محاسبه پارامترهای الکتریکی مولدهای فشرده سازی شار مارپیچی دو طبقه با روش المان محدود

محمد جعفری فر
استادیار، گروه مهندسی برق ، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران
mohammad.jafarifar@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۹

چکیده: مولدهای فشرده سازی شار مارپیچی و مارپیچی دو طبقه در چند دهه اخیر به طور گسترده برای تولید پالس‌های جریان بسیار قوی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور طراحی دقیق و بهینه این نوع مولدها، نیاز به محاسبه پارامترهای الکتریکی آن‌ها بر حسب زمان می‌باشد. از بین این پارامترهای الکتریکی، محاسبه اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌ها اهمیت زیادی دارد زیرا باعث کاهش هزینه‌های طراحی و ساخت خواهد شد. در این مقاله محاسبه پروفایل اندوکتانس خودی و متقابل مولد مارپیچی دو طبقه با حضور آرمیچر و در نظر گرفتن دینامیک آن با استفاده از روش عددی سه بعدی انجام شده است. برای این منظور معادلات ماکسول حاکم بر سیستم در بخش‌های مختلف بیان شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار کامسول این معادلات حل شده و اندوکتانس‌ها بر حسب زمان به دست آمده‌اند. به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده، یک برنامه کامپیوتری در محیط MATLAB بر اساس روش محاسبه فیلمانی نوشته شده و نتایج مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: مولد مارپیچی دو طبقه، دینامیک آرمیچر، روش المان محدود، پروفایل اندوکتانس، روش فیلمانی.

۱- مقدمه

مولدهای فشرده سازی شار مارپیچی در چند دهه اخیر به طور گسترده برای تولید پالس‌های جریان بسیار قوی در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این مولدها، انرژی شیمیایی موجود در مواد منفجره با استفاده از یک سیستم شامل سیم‌پیچ و آرمیچر به یک پالس جریان بسیار قوی تبدیل می‌شود. این مولدها دارای کاربردهای بسیاری بوده که از جمله آنها می‌توان به تحقیقات هسته‌ای، منابع تولید اشعه ایکس، مایکروویوهای توان بالا، لیزرهای پرقدرت، ریل‌گان‌ها و ... اشاره کرد[۱]. به منظور طراحی و بهینه‌سازی این نوع مولدها، نیاز به مدل‌سازی دقیق و به دست آوردن مشخصات آنها به صورت تئوری بیش از پیش احساس می‌شود. مدل‌سازی مولدهای مارپیچی فرآیند بسیار پیچیده‌ای است و این پیچیدگی زمانی که با مدل‌سازی تلفات بخش‌های مختلف همراه گردد پیچیده‌تر هم می‌شود. با توجه به اینکه عملکرد مولدهای فشرده سازی شار و از جمله مولد مارپیچی یک عملکرد یک بار مصرف و همراه با انفجار است لذا مدل‌سازی آن باید به صورت گذرا و در بازه زمانی بسیار کوچک در حد میکروثانیه انجام شود. از طرف دیگر، باید در نظر داشت که ساختار مولد در حین عملکرد دچار تغییرات می‌شود. به عنوان مثال با کاهش تعداد دورهای سیم‌پیچ، اندوکتانس و مقاومت آن کاهش یافته و لذا برای مدل‌سازی باید به دنبال راهکارهایی برای محاسبه این پارامترهای متغیر با زمان بود. از عوامل دیگری که فرآیند مدل‌سازی مولدها را پیچیده می‌کند ناشناخته بودن بخش عمده‌ای از تلفات مولد و یا اثرات ناشی از انفجار است که از جمله این اثرات تنش‌های مکانیکی ایجاد شده را می‌توان نام برد. عملکرد بخش آرمیچر، ویژگی های الکتریکی و مغناطیسی آن و مشخصات مکانیکی آن نیز بر پیچیدگی کار می‌افزاید. به طور کلی در نظر گرفتن تمامی موارد ذکر شده به طور همزمان منجر به پیچیده شدن معادلات حاکم بر مولد شده و تقریباً آنالیز همزمان آنها امکان پذیر نمی‌باشد. به همین منظور در مدل های ارائه شده تاکنون، برای ساده سازی، از برخی موارد ذکر شده تا حد امکان چشم پوشی شده است.

به طور کلی دو روش عمده برای مدل سازی مولدهای مارپیچی وجود دارد. روش اول که مگنتو هیدرو دینامیک[۱] (MHD) نامیده می‌شود

[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023

می‌تواند به صورت یک بعدی [۳-۲]، دو بعدی [۴] و یا سه بعدی [۵] مورد استفاده قرار گیرد. این روش بر پایه حل معادلات حاکم بر پتانسیل مغناطیسی و یا چگالی شار میدان مغناطیسی خواهد بود. این معادلات که به صورت دیفرانسیلی با مشتقات جزئی می‌باشند، بر روی یک مش نوشته می‌شوند که این مش می‌تواند در فضا ثابت باشد (روش اولر[۲]) و یا مش در طول یک ماده متحرک باشد (روش لاگرانژ[۳]) و یا اینکه به صورت ترکیبی از این دو حالت در نظر گرفته شود (روش اولر-لاگرانژ[۴]یا ALE) [۶]. باید در نظر داشت که روش MHD علاوه بر اینکه تمام مقوله‌های فیزیکی موجود در مولدهای مارپیچی را در بر می‌گیرد تصویر کاملی از هر آنچه در حین عملکرد مولد اتفاق می‌افتد را ارائه می‌دهد. ویژگی‌های ذکر شده برای MHD به همراه مواردی از قبیل: بزرگ بودن سایز فیزیکی مسأله، نیاز به تمرکز بیشتر در برخی قسمت ها (مثلاً نقطه اتصال آمیچر و کروبار)، وجود زمان بندی‌های متنوع در مدل‌سازی مولد، عدم شناخته بودن معادلات حالت و رسانایی الکتریکی مواد به کار رفته تحت شرایط دینامیکی مولد، فشارهای بسیار زیاد ناشی از انفجار و در نهایت مدل سازی بسیار پیچیده نفوذ مغناطیسی در فضای سه بعدی باعث شده است که استفاده از روش MHD سه بعدی در مدل‌سازی مولدهای مارپیچی چندان مورد استقبال قرار نگیرد. استفاده از MHD دو بعدی یا یک بعدی، با فرض ساده‌سازی در بسیاری از مفروضات مسأله و به دلیل کاهش حجم معادلات و همچنین زمان انجام محاسبات کمتر، بیشتر از روش سه بعدی مورد استقبال قرار گرفته شده است[۶].

روش دیگر در مدل‌سازی مولدهای فشرده سازی شار، استفاده از معادلات ولتاژ کرشهف (KVL) در مدار الکتریکی مولد است[۷]. این روش را روش مبتنی بر مدار[۵] می‌گویند. به دلیل وجود اندوکتانس و مقاومت در مدار معادل الکتریکی مولدهای مارپیچی، با استفاده از روش مبتنی بر مدار، یک مجموعه از معادلات دیفرانسیل مرتبه اول به دست می‌آید. بررسی عملکرد یک مولد فشرده‌سازی شار مارپیچی نشان می‌دهد که پارامترهای آن و از جمله مقاومت و اندوکتانس سیم پیچ ها و آرمیچر با زمان تغییر می‌کنند. لذا می‌توان گفت که در این روش مدل‌سازی، مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل دینامیکی مرتبه اول با ضرائب متغیر با زمان بر مولد حاکم هستند که برای حل آنها باید به سراغ روش های عددی رفت. برای حل دستگاه معادلات به دست آمده، نیاز به داشتن پروفایل اندوکتانس‌ها و مقاومت‌های بخش های مختلف در طول زمان عملکرد مولد می‌باشد. از آنجایی‌که مولد از نظر مغناطیسی دارای یک ساختار غیرخطی است لذا تعیین روابط تحلیلی برای محاسبه اندوکتانس‌ها به دلیل وجود انتگرال‌های پیچیده تقریباً کاری غیرممکن خواهد بود، به همین دلیل باید به دنبال استفاده از روش‌های تقریبی و عددی رفت. در چند دهه اخیر تلاش‌های زیادی در این زمینه توسط محققین صورت گرفته است و روش‌هایی متنوع با پیچیدگی‌های متفاوتی ارائه شده است. روش صفر بعدی ساده‌ترین روش پیشنهادی برای این منظور است که در آن برخی از پدیده‌های پیچیده مولد مانند نفوذ مغناطیسی و یا اثرات مجاورتی و ... نادیده گرفته می‌شود[۹-۸].

این روش به دلیل سادگی، دارای سرعت بسیار بالا بوده و نیاز به سیستم های محاسباتی پیشرفته و حافظه بالا ندارد و به همین دلیل برای مقاصد بهینه سازی و طراحی مناسب است[۱۰]. در روش یک بعدی، نیز مشابه روش صفر بعدی بسیاری از مفروضات تا حد امکان ساده‌سازی شده‌اند و آرمیچر تنها به صورت یک مسیر عبور جریان در نظر گرفته شده است و در محاسبات اندوکتانس هیچ تأثیری ندارد.

متداول‌ترین روش محاسبه پارامترهای مولدهای مارپیچی، روش دو بعدی است. این روش به صورت‌های مختلفی تاکنون مورد استفاده قرار گرفته است که از جمله آنها می‌توان به روش فیلمانی [۱۳-۱۱]، روش المان محدود [۱۴]، روش فیلمانی-مش [۱۵]، روش تفاضل محدود [۱۶-۱۷] و ... اشاره کرد. در مدل‌سازی دو بعدی، رفتار الکتریکی آرمیچر به صورت تقریباً کامل مدل می‌شود. با توجه به اینکه آرمیچر یک ماده هادی می‌باشد لذا توزیع جریان در آن به صورت محوری یا شعاعی بوده که این مسأله باعث می‌شود میدان مغناطیسی تولید شده در فضای بین آرمیچر و سیم پیچ شامل دو مؤلفه باشد که باید در محاسبه اندوکتانس‌ها لحاظ گردد. در روش فیلمانی سیم‌پیچ‌ها و آرمیچر هر کدام به تعدادی حلقه تجزیه می‌شوند و اندوکتانس متقابل بین هر کدام از حلقه‌ها با استفاده از روابط موجود در کتاب‌ها و مقالات محاسبه خواهد شد. اندوکتانس کلی هر بخش نیز با استفاده از اصل جمع آثار به صورت مجموع اندوکتانس حلقه‌های آن بخش به دست می‌آید. از آنجایی‌که در روش فیلمانی، آرمیچر به صورت حلقه‌های مجاور هم مدل‌سازی می‌شود هر چه تعداد حلقه‌ها بیشتر باشد مدل‌سازی دقیقتر و نتایج بهتری را به دنبال خواهد داشت، اما این کار باعث پیچیده‌تر شدن محاسبات و افزایش زمان عملکرد برنامه خواهد شد. از طرفی به منظور مدل‌سازی برخی از فاکتورهای مؤثر بر راندمان مولدهای مارپیچی مانند: تلفات ناشی از کروبار، شکست الکتریکی عایق‌ها، نفوذ مغناطیسی، اثر همجواری حلقه‌ها، فشارهای ناشی از میدان مغناطیسی، اثرات ناشی از افزایش دما و ... باید از مدل‌های سه بعدی بهره جست که در مقالات مختلفی به شرح جزئیات آنها پرداخته شده است[۲۴-۱۸].

در [۲۵] یک روش دو بعدی بر پایه مفهوم امپدانس معادل برای محاسبه اندوکتانس خودی مولدهای مارپیچی معمولی ارائه شده است. امپدانس معادل در هر مرحله از عملکرد مولد، از حاصل تقسیم فازور ولتاژ به فازور جریان در فرکانس معادل مولد به دست می‌آید. با توجه به اینکه در مولد دو طبقه دو سیم‌پیچ وجود داشته و با وجود آرمیچر هیچ رابطه تئوری برای محاسبه اندوکتانس متقابل وجود ندارد استفاده از این روش برای مولد دو طبقه پیچیده خواهد بود.

در این مقاله محاسبه پروفایل اندوکتانس خودی و متقابل مولد مارپیچی دو طبقه با حضور آرمیچر و در نظر گرفتن دینامیک آن با استفاده از روش عددی سه بعدی انجام شده است. برای این منظور معادلات ماکسول حاکم بر سیستم در بخش‌های مختلف بیان شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار کامسول این معادلات حل شده و اندوکتانس ها بر حسب زمان به دست آمده‌اند. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

آمده، یک برنامه کامپیوتری در محیط MATLAB بر اساس فیلمانی بیان شده در [۱۲] نوشته شده و نتایج مقایسه شده‌اند.

۲- محاسبه اندوکتانس

بررسی مقالات مختلف نشان می‌دهد که اگرچه روابط تحلیلی بسیاری برای محاسبه اندوکتانس خودی و متقابل دو سیم‌پیچ مارپیچی هم‌محور با هسته هوایی وجود دارد[۲۹-۲۶]، اما در صورتی که یک ماده فرومغناطیس مانند مس یا آلومینیوم به عنوان هسته در فضای بین دو سیم‌پیچ اضافه شود تقریباً هیچ رابطه تحلیلی وجود نخواهد داشت. در واقع محاسبه اندوکتانس با حضور هسته فرومغناطیس نیاز به استفاده از روابطی دارد که انتگرال‌های بیضوی یا سری‌های نامتناهی را به دنبال خواهد داشت که حل آنها کاری بسیار پیچیده و شاید غیر ممکن باشد. در این شرایط می‌توان با استفاده از روش‌های عددی از درگیر شدن با حل این چنین انتگرال‌های پیچیده و زمان بر اجتناب نمود.

اندوکتانس خودی در یک سیستم را می‌توان از رابطه (۱) که معروف به رابطه انرژی است به دست آورد:

$$E_m=\int_V \frac{B^2}{2\mu_0}dv=\frac{1}{2}\int_V A.Jdv \qquad E_m=\frac{1}{2}LI^2 \qquad (۱)$$

انتگرال رابطه (۱) برای یک سیستم خطی براحتی به صورت تحلیلی قابل محاسبه بوده و نتایج آن قبلاً به دست آمده است. اما برای یک سیستم غیرخطی این انتگرال فقط باید با روش عددی حل شود.

یک روش کاربردی برای محاسبه اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ در نظرگرفتن آن‌ها به صورت یک دو قطبی است. بدین صورت که ترمینال-های یکی از سیم‌پیچ‌ها به عنوان ورودی و ترمینال‌های سیم‌پیچ دیگر به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند. یک جریان (دی‌سی یا آسی) با مقدار مشخص به ورودی این دو قطبی اعمال شده و در این شرایط ولتاژ القا شده در دو سر سیم‌پیچ دیگر اندازه‌گیری می‌شود. با داشتن جریان ورودی و ولتاژ خروجی و با کمک رابطه (۲) می‌توان اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ را به دست آورد:

$$M=\frac{V_{induced}}{j(\omega)I_{applied}} \qquad (۲)$$

در رابطه (۲)، ω بیانگر فرکانس معادل عملکرد مولد است. ولتاژ القایی دو سر خروجی را نیز می‌توان با کمک معادلات ماکسول و از روی بردار پتانسیل مغناطیسی به دست آورد.

بر اساس روابط (۱) و (۲)، برای رسیدن به اندوکتانس‌های خودی و متقابل، نیاز به محاسبه بردار پتانسیل مغناطیسی ($\bar{A}$) می‌باشد. از معادلات ماکسول، بردار پتانسیل مغناطیسی را می‌توان برای یک سیستم با شرایط مرزی مشخص در حالت کلی به شکل رابطه (۳) نوشت:

$$\nabla^2\bar{A}=-\mu_0\bar{J} \qquad (۳)$$

در این رابطه، μ_0 گذردهی مغناطیسی خلأ، $\bar{J}=\sigma\bar{E}=-\sigma(\partial\bar{A}/\partial t)$ بردار چگالی جریان و σ رسانایی الکتریکی ویژه می‌باشد. با جایگزینی $\bar{J}$، رابطه (۳) به شکل رابطه (۴) در خواهد آمد:

$$\nabla^2\bar{A}-\sigma\mu_0\frac{\partial\bar{A}}{\partial t}=0 \qquad (۴)$$

در بخش‌هایی که جریان الکتریکی برقرار نباشد($\sigma=0$)، رابطه (۳) به معادله لاپلاس تبدیل خواهد شد:

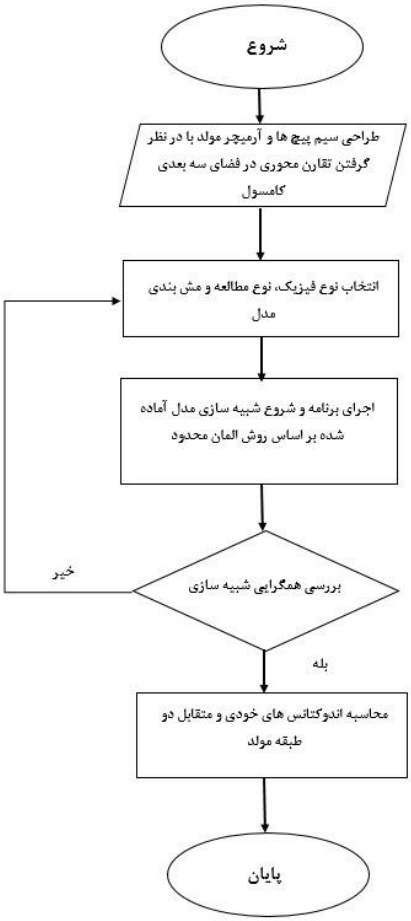
$$\nabla^2\bar{A}=0 \qquad (۵)$$

یک مولد فشرده سازی شار مارپیچی به شکل استوانه بوده و لذا استفاده از دستگاه مختصات استوانه‌ای برای تحلیل آن مناسب خواهد بود. با توجه به تقارن موجود در مولدهای مارپیچی، معادله (۳) در بخش‌های مختلف مولد به صورت معادله (۶) قابل بیان خواهد بود:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial^2A}{\partial z^2}+\frac{\partial^2A}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r}-\frac{A}{r^2}=0 && \textit{for free space}\\
&\frac{\partial^2A}{\partial z^2}+\frac{\partial^2A}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r}-\frac{A}{r^2}-\sigma\mu_0\frac{\partial A}{\partial t}=0 && \textit{for armature}\\
&\frac{\partial^2A}{\partial z^2}+\frac{\partial^2A}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial A}{\partial r}-\frac{A}{r^2}=-\sigma\mu_0 J && \textit{for windings}
\end{aligned} \qquad (۶)$$

با حل دستگاه معادلات (۶) بردار پتانسیل مغناطیسی به دست آمده و با استفاده از روابط (۱) و (۲) می‌توان اندوکتانس خودی و متقابل را به دست آورد.

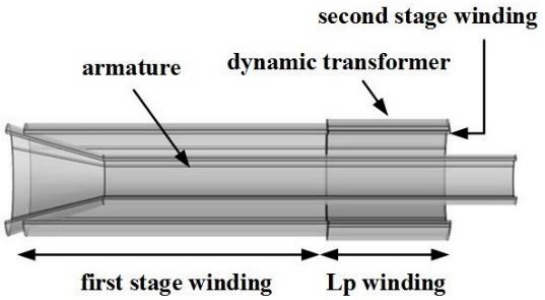
در این مقاله برای حل دستگاه معادلات (۶) و محاسبه اندوکتانس‌ها از روش عددی استفاده شده است. برای این منظور یک مدل سه بعدی از مولد با استفاده از نرم‌افزار کامسول ایجاد شده است. مراحل حل مساله با استفاده از نرم‌افزار به صورت یک فلوچارت در شکل (۱) آورده شده است.



شکل (۱): فلوچارت مدل سازی انجام شده با کامسول

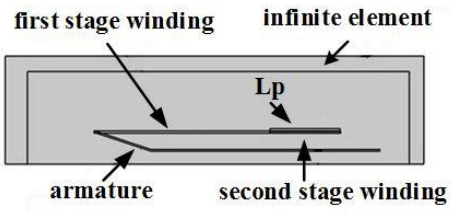
[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

شکل (۲) و (۳) به ترتیب شماتیک سه بعدی و دو بعدی بخش‌های مولد شامل سیم‌پیچ‌ها، آرمیچر و ترانسفورماتور دینامیکی را نشان می‌دهد. هر یک از سیم‌پیچ‌ها به صورت یک استوانه توخالی در نظر گرفته شده اند که سطح جانبی آن‌ها به صورت یک سیم‌پیچ چند دوری تعریف شده است. آرمیچر نیز به شکل یک استوانه بوده که به صورت یک سیم‌پیچ یک دوری مدل شده و مسیری برای عبور جریان خواهد بود.



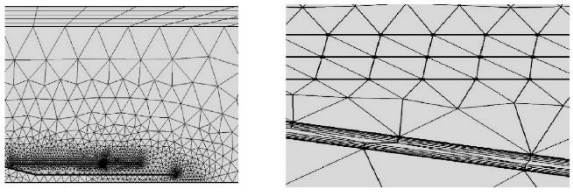
شکل (۲): مدل سه بعدی مولد دو طبقه

لازم به ذکر است که دینامیک آرمیچر و انبساط آن در این مدل لحاظ شده است و با شروع شبیه سازی، آرمیچر به صورت مخروطی منبسط خواهد شد. تمام فضاهای خالی بین سیم‌پیچ ها و آرمیچر نیز هوا بوده و رسانایی الکتریکی آن صفر در نظر گرفته شده است



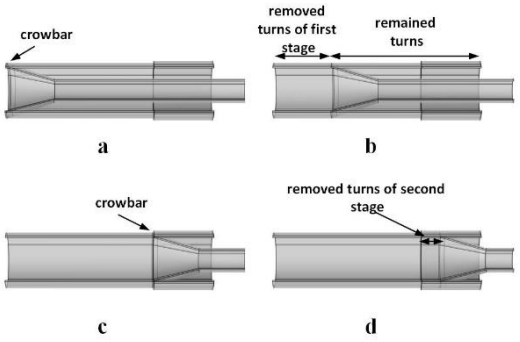
شکل (۳): شماتیک دو بعدی مولد مارپیچی

یکی از مهمترین موضوعات مرتبط با مدل‌سازی مولدهای مارپیچی، در نظر گرفتن اثر پوستی در آرمیچر است. از آنجائیکه پدیده اثر پوستی یک پدیده غیرخطی می‌باشد لذا رابطه تحلیلی برای محاسبه آن وجود ندارد. در مدل‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار کامسول برای مدل‌سازی اثر پوستی و نفوذ مغناطیسی در آرمیچر از ویژگی مش بندی لایه‌های مرزی[۶] استفاده شده است. مش‌بندی لایه‌های مرزی یک ویژگی از نرم‌افزارهای المان محدود می‌باشد که در آن مش بندی لایه‌های مرزی به صورت خاص و با چگالی بالا در راستای لایه‌های مرزی انجام می‌شود[۳۰]. این نوع مش بندی به منظور مدل‌سازی مسائل خاص فیزیکی شامل مکانیک سیالات یا اثر پوستی در الکترومغناطیس و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل (۴) نحوه مش بندی مولد مورد نظر را نشان می‌دهد. به منظور مشاهده دقیق مش بندی لایه مرزی، بخش آرمیچر با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که مش‌بندی در بخش آرمیچر در راستای دیواره آن بوده و همچنین چگالی مش در آن نسبت به دیگر بخش‌های مولد بیشتر است.



شکل (۴): نحوه مش‌بندی مولد و لایه‌های مرزی

در شکل (۵) چگونگی عملکرد مولد و پیشرفت انبساط آرمیچر در طول آن نشان داده شده است. بررسی شکل (۵) نشان می‌دهد که با پیشرفت آرمیچر، ابتدا حلقه‌های سیم‌پیچ طبقه اول و سپس سیم‌پیچ طبقه دوم یکی پس از دیگری از مدار خارج می‌شوند و در نهایت تنها سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور دینامیکی در مدار باقی خواهد ماند.



شکل(۵): نحوه عملکرد مولد و آرمیچر

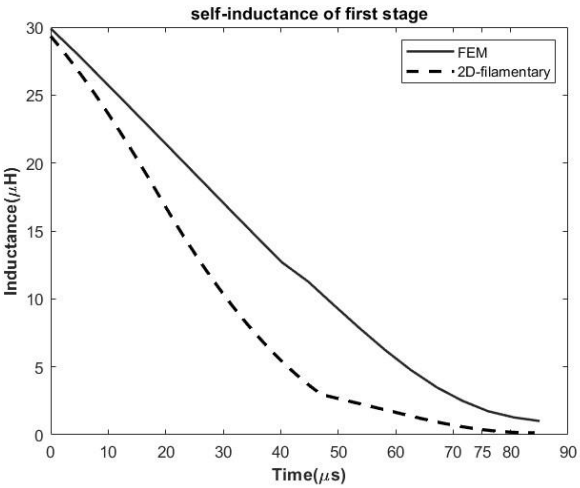
۳- نتایج شبیه سازی

همانطور که در بخش قبل ذکر شد محاسبه اندوکتانس های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های یک مولد مارپیچی با در نظر گرفتن دینامیک آرمیچر نیاز به حل معادلات غیر خطی دارد که یک فرآیند زمان‌بر و پیچیده است. از آنجایی‌که پروفایل اندوکتانس های خودی و متقابل هر یک از سیم‌پیچ‌های مولد برای مدل‌سازی و به دست آوردن پروفایل جریان‌های طبقات نیاز می‌باشد (حل دستگاه معادلات حاکم بر عملکرد مولد) لذا باید به کمک یک روش سریع و ساده این اندوکتانس‌ها را محاسبه کرد که این کار با استفاده از روش المان محدود سه بعدی انجام شده و نتایج حاصل در این بخش آورده شده است. به منظور اعتبار سنجی نتایج به دست آمده از این روش مدل سازی، یک برنامه کامپیوتری با استفاده از فیلمانی نوشته شده و نتایج حاصل، با نتایج مدل المان محدود مقایسه شده است. مشخصات مولد مارپیچی دو طبقه مدل‌سازی شده در ادامه بیان خواهد شد. سیم‌پیچ طبقه اول یک سیم‌پیچ با گام ثابت با تعداد ۴۲ دور و طول محوری ۳۰۰ میلی‌متر است. تعداد دور و طول سیم پیچ اولیه ترانسفورماتور دینامیکی به ترتیب ۴ دور و ۱۲۰ میلی‌متر می‌باشد. قطر داخلی سیم‌پیچ اولیه مولد برابر با ۱۱۵ میلی‌متر بوده و درون آن یک آرمیچر آلومینیومی با ضخامت دیواره ۳,۸ میلی‌متر قرار داده شده است. قطر خارجی آرمیچر ۵۰ میلی‌متر می‌باشد. سیم‌پیچ ثانویه مولد (ثانویه ترانسفورماتور دینامیکی) در زیر سیم‌پیچ اولیه مولد پیچیده شده و دارای طول ۱۲۰ میلی‌متر و تعداد

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

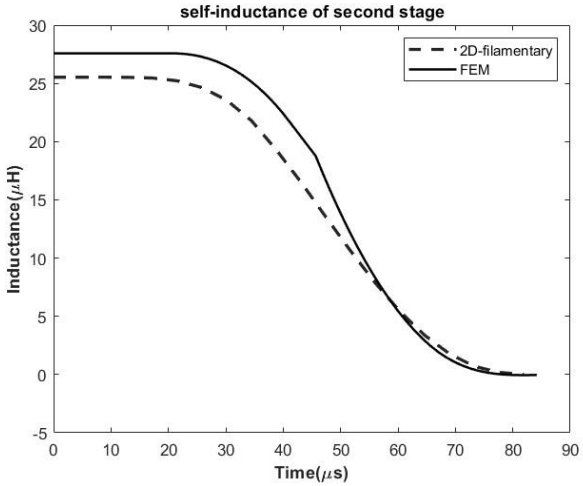
۳۰ دور است. سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور دینامیکی تمام سطح سیم‌پیچ ثانویه را می‌پوشاند که بیشترین کوپلاژ مغناطیسی بین دو سیم‌پیچ را به دنبال خواهد داشت. سرعت انتشار انفجار ناشی از مواد منفجره در این مولد معادل ۶۴۰۰ متر بر ثانیه خواهد بود. اطلاعات مربوط به نمونه عملی ساخته شده این مولد به همراه جزئیات بیشتر در مورد ساختار آن در [۳۱] آورده شده است.

به منظور محاسبه اندوکتانس خودی طبقه اول، سیم‌پیچ طبقه اول به یک جریان مشخص (در این مورد جریان ۱ آمپر) وصل شده و با استفاده از رابطه (۱)، پروفایل اندوکتانس خودی اولیه محاسبه شده است. از آنجایی‌که سیم‌پیچ طبقه اول مولد بر روی سیم پیچ طبقه دوم پیچیده شده است لذا در حین انبساط آرمیچر و پیشروی موج انفجار، هیچ اتصال الکتریکی بین آرمیچر و حلقه‌های سیم‌پیچ اولیه ترانسفوماتور دینامیکی برقرار نخواهد شد. به همین دلیل، آرمیچر نمی‌تواند حلقه‌های سیم‌پیچ اولیه ترانسفورماتور دینامیکی را از مدار خارج کند. از این لحظه تا پایان عملکرد مولد تعداد دورهای سیم‌پیچ طبقه اول ثابت مانده و تنها عامل کاهش اندوکتانس سیم پیچ طبقه اول، کاهش حجم گیر افتاده بین سیم‌پیچ و آرمیچر می‌باشد. به همین دلیل، مقدار نهایی اندوکتانس طبقه اول مولد یک مقدار کوچک غیر صفر خواهد بود. شکل (۶) پروفایل اندوکتانس طبقه اول مولد بر حسب زمان با استفاده از روش مدل المان محدود را نشان می‌دهد که در کنار آن پروفایل به دست آمده با کمک روش فیلمانی نیز آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار اولیه اندوکتانس به دست آمده از هر دو روش برابر با ۳۰ میکروهانری بوده که با مقدار واقعی اندوکتانس اولیه مولد که در مرجع [۳۱] آورده شده است برابری می‌کند. مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد که نتایج حاصل از دو روش بسیار نزدیک به هم بوده و بجز در چند نقطه، اختلاف ناچیز است.



شکل (۶): پروفایل اندوکتانس خودی طبقه اول

فرآیند محاسبه اندوکتانس خودی طبقه دوم مولد، دقیقاً مشابه طبقه اول می‌باشد. در این حالت نیز یک جریان (در اینجا ۱ آمپر) به دو سر سیم‌پیچ داده می‌شود. پروفایل اندوکتانس سیم‌پیچ طبقه دوم مولد، شبیه به طبقه اول است. با این تفاوت که تا زمانی که انبساط آرمیچر از طول طبقه اول گذر می‌کند، اندوکتانس تقریباً ثابت بوده زیرا حلقه‌های سیم‌پیچ طبقه دوم ثابت می‌باشند. با رسیدن انبساط آرمیچر به سیم‌پیچ طبقه دوم و خارج شدن حلقه‌های آن از مدار، اندوکتانس سیر نزولی را دنبال کرده و در پایان کار مولد و با خروج تمامی حلقه‌های سیم‌پیچ به مقدار صفر می‌رسد (بر خلاف اندوکتانس طبقه اول که مقدار نهایی غیر صفر دارد). شکل (۷) پروفایل اندوکتانس سیم‌پیچ طبقه دوم مولد با استفاده از مدل المان محدود و مدل فیلمانی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در این حالت نیز دو نمودار بسیار به هم نزدیک می‌باشند. مقدار اولیه اندوکتانس مولد عملی ساخته شده برابر با ۳۱ میکروهانری می‌باشد که با مقادیر حاصل از دو روش مورد نظر مطابقت دارد.

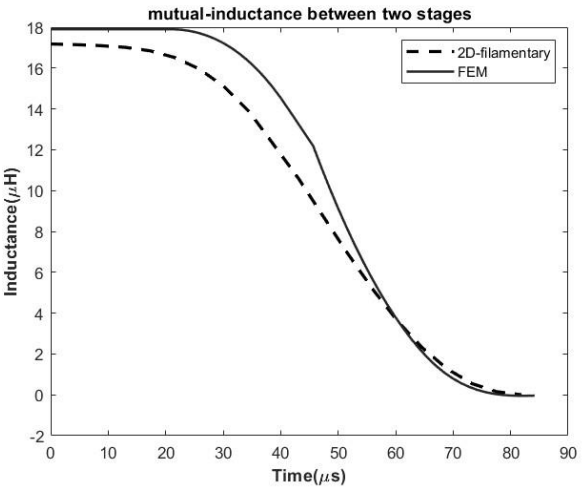


شکل (۷): پروفایل اندوکتانس خودی طبقه دوم

به طور کلی، دو روش برای به دست آوردن اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ هم محور با حضور یک آرمیچر (با در نظر گرفتن دینامیک آرمیچر) در مقالات پیشنهاد شده است. روش اول ساختن مولد و محاسبه اندوکتانس های مربوطه است که این روش علاوه بر زمان بر بودن، بسیار پر هزینه نیز خواهد بود. همچنین به دلیل مشکل بودن ثبت اطلاعات مولد در طول فرآیند فشرده سازی شار، فقط مقدار اولیه اندوکتانس را می‌توان براحتی محاسبه کرد. در [۲۵] استفاده از شبیه سازهای فیزیکی برای محاسبه اندوکتانس‌ها پیشنهاد شده است که ساختن این نوع شبیه سازهای نیز بسیار هزینه بر و زمان‌بر خواهد بود. روش دوم، استفاده از شبیه‌سازی عددی با کمک حل‌کننده های میدان-های مغناطیسی می‌باشد. در مدل المان محدود مورد نظر در این مقاله، مولد دو طبقه به عنوان یک دو قطبی با چهار ترمینال در نظر گرفته شده است. دو سر سیم‌پیچ طبقه اول ترمینالهای ورودی دو قطبی بوده که با یک جریان مشخص (به عنوان مثال ۱ آمپر) تغذیه می‌شوند. از طرفی دو سر سیم‌پیچ طبقه دوم به عنوان ترمینالهای خروجی مولد در نظر گرفته شده و ولتاژ مدار باز آن محاسبه می‌شود. با کمک رابطه (۲) و جریان ورودی و ولتاژ مدار باز مولد، اندوکتانس متقابل بین دو سیم‌پیچ قابل محاسبه خواهد بود. شکل (۸) پروفایل اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ با در نظر گرفتن دینامیک آرمیچر را نشان می‌دهد.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

اندوکتانس متقابل بین دو طبقه در ابتدای کار مولد شیب نزولی بسیار کمی داشته و تقریباً ثابت می‌باشد. دلیل این رفتار، همپوشانی بین دو سیم‌پیچ در بخش پایانی است. زیرا قسمت‌های ابتدایی سیم‌پیچ طبقه اول، هیچ‌گونه همپوشانی با طبقه دوم مولد ندارد و بهمین دلیل نقشی در اندوکتانس متقابل ایفا نمی‌کنند. در واقع دلیل کاهش بسیار ناچیز در مقدار اندوکتانس در بخش های ابتدایی نمودار، کاهش حجم بین سیم‌پیچ ها و آرمیچر بخاطر انبساط آرمیچر می‌باشد. با رسیدن انبساط آرمیچر به محل کروبار و خروج حلقه‌های طبقه دوم مولد، اندوکتانس متقابل با شیب نسبتاً زیادی شروع به کاهش می‌کند و در نهایت به صفر می‌رسد.



شکل (۸): پروفایل اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله پروفایل اندوکتانس‌های خودی و متقابل یک مولد فشره سازی شار مارپیچی دو طبقه با استفاده از روش المان محدود بر حسب زمان محاسبه گردید. در این روش ابتدا با حل معادله لاپلاس، بردار پتانسیل مغناطیسی در بخش‌های مختلف مولد محاسبه شده سپس با استفاده از روابط تعریف کننده، پروفایل اندوکتانس‌ها با حضور آرمیچر و در نظر گرفتن دینامیک آن به دست آمد. به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده، اندوکتانس‌های مذکور با استفاده از روش فیلمانی نیز محاسبه شده و با نتایج روش المان محدود مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج هر دو روش تقریباً نزدیک به یکدیگر می‌باشد. لازم به ذکر است که در مدل المان محدود پدیده نفوذ شار مغناطیسی به دیواره آرمیچر در نظر گرفته شده در حالی که روش فیلمانی به کار گرفته شده از مدل‌سازی این پدیده ناتوان است.

مراجع

[1] Altgilbers, Larry L., Igor Grishnaev, Ivor R. Smith, Yuriy Tkach, Mark DJ Brown, Bucur M. Novac, Iaroslav Tkach., *Magnetocumulative generators*, Springer, New York, 2000.

[2] W. L. Atchison, J. H. Goforth, I. R. Lindemuth, R. E. Reinovsky, "*Modeling and Analysis of the Ranchero Coaxial Explosive Pulsed Power Generator System*", 12th IEEE Int. Pulsed Power Conf, pp. 332-335, 1999.

[3] Saburi, T., Kubota, S., Wada, Y., & Yoshida, M. *Development of numerical code for physical hazard analysis of high-energy materials*. Sci Technol Energetic Mater, 74, 2013.

[4] Vunni, George B., Anthony Johnson, and Peter Bartkowski. *ALE3D Magneto-Hydrodynamic (MHD) Modeling of a New ARL Squeeze 5 Magnetic Flux Compression Generator*. US Army Research Laboratory, 2018.

[5] Vunni, George B., and Anthony J. Johnson. *ALE3D-Magnetohydrodynamic Simulation of a Small Helical Magnetic Flux Generator*. ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MDSWEDISH DEFENCE RESEARCH AGENCY LINKOEPINGLAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LAB CA, 2020.

[6] D. A. White, R. N. Rieben, B. K. Wallin, "*Coopling magnetic Fields and ALE Hydrodynamics for 3D Simulations of MFCGs*", in Proc. IEEE Int. Conf. on Megagausse Magnetic Field Generation and Related Topics, pp. 371-376, 2006.

[7] Kiuttu, Gerald F., Jay B. Chase, Donna M. Chato, Giles G. Peterson. "*Recent advances in modeling helical FCGs*", In 2006 IEEE International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, pp. 255-264, 2006.

[8] Sijoy, C. D., and S. Chaturvedi. "Three-dimensional calculations of electrical parameters in flux compression systems." In 2006 IEEE International Conference on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, pp. 385-390. IEEE, 2006.

[9] Novac, B. M., I. R. Smith, "*Fast numerical modelling and design issues of helical flux compression generators.*" In Pulsed Power Conference, 2003. Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International, Vol. 1, pp. 417-420, 2003.

[10] Appelgren, Patrik, Nils Brenning, Tomas Hurtig, Anders Larsson, Bucur M. Novac, Sten E. Nyholm, "*Modeling of a small helical magnetic flux-compression generator*", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 36, No. 5, 2008.

[11] L'Eplattenier, Pierre, Mathias Bavay, Gilles Avrillaud, B. Lalle, "*0D numerical modelisation and optimization of flux compression experiments*", In Pulsed Power Plasma Science, 2001. PPPS-2001. Digest of Technical Papers, Vol. 1, pp. 665-668, 2001.

[12] B. M. Novac, I. R. Smith, M. Hubbard, "*2-D Modeling of Electromagnetic Flux-Compression in θ-Pinch Geometry*", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 32, No. 5, pp. 1896-1901, Oct. 2004.

[13] B. M. Novac, I. R. Smith, "*Electromagnetic Flux-Compression: Detailed Two-dimensional Modelling*", 14th IEEE Int. Pulsed Power Conf, pp. 1305-1308, 2003.

[14] B. M. Novac, I. R. Smith, "*Loughborough 2-D Simulation of MURI Flux-Compression Generators*", IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 30, No. 5, pp. 1654-1658, Oct. 2003.

[15] Pak, Semyon V., Leonid P. Babich, and Andreĭ V. Ivanovskiĭ. "*Fundamentals of electrodynamic technique of numerical designing of helical high-explosive magnetic generators*." IEEE Transactions on Plasma Science 43, no. 8, 2015.

[16] B. M. Novac, I. R. Smith, M. C. Enache, "*Accurate Modeling of the Proximity Effect in Helical Flux-*

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

زیرنویس‌ها

[1] Magneto-Hydro Dynamic
[2] Eulerian
[3] Lagrangian
[4] Arbitrary Lagrangian-Eulerian
[5] Circuit-Based Method
[6] Boundary Layer Meshing Feature

Compression Generators ", IEEE Trans. Plasma Sci. Vol. 28, No. 5, pp. 1353-1355, Oct. 2000.
[17] Baird J, Worsey PN, "*The causes of armature surface fracturing within helical flux-compression generators*", IEEE transactions on plasma science. Vol. 30(5), pp: 1647-1653, 2002.
[18] C. D. Sijoy, Sh. Chaturvedi, "*Calculation of Accurate Resistance and Inductance for Complex Magnetic Coils Using the Finite-Difference Time-Domain Technique for Electromagnetics*", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 36, No. 1, pp. 70-79, Feb. 2008.
[19] Enache MC, Novac BM, Smith IR, "*Three-dimensional modelling of helical flux-compression generators*", In IEEE Pulsed Power Conference, Vol. 1, pp. 253-255, 1999.
[20] Zhenhao, Li, Cao Quanliang, and Lai Zhipeng. *"Application of current filament method on the calculation of current and force in electromagnetic forming."* Transactions of China Electrotechnical Society 33, no. 18, 2018.
[21] Kiuttu, Gerald F., Jay B. Chase. "*An armature-stator contact resistance model for explosively driven helical magnetic flux compression generators*", In Pulsed Power Conference, pp. 435-440. IEEE, 2005.
[22] Chase, Jay B., Gerald F. Kiuttu, Donna M. Chato, Giles Peterson, "*Benchmarking the Care'n Co. Flux Compression Generator Code, CAGEN, Implementing the Kiuttu Contact Resistance Model*", In Pulsed Power Conference, pp. 521-524. IEEE, 2005.
[23] Haurylavets, V. V., V. V. Tikhomirov, "*Two-dimensional model of intrinsic magnetic flux losses in helical flux compression generators*", arXiv preprint arXiv: 1209. 5633, 2012.
[24] Khanzade MH, Alinejad-Beromi Y, Shoulaie A. "*Calculation of turn skipping losses in helical flux compression generators*", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol 1; No. 40, 2012.
[25] Khanzade MH, Alinejad-Beromi Y, Shoulaie A, "*Accurate modeling of the eddy current effects in helical flux compression generators using 2-dimensional filamentary method in frequency domain*", International Review on Modelling and Simulations, 2(4):433-7, 2009.
[26] Khanzade MH, Alinejad-Beromi Y, Shoulaie A. "*Calculation of time-varying equivalent inductance and resistance of helical flux compression generators using the 2D filamentary method and dynamic matrix concept in the frequency domain*", Chinese Physics B. Vol. 19, 2010.
[27] Grover, Frederick W. *Inductance calculations: working formulas and tables*, Courier Corporation, 2004.
[28] Budnik, Krzysztof, Wojciech Machczyński. "*Inductances of coaxial helical conductors*", Computer Applications in Electrical Engineering, 2012.
[29] Anele, A. O., Y. Hamam, L. Chassagne, J. Linares, Y. Alayli, Karim Djouani. "*Evaluation of the magnetic fields and mutual inductance between circular coils arbitrarily positioned in space*", In Journal of Physics: Conference Series, Vol. 633, No. 1, p. 012012. IOP Publishing, 2015.
[30] Tominaka, Toshiharu. "*Self-and mutual inductances of long coaxial helical conductors."* Superconductor Science and Technology 21, no. 1, 2007.
[31] R. W. Peryor, *multiphysics modeling using comsol*, Jones and Bartlett Publishers, Canada, 2011.
[32] D. Q. Chen, "*Research on Dynamic-Cascaded Helical Explosively-driven Magnetic Flux Compression Generators*", Doctoral Dissertation, Changsha, P.R. China, 2015.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]

Calculation of Electrical Parameters of Two Stage-Helical Magnetic Flux Compression Generator

Mohammad Jafarifar

Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran.
mohammad.jafarifar@gmail.com

Abstract:

Helical magnetic flux compression generators (HFCG) and Two Stage-Helical flux compression generator (TS-HFCG) have been widely used to produce very high current pulses for many applications in recent decades. In order to accurate analysis and optimized design of these generators, it is necessary to calculate their electrical parameters. Among these electrical parameters, calculating the self and mutual inductances is important because it reduces the design and construction costs. In this paper, the calculation of self-inductance and mutual inductance profiles of TS-HFCGs is carried out using a three dimensional numerical method in the presence of an armature and its dynamic. For this purpose, the Maxwell equations governing the system are expressed in different parts, and then, using the utility software, the equations are solved and the inductances are obtained. In order to validate the results, a computer program is written in MATLAB based on the filamentary method and the results are compared.

Keywords: Two Stage Helical Generator; Armature Dynamic; Finite Element Method; Inductance Profile; Filamentary Method.

[DOR: 20.1001.1.23222468.1402.12.1.1.0]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 12-No. 1- Spring 2023
[Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-13]