

ارزیابی نظری و آزمایشگاهی اندوکتانس و مقاومت معادل مولدهای شار فشرده مارپیچی و وابستگی آن‌ها به فرکانس با استفاده از روش فیلامانی دوبعدی

محمدحسین خانزاده^{۱*}، یوسف علی‌نژاد برومی^۲، عباس شولایی^۳

۱- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)^۱، ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه سمنان

۳- استاد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۹/۱۷)

چکیده: در این مقاله، روشی جدید برای محاسبه دقیق اندوکتانس و مقاومت معادل مولدهای شار فشرده مارپیچی و وابستگی این کمیت‌ها به فرکانس ارائه شده است. این روش، مبتنی بر روش فیلامانی دوبعدی در حوزه فرکانس است. با استفاده از روش پیشنهادی، می‌توان تأثیر فرکانس و حضور آرمیچر را بر اندوکتانس و مقاومت معادل مولد در نظر گرفت. به منظور در نظر گرفتن تأثیر جریان گردابی بر مقاومت و اندوکتانس معادل مولد، با استفاده از روش فیلامانی، ضریبی به نام ضریب جریان گردابی معرفی شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که حضور آرمیچر نه تنها اندوکتانس معادل مولد را کاهش می‌دهد، بلکه باعث افزایش مقاومت معادل آن نیز می‌شود. در مورد تأثیر اخیر در کارهای منتشر شده قبلی در این زمینه، بحثی به میان نیامده است. برای اعتبارسنجی معادلات استخراج شده، یک نمونه کوچک مولد مارپیچی، ساخته شده و امپدانس، مقاومت و اندوکتانس آن در فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. نتایج محاسبات، تطابق خوبی با نتایج اندازه‌گیری دارند.

واژه‌های کلیدی: مولد شار فشرده مارپیچی، لاینر، جریان اولیه

۱- مقدمه

امپدانس نسبتاً زیاد ارائه نماید. این ویژگی، مولد مارپیچی را به‌عنوان گزینه‌ای مناسب به‌عنوان منبع تغذیه توان پالسی در بسیاری از کاربردها، مطرح نموده است [۲].

مطابق شکل (۱)، یک مولد شار فشرده مارپیچی (HFCG)^۱ دارای آرمیچری به‌صورت یک لوله هادی است که از ماده منفجره پر شده و در وسط یک سیم‌پیچ مارپیچی قرار گرفته است. یک بانک خازن، جریان اولیه مولد را تأمین می‌کند. هنگامی که بانک خازن در سیم‌پیچ تخلیه گردید، جریان حاصل، یک میدان مغناطیسی در فضای بین سیم‌پیچ و آرمیچر بوجود می‌آورد. با انفجار چاشنی الکتریکی که در یک انتهای آرمیچر تعبیه شده است، مواد منفجره موجود در آرمیچر منفجر شده و آرمیچر به شکل مخروط منبسط می‌گردد. زمان بندی انفجار به نحوی انجام می‌شود که در لحظه برخورد آرمیچر منبسط‌شده به سیم‌پیچ استاتور، جریان در سیم‌پیچ و به تبع آن، چگالی شار در فضای بین سیم‌پیچ و آرمیچر به مقدار بیشینه خود رسیده باشند [۳].

مولدهای شار فشرده نوعی وسیله تبدیل انرژی هستند که انرژی حاصل از انفجار یک ماده منفجره را به انرژی مغناطیسی تبدیل می‌کنند. در این وسایل، ابتدا شار اولیه‌ای ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از انفجار یک ماده منفجره، سطح مقطع عبور شار با سرعت زیاد کاهش می‌یابد در حالی که شار توسط یک سطح هادی احاطه شده است. وجود حایل هادی، مانع از تغییر شار شده و بنابراین، چگالی شار به سرعت افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر، شار در فضای محصورشده توسط حایل هادی فشرده می‌شود.

در نیمه دوم قرن گذشته میلادی انواع مختلفی از مولدهای شار فشرده طراحی، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که از میان آنها می‌توان از مولدهای صفحه‌ای، نواری، استوانه‌ای (هم‌محور)، کروی و مارپیچی نام برد [۱]. موفق‌ترین نوع از انواع مولدهای ذکر شده، مولد مارپیچی است. این مولد به علت دارا بودن اندوکتانس اولیه بزرگ در مقایسه با انواع دیگر، قادر است انرژی بسیار زیادی را به بارهای

مقطع سیم پیچ مارپیچی به اندازه سطح مقطع آرمیچر در نظر گرفته شده است، ولی اثر فرکانس و نیز اثرات جریان گردابی و مجاورتی را نمی توان منظور کرد.

از طرف دیگر، اغلب مدل های موجود برای محاسبه پارامترهای مولد مارپیچی با دقت کافی، پیچیده بوده و زمان انجام محاسبات حتی با رایانه های سریع نیز طولانی است. بنابراین، برای محاسبه مقاومت و اندوکتانس مولد در فرآیند طراحی و بهینه سازی مناسب نیستند.

در این مقاله، با استفاده از روش فیلامانی دوبعدی، روابطی برای محاسبه امپدانس، مقاومت و اندوکتانس معادل مولد مارپیچی ارائه شده است. روابط استخراج شده، این کمیت ها را برحسب فرکانس بیان می کنند. با وجود این که مولد مارپیچی یک تجهیز پالسی است، ولی مرسوم است که پارامترهای آن در حالت دائمی سینوسی و به ازای یک فرکانس متوسط، محاسبه و یا اندازه گیری شود [۷-۵]. فرکانس متوسط، با اعمال FFT به شکل موج جریان مولد که معمولاً نمایی در نظر گرفته می شود، محاسبه می شود.

با استفاده از روش پیشنهادی، تأثیر فرکانس و حضور آرمیچر را بر پارامترهای مولد می توان در نظر گرفت. اعتبار معادلات استخراج شده با استفاده از نتایج اندازه گیری، تأیید شده است.

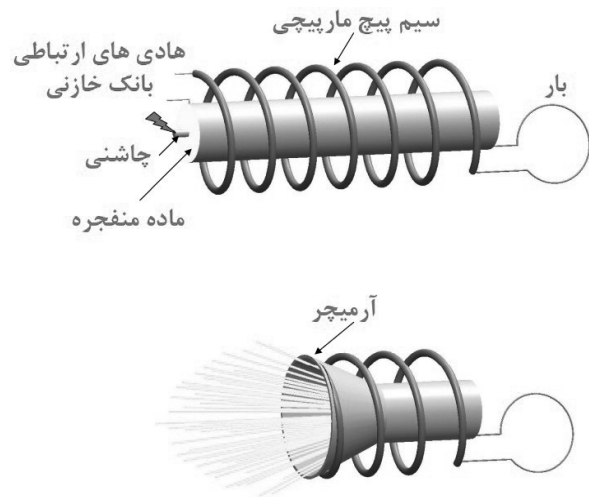
۲- مدل فیلامانی دوبعدی

یکی از روش های مدل سازی دوبعدی مولدهای شار فشرده مارپیچی روش فیلامانی است. این روش به رغم برخورداری از دقت بالا، برای اجرا، نیازی به رایانه های پر قدرت و صرف زمان های زیاد ندارد. به همین دلیل، روشی مناسب برای مدل سازی مولدهای مارپیچی است.

در این روش، چگالی شار مولد به صورت مجموع چگالی های شار دورانی B_θ و محوری B_z که به ترتیب ناشی از جریان های I_θ و I_z هستند، در نظر گرفته می شود و بر این مبنا، مطابق شکل (۲) مولد به مدارهای Z و θ تجزیه می گردد [۱۰-۸]. مدار معادل Z شامل سیم پیچ استاتور، آرمیچر و بار است.

سیم پیچ استاتور را می توان به n_c حلقه تقسیم کرد که از آن ها جریان بار I_z به صورت دورانی عبور می کند و چگالی شار B_{zZ} را می سازد. از طرف دیگر، این سیم پیچ به همراه آرمیچر تشکیل مسیری هم محور برای جریان داده و چگالی شار B_θ را به وجود می آورد. عبور جریان متغیر با زمان I_z از سیم پیچ، باعث ایجاد

با پیشروی موج انفجار با سرعت حدود ۸ km/s، آرمیچر در حال انبساط، مطابق شکل (۱) حلقه های سیم پیچ استاتور را به ترتیب اتصال کوتاه و از مدار خارج می کند. با توجه به اینکه شار در ابتدا و انتهای عملکرد مولد تقریباً ثابت می ماند، جریان در بار متناسب با نسبت اندوکتانس های اولیه و نهائی افزایش می یابد.



شکل (۱). مولد شار فشرده مارپیچی قبل از شروع به کار (بالا) و در حین کار (پایین)

در فرآیند طراحی مولدهای مارپیچی لازم است مقدار اولیه مقاومت و اندوکتانس آن تعیین گردد. روش های مختلفی برای محاسبه مقاومت و اندوکتانس مولد مارپیچی وجود دارد. مقاومت اهمی مولد مارپیچی معمولاً براساس مدل یک بعدی نفوذ میدان مغناطیسی در هادی های سیم پیچ و دیواره آرمیچر، محاسبه می شود [۴].

رابطه ای تقریبی برای محاسبه اندوکتانس مولد مارپیچی توسط فاولر و همکارانش مطابق زیر ارائه شده است [۱]:

$$L = \frac{3.95 n_c^2 r_c^2}{l_c + 0.45 r_c} \quad [\mu H] \quad (1)$$

در این رابطه، مجذور شعاع ظاهر شده در صورت، متناسب با سطح مقطع عبور شار است. بنابراین، در مولد مارپیچی باید تفاضل مجذور شعاع سیم پیچ و شعاع آرمیچر جایگزین آن شود. شعاع r_c ظاهر شده در مخرج برای در نظر گرفتن تأثیر محدود بودن طول سیم پیچ است و در مولد مارپیچی بهتر است با نصف تفاضل شعاع های سیم پیچ و آرمیچر جایگزین گردد [۱]. اگرچه در این رابطه، تأثیر آرمیچر بر اندوکتانس مولد با کوچک تر انگاشتن سطح

معادلات، یک معادله مربوط به استاتور و بقیه مربوط به آرمیچر است. این معادلات را به شکل ماتریسی می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$[R(t)][I(t)] + \frac{d}{dt} \{ [L(t)][I(t)] \} = 0 \quad (2)$$

که در آن، $[L(t)]$ یک ماتریس متغیر با زمان با حداکثر ابعاد $(n+1) \times (n+1)$ است که n عنصر اول روی قطر اصلی آن اندوکتانس خودی حلقه‌های فرضی آرمیچر، عنصر آخر روی قطر اصلی آن اندوکتانس مدار z و عناصر غیر قطری آن به جز سطر و ستون آخر، اندوکتانس‌های متقابل بین حلقه‌های فرضی آرمیچر هستند. عناصر سطر و ستون آخر ماتریس نیز اندوکتانس متقابل بین هریک از حلقه‌های فرضی آرمیچر و سیم‌پیچ استاتور هستند. $[R(t)]$ یک ماتریس قطری با حداکثر بعد $(n+1)$ ، و $[I(t)]$ بردار ستونی جریان با حداکثر بعد $(n+1)$ است. n عنصر اول قطر اصلی ماتریس $[R(t)]$ ، مقاومت حلقه‌های آرمیچر و عنصر آخر آن، مقاومت سیم‌پیچ مارپیچی است. از آنجایی که حلقه‌های سیم‌پیچ مولد و حلقه‌های فرضی آرمیچر، هم‌محور هستند، اندوکتانس متقابل بین حلقه‌های آم و زام را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود [۱۱]:

$$L_{ij} = 2\mu_0 \frac{\sqrt{r_i r_j}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) - E(k) \right] \quad (3)$$

که در آن، r_i, r_j شعاع حلقه‌های i ام و j ام، k و E به ترتیب انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم هستند و k نیز از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$k^2 = \frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2 + d^2}$$

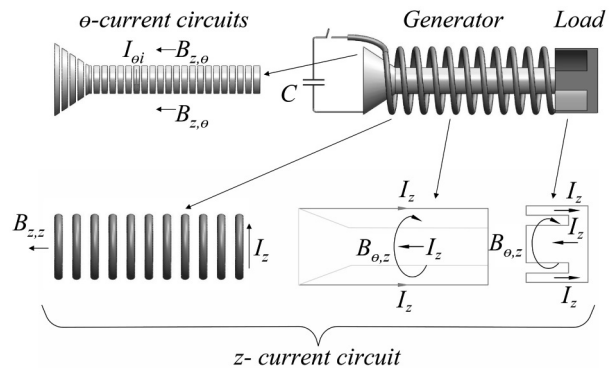
که در آن، d_{ij} فاصله محوری بین حلقه‌های i ام و j ام است. اندوکتانس خودی i امین حلقه آرمیچر (یا سیم‌پیچ مارپیچی با قرار دادن d به جای h) از رابطه زیر تعیین می‌شود [۸]:

$$L_i(r_i, h) = \mu_0 r_i \left(\ln \frac{8r_i}{h} - 0.5 \right) \quad (4)$$

که در آن، r_i شعاع حلقه i ام و h ضخامت محوری حلقه آرمیچر (و قطر هادی سیم‌پیچ) است. اندوکتانس خودی سیم‌پیچ $(L_{n+1, n+1})$ ، از رابطه (۵) تعیین می‌شود:

$$L_{n+1, n+1} = \sum_{i=1}^{n_c} \left(L_i + \sum_{j=1, j \neq i}^{n_c} L_{ij} \right) \quad (5)$$

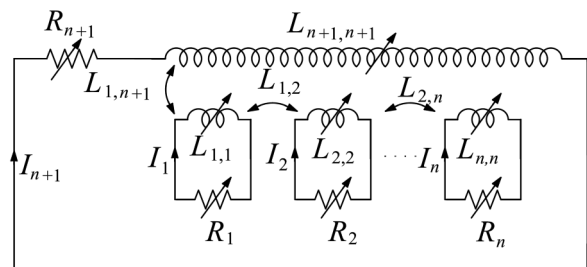
جریانی در راستای آرمیچر می‌شود. از آنجایی که توزیع جریان القاء شده در آرمیچر، یکنواخت نیست، برای حصول دقت کافی در مدل کردن اثر آن، آرمیچر به n حلقه فرضی مجزا (مدارهای θ) با جریان‌های متفاوت تقسیم می‌شود. برای سادگی تحلیل می‌توان تعداد حلقه‌های آرمیچر را با تعداد حلقه‌های سیم‌پیچ استاتور، یکی انتخاب کرد. اگر چه شکل (۲) یک مولد با سیم‌پیچ یک‌طبقه با گام و قطر ثابت را نشان می‌دهد، ولی می‌توان آن را برای مولد با سیم‌پیچ چندطبقه و گام و قطر متغیر تعمیم داد [۹].



شکل (۲). تجزیه مولد مارپیچی به یک مدار مؤلفه z و n مدار مؤلفه θ

۳- دستگاه معادلات دیفرانسیل HFCG

با توجه به شکل (۲) برای توضیح رفتار یک مولد مارپیچی می‌توان از $n+1$ مدار معادل مطابق شکل (۳) استفاده کرد. در این مدارهای معادل، کل سیم‌پیچ استاتور با یک مدار RL و هر یک از حلقه‌های فرضی آرمیچر نیز با یک مدار RL جداگانه مدل شده‌اند. تمام این مدارها دارای توزیع متقابل با یکدیگر هستند.



شکل (۳). مدارهای معادل z و θ برای مولد مارپیچی

با توجه به شکل (۳) ملاحظه می‌شود مدل فیلامانی مولد مارپیچی شامل $n+1$ مدار معادل است. بنابراین می‌توان آن را با $n+1$ معادله دیفرانسیل مرتبه اول خطی هم‌زمان نمایش داد. از این

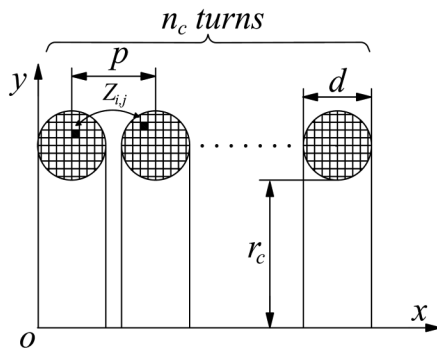
اولین حلقه از سیم پیچ را نشان می دهد. در این شکل، سامانه مختصات جدید $x'-y'$ را در نظر می گیریم که مبدأ آن منطبق بر مرکز مقطع هادی است. ابتدا فرض می کنیم هادی دارای سطح مقطع مربع است و به تعداد $n_s \times n_s$ فیلامان تقسیم شده است. بنابراین مختصات مرکز فیلامان واقع در آمین سطر و آمین ستون برابر خواهد بود با:

$$x'_{ij} = \frac{-d}{2} (j - 0.5) t_f \quad (11)$$

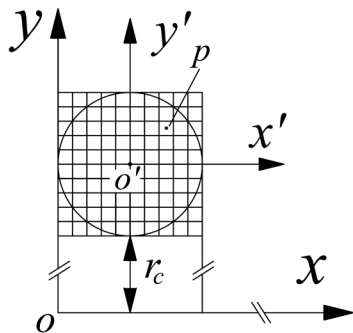
$$y'_{ij} = \frac{d}{2} (i + 0.5) t_f \quad (12)$$

که در آن، d و t_f به ترتیب قطر هادی سیم پیچ و ضخامت فیلامان هستند. فاصله مرکز فیلامان تا مبدأ مختصات $x'-y'$ برابر است با:

$$\rho'_{ij} = \sqrt{x'^2_{ij} + y'^2_{ij}} \quad (13)$$



شکل (۴). تقسیم مقطع سیم پیچ به تعدادی فیلامان (نیمه بالای سیم-



شکل (۵). سطح مقطع اولین حلقه از سیم پیچ

از آنجایی که سطح مقطع هادی دایره ای شکل است، فقط فیلامان هایی را در نظر می گیریم که فاصله آن ها از مبدأ مختصات $x'-y'$ کوچکتر و مساوی شعاع هادی است. بنابراین، تعداد فیلامان های داخل هادی برابر خواهد بود. شکل (پ-۱) الگوریتم

در رابطه (۵)، L_i و L_{ij} به ترتیب از روابط (۳ و ۴) جایگزین می شوند. اگر اندوکتانس متقابل بین آمین حلقه آرمیچر با شعاع r_{ai} و آمین حلقه سیم پیچ با شعاع r_{ci} با $L_{ij}(r_{ai}, r_{cj}, d_{acij})$ نمایش داده شود، اندوکتانس متقابل بین آمین حلقه آرمیچر و سیم پیچ ماریچی برابر خواهد بود:

$$L_{n+1,i} = L_{i,n+1} = \sum_{j=1}^{n_c} L_{ij} (r_{ai}, r_{cj}, d_{acij}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

که در آن، d_{acij} فاصله محوری آمین حلقه آرمیچر و آمین حلقه سیم پیچ ماریچی است.

مقاومت آمین حلقه آرمیچر نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_i (r_i, h) = \frac{2 \pi \rho r_i}{\delta h} \quad (7)$$

که در آن، δ عمق نفوذ جریان برابر است با [۲]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \pi f}} \quad (8)$$

مقاومت سیم پیچ ماریچی (آخرین عنصر از ماتریس $[R(t)]$) از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_{n+1} = \sum_{i=1}^{n_c} R_{ci} (r_{ci}, d) \quad (9)$$

که در آن، R_{ci} مقاومت آمین حلقه از سیم پیچ ماریچی است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$R_{ci} (r_{ci}, d) = \frac{8 \rho r_{ci} K_{eddy}}{d^2} \quad (10)$$

که در آن r_{ci} شعاع حلقه آم سیم پیچ و K_{eddy} ضریب جریان گردابی است و در قسمت بعد محاسبه می شود.

۴- محاسبه ضریب جریان گردابی

برای محاسبه اثر جریان فوکو بر مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ ماریچی، فرض می کنیم سطح مقطع هادی های سیم پیچ به تعدادی فیلامان تقسیم شده است. به علت تقارن، سطح مقطع سیم پیچ را در مختصات قائم دوعدی در نظر گرفته و فرض می کنیم محور سیم پیچ بر محور x منطبق است. در این صورت، نیمه بالای سطح مقطع سیم پیچ، مطابق شکل (۴) خواهد بود. شکل (۵) نیز سطح مقطع

که در آن، $[V]$ و $[I]$ بردارهای ولتاژ و جریان (فیزور) با بعد nt و $[Z]$ ماتریس امپدانس فیلامانها با ابعاد $n_t \times n_t$ است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$[Z] = [R] + j\omega[L] \quad (18)$$

در رابطه فوق، $[R]$ یک ماتریس قطری با بعد n_t است که عناصر آن مقاومت فیلامانها هستند. $[L]$ نیز یک ماتریس $n_t \times n_t$ است که عناصر قطر اصلی آن، اندوکتانسهای خودی و بقیه عناصر آن، اندوکتانسهای متقابل فیلامانها هستند. اندوکتانسهای خودی و متقابل فیلامانها به ترتیب از روابط (۳ و ۴) محاسبه می شوند. مقاومت فیلامانها نیز از رابطه زیر تعیین می شود:

$$R_{f_i} = 2\pi\rho \frac{r_{f_i}}{t_{f_i}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n_t \quad (19)$$

که در آن، r_{f_i} و t_{f_i} به ترتیب شعاع و ضخامت فیلامان نام هستند. ماتریس ادمیتانس سامانه را می توان از معادله زیر محاسبه کرد:

$$[Y] = [Z]^{-1} = \begin{bmatrix} y_{11} & n & y_{1n_t} \\ n & n & n \\ y_{n_t 1} & n & y_{n_t n_t} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ماتریس فوق را می توان به شکل زیر متشکل از nc زیرماتریس در نظر گرفت:

$$[Y] = \begin{bmatrix} [Y_{11}] & n & [Y_{1n_c}] \\ n & n & n \\ [Y_{n_c 1}] & n & [Y_{n_c n_c}] \end{bmatrix} \quad (21)$$

که در آن، زیرماتریسهای $[Y_{ij}]$ و $[Y_{ii}]$ به ترتیب ادمیتانس خودی حلقه نام و ادمیتانس متقابل حلقههای نام و نام سیم پیچ هستند و از رابطه زیر تعیین می شوند:

$$[Y_{ij}] = \begin{bmatrix} y_{(i-1)n_c+1, (j-1)n_c+1} & n & y_{(i-1)n_c+1, jn_c} \\ n & n & n \\ y_{in_c, (j-1)n_c+1} & n & y_{in_c, jn_c} \end{bmatrix} \quad (22)$$

با توجه به شکل (۶)، ملاحظه می شود مدار معادل هر حلقه شامل n_f شاخه است که با هم موازی شده اند. بنابراین، ادمیتانسهای خودی و متقابل معادل برای حلقههای سیم پیچ، برابر مجموع تمام عناصر زیرماتریسهای متناظر خواهد بود. بنابراین، ماتریسهای

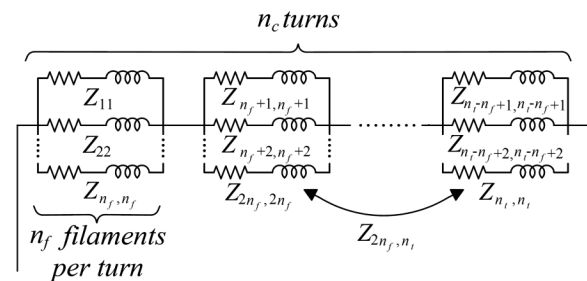
تعیین تعداد فیلامانهای داخل هادی و شعاع و فاصله محوری هر یک از آنها را از محور y برای حلقه اول سیم پیچ نشان می دهد. ابتدا با استفاده از این الگوریتم، پارامترهای اولین حلقه محاسبه شده و سپس شعاع و فاصله محوری فیلامانهای سیم پیچ از محور y از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$r_{fk}^{l+1} = r_{fk}^l \quad (14)$$

$$\text{for } l = 1, 2, 3, \dots, n_c \text{ and } k = 1, 2, 3, \dots, n_f$$

$$d_{fk}^{l+1} = d_{fk}^l + (l-1)p \quad (15)$$

$$\text{for } l = 1, 2, 3, \dots, n_c \text{ and } k = 1, 2, 3, \dots, n_f$$



شکل (۶). مدار معادل سیم پیچ مارپیچی

که در آنها، p گام حلقههای سیم پیچ و r_{fk}^l و d_{fk}^l به ترتیب شعاع و فاصله محوری فیلامان k ام اولین حلقه سیم پیچ از محور y هستند. فاصله محوری بین فیلامانهای نام و نام سیم پیچ که برای محاسبه اندوکتانس متقابل بین آنها مورد نیاز است، از رابطه زیر به دست می آید:

$$d_{fij} = |d_{fi} - d_{fj}| \quad (16)$$

از آنجایی که در هر حلقه، n_f فیلامان با هم موازی و در سیم پیچ، nc حلقه با هم سری هستند، تعداد کل فیلامانها در سیم پیچ برابر $n_t = n_f \times n_c$ خواهد بود و می توان برای آن، مدار معادلی مطابق شکل (۶) در نظر گرفت [۱۲].

اساس روش پیشنهادی برای محاسبه اثر جریان فوکو، تعیین توزیع چگالی جریان در هادیهای سیم پیچ است. برای این منظور فرض می کنیم یک ولتاژ سینوسی به دو سر مدار شکل (۶) وصل شده و به حالت دائمی رسیده است. در این صورت، معادله ماتریسی سامانه، مطابق زیر خواهد بود:

$$[V] = [Z][I] \quad (17)$$

و سرانجام، بردارهای جریان و ولتاژ فیلامان‌ها از روابط زیر تعیین می‌شوند:

$$[V]=[T][V'] \quad (31)$$

$$[I]=[Y][V] \quad (32)$$

[T] در رابطه (۳۱) یک ماتریس انتقال متشکل از n_c زیرماتریس به شکل زیر است:

$$[T]=[[T_1] [T_2] \dots [T_{n_c}]]^T \quad (33)$$

که در آن، $[T_i]$ یک ماتریس $n_f \times n_c$ است که فقط ستون n ام آن یک بردار واحد و بقیه عناصر آن صفر است.

به منظور محاسبه مقاومت معادل و ضریب جریان گردابی سیم پیچ مارپیچی، برنامه‌ای با متلب نوشته شده که ماتریس‌های امپدانس و ادمیتانس، امپدانس و مقاومت معادل و ضریب جریان گردابی را با استفاده از روابط (۲۷-۱۱) در فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌کند. این برنامه همچنین جریان فیلامان‌ها را با استفاده از روابط (۳۲-۲۸) محاسبه می‌کند. دامنه فیزور جریان فیلامان‌های یک سیم پیچ ۵ حلقه‌ای در شکل (۷) نشان داده شده است. از آنجایی که سطح مقطع همه فیلامان‌ها با هم برابرند، این شکل همچنین توزیع چگالی جریان در هر حلقه را نشان می‌دهد.

برای اعتبارسنجی معادلات استخراج شده و برنامه متلب، یک سیم پیچ مارپیچی ساخته شده و امپدانس و مقاومت آن در فرکانس‌های مختلف با استفاده از LCR متر اندازه‌گیری شد. مشخصات سیم پیچ ساخته شده در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): مشخصات سیم پیچ مارپیچی

قطر سیم پیچ	۶۵ میلی‌متر
طول سیم پیچ	۶۵ میلی‌متر
تعداد حلقه‌های سیم پیچ	۲۸ حلقه
گام سیم پیچ	۲٫۳۲ میلی‌متر
قطر هادی سیم پیچ	۲٫۲۴ میلی‌متر

ضریب جریان گردابی و مقاومت سیم پیچ (محاسبه و اندازه‌گیری شده) در شکل‌های (۸) و (۹) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۸) ملاحظه می‌شود نتایج محاسبه و اندازه‌گیری تطابق خوبی با هم دارند.

ادمیتانس و امپدانس معادل سامانه برابر خواهد بود با:

$$[\hat{Y}]=\begin{bmatrix} \hat{y}_{11} & n & \hat{y}_{1n_c} \\ n & n & n \\ \hat{y}_{n_c 1} & n & \hat{y}_{n_c n_c} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[\hat{Z}]=[\hat{Y}]^{-1}=\begin{bmatrix} \hat{z}_{11} & n & \hat{z}_{1n_c} \\ n & n & n \\ \hat{z}_{n_c 1} & n & \hat{z}_{n_c n_c} \end{bmatrix} \quad (24)$$

از آنجایی که امپدانس‌های حلقه‌ها در مدار معادل با هم سری هستند، امپدانس معادل سیم پیچ برابر مجموع عناصر ماتریس $[\hat{Z}]$ و مطابق زیر خواهد بود:

$$Z_{eq}=\sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_c} \hat{z}_{ij} \quad (25)$$

بنابراین، مقاومت معادل سیم پیچ را می‌توان به عنوان قسمت حقیقی امپدانس آن، مطابق رابطه زیر در نظر گرفت:

$$R_{eq}=\operatorname{Re}(Z_{eq}) \quad (26)$$

و سرانجام ضریب جریان گردابی را مطابق زیر تعریف می‌کنیم:

$$K_{eddy}=\frac{R_{eq}}{R_{dc}} \quad (27)$$

که در آن، R_{dc} مقاومت dc هادی به کاررفته در سیم پیچ است در حالی که به صورت سیم راست در آمده است.

در صورتی که لازم باشد توزیع چگالی جریان در هادی‌های سیم پیچ را به دست آوریم، فرض می‌کنیم ولتاژی سینوسی با دامنه V به دو سر سیم پیچ اعمال شده و حالت دائمی فرا رسیده است. در این حالت، جریان سیم پیچ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I=V/Z_{eq} \quad (28)$$

بردارهای جریان و ولتاژ حلقه‌های سیم پیچ را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$[I']=I[1 \ 1 \ 1 \dots 1] \quad (29)$$

$$[V']=[\hat{Z}][I'] \quad (30)$$

یک ولتاژ سینوسی به مدار معادل z (سیم پیچ استاتور) شکل (۳) اعمال شده و حالت دائمی سینوسی فرا رسیده است. در این صورت، دستگاه معادلات (۲) را در حالت دائمی سینوسی می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$[R][I] + j\omega[L][I] = [V] \quad (34)$$

که در آن، $[R]$ و $[L]$ ماتریس‌های مقاومت و اندوکتانس اولیه مولد ($[R(0)]$ و $[L(0)]$) و بردار فیزور جریان و $[V]$ برداری با طول $n+1$ است و مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$[V] = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ V]^T \quad (35)$$

که در آن، V فیزور ولتاژ اعمالی به سیم پیچ استاتور است. دستگاه معادلات (۳۴) شامل $n+1$ معادله است که n معادله اول آن را می‌توان مطابق زیر در نظر گرفت:

$$[R_1][I_1] + j\omega[L_1][I_1] + j\omega I_{n+1}[L_2] = 0 \quad (36)$$

معادله آخر آن را نیز می‌توان به شکل زیر نوشت:

$$R_{n+1}I_{n+1} + j\omega[L_2]^T[I_1] + j\omega L_{n+1,n+1}I_{n+1} = V \quad (37)$$

که در آن‌ها، $[R_1]$ و $[L_1]$ ماتریس‌هایی هستند که به ترتیب از حذف آخرین سطر و ستون ماتریس‌های $[R]$ و $[L]$ به دست می‌آیند. بردار $[I_1]$ همان بردار $[I]$ است که فقط عنصر آخر آن حذف شده است R_{n+1} ، $L_{n+1,n+1}$ و I_{n+1} به ترتیب آخرین عنصر ماتریس‌های $[R]$ و $[L]$ و بردار $[I]$ هستند. $[L_2]$ نیز برداری مطابق زیر است:

$$[L_2] = [L_{1,n+1} \ L_{2,n+1} \ \dots \ L_{n,n+1}]^T \quad (38)$$

از رابطه (۳۶) داریم:

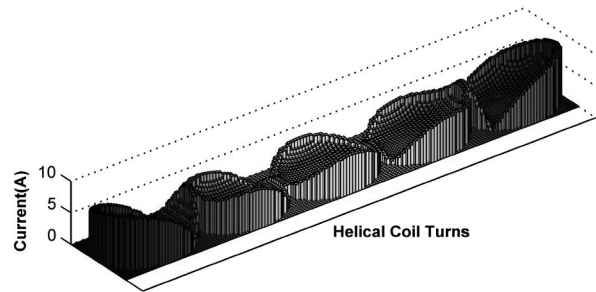
$$[I_1] = -j\omega I_{n+1} [[R_1] + j\omega[L_1]]^{-1} [L_2] \quad (39)$$

با جای گذاری (۳۹) در (۳۷) خواهیم داشت:

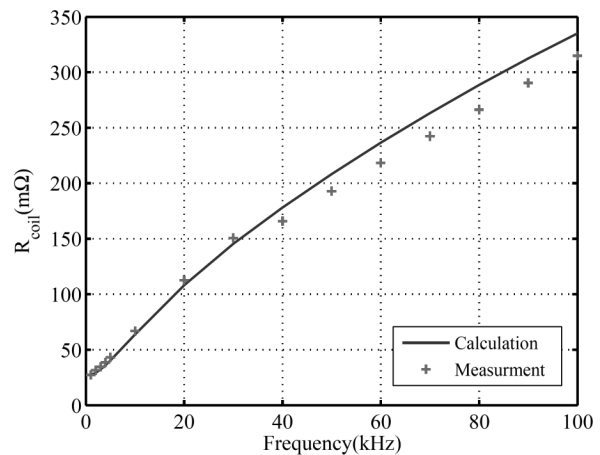
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega^2 [L_2]^T [[R_1] + j\omega[L_1]]^{-1} [L_2] \\ + R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \end{array} \right\} I_{n+1} = V \quad (40)$$

حال امپدانس معادل مولد، مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود:

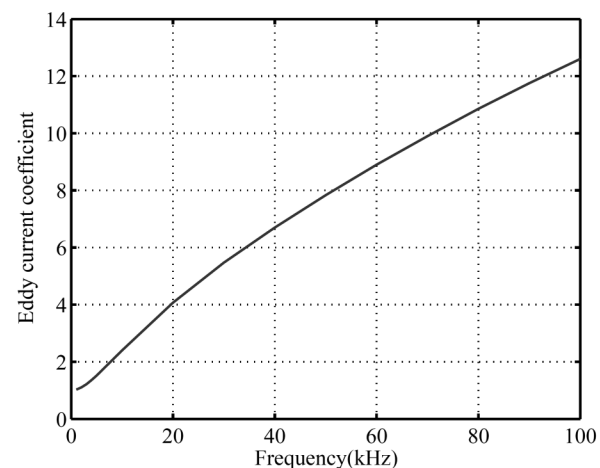
$$Z_{eq} = \omega^2 [L_2]^T [[R_1] + j\omega[L_1]]^{-1} [L_2] + R_{n+1} + j\omega L_{n+1} \quad (41)$$



شکل (۷). جریان فیلامان‌های هر حلقه از سیم پیچ مارپیچی



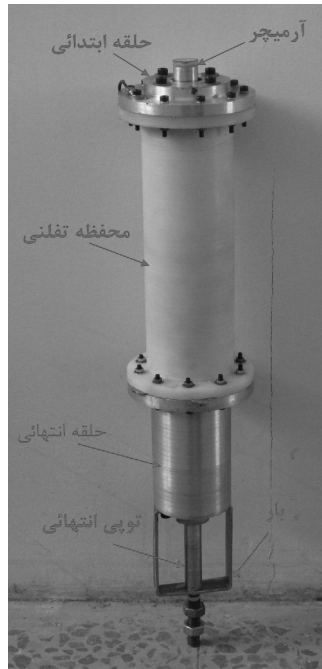
شکل (۸). تغییرات مقاومت سیم پیچ مارپیچی بر حسب فرکانس



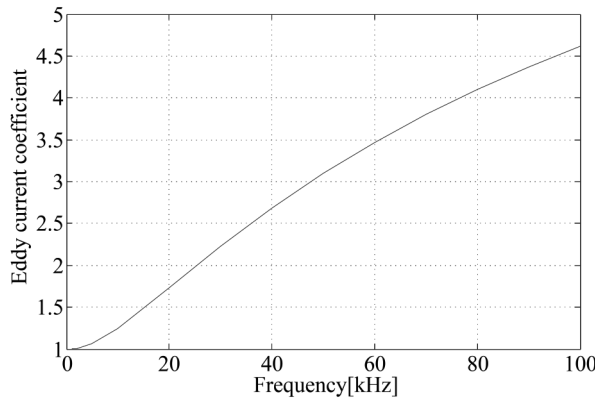
شکل (۹). تغییرات ضریب جریان گردابی سیم پیچ مارپیچی بر حسب فرکانس

۵- استخراج اندوکتانس و مقاومت معادل HFCG

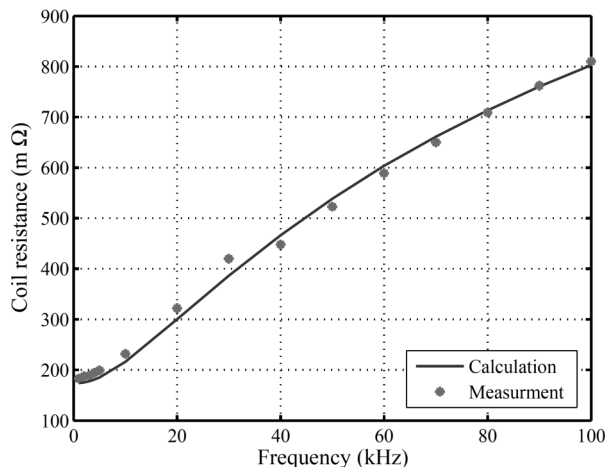
برای استخراج روابط اندوکتانس و مقاومت معادل فرض می‌کنیم



شکل (۱۰). مولد شارفشده ساخته شده



شکل (۱۱). تغییرات ضریب جریان گردابی HF CG بر حسب فرکانس



شکل (۱۲). مقاومت سیم پیچ HF CG بر حسب فرکانس (بدون آرمیچر)

وسرانجام قسمت‌های حقیقی و موهومی امپدانس معادل را به ترتیب به عنوان مقاومت و راکتانس معادل در نظر می‌گیریم. بنابراین مقاومت و اندوکتانس معادل مولد، مطابق روابط زیر خواهد بود:

$$R_{eq} = \text{Real} (Z_{eq}) \quad (۴۲)$$

$$L_{eq} = \text{Imag} (Z_{eq}) / \omega \quad (۴۳)$$

۶- محاسبات و مقایسه آن‌ها با نتایج اندازه‌گیری

به منظور محاسبه اندوکتانس و مقاومت معادل HF CG در حالت سکون، برنامه‌ای با متلب نوشته شده که ابتدا ماتریس‌های مقاومت و اندوکتانس مولد را با استفاده از روش فیلامانی دوبعدی، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از روابط (۴۳-۴۱) امپدانس، مقاومت و اندوکتانس معادل مولد را در فرکانس‌های مختلف محاسبه می‌کند. در حالتی که آرمیچر به ۲۰۰ حلقه تقسیم شود، زمان اجرای برنامه روی رایانه ۲/۱۱ GHz، ۵/۶ ثانیه است.

برای اعتبارسنجی معادلات استخراج شده و برنامه نوشته شده، یک نمونه آزمایشگاهی HF CG ساخته شد و با استفاده از یک LCR متر HIOKI مدل ۳۵۳۲-۵۰ امپدانس، مقاومت و اندوکتانس معادل آن در فرکانس‌های مختلف، اندازه‌گیری شد. این LCR متر قادر است مقادیر B, X, C, L, R, |Z|, D(tanδ), و Q را در محدوده فرکانسی ۴۲ هرتز تا ۵ مگا هرتز اندازه‌گیری نماید. تصویر مولد ساخته شده و مشخصات آن به ترتیب در شکل (۱۰) و جدول (۲) آمده است. شکل (۱۱) تغییرات ضریب جریان گردابی را بر حسب فرکانس نشان می‌دهد. نتایج محاسبات و اندازه‌گیری نیز در دو حالت (با و بدون آرمیچر) در شکل‌های (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است، بیشترین اختلاف مقادیر محاسبه شده و اندازه‌گیری شده اندوکتانس، کمتر از ۵٪ است. دلیل این اختلاف این است که تأثیر جریان گردابی فقط در محاسبه مقاومت منظور شده (Keddy) و در محاسبه اندوکتانس، چشم‌پوشی شده است.

جدول (۲). مشخصات مولد مارپیچی ساخته شده

قطر سیم پیچ	۶۵ میلی‌متر
طول سیم پیچ	۸۱ میلی‌متر
تعداد حلقه‌های سیم پیچ	۶۰
گام سیم پیچ	۱،۳۵ میلی‌متر
قطر هادی سیم پیچ	۱،۲۴ میلی‌متر
قطر آرمیچر	۳۲،۵ میلی‌متر
ضخامت دیواره آرمیچر	۴ میلی‌متر

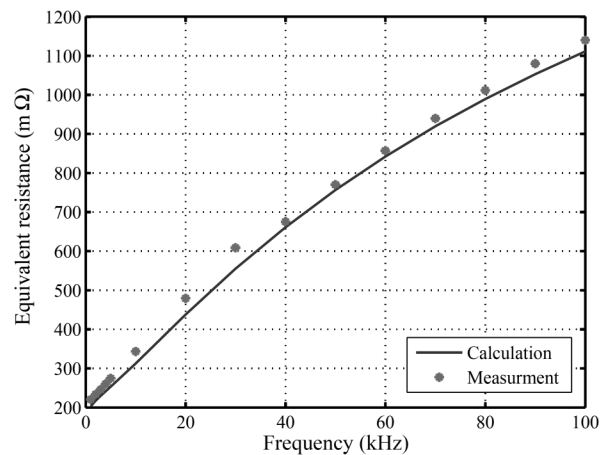
۷- نتیجه‌گیری

در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی مولدهای شار فشرده مارپیچی، لازم است مقادیر مقاومت و اندوکتانس آن‌ها به سرعت و با دقت بالا محاسبه گردد. از آنجایی که اغلب روش‌های دقیق محاسبه این مقادیر زمان‌بر است، در این تحقیق روش فیلامانی دوبعدی در حوزه فرکانس برای این منظور پیشنهاد شده است. این روش با وجود دقت، از سرعت کافی نیز برخوردار است. همچنین با این روش می‌توان تأثیر فرکانس و حضور آرمیچر را بر مقاومت و اندوکتانس مولد در نظر گرفت. از قابلیت‌های دیگر روش ارائه شده، این است که می‌توان آن را برای محاسبه تغییرات اندوکتانس و مقاومت مولد بر حسب زمان به کار برد و با در اختیار داشتن آن‌ها، تحلیل عملکرد مولد با حل یک معادله دیفرانسیل مرتبه اول با ضرایب متغیر میسر خواهد بود.

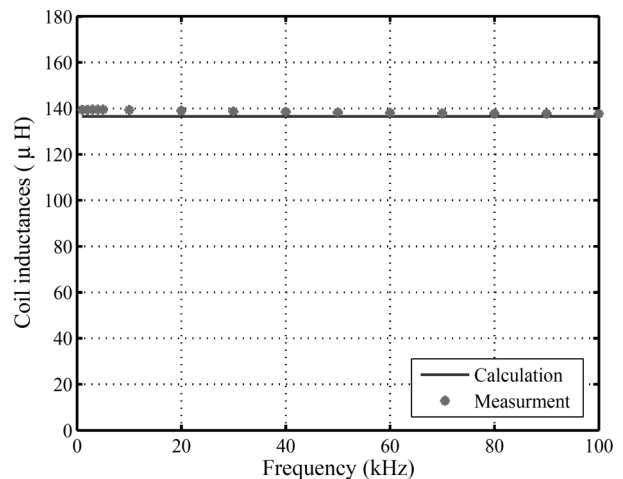
با توجه به شکل‌های (۱۲-۱۵) ملاحظه می‌شود حضور آرمیچر، اندوکتانس معادل مولد را کاهش و مقاومت معادل آن را افزایش می‌دهد. افزایش مقاومت آرمیچر باعث افزایش تلفات در مولد خواهد شد. همچنین شکل‌های (۱۲-۱۵) بیانگر تطابق نتایج محاسبه و اندازه‌گیری هستند.

۸- مراجع

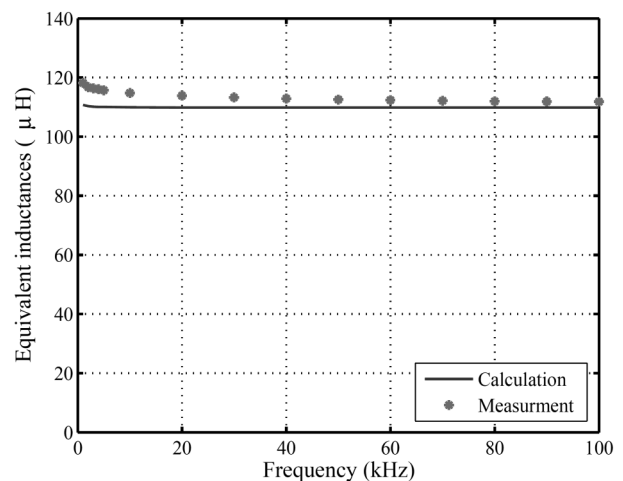
- [1] C. M. Fowlers, R. S. Caird, and W. B. Garn, "An Introduction to Explosive Magnetic Flux Compression Generators," Los Alamos Report LA-5890-MS, pp. 1-7, 1975.
- [2] A. A. Neuber and J. C. Dickens, "Magnetic Flux Compression Generators," Proceeding of The IEEE, vol. 92, no. 7, pp. 1205-1215, 2004.
- [3] S. Younger, I. Lindemuth, R. Reinovsky, C. M. Fowler, J. Goforth, and C. Ekdahi, "Scientific Collaboratings Between Los Alamos and Arzamas-16 Using Explosive-Driven Flux compression Generators," Los Alamos Science, no. 24, pp. 52-54, 1996.
- [4] B. M. Novac, I. R. Smith, H. R. Stewardson, P. Senior, V. V. Vadher, and Enache, "Design Construction and Testing of Explosive-driven Helical Generators," J. Appl. Phys., vol. 28, pp. 807-823, 1995.
- [5] A. A. Neuber, J. Dickens, J. B. Cornette, K. Jamison, E. R. Parkinson, M. Giesselmann, P. Worsey, J. Baird, M. Schmidt, and M. Kristiansen, "Electrical Behavior of Simple Helical Flux Compression Generator for Code Benchmarking," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 29, no. 4, pp. 573-579, August 2001.



شکل (۱۳). مقاومت معادل HFCC بر حسب فرکانس (با آرمیچر)

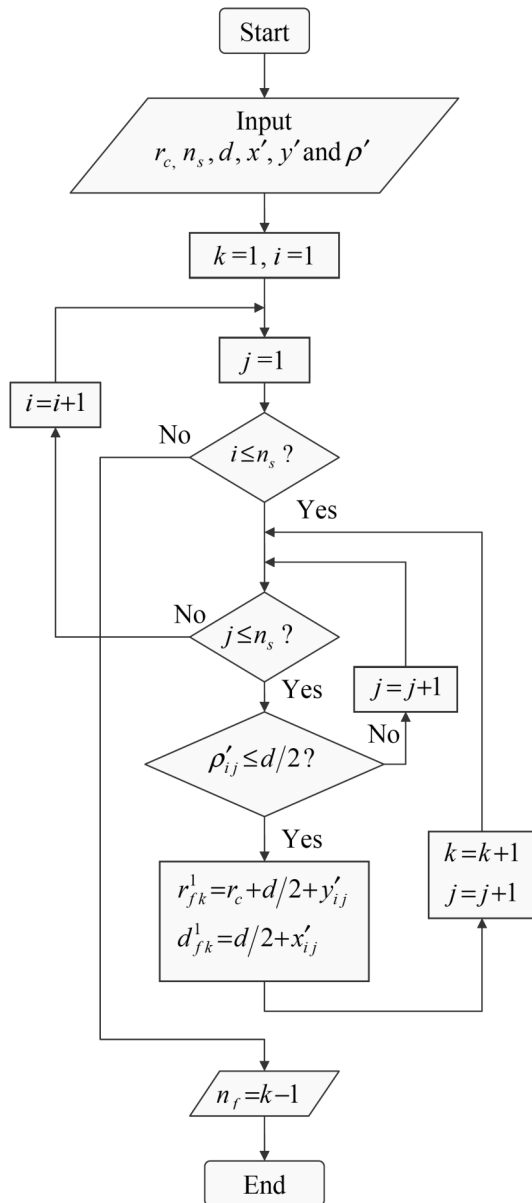


شکل (۱۴). اندوکتانس سیم‌پیچ HFCC بر حسب فرکانس (بدون آرمیچر)



شکل (۱۵). اندوکتانس معادل HFCC بر حسب فرکانس (با آرمیچر)

پیوست:



شکل (پ-۱): الگوریتم تعیین تعداد فیلامان‌های حلقه اول و شعاع و فاصله محوری آن‌ها از محور z .

[6] J. C. Hernandez, A. A. Neuber, J. C. Dickens, and M. Kristiansen, "Quantification of Ohmic and Intrinsic Flux Losses in Helical Flux Compression Generators," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 32, no. 5, pp. 1902-1907, October 2004.

[7] A. A. Neuber, J. C. Hernandez, T. A. Holt, J. C. Dickens, and M. Kristiansen, "Physical Efficiency Limits of Inch-Sized Helical MFCGs," in Dig. Tech. Papers 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf., vol. 1, pp. 413-416, 2003.

[8] L. L. Altgilbers, M. D. Brown, I. Grishnaev, B. M. Novac, I. R. Smith, I. Tkach, and Y. Tkach, "Magnetocumulative Generators," New York: Springer - Verlag, 1999.

[9] A. A. Neuber, "Explosively Driven Pulsed Power," Helical Magnetic Flux Compression Generators, Berlin, Heidelberg: Springer- Verlag, 2005.

[10] B. M. Novac and I. R. Smith, "Explosive-Driven Pulsed Power Generation Program (MURI): 2-Dimensional Simulation of Helical Generators," 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf., pp. 110-113, 2003.

[11] J. C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism Oxford Pub.," London, vol. 2, pp. 305-307, 1878.

[12] M. H. Khanzade, Y. Alinejad-Beromi, and A. Shoulaie, "Accurate Modeling of the Eddy Current Effects in Helical Flux Compression Generators Using 2-Dimensional Filamentary Method in Frequency Domain," Int. Review on Modelling and Simulations, vol. 2, no. 4, pp. 433-437, 2009.

Theoretical and Experimental Evaluation of Equivalent Initial Inductance and Resistance of Helical Flux Compression Generators and their Dependence on Frequency Using 2-D Filamentary Meth

M. H. Khanzade^{*}, Y. Alinejad Beromi, A. Shoulaie

Assistant Professor of ICT Faculty, Imam Hossein Comprehensive University

(Receive: 2014/06/07, Accept: 2015/12/08)

Abstract

This paper presents an approach to calculate the initial equivalent inductance and resistance of helical flux compression generators and their dependence on frequency accurately. This approach is based on the 2-D filamentary method in frequency domain. By using this method, it is possible to consider both the effects of the armature presence and frequency on the inductance and resistance of helical flux compression generators. In order to consider the eddy current effects on the equivalent resistance and inductance of the helical coil, we introduce an eddy current coefficient using the filamentary method. The calculation results show that the presence of the armature not only decreases the equivalent inductance of the HFCG, but also increases its equivalent resistance. The latter effect has not been discussed previously in the open literature. To verify our derived equations, a small scale HFCG was built and its inductance, resistance and impedance were measured at different frequencies. It is shown that the calculation results demonstrate a good agreement with measurement results.

Keywords: Flux Compression Generator, Liner, Seed Current.

* Corresponding Author Email: khanzade@ihu.ac.ir