

مدل سازی تلفات جریان گردابی سلف های توان بالا با هسته های مورق در سامانه

موقعیت یاب زمین پایه

محمد رضا علیزاده پهلوانی^{۱*}، ایمان سلطانی^۲، آرش دهستانی کلاگر^۳

۱- دانشیار، ۲- دانشجوی دکتری، ۳- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(دریافت: ۹۶/۰۱/۲۰، پذیرش: ۹۷/۰۲/۲۶)

چکیده: فرستنده جریانی سامانه موقعیت یاب زمین پایه محلی لوران از چندین سلف توان بالا هسته های فریتی یا فلزی استفاده می نماید. رفتار غیرخطی این سلف ها با تغییرات فرکانس کاری فرستنده در تلفات جریان گردابی و به طبع در راندمان فرستنده بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله رابطه های تلفات جریان گردابی در سلف های سلونوئیدی توان بالا با هسته های مورق ارائه می گردد و نشان داده می شود که این روابط می تواند به عنوان مرجع، در فرکانس های مختلف برای سلف های توان بالا با هسته مورق استفاده شود. نتایج حاصل از مدل سازی و شبیه سازی نشان خواهد داد که پارامترهای غیرخطی موجود در سلف چه اثراتی بر روی عملکرد سلف های فرستنده خواهند گذاشت. در این تحقیق نشان داده خواهد شد که فرکانس ۱۰۰ KHz فرستنده جریان لورن مرز کاهش نرخ تلفات جریان گردابی و افزایش راندمان در این فرستنده است. همچنین نشان داده می شود که زیر این فرکانس تلفات جریان گردابی با \sqrt{f} و بالای این فرکانس تلفات جریان گردابی با f^2 متناسب است.

کلید واژه ها: سلف توان بالا، جریان گردابی، سامانه موقعیت یاب زمین پایه، تلفات گردابی

۱- مقدمه

سلف های توان بالا در جبران سازی های توان راکتیو استاتیکی^۲ (SVC)، کاهش فلیکر ولتاژ (سری شده با الکتروود کوره قوس) و خطوط HVDC^۳ و همچنین شتاب دهنده مغناطیسی کاربرد دارند [۸-۹]. امروزه از سلف های هسته دار توان بالا به دلیل شار نشستی پایین در رنج وسیعی از فرکانس ها در فرستنده های رادیویی بهره برداری می شود. از سوی دیگر کاهش تداخل های مغناطیسی در کاربردهای رادیویی از مزایای این گونه سلف ها می باشد [۱۰]. دست یابی به اندوکتانس بالا در فضای کم از دیگر محاسن سلف هسته دار فرکانس بالا است. وزن زیاد و تلفات فوکو این سلف ها طراحان را به سمت مورق سازی هسته و طراحی بهینه آنها سوق داده است.

در گذشته مقاومت و خازن های فرکانس بالا به سادگی طراحی و ساخته می شدند، اما ساخت سلف هسته دار فرکانس بالا برای طراحان همیشه کار دشواری بوده است. سلف های هسته دار فرکانس بالا نقش مهمی در صنایع الکتریکی، الکترونیکی و مخابراتی ایفا کرده و کاربردهای فراوانی از قبیل مدارات الکتریکی فوق میدانی با فرکانس رادیویی (در سامانه لورن)، حسگرهای القایی، مبدل های ولتاژ و جریان، فیلترهای هارمونیک، تطبیق دهنده های امپدانس و کلیدهای مغناطیسی (در سامانه

امروزه مکان یابی به عنوان یکی از نیازهای بسیار ضروری محسوب می شود. با توجه به اینکه مکان یاب های عمومی مبتنی بر سامانه موقعیت یاب جهانی^۱ (GPS) همیشه در دسترس نبوده و قابل اطمینان نیز نیستند لذا مکان یابی محلی جایگزین مناسبی می باشد. سامانه موقعیت یاب زمین پایه لورن به عنوان سامانه مکمل و پشتیبان قابل اتکاء برای GPS می تواند با این هدف مورد استفاده قرار گیرد [۵-۱۱]. هم اکنون در بسیاری از کشورهای جهان فرستنده های لورن مربوط به این سامانه نصب شده و در حال بهره برداری می باشند. در کشور عزیزمان نیز سامانه های موقعیت یاب زمین پایه لورن با توان نامی ۴MVA متشکل از چند ده سلف هسته دار توان بالا با فرکانس های مختلف در مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر در حال ساخت است. از کاربردهای سلف های هسته دار توان بالا فرکانس پایین می توان در راکتورهای شنت برای حذف هارمونیک ها [۶] و همچنین محدود کردن جریان خطا در شبکه توزیع و یا محدود کردن جریان خطا در نقطه خنثی در مواقعی که خطا بین فاز و زمین رخ می دهد اشاره نمود [۷]. همچنین

2- Static VAR Compensators
3- High-Voltage Direct Current

* نویسنده پاسخگو: Mr_Alizadehp@mut.ac.ir
1- Global Positioning System

نظامی همچون سامانه‌های ناوبری، موقعیت‌یابی کشتی و تجهیزات جنگی و غیر نظامی همچون کنترل ترافیک در بزرگراه‌ها و شهرها، مدیریت اتوبوس‌رانی و حمل و نقل جاده‌ای و غیره کاربرد دارند. تعیین موقعیت اجسام یکی از کاربردهای مشترک این سامانه بوده که لورن نام دارد. لورن سیستمی رادیویی بوده که با دقت، موقعیت اجسام را (با اندازه‌گیری اختلاف زمان رسیدن سیگنال رادیویی از ایستگاه‌هایی بسیار دور از هم) تعیین می‌کند [۱۵]. به منظور کارایی موثر سیستم لورن، گیرنده لورن باید با حداقل سه ایستگاه (فرستنده) مرتبط باشد. یکی از فرستنده‌ها به عنوان ایستگاه اصلی و دو ایستگاه دیگر ایستگاه فرعی نامیده می‌شوند. سیگنال‌ها توسط گیرنده لورن، که درون اجسام (داخل کشتی، هواپیما و ...) می‌باشند، دریافت می‌شوند. مهمترین سازنده فرستنده‌های لورن تا سال ۲۰۰۰، شرکت مگا پالس^۲ آمریکا بوده است. تولید پالس‌های جریانی با شکل موج سینوسی و عرض پالس دو دوره تناوب با فرکانس ۱۰۰ KHz در این فرستنده توسط چهار مولد جریان سینوسی نیم‌سیکل^۳ (HCG) صورت می‌پذیرد. بدین منظور هر فرستنده حداقل به چهار HCG نیاز دارد. دو HCG به صورت موازی برای شکل‌دهی نیم‌سیکل‌های مثبت و دو HCG موازی دیگر برای شکل‌دهی نیم‌سیکل‌های منفی استفاده می‌شوند. هر HCG از سه طبقه که هر طبقه از یک مدار RLC که در شرایط فوق میرایی کار می‌کند تشکیل شده است. طبقه اول با مدار شارژ^۴ خازن C₁ و طبقه دوم به مدار شارژ^۴ خازن C₂ و طبقه سوم به مدار فشرده‌ساز پالس نام‌گذاری می‌شوند.

این طبقات به ترتیب با فرکانس‌های ۱/۷ KHz، ۳۳/۳ KHz و ۱۰۰ KHz طراحی می‌شوند، بنابراین، هر HCG همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است از دیود، سلف‌ها، خازن‌ها و یکسوسازهای کنترل‌شده سیلیکونی^۴ (SCR) تشکیل شده است. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده می‌شود هر HCG از دو سلف SR1 و SR2 هسته‌دار که به‌عنوان کلید و تنظیم‌کننده فرکانس طبقه تشکیل شده است، عمل می‌کند. از این رو تحلیل این گونه سلف‌ها برای این فرستنده امری ضروری و حیاتی است. سلف SR2 که قلب HCG نامیده می‌شود می‌بایست دامنه جریان KA ۱۰ را با عرض پالس ۵ میکرو ثانیه از خود عبور دهد. نتایج شبیه‌سازی نمونه اقتباسی مولد جریان سینوسی نیم‌سیکل و ساختار شکل موج سیگنال لورن در [۱۷] به‌طور کامل ارائه شده است.

لورن اشاره کرد. در بررسی تلفات این سلف‌ها باید تمام عوامل غیرخطی را لحاظ نمود. در [۱۱] مدل سیگنال کوچک یک سلف با هسته فریتی و بررسی اثر خازن‌های پارازیتی ارائه شده است ولی در فرکانس کاری برق شهری این کار صورت گرفته است. در [۱۲] رفتار فرکانسی سلف هسته‌دار و مدار معادل آن در فرکانس‌های مختلف با مطالعه خازن پارازیتی، اتلاف هسته و اندوکتانس وابسته به فرکانس بررسی شده است. که تمرکز این مقاله بر روی ضریب کیفیت بوده است و توان تلفات با توجه به فرکانس‌های مختلف دیده نشده است.

در [۱۳] برای لحاظ نمودن اثرات غیرخطی سلف هسته‌های در اندوکتانس سلف ابتدا سطح مقطع هادی به فیلمان‌های کوچکتری تقسیم‌بندی شده و سپس با استفاده از رابطه گراور و نیومن به ترتیب اندوکتانس خودی هر هادی فیلمان و اندوکتانس متقابل بین دو فیلمان محاسبه و بر اساس ماتریس امپدانس و قوانین کیرشهف، اندوکتانس و مقاومت سلف در فرکانس‌های مورد نظر ارائه شده است. در مرجع [۱۴] روش مش‌بندی غیر یکنواخت پیشنهاد گردیده است. عدم ارائه ساختار مناسب و عدم تایید نتایج آن با نرم‌افزار المان محدود از معایب این روش است. در مقاله ذکر شده نیز ولتاژ و فرکانس کاری پایین می‌باشد. در این تحقیق، در گام اول جایگاه سلف‌های هسته‌دار توان بالا با فرکانس بالا در فرستنده لورن تدوین شده و در ادامه روابط تحلیلی این سلف‌ها جهت مدل‌سازی آنها استخراج و در گام‌های بعدی روابط تحلیلی جهت تعیین تلفات توان در هسته‌های مورق در فرکانس‌های بالا ارائه خواهد شد. لذا در ابتدا برای مدل‌سازی چگالی شار مغناطیسی و چگالی جریان گردابی ناشی از آن پرداخته شده و در پایان تلفات توان در هسته برحسب چگالی شار مغناطیسی و فرکانس ارائه می‌گردد.

در این تحقیق نشان داده خواهد شد که فرکانس ۱۰۰ KHz فرستنده جریان لورن مرز کاهش نرخ تلفات جریان گردابی و افزایش راندمان در این فرستنده است. همچنین نشان داده می‌شود که زیر این فرکانس تلفات جریان گردابی با \sqrt{f} و بالای این فرکانس تلفات جریان گردابی با f^2 متناسب است.

۲- ساختار اقتباسی فرستنده جریان مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر

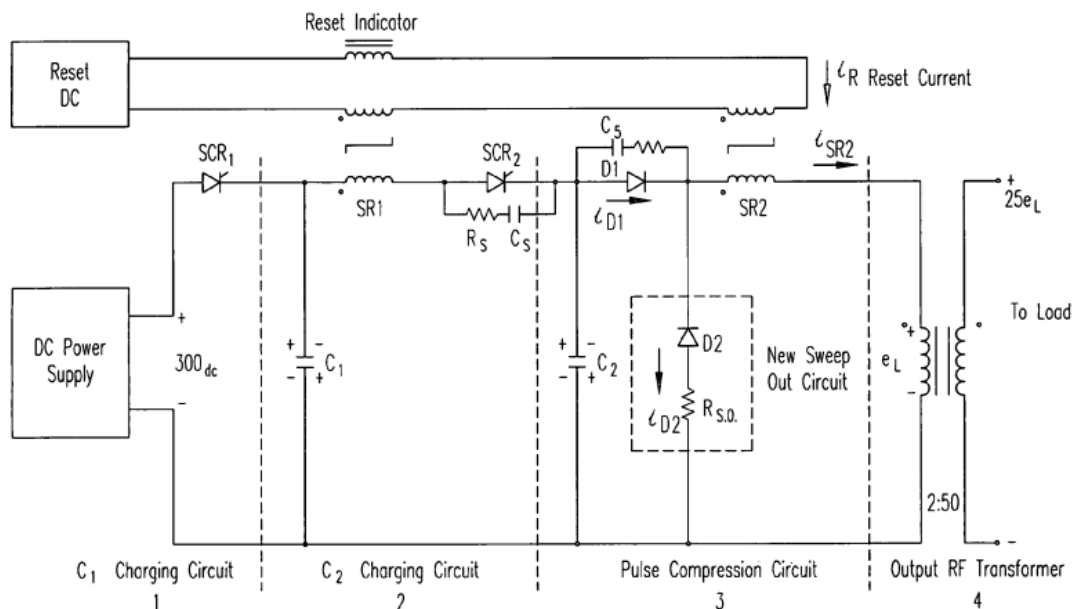
یکی از سامانه‌های هدایت و کنترل اجسام، سامانه موقعیت‌یاب زمین پایه می‌باشد. این گونه سامانه‌ها در بسیاری از موارد اعم از

2 - MEGAPULSE

3 - Half Cycle Generator

4- Silicon-Controlled Rectifier

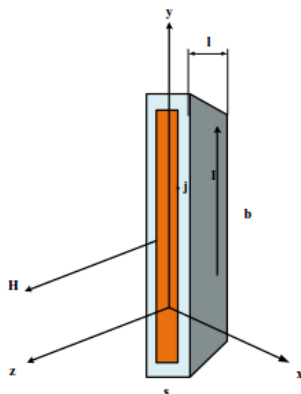
1 - Eddy Current



شکل (۱): مولد جریان سینوسی نیم سیکل [۱۶]

۳- مدل سازی شدت میدان مغناطیسی در سلف سلونوئیدی توان بالا با هسته مورق

در این بخش شدت میدان مغناطیسی ناشی از جریان جاری در سیم پیچ با فرض چشم پوشی از طول سیم پیچ در قیاس با طول هسته مورق مدل سازی می گردد. با توجه به این فرض می توان شدت میدان مغناطیسی را در راستای محور Z (محور مغناطیسی سیم پیچ) لحاظ نمود. در شکل (۳) یک لایه از n لایه هسته سلف نمایش داده شده است. اگر ضخامت دو لایه (s) در قیاس با ارتفاع هر لایه (h) قابل چشم پوشی باشد می توان بیان نمود که شدت میدان مغناطیسی درون هر لایه فقط تابع x یعنی عرض لایه خواهد بود $(H = H(x)\vec{a}_z)$ [۱۸].



شکل (۳): شمای سه بعدی ورقه مرکزی هسته سلونوئیدی

اگر ابعاد هسته این سلف و مشخصات فیزیکی آن از قبیل μ_r ، دامنه جریان، تعداد دورهای سیم پیچ سلف، ضخامت صفحات مورق هسته، عمق نفوذ هسته و غیره طراحی مناسبی نداشته باشد عملاً دستیابی به فرکانس ۱۰۰ KHz با راندمان بالا میسر نخواهد بود. ساختار سلف سلونوئیدی با هسته تروئیدی جهت سلف SR_2 در این تحقیق انتخاب شده است. در ادامه مدل سازی شدت میدان مغناطیسی، چگالی شار مغناطیسی، چگالی جریان گردابی، شار پیوندی، چگالی تلفات توان گردابی بر حسب فرکانس به منظور طراحی بهینه سلف SR_2 ارائه شده است. سلف های استفاده شده در این سامانه لورن از نوع سلونوئیدی با هسته EC52 بوده که مدل سه بعدی این هسته در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲): شمای سه بعدی هسته فریتی EC52

$$\gamma = \sqrt{j\mu_c \sigma_c \omega} = (1+j)\sqrt{\pi\mu_c \sigma_c f} = \frac{(1+j)}{\delta_c} \quad (8)$$

$$\delta_c = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu_c \sigma_c f}} = \sqrt{\frac{\rho_c}{\pi\mu_c f}} \quad (9)$$

در روابط فوق، μ_c ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هسته، δ_c عمق نفوذ، N تعداد دورهای سیم پیچی، I_m جریان سیم پیچ، l_c طول سیم پیچ، f فرکانس جریان، σ_c ضریب هدایت الکتریکی هسته و ρ_c مقاومت الکتریکی ویژه هسته می باشد.

با توجه به این که جریان کل گردابی در هر ورق صفر است، برای شدت مغناطیسی داریم [۱۹]:

$$\bar{H}_c(x) = \bar{H}_c(-x) \quad (10)$$

با حل معادله هلم هولتز داریم:

$$H(x) = H_o \frac{\cosh(\gamma x)}{\cosh(\gamma \frac{s}{2})} \quad (11)$$

که در آن:

$$H_o = H_m \left(\frac{s}{2}\right) = \frac{NI_m}{l_c} \quad (12)$$

دامنه شدت میدان مغناطیسی از رابطه زیر به دست می آید:

$$|H(x)| = H_o \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2x}{\delta_c}) + \cos(\frac{2x}{\delta_c})}{\cosh(\frac{s}{\delta_c}) + \cos(\frac{s}{\delta_c})}} \quad (13)$$

$$= \frac{NI_m}{l_c} \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2x}{\delta_c}) + \cos(\frac{2x}{\delta_c})}{\cosh(\frac{s}{\delta_c}) + \cos(\frac{s}{\delta_c})}}$$

دامنه شدت مغناطیسی نرمالیزه شده، یعنی $\frac{|H(x)|}{H_o}$ را بر حسب x در شکل (۴) نشان داده شده است.

با توجه به قانون مداری آمپری در هسته داریم:

$$H_c(x,t)l + H_a(x,t)l = Ni(t) + l \int_x^{\frac{s}{2}} J_y(x,t) \quad (1)$$

که در رابطه (۱) $H_c(x,t)$ و $H_a(x,t)$ به ترتیب شدت میدان مغناطیسی در هسته و فاصله هوایی می باشد. l هم با توجه به شکل (۳) طول هسته می باشد.

با توجه به رابطه (۱) و همچنین مقدار چگالی شار در مرز بین هسته و سیم پیچ داریم:

$$B_c(x,t) = B_a(x,t) \quad (2)$$

با جایگذاری رابطه (۲) در (۱) و خطی سازی درون هسته فریتی داریم:

$$H_c(x,t)l = N \left[i(t) + \frac{l}{N} \int_x^{\frac{s}{2}} J_y(x,t) dx \right] \quad (3)$$

$$-\frac{s}{2} < x < \frac{s}{2}$$

با مشتق گیری از رابطه (۳) بر حسب محور x داریم:

$$\frac{\partial H_c(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_x^{\frac{s}{2}} J_y(x,t) dx \right] = -J_y(x,t) \quad (4)$$

$$-\frac{s}{2} < x < \frac{s}{2}$$

با استفاده از قانون فارادی داریم:

$$\frac{\partial E_y(x,t)}{\partial x} = -\frac{\partial B_c(x,t)}{\partial t} \quad (5)$$

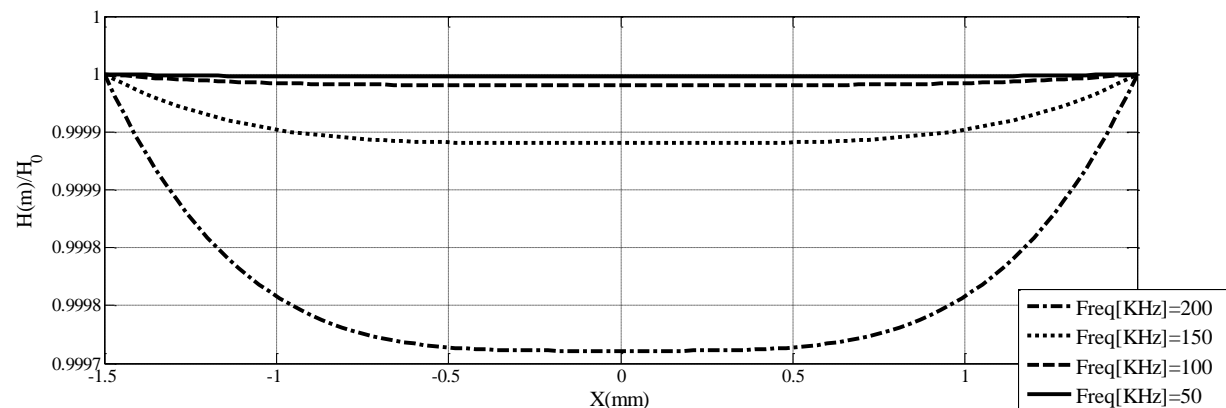
با در نظرگیری قانون آمپر و $J_y = \frac{E_y}{\rho_c}$ رابطه (۵) داریم:

$$\frac{\partial^2 H_c(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{\mu_c}{\rho_c} \frac{\partial H_c(x,t)}{\partial t} \quad (6)$$

در حالت دایمی شدت میدان مغناطیسی از معادله دیفرانسیل هلم هولتز به شکل زیر بدست می آید:

$$\nabla^2 H = \gamma^2 H \quad (7)$$

که در آن داریم:



شکل (۴): شدت میدان مغناطیسی نرمالیزه شده بر حسب x در فرکانسهای مختلف به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

میدان مغناطیسی به صورت زیر به دست می آید.

$$J = \nabla \times H = \frac{\partial H_z(x)}{\partial x} \vec{a}_y = -\gamma H_o \frac{\sinh(\gamma x)}{\cosh(\gamma \frac{s}{2})} \vec{a}_y \quad (16)$$

با توجه به رابطه (۱۶) می توان نتیجه گرفت تابع جریان گردابی فرد است پس داریم:

$$\vec{J}_y(x) = -\vec{J}_y(-x) \quad (17)$$

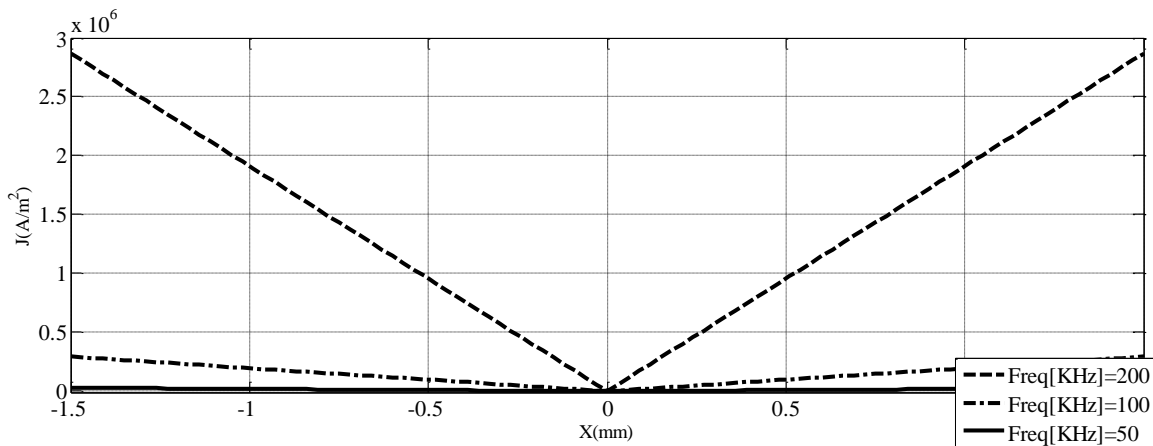
لذا دامنه چگالی جریان گردابی برابر است با:

$$J_m = |J(x)| = \frac{H_o}{\delta_c} \sqrt{\frac{2 \left[\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}} \quad (18)$$

$$= \frac{N I_m}{l_c \delta_c} \sqrt{\frac{2 \left[\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) \right]}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}}$$

در شکل (۵) رفتار چگالی جریان گردابی بر حسب X نشان داده شده است.

در این شکل مشاهده می شود که دامنه چگالی جریان گردابی با افزایش فرکانس در سطح هر لایه (با توجه به اثر پوستی) افزایش می یابد



شکل (۵): تغییرات دامنه چگالی جریان گردابی بر حسب X در فرکانس های مختلف به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

لبه های هسته های مورق بیشتر از نقاط دیگر هسته می باشد.

در شکل (۶) دامنه چگالی جریان گردابی در سطح هر لایه بر حسب تغییرات فرکانس ترسیم شده است.

از این شکل مشاهده می شود که دامنه نرمالیزه شده شدت میدان مغناطیسی با افزایش فرکانس کاهش می یابد.

۴- مدل سازی چگالی شار مغناطیسی

با فرض ایزوتروپیک، هم سو یکسان و خطی بودن هسته چگالی شار مغناطیسی درون هر لایه هسته از رابطه زیر به دست می آید [۲۰].

$$B = \mu_c H = \mu_c H_o \frac{\cosh(\gamma x)}{\cosh(\gamma \frac{s}{2})} \vec{a}_z = \frac{\mu_c N I_m}{l_c} \frac{\cosh(\gamma x)}{\cosh(\gamma \frac{s}{2})} \vec{a}_z \quad (14)$$

دامنه چگالی شار مغناطیسی از رابطه زیر به دست می آید:

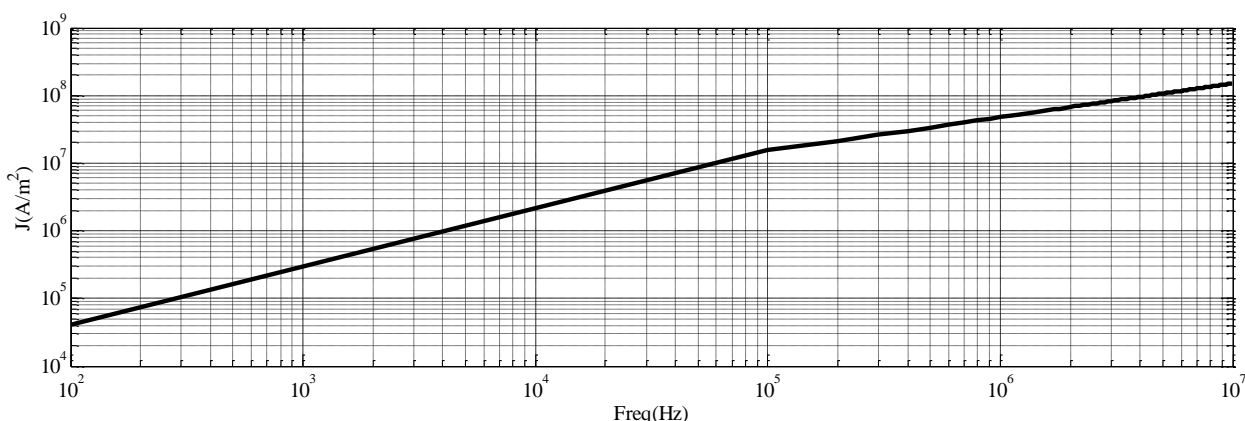
$$B(x) = |B(x)| = \mu_c |H(x)| = \mu_c H_o \sqrt{\frac{\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}} \quad (15)$$

در شکل (۴) با توجه به رابطه (۱۳) دامنه شدت مغناطیسی در لایه مرکزی هسته ترسیم شده است و با توجه به رابطه (۱۵) دامنه چگالی شار مغناطیسی ضریبی از دامنه شدت مغناطیسی می باشد بنابراین رفتار شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی در درون هر لایه یکسان است.

۵- مدل سازی چگالی جریان گردابی

بر اساس قوانین ماکسول چگالی جریان گردابی از کرل شدت

در شکل (۴) و (۵) دامنه شدت میدان مغناطیسی و دامنه چگالی جریان گردابی بر حسب فرکانس در سطح لایه $x = \frac{s}{2}$ ترسیم شده اند. از این اشکال مشاهده می شود که مقدار جریان بر روی



شکل (۶): دامنه چگالی جریان گردابی در سطح هر لایه بر حسب تغییرات فرکانس به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

و کل شار پیوندی برای سیم پیچی سلف سلونوئیدی عبارتست از:

$$\lambda_c = N\Phi_c = nN\phi_c = 2nN \frac{h\delta_c}{1+j} \mu_c H_o \tanh\left[(1+j)\frac{s}{2\delta_c}\right] \quad (23)$$

از طرفی برای اندوکتانس سلف سلونوئیدی با هسته تروئیدی داریم:

$$L = \frac{\lambda_c}{I_m} \quad (24)$$

۷- مدل سازی توزیع و چگالی تلفات توان ناشی از جریان گردابی

بر اساس رابطه پوئینگ چگالی توان تلفاتی جریان گردابی از رابطه زیر به دست می آید:

$$P(x) = \frac{E \cdot J}{2} = \frac{|J|^2}{2\sigma_c} = \frac{J_m^2(x)}{2\sigma_c} \quad (25)$$

از آنجا که $E = J/\sigma_c$ داریم:

$$P(x) = \frac{H_o^2}{\delta_c^2 \sigma_c} \frac{\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)} \quad (26)$$

$$= \frac{N^2 I_m^2}{\delta_c^2 \sigma_c l_c^2} \frac{\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}$$

در شکل (۷) چگالی تلفات توان جریان گردابی بر حسب x در لایه مرکزی هسته نشان داده شده است.

۶- مدل سازی شار پیوندی هر لایه و اندوکتانس سلف سلونوئیدی با هسته مورق

شار پیوندی هر لایه با توجه به رابطه (۱۵) و قانون گوس به صورت زیر مدل می شود.

$$\phi_c = \iint_s B(x) \cdot dS = \int_0^h dy \int_{-s/2}^{s/2} \mu_c H(x) dx \quad (19)$$

$$= h\mu_c \int_{-s/2}^{s/2} H(x) dx.$$

$$\phi_c = \frac{2h\delta_c \mu_c H_o}{1+j} \frac{\sinh\left[(1+j)\frac{s}{2\delta_c}\right]}{\cosh\left[(1+j)\frac{s}{2\delta_c}\right]} \quad (20)$$

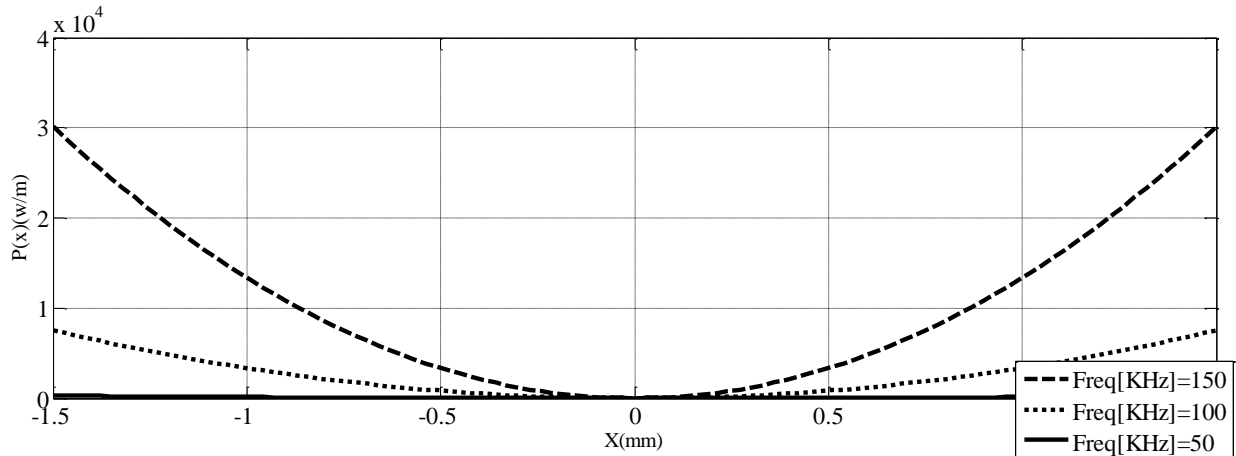
$$= \frac{2h\delta_c \mu_c H_o}{1+j} \tanh\left[(1+j)\frac{s}{2\delta_c}\right]$$

بنابراین، دامنه شار پیوندی در هر لایه هسته مورق از رابطه زیر به دست می آید:

$$|\phi_c| = 2h\delta_c \mu_c H_o \sqrt{\frac{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}} \quad (21)$$

در نهایت شار دور برای n لایه عبارتند از:

$$\Phi_c = n\phi_c \quad (22)$$



شکل (۷): چگالی توان تلفاتی جریان گردابی بر حسب X در فرکانس های مختلف به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

۸- متوسط تلفات توان جریان گردابی در واحد

حجم هر لایه هسته

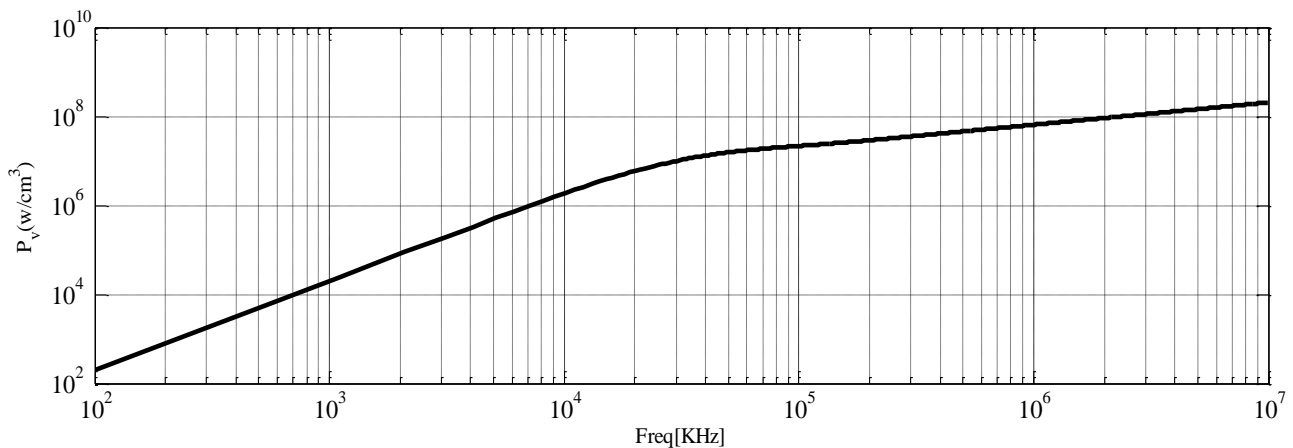
با متوسط گیری از چگالی توان تلفاتی جریان گردابی در عرض

لایه مرکزی داریم:

$$P = \frac{1}{s} \int_{-s/2}^{s/2} P(x) dx = \frac{2}{s} \int_0^s P(x) dx \quad P = \frac{2H_o^2}{\delta_c^2 \sigma_c} \int_0^s \frac{\cosh\left(\frac{2x}{\delta_c}\right) - \cos\left(\frac{2x}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)} dx = \frac{N^2 I_m^2}{\delta_c \sigma_c} \frac{\sinh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) - \sin\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)} = \frac{H_o^2}{\delta_c \sigma_c \omega} \frac{\sinh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) - \sin\left(\frac{s}{\delta_c}\right)}{\cosh\left(\frac{s}{\delta_c}\right) + \cos\left(\frac{s}{\delta_c}\right)} \quad (27)$$

گذشت از محدوده فرکانسی ۱۰۰ KHz با نرخ کمتری تلفات افزایش می یابد.

در شکل (۸) تغییرات متوسط تلفات توان گردابی بر حسب تغییرات فرکانس ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می شود که محدوده فرکانسی پایین تلفات با نرخ بیشتری رو به افزایش است و پس از

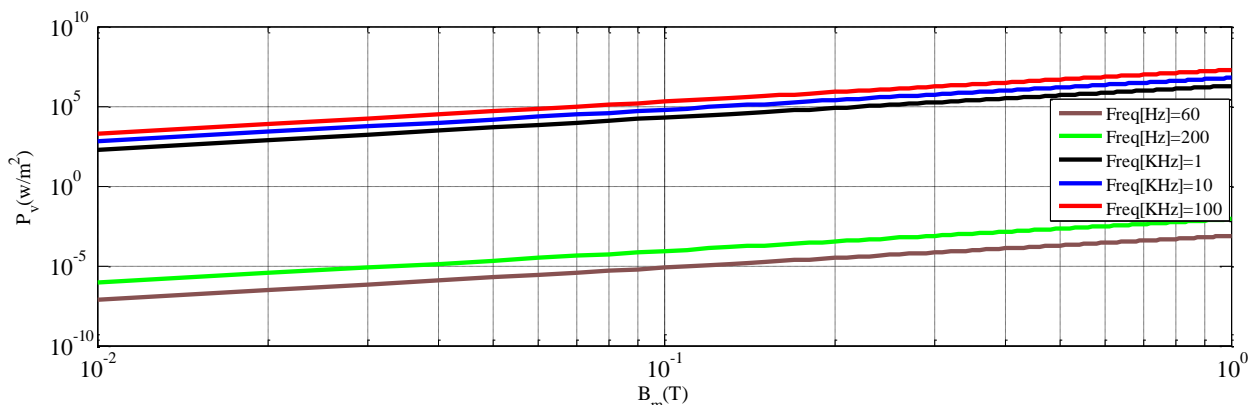


شکل (۸): متوسط تلفات توان جریان گردابی بر حسب فرکانس به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

ترسیم شده است.

در شکل (۹) تغییرات متوسط تلفات توان جریان گردابی به ازای تغییرات چگالی شار مغناطیسی، در چهار فرکانس کاری مختلف



شکل (۹): نمودار تغییرات متوسط تلفات توان جریان گردابی به ازای تغییرات چگالی شار مغناطیسی در چهار فرکانس کاری به ازای

$$\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega m, \mu_r = 12000, I_m = 10000 A, N = 25, s = 0.3 mm, l_c = 3 cm$$

هسته است، ارایه شده است. بر اساس نتایج حاصل از محاسبات می توان تلفات ناشی از جریان گردابی را استخراج نمود. این مدل می تواند به عنوان مدلی جامع، در فرکانس های مختلف برای سلف های هسته دار توان بالا ارائه گردد. سه نتیجه کلی زیر از تحلیل این مقاله حاصل می شود به طوری که توان تلفاتی هسته با افزایش فرکانس زیاد می شود، در فرکانس های پایین تلفات با f^2, B_m^2 متناسب است و در فرکانس های بالا تلفات با \sqrt{f}, B_m^2 متناسب است. با توجه به جایگاه سلف هسته دار فرکانس بالا در سامانه موقعیت یاب زمین پایه تحلیل روابط حاکم بر آنها امری مهم و ضروری جهت طراحی می باشد.

در فرکانس های پایین می توان برای توان تلفاتی در واحد حجم هسته رابطه تقریبی زیر را نوشت [۲۱]:

$$P_v \approx \frac{s^2 \omega^2 B_m^2}{24 \rho_c}, \quad s \leq \delta_c \quad (28)$$

و در فرکانس های بالا رابطه زیر:

$$P_v \approx \frac{B_m^2}{s} \sqrt{\frac{\pi \rho_c f}{\mu_r \mu_0}}, \quad s \geq 3 \delta_c \quad (29)$$

بنابراین، تلفات توان جریان گردابی در کل حجم هسته به این ترتیب به دست می آید:

$$P = nVP_v = n(shl_c)P_v \quad (30)$$

در نتیجه:

$$\begin{aligned} P &= \frac{nH_o^2 hl_c}{\delta_c \sigma_c} \frac{\sinh(\frac{s}{\delta_c}) - \sin(\frac{s}{\delta_c})}{\cosh(\frac{\omega}{\delta_c}) + \cos(\frac{\omega}{\delta_c})} \\ &= \frac{nN^2 I_m^2 hl_c}{\delta_c \sigma_c l_c^2} \frac{\sinh(\frac{s}{\delta_c}) - \sin(\frac{s}{\delta_c})}{\cosh(\frac{\omega}{\delta_c}) + \cos(\frac{\omega}{\delta_c})} \\ &= \frac{nhl_c B_m^2}{\delta_c \sigma_c \mu_c^2} \frac{\sinh(\frac{s}{\delta_c}) - \sin(\frac{s}{\delta_c})}{\cosh(\frac{s}{\delta_c}) + \cos(\frac{s}{\delta_c})} \end{aligned} \quad (31)$$

۹- نتیجه گیری

در این تحقیق مدل سازی سلف سلونوئیدی توان بالا با هسته تروئیدی مورق که مبتنی بر مشخصات هندسی و فیزیکی

۱۰- مراجع

- [1] Z. Lili, Xi. Xiaoli, J. Zhang, and Y. Pu, "A New Method for Loran-C ASF Calculation over Irregular Terrain," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 49, no. 3, pp. 1738-1744, 2013.
- [2] G. Johnson, R. Shalaev, R. Hartnett, P. Swaszek, and M. Narins, "Can Loran meet GPS backup requirements?," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 20, no. 2, pp. 3-12, 2005.
- [3] C. L. Sherman, B. B. Peterson, C. O. Lee Boyce Jr., and K. Enge, Per, "Loran Coverage Availability Simulation Tool," In Proceedings of the Royal Institute of Navigation NAV08/International Loran Association 37th Annual Meeting, London, UK, Oct. 2008.
- [4] G. W. Johnson, P. F. Swaszek, R. J. Hartnett, R. Shalaev, and M. Wiggins, "An Evaluation of Eloran As A Backup to GPS," IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, May 2007.
- [5] C. L. Sherman, R. Wenzel, G. Johnson, and P. K. Enge, "Assessment of The Methodology for Bounding Loran Tem- Poral ASF For Aviation," In Proceedings of the Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA, 2008.

- [13] D. Egorov, I. Petrov, J. Link, R. Stern, and J. J. Pyrhönen, "Model-Based Hysteresis Loss Assessment in PMSMs With Ferrite Magnets," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 1, pp. 179-188, 2018.
- [14] A. W. Barr, "Calculation of Frequency-Dependent Impedance for Conductors of Rectangular Cross Section," *AMP Journal of Technology*, vol. 1, pp. 91-100, 2004.
- [15] S. C. Lo, "Broadcasting GPS Integrity Information Using Lorán-C," Ph.D. Thesis, Stanford University, 2002.
- [16] Patent no: 7,064,705 B2, Application no: 10/877000, Dated: June 20, 2006.
- [17] M. R. Alizadeh Pahlavani, "New Approach in Designing the Generators of the Current Compressor with Increasing the Energy Efficiency and Signal Quality of the Lauren-based Ground Positioning System," *Electromagnetics Journal, Applied*, vol. 3, no. 3, pp. 1-10, 2016. (In Persian)
- [18] U. Reggiani and G. Grandi, "Quency Behavior of Laminated Iron-Core Inductors for Filter Applications," *IEEE APEC*, vol. 2, pp. 654-660, 2000.
- [19] H. Wang and Y. Zhang, "Modeling of Eddy-Current Losses of Welded Laminated Electrical Steels," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 40-44, 2017.
- [20] Z. Deng, Y. Kang, J. Zhang, and K. Song, "Multi-Source Effect in Magnetizing-Based Eddy Current Testing Sensor for Surface Crack in Ferromagnetic Materials," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, pp. 24-36, 2018.
- [21] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, "Power Electronics," 2nd Ed., New York: Wiley, pp. 749-750, 1995.
- [6] J. Avila-Montes, D. Campos-Gaona, E. Melgoza Vázquez, and J. R. Rodríguez-Rodríguez, "A Novel Compensation Scheme Based on a Virtual Air Gap Variable Reactor for AC Voltage Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 12, pp. 6547-6555, 2014.
- [7] M. Nazari-Heris, H. Nourmohamadi, M. Abapour, and M. Sabahi, "Multilevel Nonsuperconducting Fault Current Limiter: Analysis and Practical Feasibility," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 8, pp. 6059-6068, 2017.
- [8] J. Zhao, P. Yue, L. Grekhov, and X. Ma, "Current Effects on The Power Losses of High-Speed Solenoid Valve for Common-Rail Injector," *Applied Thermal Engineering*, vol. 128, pp. 1579-158, 2018.
- [9] Z. vDeng, Y. Kang, J. Zhang, and K. Song, "Multi-source Effect in Magnetizing-based Eddy Current Testing Sensor for Surface Crack in Ferromagnetic Materials," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 271, pp. 24-36, 2018.
- [10] C. Fernandez, Z. Pavlovic, S. Kulkarni, P. McCloskey, and C. O'Mathuna, "Novel High Frequency Electrical Characterization technique for Magnetic Passive Devices," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, no. 2, pp. 621-628, 2018.
- [11] M. E. Mosleh and M. R. Besmi, "Calculation of the Current and Efficiency of High Frequency MCG Generator in Time of Explosion Progress by Using New Method of NUEC," *Canadian Journal IEEE*, vol. 2, no. 7, pp. 332-339, 2011.
- [12] P. N. Murgatroyd, "The Brooks Inductor: A Study of Optimal Solenoid Cross-Sections," *IEEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, vol. 133, no. 5, 1986.

Modeling of Vortex Flow of High Power Inductors Losses with Foliate Cores in Ground-Based Positioning System

M. R. Alizadeh Pahlavani^{*}, I. Soltani, A. Dehestani Kolagar

Malek-Ashtar University of Technology

(Received: 09/04/2017, Accepted: 16/05/2018)

Abstract

The Laurent local current transmitter of ground-based Positioning System uses several High power inductance ferrite or metal cores. Nonlinear behavior of these inductors with transient frequency variations in the case of fluctuations is of much importance in flow losses and in the efficiency of the transmitter. In this paper, the relations of vortex flow losses in high power solenoids with foliate cores are presented. On the other hand, it is shown that these relations can be used as a reference model at different frequencies for high-power inductors with foliate cores. The results of modeling and simulation show the effects of nonlinear parameters in the inductor on the performance of the transmitter's inductors. The paper will reveal that the 100 kHz frequency of the Laurent flow transmitter is the boundary of reducing the rate of loss of vortex flow and increasing efficiency in this transmitter. It also shows that under this frequency, the losses of the vortex flow are proportional with \sqrt{f} and above this frequency with f^2

Keywords: Eddy Currents, Laminated Magnetic Cores, LPS, High Power Inductor

^{*} Corresponding author E-mail: mr_alizadehp@mut.ac.ir