نشریه علمی «الکترومغناطیس کاربردی»
سال هفتم، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۸؛ ص ۲۴- ۱۷

طراحی ساختار جدید برای سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در سامانه انتقال توان بی‌سیم با خاصیت حساسیت پایین در برابر جابجایی و نامیزانی

فرنگیس طبیبی[۱]، سیدمهدی میرایمانی[۲*]، جعفر ادبی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۸/۰۶/۰۹، پذیرش: ۹۸/۰۹/۲۱)

چکیده

انتقال توان از منبع به بار توسط سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده از مهم‌ترین بخش‌های سامانه انتقال بی‌سیم برق می‌باشد. به‌طور حتم طراحی ساختاری مناسب برای این سیم‌پیچ‌ها می‌تواند عواملی چون اندوکتانس متقابل، ضریب کوپل، بازده و عملکرد سامانه را بهبود بخشد. در این مقاله به بررسی و ارائه یک ساختار جدید برای سیم‌پیچی فرستنده و گیرنده با حساسیت کم در برابر نامیزانی و جابجایی سیم‌پیچ‌ها در مقایسه با ساختارهای قبلی در راستاهای مختلف پرداخته شده است. در واقع با انتخاب شکل خاص برای هسته سیم‌پیچی و استفاده از کامپوزیت مغناطیسی نرم (SMC) برای ساختار هسته اندوکتانس متقابل و بازده بهبود داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار فلاکس به تصدیق و برتری نتایج ساختار جدید نسبت به سایر ساختارها پرداخته خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: جابجایی سیم‌پیچ، کامپوزیت مغناطیسی نرم، جفت‌شدگی نوسانی، ساختار سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده، انتقال توان بی‌سیم

۱. مقدمه

ایده انتقال توان بی‌سیم تقریباً به‌اندازه خود تولید برق قدمت دارد. در آغاز قرن بیستم، نیکلا تسلا پیشنهاد استفاده از سیم‌پیچ‌های بزرگ برای انتقال برق از طریق لایه تروپوسفر و اتمسفر به خانه‌ها را داد [۱]. انتقال نیروی برق بدون استفاده از سیم، از رؤیاهای دیرینه به شمار می‌رود؛ اما با پیشرفت‌های مهندسی، ابزارهای همراه و خودروهای الکتریکی، این رؤیا در حال به وقوع پیوستن است. انتقال توان از منبع به بار توسط سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده از اساسی‌ترین و مهم‌ترین بخش‌های سامانه انتقال برق بی‌سیم می‌باشد. مسلماً طراحی ساختاری مناسب برای این سیم‌پیچ‌ها می‌تواند بازده و عملکرد سامانه را بهبود دهد. این سیم‌پیچ‌ها با جهت‌گیری و ساختارهای گوناگون، به میزان متفاوتی انرژی را منتقل می‌کنند. درواقع این ساختارها وضعیت قرار گرفتن آن‌ها نسبت به یکدیگر به کاهش یا افزایش اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها می‌انجامد و با افزایش اندوکتانس متقابل[۲] به افزایش ضریب جفت‌شدگی[۳] مغناطیسی فلذا بالا رفتن بازده سامانه منجر می‌گردد [۲].

$$F = k^2 Q_T Q_R = \frac{Q_T M^2}{r_R L_T \sqrt{L_R C_R}} \qquad (۱)$$

طبق رابطه (۱) تابع بازده با توان دوم اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌ها نسبت مستقیم دارد. با افزایش اندوکتانس متقابل به افزایش ضریب جفت‌شدگی مغناطیسی سامانه کمک نموده فلذا بالا رفتن بازده منجر می‌گردد.

در این رابطه $F(\eta)$ تابع بازده، k ضریب کوپل مغناطیسی، Q_2 و Q_1 ضرایب کیفیت سمت گیرنده و فرستنده، M اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌ها، r_2 مقاومت گیرنده، L_2 و L_1 اندوکتانس‌های خودی گیرنده و فرستنده و C_2 خازن سمت گیرنده می‌باشد. جهت بهبود تابع بازده تنها ضریب کوپل، ضریب کیفیت سیم‌پیچی فرستنده و مقاومت سمت گیرنده قابل تغییر است زیرا مقادیر L و C تحت فرکانس کاری سامانه مقدار پیدا می‌کنند و از دست طراح خارج است.

در ارتباط با ساختار سیم‌پیچی مورد استفاده تاکنون ساختارهای متفاوتی ارائه‌شده است که بسته به نوع نیاز در کاربری‌های متفاوت ازجمله خودروی برقی یا تلفن‌های همراه برای مثال بیشینه دریافت انرژی، کاهش تلفات و یا افزایش برد القاء شکل و خواص منحصربه‌فرد خود را دارند. در برخی از

* نویسنده پاسخگو: Mirimani@nit.ac.ir

[2] Mutual Inductance
[3] Coupling Coefficient

مقالات قرار دادن هسته‌های آهنی یا فریت به‌منظور کاهش جریان تحریک، افزایش اندوکتانس تولیدی به‌منظور القای متقابل و در نتیجه‌ی آن افزایش بازده سامانه دیده‌شده است که به‌مراتب مشکلاتی ازجمله اشباع سیم‌پیچی و شکل موج جریان غیرخطی و تلفات هیسترزیس را به همراه خواهد داشت. همین‌طور بررسی و مطالعه روی جنس هسته موردنیاز آن‌ها از دیگر مشخصاتی است که نقش به‌سزایی در میزان توان انتقالی خواهد داشت.

در [۳] ساختارهای صفحه‌ای پیشنهاد شده که برای کاربردهای خاص ازجمله شارژ ادوات الکترونیکی و شارژ خودروهای برقی مورداستفاده قرار می‌گیرند، تنها برای کاربردهای فواصل نزدیک مناسب می‌باشند. اما لازم به ذکر است که به‌رغم اینکه درست در مجاورت سیم‌پیچی، بازدهی دستگاه خیلی خوب است ولی وقتی‌که حتی تنها چند سانتی‌متر فاصله وجود داشته باشد، این بازدهی به صفر می‌رسد. لذا معایبی چون برد بسیار کم، حساسیت زیاد به جهت‌گیری نسبی سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده و لزوم استفاده از سیم‌پیچ‌های بزرگ از معایب این ساختار می‌باشد.

در ساختارهای تک نوعی[۱] و دو نوعی[۲] که مورداستفاده در بزرگراه‌ها جهت تعبیه شدن در کف جاده‌ها قرار می‌گیرند، اثر افزایش ضریب نفوذپذیری روی میزان رلوکتانس بررسی شده است. در این دو ساختار سعی بر آن شد با استفاده از هسته EE و UU شکل از جنس فریت بتوان رلوکتانس مسیر عبور شار را کاهش داد و طبق وجود رابطه عکس میان رلوکتانس و ضریب کوپل، می‌توان ضریب کوپل میان سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده را افزایش داد. برخلاف این ساختار که سیم‌بندی روی بازوهای هسته‌های E وU شکل پیچیده می‌شوند و تقریباً طول سیم موردنیاز سیم‌بندی به‌طور نسبی زیاد است، در ساختار پیشنهادی این پایان‌نامه با نازک کردن محور سیم‌بندی هسته، علاوه برافزایش ضریب پرمابلیه به کاهش طول سیم‌بندی جهت کاهش هرچه بیشتر رلوکتانس مسیر کوشیده است. لذا به ضریب کوپل بالاتر و درنتیجه بازده بیشتر دست یافته است [۴].

همین‌طور در ساختارهای مرسوم استوانه‌ای[۳] با توجه به وزن بالای فریت استفاده‌شده مقرون‌به‌صرفه نمی‌باشند. دیگر ساختار موجود برای سیم‌پیچ‌های گیرنده، ساختارهای هسته طبلی بودند[۴] که این ساختارها با داشتن سطوح بزرگ طبلی شکل به دریافت هرچه بیشتر انرژی کمک می‌کنند [۵]. اما نکته قابل توجه در مورد این ساختار این است که طی چرخش‌های زاویه‌ای سیم‌پیچی‌ها نسبت به یکدیگر، تنها در حالتی که سیم‌پیچ‌ها متحدالمرکز می‌باشند اندوکتانس متقابل میان آن‌ها بیشینه است و با تغییرات زاویه‌ای این سیم‌پیچ‌ها اندوکتانس دستخوش تغییر شده و در مواردی نیز این کاهش با شدت بسیاری همراه خواهد بود. بازهم در ساختار پیشنهادی طراحی منحصربه‌فرد سیم‌پیچی گیرنده و البته بهره‌گیری از این خاصیت سطح بزرگ‌تر در فرستنده و گیرنده، اثر تغییرات زاویه‌ای روی میزان اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها به‌شدت کاهش داده شده است.

آخرین ساختار مورد بررسی ساختار سیم‌بندی تک لایه‌ای[۵] برای گیرنده می‌باشد که با استفاده از هسته‌های یکپارچه ساختار جدیدی را ارائه داده‌اند [۶]. در این مقاله بهترین وضعیت برای حالتی در نظر گرفته شده است که سیم‌پیچ‌ها در جابجایی صفر نسبت به یکدیگر قرار دارند و کاملاً در یک راستا و جهت می‌باشند و تمامی محاسبات و نتایج خود را در حالت تراز[۶] انجام داده‌اند. در اینجا این سؤال پیش می‌آید که اگر برای کاربردی خاص نیاز به تغییر وضعیت سیم‌پیچ‌ها نسبت به یک‌دیگر پیش آید آیا این ساختار می‌تواند مؤثر واقع شود؟

در این مقاله به طراحی ساختاری جدید برای سیم‌پیچ‌ها پرداخته‌شده و اثر جابجایی‌های افقی، عمودی و زاویه‌ای بر روی ساختار پیشنهادی با شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای فلاکس و متلب انجام‌گرفته است. ساختار پیشنهادی علاوه بر حساسیت کمتر نسبت به جابجایی‌های راستاهای افقی و عمودی، در جابجایی‌های زاویه‌ای نیز به علت طراحی خاص سیم‌پیچی و انحنای موجود در کناره‌ها رفتار مناسب‌تری نسبت به سایر ساختارهای مشابه خود در همان اندازه نشان می‌دهد. درواقع این ثابت بودن[۷] نسبی اندوکتانس متقابل در این ساختار در برابر تغییرات زاویه‌ای این اجازه را می‌دهد که در کاربردهای خاص انتقال توان بی‌سیم عملکرد بهتری داشته باشد.

در بخش ۲ به اساس طراحی سیم پیچ پیشنهادی سامانه انتقال، در بخش ۳ به مقایسه ساختار هسته‌های فریتی و کامپوزیت مغناطیسی نرم[۸]، در بخش ۴ به معرفی مبدل مورد استفاده در سامانه، در بخش ۵ شبیه‌سازی با نرم‌افزار FEM فلاکس و مقایسه نتایج با چند ساختار قبلی پرداخته شده است. بخش ۶ نتیجه‌گیری و در پایان مراجع مقاله را مشاهده خواهید نمود.

[1] Mono Type
[2] Dual Type
[3] Cylindrical
[4] Drum Core
[5] Single Layer Winding
[6] Misalignment=0
[7] Robust
[8] SMC

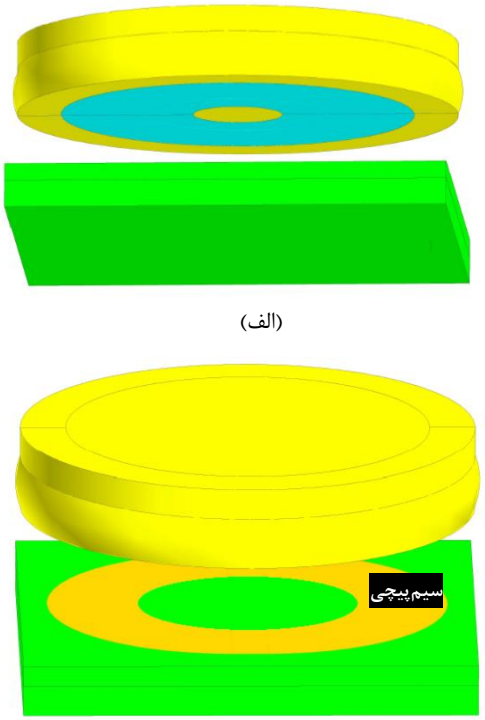
۲. طراحی ساختار پیشنهادی

در سامانه انتقال بی‌سیم افزایش ضریب کوپل به‌منظور افزایش بازده مهم‌ترین پارامتر به‌حساب می‌آید و این میسر نیست مگر با بیشینه نمودن اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده. همان‌گونه که پیش‌تر گفته شد بهترین وضعیت جهت داشتن بیشترین میزان اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها، در حالت متحدالمرکز بودن (قرار داشتن مرکز سیم‌پیچ‌ها روی یک محور) آن‌هاست. در واقع در این وضعیت سیم‌پیچ‌ها در مناسب‌ترین حالت جهت انتقال انرژی قرار می‌گیرند. اما اندکی تغییرات در راستاهای مختلف به کاهش زیاد اندوکتانس متقابل حتی در مواردی کاهش صددرصدی آن می‌انجامد.

بر طبق مقالات حیطه الکترومغناطیس خطوط شار مغناطیسی در زوایا و گوشه‌های ساختار تمایل به متمرکز شدن دارند. این قضیه به‌علت نامتقارنی چگالی شار مغناطیسی است. در ساختارهای متداول خطوط شار عمدتا در کناره‌های سیم‌پیچی در مجاورت هوا قرار می‌گرفت و باتوجه به ضریب نفوذپذیری[1] پایین هوا، رلوکتانس مسیر زیاد و موجب بوجود آمدن جریان گردشی[2] در کناره‌های ساختار می‌شود. به‌همین دلیل در ساختار پیشنهادی با طراحی خاص برای گیرنده تمرکز خطوط شار مغناطیسی را در نواحی هسته‌ی خاصی از جنس کامپوزیت مغناطیسی نرم که به تفضیل در بخش فلان به آن پرداخته خواهد شد، نگه‌داشته و با توجه ساختار و ویژگی های خاص این کامپوزیت‌ها از تولید جریان گردشی و ایجاد تلفات مقاومتی جلوگیری شده است.

همچنین در این ساختار همان‌طور که در شکل (۱) قابل مشاهده است، مقاطع سیم‌پیچی را بزرگ در نظر گرفته شده تا میزان پوشش‌دهی گیرنده برای دریافت هرچه بیشتر انرژی از فرستنده به حداکثر خود برسد. اما نکته‌ی قابل توجه در مورد ساختار پیشنهادی زمانی است که سیم‌پیچ‌ها در موقعیتی غیر از هم‌مرکز بودن قرار گیرند. میزان شار مغناطیسی انتقالی با تغییر موقعیت X ,Y کاهش می‌یابد و در حالتی که جابجایی زاویه‌ای نیز به آن افزوده شود، این کاهش بسیار چشم‌گیر خواهد بود. راه‌کار پیشنهادی جهت این مشکل این است که گوشه‌های سیم‌پیچی گیرنده دارای انحنای دایروی شود تا تقارن در کناره‌ها و نقاطی از سیم‌پیچ‌ها که در اثر تغییرات زاویه‌ای ممکن است در موقعیت نامناسبی نسبت به فرستنده قرار گفته باشد از لحاظ کاهش اندوکتانس متقابل خیلی دستخوش تغییر نشود.

[1] Permeability
[2] Eddy Current



(الف)

(ب)

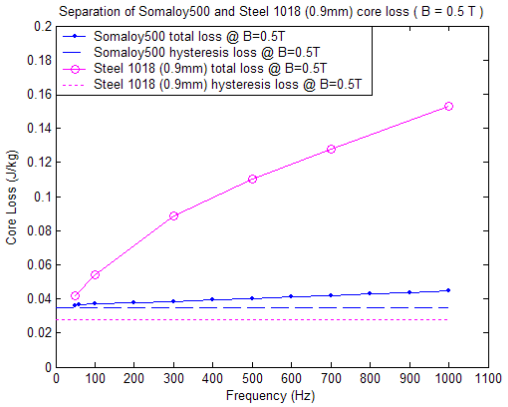
شکل (۱): شبیه‌سازی Flux ساختار سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده؛ (الف) نمای روبروی سیم‌پیچی فرستنده، (ب) گیرنده.

۳. مقایسه ساختارهای فریتی و کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم (SMC)

باتوجه به ضریب نفوذپذیری پایین هوا و وجود مسیرهای هوایی برای عبور شار از هسته‌های فریتی و آهنی جهت متمرکز کردن خطوط شار مغناطیسی و عبور آن‌ها از مسیرهایی با ضریب نفوذپذیری بالا به کاهش رلوکتانس مسیر و افزایش ضریب کوپل مغناطیسی استفاده می‌شود. در اکثر ماشین‌های الکتریکی از فولادهای الکتریکی استفاده می‌شود. به‌منظور بهبود کارایی دستگاه ضروری است که تمام تلفات ذاتی مانند تلفات آهن، تلفات مغناطیسی، تلفات اصطکاکی و تلفات حرارتی کاهش یابد. تلفات آهن می‌تواند به‌عنوان مجموع مقدار تلفات هیسترزیس وابسته به فرکانس خطی، تلفات جریان فوکو افزایش با توان دوم فرکانس و تلفات غیرطبیعی تعریف می‌شود. در میدان‌های مغناطیسی متناوب با فرکانس بالا، مواد کامپوزیتی مغناطیسی به‌عنوان یک عایق به جریان فوکو عمل می‌کنند و به همین دلیل تلفات آهنی را کم می‌کنند. استفاده بهینه از این مواد می‌تواند چگالی توان دستگاه الکتریکی را افزایش دهد [۷].

شکل (۲): ذرات احاطه‌شده پودر آهن در ماده عایق.

توزیع تلفات مغناطیسی در هسته‌های کامپوزیتی از رفتار هسته‌های ورقه‌ورقه به علت ساختار متفاوتی از مواد ماده فرومغناطیسی متفاوت است. تلفات هیسترزیس هسته‌های کامپوزیتی بالاتر است و تلفات جریان فوکو در اثر تلفات داخلی درون ذرات حاصل می‌شود. مقدار فرکانس نقطه انتقال بستگی به ضخامت اسمی فولاد قابل‌مقایسه و می‌تواند برای نمرات تجاری معمول بین ۵۰۰ Hz تا ۱۵۰۰Hz متفاوت باشد. بنابراین، استفاده از این مواد برای دستگاه‌هایی که در فرکانس بالا عمل می‌کنند یا برای ماشین‌های با مقدار قابل‌توجهی از هارمونیک‌های بالاتر، جالب می‌شود. طبق نمودار شکل (۳) اگرچه تلفات هیسترزیس در کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم بیشتر از ساختارهای متداول آهن است اما مشخصه تلفات فوکوی بهتر و کمتر درمجموع تلفات هسته را برای این جنس هسته در فرکانس‌های بالا کمتر و ساختار مورد قبول‌تر می‌باشد [۸].



شکل (۳): منحنی مقایسه هسته‌های استیل با SMC در تلفات هیسترزیس و کل.

در قطعات الکترو مغناطیسی ساخته شده با روش پودر که در شکل (۲) بصورت گرافیکی نمایش داده شده‌است، از آن جا که اولا یک لایه هوا یا ماده عایق ذرات پودر را احاطه کرده و ثانیا مسیر جریان های گردابی به تک تک دانه های مجزا از هم محدود شده، کنترل جریان های گردابی به صورت بسیار موثر تری انجام می‌شود و در نهایت تلفات هسته کاهش می‌یابد.

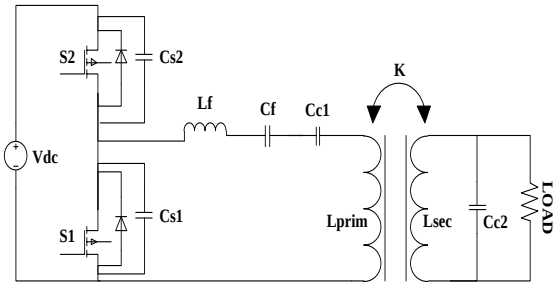
کامپوزیت‌های مغناطیسی نرم به واسطه طبیعت پودر، خواص مغناطیسی همسانگردی در سه بعد دارند. این همسانگردی خواص، به‌عنوان یک مزیت بسیار بزرگ در طراحی وسایل الکترومغناطیسی محسوب می‌شود [۹-۱۰].

همچنین، در میدان های مغناطیسی متناوب با فرکانس بالا، مواد SMC به‌عنوان یک عایق به جریان فوکو عمل می‌کنند و به همین دلیل تلفات آهنی را کم می‌کنند استفاده بهینه از SMC می‌تواند چگالی توان دستگاه الکتریکی را افزایش دهد.

شکل‌پذیری راحت بر خلاف فریت (اشکال پیچیده می‌تواند به‌طور مستقیم بدون تخریب ساختار مواد و بدتر شدن خواص مغناطیسی فشرده شود.) یکی دیگر از مزیت‌های این ساختار نسبت به نوع فریت می‌باشد.

۴. مبدل نوسانی سامانه انتقال

آمپلی‌فایر کلاس DE اخیرا کشف شده است. امروزه استفاده از آن‌ها به‌خصوص در حیطه الکترونیک قدرت و سامانه‌های انتقال بی‌سیم به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. بازده این آمپلی‌فایر در فرکانس‌های بالا بسیار بالاتر از نوع مشابه خود در کلاس D و حتی در فرکانس کاری پایین‌تر است. یک آمپلی‌فایر کلاس DE همانند شکل (۴) از دو کلید سری که دو خازن با آن‌ها موازی هستند، یک منبع DC نیز موازی کلیدها، یک سلف و خازن سری نیز در سر وسط دو کلید و در نهایت یک بار سری با مدار تشکیل شده است.



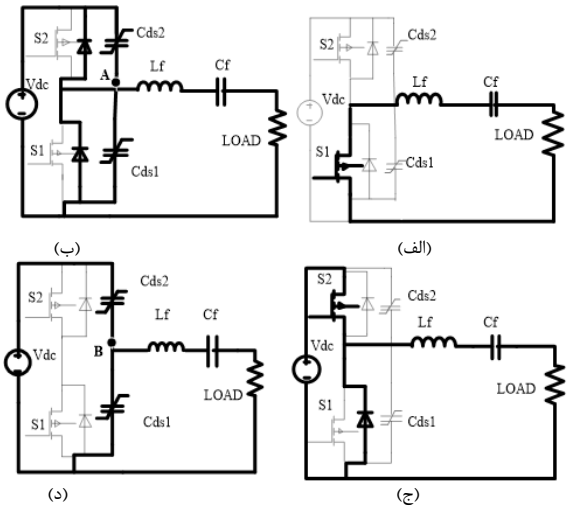
شکل (۴): اینورتر نوسانی کلاس DE.

به‌راحتی می‌توان گفت که این آمپلی‌فایر، مزایای هردو آمپلی‌فایرهای کلاس D و E را دارد و کمبودها و معایب آن‌ها را با این تلفیق از بین‌می‌برد [۱۱]. در این آمپلی‌فایر به‌دلیل وجود دو کلید همانند مبدل کلاس D استرس ولتاژ روی کلیدها کمتر شده و این نسبت به مبدل کلاس E تک‌کلید، یک مزیت به‌شمار می‌رود. همین‌طور توان خروجی همانند اینورتر کلاس E بیشتر از خروجی توان در کلاس D خواهد بود لذا شکل موج‌های مبدل

کلاس DE شامل شکل‌موج‌های هر دو کلاس D و E می‌باشد [۱۲].

حالت‌های عملکردی مبدل‌های نوسانی به امپدانس بستگی دارد. در واقع می‌توان گفت در این اینورتر جریان تانک از ولتاژ کلید عقب مانده و لحظه عبور از صفر ولتاژ، سریع‌تر از لحظه به صفر رسیدن جریان خواهد بود. وصل شدن کلید زمانی رخ می‌دهد که جریان منفی است و دیود موازی معکوس شده کلید درحال هدایت است یعنی زمان وصل شدن کلید در زمان صفر بودن ولتاژش رخ می‌دهد و این همان کلیدزنی حالت صفر است [۱۳]. در این حالت تلفات حالت روشن شدن کلید حذف می‌شود.

زیربازه‌های تحلیل عملکرد مبدل در شکل (۵) آورده شده است. پس از تحلیل در این ۴ زیربازه می‌توان به راحتی با استفاده از فرمول‌های به‌دست‌آمده که به‌صورت خلاصه در زیر نوشته شده‌اند، پارامترهای سلفی و خازنی سامانه را محاسبه کرد.



شکل (۵): زیربازه‌های عبور جریان در اینورتر نوسانی کلاس DE.

برای خازن‌های رزوناتور سمت فرستنده و گیرنده داریم:

$$C_{C2} = \frac{1}{\omega^2 L_{\sec}} \qquad (۲)$$

$$C_{C1} = \frac{1}{\omega^2 (L_{prim} - \frac{M^2}{L_{\sec}})} \qquad (۳)$$

همین‌طور برای پارامترهای سری و خازن‌های موازی کلید مبدل می‌توان نتیجه گرفت:

$$C_F = \frac{1}{R\omega(Q - \frac{\pi}{2})} \qquad (۴)$$

$$L_f = \frac{QR}{\omega} \qquad (۵)$$

$$C_{S1} = C_{S2} = \frac{\pi P}{\omega V_{in}} = \frac{1}{2\pi\omega R} \qquad (۶)$$

۵. شبیه‌سازی

آمپلی‌فایر کلاس DE متشکل از دو کلید قدرت است. این کلیدها هرکدام در 1/4 دوره تناوب روشن می‌شوند (Dutycycle=0.25) و فرکانس کلیدزنی ۲۰ KHz می‌باشد. سناریوی تعریفی برای سه حالت ۱- نامیزانی[1] در راستای افقی (Move_X)، ۲- نامیزانی در راستای عمودی (Move_Y) و ۳- تغییرات در راستای چرخش حول محور Z در نظر گرفته شده است.

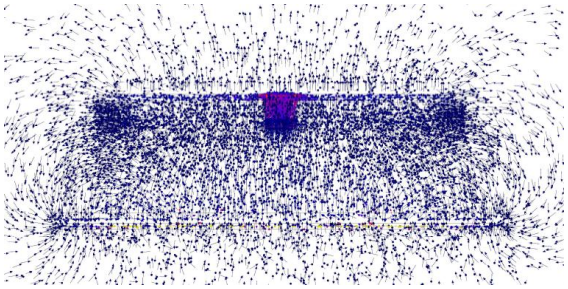
شکل توزیع شار مغناطیسی[2] برای حالت هم‌مرکز بودن سیم‌پیچ‌ها و در نامیزانی در راستاهای مختلف در شکل قابل مشاهده است.

مقادیر محاسبه شده سامانه در جدول (۱) آورده شده است.

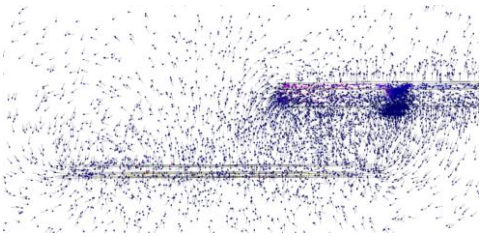
جدول (۱): مقادیر محاسبه‌شده برای مبدل کلاس DE در شبیه‌سازی.

پارامتر	مقدار
L_f	81.6 µH
C_f	0.356 nF
C_{c1}	0.270 nF
C_{c2}	1.08 nF
Load	10 Ω
V_{in}	100 Vdc
P_{out}	10 W
F_{sw}	20 KHz
Air gap	150 mm
L_1	100 µH
L_2	20 µH

[1] Misalignment
[2] Magnetic Flux

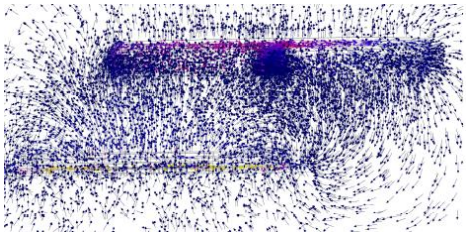


شکل (۶): توزیع شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در حالت Move_X,Y, ALPHA=0.

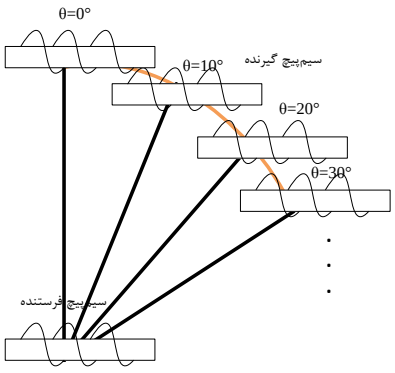


شکل (۷): توزیع شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در حالت Move_X≠0.

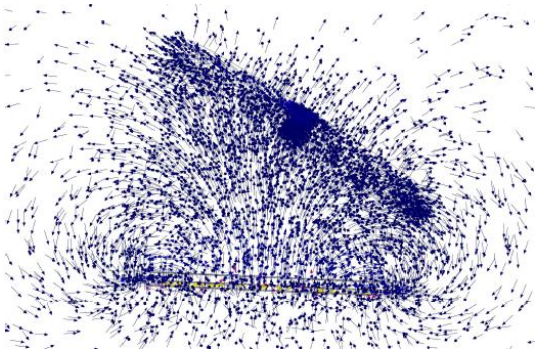
همان‌طورکه در شکل‌های بالا مشاهده می‌شود، قسمت استوانه‌ای تعبیه‌شده در وسط سیم‌پیچی گیرنده نقش بسزایی در دریافت بیشتر میدان مغناطیسی از فرستنده ایفا می‌کند و در نامیزانی‌های زاویه‌ای، افقی و عمودی قسمت عمده پراکندگی میدان مغناطیسی از سیم‌پیچ‌ها که دارای رلوکتانس کمتری نسبت به هوا می‌باشند بسته می‌شود.



شکل (۸): توزیع شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در حالت Move_Y≠0.



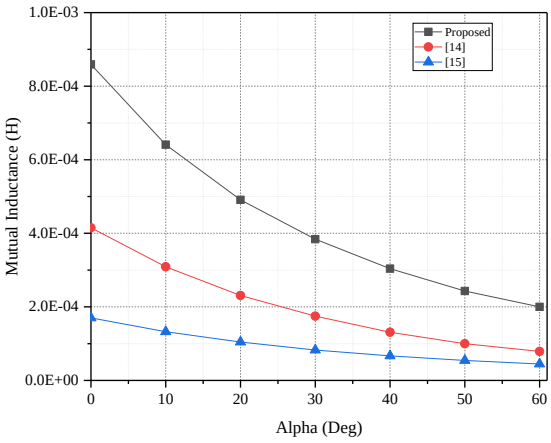
شکل (۹): موقعیت سیم‌پیچ‌ها در سناریوی جابجایی زاویه‌ای.



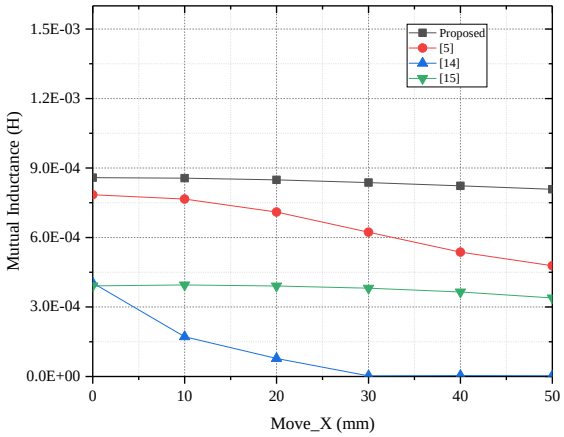
شکل (۱۰): توزیع شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده در حالت ALPHA≠0.

پس از مشاهده توزیع فضایی شار مغناطیسی بین سیم‌پیچ‌ها با استفاده از حسگرهای موجود در نرم‌افزار، اندوکتانس‌های خودی و القایی خوانده می‌شوند. سناریوهای قبل را برای این حس‌گرها فعال نموده و نتایج مربوط به تغییرات اندوکتانس متقابل میان سیم‌پیچ‌ها در جابجایی‌های افقی، عمودی و زاویه‌ای در قالب منحنی‌های ۱۰-۶ استخراج شده‌اند. این نتایج با چند ساختار دیگر مورد مقایسه قرار گرفته که می‌توانید آن‌ها در زیر را مشاهده کنید.

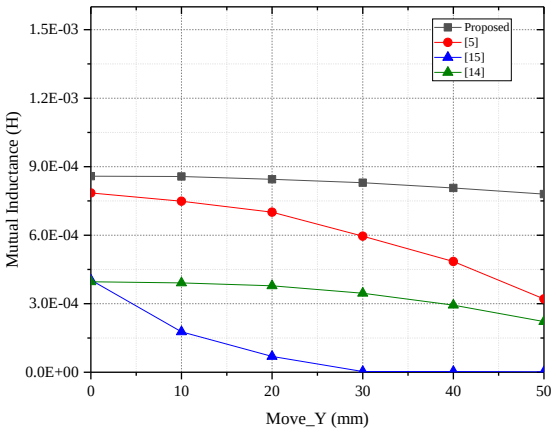
همان‌طور که در نمودارهای شکل‌های (۱۳-۱۱) مشهود است ساختار پیشنهادی در جابجایی‌های زاویه‌ای، افقی و عمودی دارای اندوکتانس متقابل با دامنه‌تغییرات کمتری نسبت به سه ساختار دیگر بوده و می‌توان گفت در این نامیزانی‌ها ساختار از خود عملکرد بهتری را نشان داده است. در فواصل متفاوت تغییرات تزویج بین سیم‌پیچ‌ها نیز به حداقل رسیده و این امر در بازدهی سامانه و انتقال بیشینه توان مؤثر خواهد بود.



شکل (۱۱): مقایسه اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های ساختار پیشنهادی با دو ساختار [۱۴, ۱۵] تحت جابه‌جایی زاویه‌ای.



شکل (۱۲): مقایسه اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های ساختار پیشنهادی با سه ساختار [۵، ۱۴، ۱۵] تحت جابه‌جایی افقی.



شکل (۱۳): مقایسه اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ‌های ساختار پیشنهادی با ساختارهای دیگر تحت جابه‌جایی عمودی.

همین‌طور می‌توان گفت در اثر تغییر فاصله سیم‌پیچ‌ها فرکانس نوسان سامانه دستخوش تغییر شده و در هر فاصله معین تنها یک فرکانس بهینه وجود دارد که در آن تزویج بین گیرنده و فرستنده حداکثر می‌باشد. بنابراین با تغییر این فاصله و تغییر فرکانس، مشخصاتی از مبدل مانند خازن‌های رزوناتور در هر فرکانس می‌بایست با مقادیر جدید جایگزین شوند.

در سامانه انتقال بی‌سیم، اندوکتانس القایی سیم‌پیچ گیرنده تحت تأثیر سیم‌پیچ فرستنده می‌باشد، بدین معنا که به هر میزانی این دو سیم‌پیچ به یکدیگر نزدیک‌تر باشند، شار گذرنده‌ای که از منبع ولتاژ در فرستنده ایجاد شده است، بیشتر در گیرنده به تزویج درمی‌آید. بنابراین مادامی‌که این فاصله میان سیم‌پیچ‌ها تغییر کند، به علت تغییر رلوکتانس مسیر، این اندوکتانس‌ها متغیر خواهند بود. طبق بررسی‌های انجام‌شده در این مقاله مشاهده گردید زمانی که فاصله هوایی میان سیم‌پیچ‌ها دستخوش تغییر می‌شود، با انتخاب فرکانس نوسان به‌صورت یک خط مشی، اندوکتانس متقابل تنها در یک فرکانس بیشترین مقدار را از آن خود می‌کند. درواقع در اثر تغییرات فاصله تنها یک فرکانس نوسان وجود دارد که در آن سامانه در تبادل بیشترین مقدار از اندوکتانس در بین فرستنده و گیرنده می‌باشد. روابط مربوط به پارامترهای سامانه ازجمله سلف و خازن‌های نوسان تحت تأثیر فرکانس نوسان می‌باشند. بنابراین اثر تغییرات فاصله بین سیم‌پیچ‌ها و تغییر فرکانس روی پارامترهای سامانه نیز تأثیر خواهد گذاشت.

۶. نتیجه‌گیری

در سامانه انتقال بی‌سیم طراحی ساختار سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده مهمترین و حائز اهمیت‌ترین بخش سامانه می‌باشد زیرا همان‌گونه که گفته شد وظیفه انتقال توان بی‌سیم برعهده این بخش می‌باشد. در این مقاله ساختار پیشنهادی باعث بهبود اندوکتانس متقابل و در نتیجه توان خروجی و بازدهی سامانه تحت تاثیر آن افزایش خواهد یافت. همین‌طور در قطعات الکترومغناطیسی ساخته شده با روش پودر، از آن جا که اولا یک لایه هوا یا ماده عایق ذرات پودر را احاطه کرده و ثانیا مسیر جریان‌های گردابی به تک‌تک دانه‌های مجزا از هم محدود شده، کنترل جریان‌های گردابی به‌صورت بسیار موثرتری انجام می‌شود و در نهایت تلفات هسته کاهش می‌یابد.

۷. مراجع

[1] N. Tesla, "Art of Transmitting Electrical Energy Through the Natural Mediums", U. S. Patent 787412; April 08, 1905.

[2] T. Honjo, T. Koyama, K. Umetani, and E. Hiraki, "Novel Receiving Coil Structure for Improving Efficiency and Power Transfer Capability of Resonant Inductive Coupling Wireless Power Transfer", in Electrical Machines and Systems (ICEMS), 19th International Conference on IEEE, pp. 1-6, 2016.

[3] Z. Luo and X. Wei, "Analysis of Square and Circular Planar Spiral Coils in Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 331-341, 2017.

[4] J. Shin et al., "Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial electronics, vol. 61, no. 3, pp. 1179 -1192, 2014.

[5] T. Honjo, T. Koyama, K. Umetani, and E. Hiraki, "Novel Receiving Coil Structure for Improving Efficiency and Power Transfer Capability of Resonant Inductive Coupling Wireless Power Transfer", in 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS IEEE), pp. 1-6, 2016.

[6] B. H. Choi, V. X. Thai, E. S. Lee, J. H. Kim, and C. T. Rim, "Dipole-Coil-Based Wide-Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 5, pp. 3158-3167, 2016.

[7] K. J. H. Shokrollahi, "Review Soft Magnetic Composite Materials (SMCs)", Journal of Materials Processing Technology, vol. 189, pp. 1-12, 2007.

[8] P. H. Ola Anderson, "Advances in Soft Magnetic Composites – Materials and Applications," Proceedings of the 2009 International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials, Las Vegas, USA, no. Füssen, Germany, 2009.

[9] PM in magnet applications, http:// www.empa.com.foresight/magent.htm, accessed on May 20, 2002.

[10] J. M. B. a. C.Gelinas, "Imminent Changes in Soft Magnetic Devices," Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials, 1998.

[11] M. K. Kazimierczuk and J. Jozwik, "Resonant DC/DC Converter with Class-E Inverter and Class-E Rectifier," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 36, no. 4, pp. 468-478, 1989.

[12] H. Sekiya, T. Negishi, T. Suetsugu, and T. Yahagi, "Operation of Class DE Amplifier Outside Optimum Condition," in Circuits and Systems, 2006. ISCAS 2006. Proceedings. 2006 IEEE International Symposium on, 2006.

[13] B. Panda and A. Sahoo, "Study of Soft Switching Boost Converter Using An Auxiliary Resonant Circuit," 2012.

[14] W. Zhong, X. Liu, and S. R. Hui, "A Novel Single-Layer Winding Array and Receiver Coil Structure for Contactless Battery Charging Systems with Free-Positioning and Localized Charging Features," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 4136-4144, 2010.

[15] Z. Luo and X. Wei, "Analysis of Square and Circular Planar Spiral Coils In Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 1, pp. 331-341, 2018.

Journal of Applied Electromagnetics

Vol. 7, No.2, 2020 (Serial No. 19)

Design of A New Structure for Transmitter and Receiver Coils in Wireless Transmission Systems with low Sensitivity in Misalignment

F. Tabibi, S. M. Meirimani*, J. Adabi

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 31/08/2019, Accepted: 12/12/2019)

Abstract

Power transmission from source to load via transmitter and receiver coils is one of the most important parts of a wireless power transmission system. Certainly, designing a proper structure for these coils can improve mutual inductance, coupling coefficient, efficiency and system performance. In this paper, a new coil structure with low sensitivity to misalignment and movement of coils in comparison to conventional structures is presented and studied. The mutual inductance and system efficiency have been improved through selecting a specific shape for the core of the coils and using a soft magnetic composite for core structure. The superiority of the proposed structure compared to conventional structures is proved by the results obtained using Flux software.

Keywords: Misalignment, Soft Magnetic Composite, Magnetic Resonant Coupling, Transmitter and Receiver Winding Structure, Wireless Power Transmission

* Corresponding author E-mail: Mirimani@nit.ac.ir