیار پایین تر از آلیاژ نانو بلور **FINEMENT[®] FT-3M F6045G** بود.

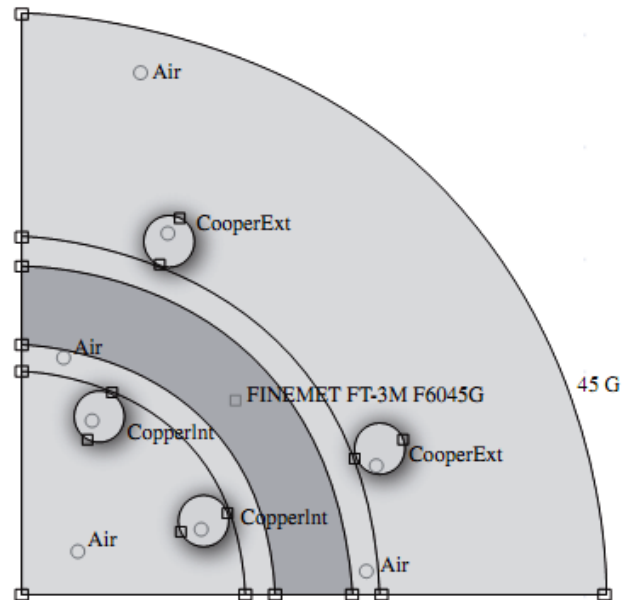
۶. نتیجه گیری

از خصوصیات مغناطیسی و شبیه سازی های محاسباتی، با استفاده از روش المان محدود (FEM)، مشخص گردید که در یک ترانسفورماتور جریان نوعی با مقدار چگالی شار بهره برداری به میزان **0.7 T**، خواص آلیاژهای نانو بلور موجب تقویت این فرضیه می گردند که استفاده از این مواد در هسته های اندازه گیری ترانسفورماتورهای جریان می تواند خطاهای نسبت تبدیل و زاویه فازی را کاهش داده و کلاس دقت آن را بهبود ببخشد.

مراجع

- Luciano BA, Guimarães MKA, Castro WB. Journal of metastable and nanocrystalline materials. In: Kiminami, CK, Botta Filho WJ, guest editors. *Some designs considerations on industrial applications of amorphous and nanocrystalline alloys. Proceedings of the 1st Workshop on Metastable and Nanostructured Materials*; 2001 August 16-17; São Pedro, SP, Brazil. Switzerland: Trans Tech Publications. 2002. p. 133-138.
- Edison Electric Institute. *Electrical Metermen's Handbook*. Seventh Edition. New York: EEI: 1965.
- McLyman, CWT. *Magnetic core selection for transformers and inductors: a user's guide to practice and specification*. New York: Marcel Dekker: 1997.
- Yoshizawa Y, Oguma S, Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Journal of Applied Physics*. 1988; 64(1):6044-6046.
- Yoshizawa Y. Magnetic properties and microstructure of nanocrystalline Fe-based alloys. *Journal Metastable and Nanocrystalline Materials*. 1999; 1(1):51-62.
- Mchenry ME, Laughlin DE. Nano-scale materials development for future magnetic applications. *Acta Materialia*. 2000; 48(1):223-238.
- Meeker D. *Finite Element Method Magnetics - Version 3.3*. [user's manual on the Internet]. 2003. [cited 2003 May 17] Available from: <http://femm.berlios.de>.

در شکل ۶ یکی از نمودارهای ترسیمی ایجاد شده توسط FEMM 3.3 برای شبیه سازی با استفاده از آلیاژ نانو بلوری **FINEMENT[®] FT-3M F6045G** نشان داده شده است. خطوط میدان مغناطیسی در داخل ماده مغناطیسی هسته به دلیل میزان بالای نفوذ پذیری نسبی آن در مقایسه با دیگر

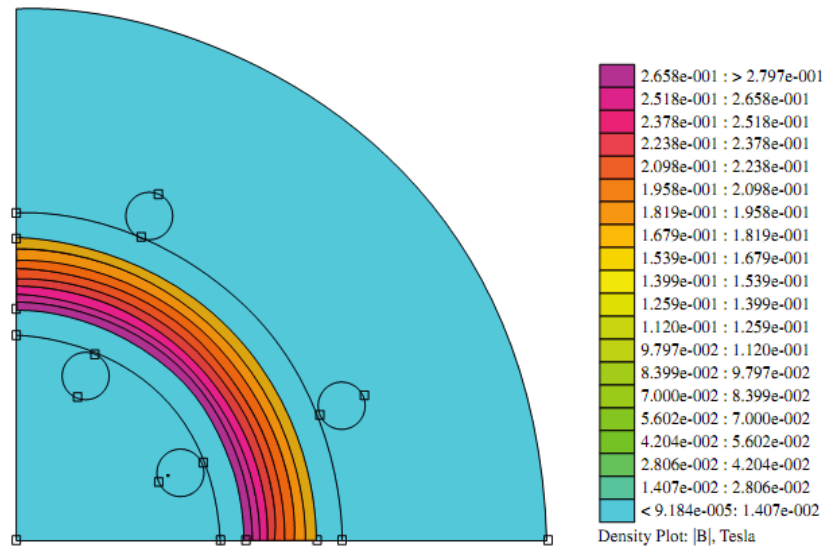


شکل ۷: حوزه تقسیم بندی شده به المان های مش

المان های حوزه، محدود شده اند. شدت شار مغناطیسی را می توان را می توان به کمک مقیاس رنگی در شکل مشاهده نمود که در آن شدت بیشتر با قرمز کم رنگ نشان داده شده و به معنای چگالی شار بزرگتر در ماده است. محاسبات نشان می دهند که میدان و چگالی شار بصورت شعاعی در توروئید پیچیده شده تغییر می کنند. در هر شبیه سازی، تعداد دورهای مسی سیم پیچ اولیه مقدار محاسبه شده جریان تحریک مورد نیاز برای القای چگالی شار متوسط به میزان **0.7 T** داخل هر ماده مغناطیسی را تعیین می کنند. برای رسیدن به این مقدار ویژه از القای مغناطیسی در داخل هسته، آلیاژ نانو بلور **FINEMENT[®] FT-3M F6045G** به عنوان ماده مغناطیسی بود که کمترین مقدار جریان تحریک را درخواست نمود و سپس آلیاژ بی شکل **METGLAS[®] 27-05-2** در جایگاه بعدی قرار داشت بگونه ای که جریان های تحریک آن ها بسیار پایین تر از جریان مورد نیاز توسط ماده سیلیکون-آهن E-004 با دانه بندی جهت دار بود که از خود نفوذ پذیری مغناطیسی بالایی را در بهره برداری معمولی CT نشان نداد. در

استفاده از مواد نانویلور در بهینه سازی خطاهای ترانسفورماتور جریان

سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۴ تهران، ایران



شکل ۶: مقیاس چگالی شار در المان های حوزه

جدول ۱: مواد مغناطیسی شبیه سازی شده به عنوان هسته CT

ماده	ترکیب	$B_H(T)(\% \cdot Hz)$	$H_{rmax}(\% \cdot Hz)$	$\rho(\mu m)$
FINEMENT [®] FT - TM E-10G	$Fe_{77.2}Cu_7Nb_7Si_{17.2}B_1$	0/90	$185000 (\% \cdot Am^{-1})$	1/20
NANOPERM [®] M - 22 - 22 N1	$Fe_{77.2}Si_{12.2}Cu_7Nb_7B_1$	1/18	$34985 (\% \cdot Am^{-1})$	1/15
METGLAS [®] 2605 - 2	$Fe_{77}Si_4B_{17}$	1/56	$193397 (\% \cdot Am^{-1})$	1/37
سیلیکون-آهن E-004 با دانه بندی جهت دار	$Fe - 2\%/Si$	1/85	$40154 (\% \cdot Am^{-1})$	0/47

جدول 2: پارامترهای بدست آمده برای هر ماده مغناطیسی بدست آمده از شبیه سازی

استفاده از مواد نانویولور در بهینه سازی خطاهای ترانسفورماتور جریان

سومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۴ تهران، ایران

I_p (mA)	$\mu_R(f \cdot Hz)$	$Hf(Am^{-1})$	ماده
31/34	109100	1/46	FINEMENT [®] FT - TM F-06G
110/70	29270	5/43	NANOPEERM [®] N - FT - T N1
34/82	97090	1/64	METGLAS [®] T-08 - 1
141/36	22930	6/93	سیلیکون-آهن E-004 با دانه بندی جهت دار