

طراحی و پیاده‌سازی سامانه انتقال توان بیسیم مبتنی بر تشدیدکننده‌های تزویج شده مغناطیسی مارپیچ با بازده بالا

سام معینی^۱، جعفر بذرافشان^۲، سید عبدالرضا ترابی^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، ۲- کارشناس ارشد، ۳- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده علوم و مهندسی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران
(دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۸)

چکیده

سامانه‌های انتقال توان بیسیم غیر تشعشعی بر پایه تشدیدکننده‌های تزویج شده مغناطیسی، به واسطه بازده بالا در مسافت‌های انتقال بیشتر از قطر سیم‌پیچ‌هایشان و محدوده میانی عملکردشان مورد توجه محققین زیادی قرار گرفته است. ساختار ارائه شده در این مقاله طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه انتقال توان بیسیم مبتنی بر ۴ سیم‌پیچ شامل سیم‌پیچ‌های تحریک، فرستنده، گیرنده و بار ارائه شده است. در حالتی که فرکانس تقویت‌کننده کلاس E با فرکانس تشدید فرستنده و گیرنده برابر باشد انتقال توان صورت خواهد گرفت. هدف این مقاله رسیدن به بالاترین بازده کاری بدون طراحی سامانه تطبیق امپدانس اضافی است و این رویکرد با تنظیم ضرایب تزویج و تغییر فاصله بین سیم‌پیچ‌های تحریک-بار و تشدیدکننده محقق خواهد شد. بیشینه بازده در فاصله ۱۵ cm، ۹۳ درصد است و در فاصله ۶۰ cm و ۱۰۰ cm به ترتیب ۵۶/۳ و ۳۵/۶ درصد بهبود بازده نسبت به وضعیت ثابت بودن سیم‌پیچ‌ها مشاهده شده است.

کلید واژه‌ها: انتقال توان بیسیم، تشدیدکننده مارپیچ مسطح، بازده سامانه، تشدیدکننده‌های تزویج شده مغناطیسی

۱. مقدمه

به چهار نوع انتقال توان از طریق پرتوهای لیزر^۲ [۳]، انتقال توان خازنی^۳ [۴]، انتقال توان توسط امواج صوتی [۵] حاصل می‌شود. روش انتقال توان در میدان نزدیک از میدان مغناطیسی که توسط تزویج القایی بین سیم‌پیچ‌ها یا میدان الکتریکی ایجاد شده به واسطه تزویج خازنی ایجاد خواهد شد [۶] که القای مغناطیسی به دلیل مزایای آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از چالش‌های روش انتقال توان القایی (IPT^۴) کاهش بازده کاری با افزایش مسافت انتقال است. بنابراین یک روش جایگزین بر پایه تشدیدکننده‌های تزویج شده برای غلبه بر این مشکل ارائه شده است. بر اساس فرکانس تشدید یکسان، سیم‌پیچ‌ها به صورت بسیار قوی با هم تزویج شده که این امر باعث افزایش بازده توان انتقالی بین آنها خواهد شد [۷]. یکی دیگر از مزایای این روش نسبت به انتقال توان القایی این است که فرستنده می‌تواند توان را به چندین سیم‌پیچ ارسال کند و چندین باتری را به صورت هم‌زمان شارژ کند [۸]. در مورد تقویت‌کننده‌های توان معمولاً از تقویت‌کننده‌های کلاس E در سامانه‌های WPT استفاده می‌شود. تقویت‌کننده‌های کلاس E نوع^۵ ZVS از کاراترین تقویت‌کننده‌هایی هستند که تاکنون شناخته شده است. شکل موج جریان و ولتاژ کلید با توجه به زمان جابه‌جا و در نتیجه

امروزه با توجه به محدود بودن عمر باتری‌ها و همچنین مشکلات فراوان جهت تعویض و تعمیر آنها استفاده از فناوری سامانه انتقال توان بیسیم امری اجتناب‌ناپذیر هست. از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به انتقال توان به ادوات پزشکی مانند کاشتینه‌های پزشکی پنهان در بدن و دستگاه‌های الکترونیکی قابل حمل را نام برد.

در کاشتینه‌های^۱ داخل بدن مانند محرک‌های میکرو سامانه که برای تحریک و نظارت بر سیگنال بیولوژیکی مانند سیگنال‌های عصبی، سیگنال‌های عضلات، فشار خون، فشار داخل چشم و غیره استفاده می‌شوند [۱-۲]. همچنین در مکان‌هایی که ورود انسان دشوار یا غیرممکن باشد؛ مانند مکان‌هایی که دمای بالا، گازهای سمی یا مکان‌هایی که کاملاً باید ایزوله باشد از روبات‌ها استفاده می‌شود که غالباً از کابل برق یا باتری تغذیه می‌گردند. به واسطه محدودیت‌های کابل برق امکان قطع یا گره خوردن در طول سیم و برای باتری‌ها مشکلاتی چون حجم، وزن، محدود بودن عمر باتری و آثار شیمیایی آن محققان را بران داشته تا روش‌های جدیدی ایجاد کنند. امروزه بحث انتقال توان بیسیم مطرح و رو به گسترش است. روش‌های انتقال توان بیسیم

^۲ Laser Beams

^۳ Capacitive Coupling

^۴ Inductive Power Transfer

^۵ Zero Voltage Switching

* نویسنده پاسخگو: ab.reza.torabi@ut.ac.ir

^۱ Implantable Microsystem

چهار سیم پیچ دارای فرکانس یکسان می‌شوند، راکتانس القایی و خازنی هر سیم پیچ یکسان خواهد شد و سیم پیچ گیرنده میدان القایی سیم پیچ فرستنده را قطع و توان را به بار تحویل می‌دهد. بر این اساس داریم:

$$jX_L + jX_C = 0 \quad (1)$$

$$j(\omega_0 L_i - 1/\omega_0 C_i) = 0 \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

فاصله بین سیم پیچ تحریک و تشدیدکننده اول d_{12} (A تا B)، فاصله بین ۲ تشدیدکننده d_{23} (B تا C) و فاصله بین تشدیدکننده دوم و سیم پیچ بار d_{34} می‌باشد (C تا D). فاصله بین ۲ تشدیدکننده از اهمیت قابل توجهی جهت تعیین بازده برخوردار است.

۳. تحلیل سامانه مداری مبتنی بر ۴ حلقه

سیم پیچ

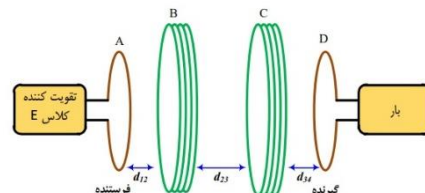
شکل (۲) مدار معادل سامانه WPT مبتنی بر ۴ سیم پیچ را نشان می‌دهد. این سیم پیچ‌ها توسط میدان مغناطیسی با هم در ارتباط هستند و بین آنها تزویج مغناطیسی برقرار است. به‌طور دقیق‌تر می‌توان گفت بین سیم پیچ‌های A و D با تشدیدکننده‌ها تزویج القایی برقرار است و همگی یک سامانه انتقال توان بیسیم را تشکیل می‌دهند. سیگنال ورودی (V_S) می‌تواند یک تقویت کننده توان باشد یا یک VNA^۱ باشد که قابلیت محاسبه ضرایب انعکاس و انتقال را هم داشته باشد. در این مقاله سیگنال ورودی از یک تقویت کننده توان کلاس E تأمین می‌شود. مقاومت ورودی $(R_S = 50 \Omega)$ که همان امپدانس خروجی تقویت کننده کلاس E و مقاومت بار R_L نیز می‌باشد. سیم پیچ تحریک (A) شامل سلف L_1 با مقاومت داخلی R_1 است. خازن C_1 با سلف و مقاومت سری شده تا فرکانس آن با فرکانس سیم پیچ‌های فرستنده و گیرنده یکسان شود. ابعاد تشدیدکننده‌ها (فرستنده و گیرنده) به ظرفیت خازن پارازیتی و ظرفیت خازنی بین سیم پیچ‌ها^۲ ایجاد می‌شود بستگی دارد. از آنجایی که در طراحی ابعاد و طول سیم پیچ‌های تشدیدکننده‌ها که دارای اندوکتانس مشخص بوده ثابت در نظر گرفته شده خازن‌های C_2 و C_3 مربوط به این بخش بوده و به‌صورت دقیق قابل محاسبه نمی‌باشند و به‌صورت دستی روی فرکانس تشدیدکننده‌ها تنظیم شده‌اند. خازن C_4 هم نقش خازن C_1 را در مدار دارد و فرکانس تشدید سیم پیچ بار هم به این شکل تعریف خواهد شد. در حالتی که فرکانس تقویت کننده کلاس E با فرکانس تشدید،

تلفات ترانزیستور بسیار کم خواهد شد. اگر مقدار مؤلفه‌های مدار تشدید به درستی انتخاب شود، کلیدزنی در ولتاژ صفر انجام می‌شود. از آنجا که شکل موج جریان و ولتاژ در یک طول فواصل زمانی کلیدزنی همپوشانی ندارد، تلفات کلید تقریباً صفر است و باعث بالا رفتن بازده می‌شود [۱۹].

در این مقاله، روشی برای بهبود بازده سامانه برای حالتی که فاصله بین سیم پیچ‌های تحریک و تشدید متغیر است ارائه خواهد شد و به‌طور تجربی نشان می‌دهد که یک سامانه انتقال توان بیسیم با بازده بالا تحت تغییرات فاصله سیم پیچ‌ها حاصل خواهد شد. در روش پیشنهادی نیازی به شبکه تطبیق با تلفات اضافی ندارد و صرفاً با انجام ملاحظاتی در روابط و تنظیم بهینه ضریب تزویج بین سیم پیچ‌های تشدیدکننده، تحریک و بار محقق خواهد شد و در نتیجه ابعاد سامانه هم بزرگ‌تر نخواهد شد.

۲. تحلیل ساختار سامانه و عملکرد

تشدیدکننده‌های الکترومغناطیسی (تشدیدکننده‌های تزویج شده مغناطیسی) سامانه‌های WPT که از ۴ سیم پیچ به‌جای ۲ سیم پیچ استفاده شده است دارای مسیر القایی مطلوب‌تری هستند. شکل (۱) سامانه انتقال توان بیسیم بر پایه ۴ سیم پیچ را نشان می‌دهد. مطابق شکل سیم پیچ A و D به ترتیب سیم پیچ تحریک و بار و سیم پیچ‌های B و C به ترتیب سیم پیچ فرستنده (TX) و گیرنده (RX) یا تشدیدکننده‌های اصلی سامانه نام دارند. تشدیدکننده RLC با ضریب کیفیت بالاتر (چون تعداد دورهای بالاتری نسبت به سیم پیچ‌های A و D دارد) قابلیت جبران تزویج پائین و ضریب کیفیت پائین حلقه‌های A و D را دارند. خازن‌های پارازیتی خارجی به سیم پیچ‌های A و D اضافه شده تا با تشدیدکننده اصلی هم فرکانس شوند. برای موارد معمول اندازه ۴ سیم پیچ متفاوت است و معمولاً سیم پیچ‌های بخش گیرنده ابعاد کوچک‌تر و انعطاف بالاتری دارند تا به راحتی در لپ‌تاب‌ها و ادوات الکترونیکی قابل حمل و ... نصب شوند.



شکل (۱): شماتیک سامانه انتقال توان بیسیم مبتنی بر ۴ سیم پیچ

از طرفی جهت رسیدن به بازده بالا اندازه سیم پیچ فرستنده را بزرگ‌تر انتخاب می‌کنند. در حالیکه بازده ۲ سیم پیچ به فاصله بین آنها وابسته است، در سامانه‌هایی که ۴ سیم پیچ دارند نسبت به تغییرات فاصله حساسیت کمتری دارند و این سامانه‌ها قابلیت بهینه شدن را جهت رسیدن به بازده بیشینه را دارند. زمانی که هر

^۱ Vector Network Analyzer

^۲ Stray Capacitance

$$\begin{aligned}
 Z_{12} &= j\omega M_{12} \\
 Z_{23} &= j\omega M_{23} \\
 Z_{34} &= j\omega M_{34} \\
 Z_{11} &= R_s, Z_{22} = R_2 \\
 Z_{33} &= R_3, Z_{44} = R_L \\
 Z_{13} &= Z_{31} = 0 \\
 Z_{14} &= Z_{41} = 0 \\
 Z_{24} &= Z_{42} = 0
 \end{aligned}
 \quad (۴)$$

؛

با استفاده از $Q_i = \omega_0 L_i / R_i$ ضریب کیفیت هر سیم‌پیچ قابل محاسبه است. با در نظر گرفتن روابط (۲-۴)، مقادیر جریان‌های سیم‌پیچ‌های اول و چهارم برابر است با

$$I_1 = \frac{(1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) \frac{V_s}{R_s}}{\left[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3 \right]} \quad (۵)$$

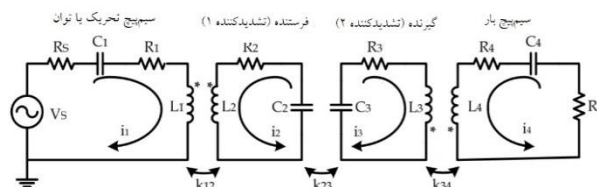
$$I_4 = \frac{k_{12} k_{23} k_{34} \sqrt{Q_1 Q_2} \sqrt{Q_2 Q_3} \sqrt{Q_3 Q_4} \frac{jV_s}{\sqrt{R_s R_L}}}{\left[(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)(1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) + k_{23}^2 Q_2 Q_3 \right]} \quad (۶)$$

امپدانس ورودی سامانه پارامتر تعیین‌کننده‌ای جهت طراحی تقویت‌کننده کلاس E می‌باشد. امپدانس ورودی سیم‌پیچ‌های تزویج شده تابعی از اندوکتانس تزویج‌شده بین سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده است و امپدانس خروجی تابعی از توان انتقالی است [۱۱]. با توجه به ساختار مداری و روابط (۲) و (۳) و (۵) امپدانس ورودی برابر است با:

$$Z_{in} = \frac{V_s - R_s I_1}{I_1} = R_s \times \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2 (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4)}{1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4} \quad (۷)$$

اندوکتانس خودالقایی با در نظر برای سیم‌پیچ‌های مارپیچی، مقاومت سیم‌پیچ و فاصله بین سیم‌های یک تشدیدکننده بیشترین تأثیر را در مقدار و ضریب کیفیت سلف می‌گذارد. مقاومت سیم‌پیچ با فاصله بین سیم‌ها نسبت عکس دارد [۱۳-۱۲]. شکل (۳) برشی عرضی از یک سیم‌پیچ تخت بوده که قطر سیم (w)، فاصله بین دو سیم (p)، تعداد دور (N)، قطر داخلی (D_i)، قطر خارجی (D_o)، شعاع متوسط (a) و پهنای سیم‌پیچ (c) و تمامی واحدها بر حسب متر است [۱۴-۱۵].

فرستنده و گیرنده برابر باشد امپدانس سامانه حداقل بوده و جریان سیم‌پیچ‌ها بیشینه خواهد شد و توان به گیرنده منتقل خواهد شد [۹].



شکل (۲): مدار معادل سامانه انتقال توان بیسیم مبتنی بر ۴ سیم‌پیچ

در سامانه فوق از تزویج‌های متقاطع^۱ صرف‌نظر شده است.

در این سامانه هم‌داری ($k_{13} = k_{14} = k_{24} = 0$) و سیم‌پیچ‌های مجاور هم‌داری ($k_{12} = k_{23} = k_{34} \neq 0$) ضریب تزویج بین سیم‌پیچ‌ها به فاصله بین آنها، شکل سیم‌پیچ‌ها، ابعاد نسبی آنها و جهت‌گیری (زاویه) بین آنها بستگی دارد. ضریب تزویج بین دو سیم‌پیچ بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$k_{AB} = \frac{M_{AB}}{\sqrt{L_A L_B}} \quad (۲)$$

$$0 < k \leq 1$$

در رابطه بالا M_{AB} اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ A و B بوده. در این طراحی با داشتن نسبت دور بالا تشدیدکننده‌ها، مقاومت الکتریکی منبع (بار) به یک مقاومت مؤثر زیادی تبدیل شده که با تشدیدکننده‌های داخلی موازی خواهد شد. بنابراین انتقال توان بیسیم با بارده بالایی در تشدیدکننده‌ها حتی با اتصال بار خارجی برقرار خواهد شد [۱۰]. در یک تشدیدکننده با ضریب کیفیت بالا، داشتن ورودی و بار (شرایط عملی) فرض بر این است $R_4 \ll R_L$ و $R_1 \ll R_s$ بنابراین $R_4 + R_L \approx R_L$ بر اساس قوانین مداری کیرشلف، رابطه بین جریان عبوری از سیم‌پیچ‌ها و ولتاژ اعمال‌شده به آنها از روابط زیر پیروی می‌کند:

$$\begin{aligned}
 V_s &= Z_{11} I_1 + j\omega M_{12} I_2 \\
 0 &= j\omega M_{12} I_1 + Z_{22} I_2 - j\omega M_{23} I_3 \\
 0 &= -j\omega M_{23} I_2 + Z_{33} I_3 + j\omega M_{34} I_4 \\
 0 &= j\omega M_{34} I_3 + Z_{44} I_4
 \end{aligned}
 \quad (۳)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} \quad \text{در اینجا } Z_{ij} = Z_{ji} \text{ و فرکانس تشدید}$$

بنابراین داریم:

¹ Cross Coupling

می‌باشد. با فرض آن که شعاع سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده $(r_1$ و $r_2)$ خیلی کوچک‌تر از فاصله انتقال توان (d_{23}) بین آن دو می‌باشد، اندوکتانس متقابل بین آن‌ها از رابطه نیومن^۱ برابر است با [۱۶]:

$$M_{23} \cong \frac{\mu_0 \pi N_2 N_3 r_2^2 r_3^2}{2d_{23}^3} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق N_2 و N_3 به ترتیب تعداد دورهای سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده و μ_0 قابلیت گذردهی مغناطیسی در هوای آزاد می‌باشد. شکل زیر سامانه انتقال توان بیسیم پیاده‌سازی شده را نشان می‌دهد.



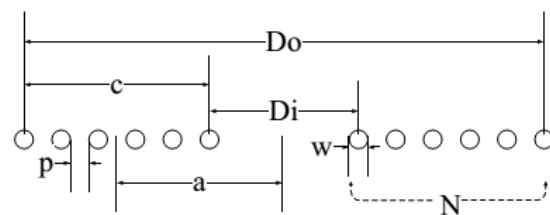
شکل (۴): پیاده‌سازی سامانه انتقال توان بیسیم

۴. تطبیق امپدانس سامانه

جهت بالا رفتن بازده سامانه می‌بایست قبل و بعد از سیم‌پیچ‌های تشدیدکننده یا همان فرستنده و گیرنده توان مدارات تطبیق امپدانس قرار گیرند. روش‌های متفاوتی جهت تطبیق امپدانس این سامانه می‌باشد. مدارات RLC نوع Pi و T و همچنین مدار تطبیق L [۱۱] از انواع مدارات تطبیقی هستند که می‌تواند با طراحی مناسب استفاده شوند. در واقع خود سیم‌پیچ‌های تحریک و بار به نوعی مدارات تطبیق سامانه را تشکیل می‌دهند. در اینجا با توجه به اینکه منبع سیگنال تقویت‌کننده کلاس E می‌باشد در حالتی که در رابطه امپدانس ورودی سامانه، اگر Z_{in} با R_s تطبیق باشد (رابطه ۷)، بیشینه بازده منتقل خواهد شد. بنابراین داریم:

$$1 + k_{23}^2 Q_2 Q_3 + k_{34}^2 Q_3 Q_4 = k_{12}^2 Q_1 Q_2 (1 + k_{34}^2 Q_3 Q_4) \quad (۱۴)$$

با توجه به متقارن بودن (ابعاد، تعداد دور و ضریب کیفیت سیم‌پیچ‌های B و C یکسان است) سامانه طراحی شده و رابطه داریم:



شکل (۳): برش عرضی از تشدیدکننده مارپیچ [۱۲].

$$D_0 = D_i + 2N(w + p)$$

$$l = \frac{1}{2} N \pi (D_0 + D_i) \quad (۸)$$

$$a = \frac{1}{4} (D_0 + D_i)$$

$$c = \frac{1}{2} (D_0 - D_i)$$

بر این اساس مقادیر اندوکتانس خودالقایی و ظرفیت خازنی برابر است:

$$L_{self} = \frac{N^2 (D_0 - N(w + p))^2}{16D_0 + 28N(w + p)} \frac{39.37}{10^6} \quad (۹)$$

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L_{self}} \quad (۱۰)$$

به واسطه متقارن بودن سامانه مقادیر (ابعاد ۲ سیم‌پیچ تشدیدکننده یکسان و ابعاد حلقه تحریک و بار هم یکسان طراحی شده است) $Q_1 = Q_4$ ، $Q_2 = Q_3$ و $k_{12} = k_{34}$ می‌باشند.

با توجه به مفروضات بالا بهره ولتاژ به صورت،

$$\left| \frac{V_L}{V_S} \right| = \left| \frac{I_4 R_L}{I_1 R_S} \right| = \frac{k_{23} k_{12}^2 Q_1 Q_2}{(1 + k_{12}^2 Q_1 Q_2)^2 + k_{23}^2 Q_2^2} \left(\frac{R_L}{R_S} \right)^{0.5} \quad (۱۱)$$

سامانه طراحی شده را به صورت یک شبکه ۲ درگاهی در نظر می‌گیریم. در این حالت بازده توان انتقالی به صورت زیر محاسبه می‌شود

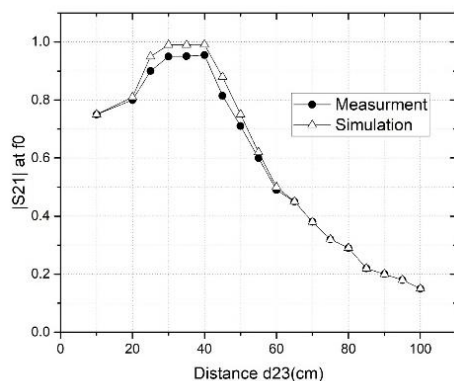
$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_4^2 R_L}{I_1^2 \left(\frac{R_S}{4} \right)} = |S_{21}|^2 \quad (۱۲)$$

تعامل اصلی برای انتقال توان به‌طور عمده بین فرستنده و گیرنده اتفاق می‌افتد و بازده عملاً به فاصله بین آنها بستگی دارد.

ضریب تزویج بین فرستنده و گیرنده $M_{23} = M_{23/\sqrt{L_2 L_3}}$

¹ Neumann Formula

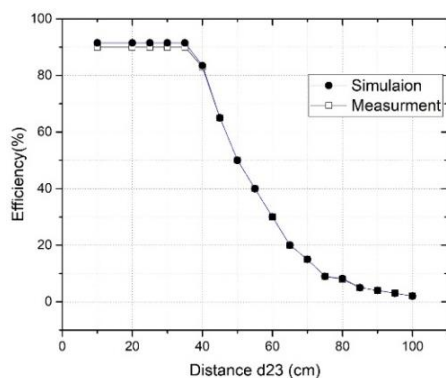
ولتاژ کار مدار ۱۲ ولت است و توسط مبدل DC-AC به سیگنال AC جهت ورود به تقویت کننده کلاس E تبدیل خواهد شد. شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مداری با استفاده از نرم‌افزار ADS انجام و نتایج مربوط به $|S_{21}|$ در فرکانس ۱ MHz بر حسب فاصله بین ۲ تشدیدکننده در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): $|S_{21}|$ اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

برای مدل مداری نتایج شبیه‌سازی شده با استفاده از پارامترهای اندازه‌گیری شده سیم‌پیچ‌ها در جدول (۱) به دست آمده است. بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی تعامل مطلوبی برقرار و نتایج مشابه هم می‌باشند. بیشینه $|S_{21}|$ ۰/۹۷ در فاصله ۳۷ cm حاصل شده است. مطابق شکل (۵) بازده در فاصله‌های نزدیک ($d \leq 30 \text{ cm}$) کاهش می‌یابد دلیل این امر اثر انشقاق فرکانسی^۲ می‌باشد [۱۸]. جایی که فرکانس از مقدار اصلی $f_0 = 1 \text{ MHz}$ انحراف پیدا می‌کند. در شکل (۶) بازده توان انتقالی در محدوده فرکانسی ۰/۹۹ تا ۱/۴ MHz اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است و در فواصل نزدیک در بازه فرکانسی فوق بازده به ۹۱ درصد رسیده است. این در حالی است که در فرکانس تشدید اصلی (۱ MHz) به دلیل تزویج زیاد بین تشدیدکننده دوم و سوم و همچنین اثر انشقاق فرکانسی میزان بازده اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد.

$$(\eta = |S_{21}|^2)$$



شکل (۶): بازده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده

$$\begin{aligned} k_{12} &= k_{34} \\ Q_2 &= Q_3 \end{aligned} \quad (15)$$

$$1 + k_{23}^2 Q_2^2 = k_{12}^4 Q_2 Q_1$$

بر اساس رابطه (۱۵) زمانی که فاصله بین فرستنده و گیرنده تغییر کند میزان k_{23} تغییر خواهد نمود. زمانی که d_{23} افزایش می‌یابد مقدار k_{12} یا Q_1 کاهش می‌یابد.

۵. اندازه‌گیری بازده

جهت اعتباربخشی، سامانه انتقال توان بیسیم که به صورت متقارن هم می‌باشد پیاده‌سازی شده است و مشخصات آن مطابق جدول (۱) می‌باشد. مقادیر محاسبه شده با صرف نظر از مقادیر پارازیتی سیم‌پیچ‌ها بوده و مقادیر اندازه‌گیری شده با اسیلوسکوپ GoodWill GDS-1072B و مولتی‌متر Victor 88C می‌باشد. برای دست‌یابی به ضریب کیفیت بالا در مدار تشدید از سلف مارپیچ استفاده شده است و همچنین خازن متغیر با سلف مارپیچ سری شده تا فرکانس ۱ MHz را برای تشدید فراهم کنند. تمامی سیم‌پیچ از سیم مسی با قطر ۳ mm ساخته شده‌اند. تمامی سیم‌پیچ‌ها با هم هم‌جهت هستند (مانند آنتن‌های جهت‌دار) و فاصله ۲ تشدیدکننده از صفر تا ۱۰۰ cm متغیر است. حالت اول $d_{12} = d_{34}$ در فاصله ۱ cm قرار دارند. بازده با استفاده از ۲ روش اندازه‌گیری می‌شود که قبل آن جهت حذف اثر کابل کالیبراسیون انجام می‌شود. برای کالیبراسیون VNA از یک اتصال کوتاه (S)، اتصال باز (O) و یک بار 50Ω (L) استفاده می‌شود^۱. روش اول با استفاده از دستگاه VNA مقدار $|S_{21}|$ اندازه‌گیری می‌شود و روش دوم جهت محاسبه بازده بر اساس P_{OUT} و P_{IN} می‌باشد (رابطه ۱۲).

جدول (۱): مشخصات المان‌های مداری و سیم‌پیچ‌ها

مقادیر	پارامتر	
۵۰ اهم	R_S, R_L	
$f_0 = 1 \text{ MHz}$	$12 \mu\text{H}$	L_1, L_4
	2.5 nf	C_1, C_4 (متغیر)
	$2.53 \mu\text{H}$	L_2, L_3
	10 nf	C_2, C_3
0.25Ω	R_1, R_4	
1Ω	R_2, R_3	
0.1	k_{12}, k_{34}	
59 mm	شعاع داخلی سیم‌پیچ تحریک و بار	
57.5 mm	شعاع داخلی فرستنده و گیرنده (تشدیدکننده‌ها)	
7	تعداد دور سیم‌پیچ تحریک و بار	
18	تعداد دور سیم‌پیچ تشدیدکننده	

² Frequency Splitting

^۱ روش SOLT

۵. نتیجه گیری

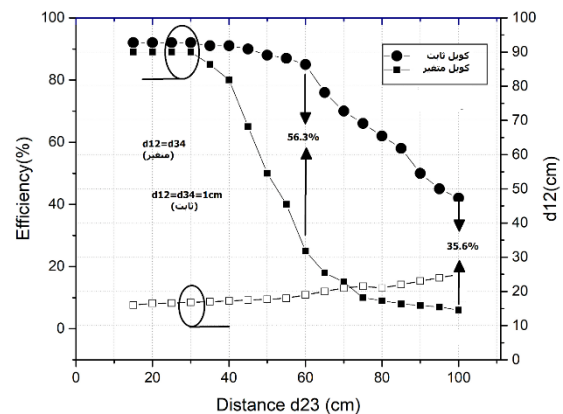
در این مقاله با تنظیم ضرایب تزویج و تغییر فاصله بین سیم پیچ های تحریک-بار و تشدیدکننده ها بدون طراحی مدار تطبیق اضافی بالاترین مقدار بازده محقق شد.

نتایج تجربی نشان می دهد که بازده انتقال توان به صورت قابل ملاحظه ای با تنظیم پارامترهای تزویج و تغییرات فاصله سیم پیچ ها بهبود پیدا می کند و نیازی به طراحی شبکه تطبیق امپدانس نمی باشد. تشدیدکننده های مارپیچ مسطح در فواصل نزدیک عملکرد مناسبی دارند. برای انتقال توان در دستگاه های الکترونیکی مانند رایانه های قابل حمل، تلفن های سیار یا کاشتی های داخل بدن گزینه مناسب تری نسبت به تشدیدکننده های استوانه ای (هلیکس) هستند. برای رسیدن به ضریب کیفیت بالا در تشدیدکننده ها، از ظرفیت خازنی خود سیم پیچ برای تشدید استفاده شود. که در اینجا به علت پایین بودن فرکانس کار مدار و بزرگ شدن سیم پیچ تشدیدکننده با افزودن خازن هایی به تشدیدکننده آنها را در فرکانس کار مدار تنظیم کرده ایم. بهتر است ابتدا تشدیدکننده ها ساخته و فرکانس تشدیدشان به دست آید سپس مدار تقویت کننده طراحی شود. چرا که محاسبه خازن پارازیتی سیم پیچ بسیار دشوار است.

۶. مراجع

- [1] M. Ghorbel, M. Samet, A. Bhamida, and J. Tomas, "An Advanced Low Power and Versatile CMOS Current Driver for Multi-Electrode Cochlear Implant Microstimulator," Journal of Low electronics. Vol 2, No. 3, December 2006. P.p 1-14.
- [2] J. Ohta, T. Tokuda, K. Sasagawa, T. Noda, "Implantable CMOS biomedical devices", Sensors, vol. 9, no. 11, pp. 9073-9093, 2009.
- [3] Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, Vol. 1, No. 4, Article 143. Publication date: December 2017
- [4] Narayanamoorthi R, Vimala Juliet A, Bharatiraja Chokkalingam, Sanjeevikumar Padmanaban and Zbigniew M. Leonowicz "Class E Power Amplifier Design and Optimization For the Capacitive Coupled Wireless Power Transfer System in Biomedical Implants" Energies 2017, 10, 1409
- [5] Roes, M.G.L., Duarte J.L, Hendrix, M.A.M, Lomonova E.A," Acoustic Energy Transfer: A Review," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, pp. 242-248, 2013
- [6] S.D. Rankhamb and A. P. Mane, "Review Paper on Wireless Power Transmission", IJSR, vol. 5, no. 2, pp. 1340-1343, 2016
- [7] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. Kim and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1413- 1452, 2016.
- [8] A. Siddiqui, A. Nagani and R. Ali, "Wireless Power Transfer Techniques: A Review", Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 3, no. 12, pp. 6711-616, 2015.

در ادامه شکل (۶) با افزایش فاصله بین تشدیدکننده ها (d_{23}) بازده سامانه به شدت کاهش پیدا می کند. زمانی که تغییرات فاصله در d_{23} وجود دارد (روابط ۱۴ و ۱۵) با تنظیم پارامترهای تزویج بازده بهینه خواهد شد. در واقع در حالتی که فاصله بین ۲ تشدیدکننده افزایش می یابد میزان k_{23} (ضریب تزویج بین آنها) کاهش می یابد. جهت برآورده سازی شرایط تطبیق مقدار k_{12} می بایست کاهش یابد (بر اساس افزایش d_{12} برای سامانه متقارن که در آن $d_{12} = d_{34}$ می باشد). بازده اندازه گیری شده در مقایسه با تزویج ثابت و متغیر در شکل (۷) نشان داده شده است. فاصله d_{12} تنظیم تا شرایط رابطه (۱۵) برقرار شود. مقایسه نتایج اندازه گیری نشان می دهد که روش تزویج متغیر به طور قابل ملاحظه ای به صورت هم زمان محدوده انتقال و بازده سامانه را افزایش می دهد. بازده بیشینه در فاصله ۱۵ cm، ۹۳ درصد و در فاصله ۱ m، ۳۲/۸ درصد است. ضمناً در فاصله ۶۰ cm، ۵۶/۳ درصد و در فاصله ۱m، ۳۵/۶ درصد بازده بهبود پیدا خواهد کرد.



شکل (۷): مقایسه اندازه گیری بازده در WPT در حالت تزویج ثابت و متغیر

جدول (۲) به مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی جهت افزایش بازده سامانه و همچنین ۲ پژوهش انجام گرفته در این حوزه می پردازد.

جدول (۲): مقایسه نتایج این مقاله با مراجع دیگر

مسافت انتقال (cm)	بازده %	فرکانس (MHz)	سامانه WPT
۰ تا ۷۰ متغیر	۷۰	۸ تا ۱۲	[۱۸]
۵/۸	۹۰	۱۳/۵۶	[۱۲]
۱ تا ۱۰۰	۹۳	۱	این مقاله
در ۱۵ cm			

- [15] L. H. Chen, S. Liu, Y. C. Zhou, and T. J. Cui, "An optimizable circuit structure for high-efficiency wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 1, pp. 339-349, Jan 2013.
- [16] W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 32, no. 9, pp. 1230-1242,
- [17] A. P. Sample, D. T. Meyer and J. R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled 1-Resonators for Wireless Power Transfer," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011
- [18] K. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, ser. Electrical engineering handbook series. Taylor & Francis, 2004.
[Online]. Available: <http://books.google.com/books?id=nZzOAsroBIEC>
- [19] M. K. Kazimierczuk, *RF Power Amplifiers*, John Wiley & Sons, New York, NY, 2008
- [9] Ki.Young Kim, "Wireless Power Transfer Principle And Engineering Expolaration. ISBN:978-953-307-874-8
- [10] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, "Magneticresonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no 7, pp. 1819-1825, Jul. 2009.
- [11] Ahmad, Naderna "Two-side Impedance Matching for Maximum Wireless Power Transmissi IETE Journal of Research · December 2015 ion
- [12] Benjamin H. Waters, Brody J. Mahoney, Gunbok Lee and Joshua R. Smith, "Optimal Coil Size Ratios for Wireless Power Transfer Applications", 28 July 2014
- [13] F. Grover, *Inductance calculations*, ser. Dover phoenix editions. Dover Publications, Incorporated, 2004
- [14] S. Senjuti, "Design and optimization of efficient wireless power transfer links for implantable biotelemetry systems," Master's thesis, University of Western Ontario, May 2013

Design and Implementation of a Highly Efficient Wireless Power Transfer System Using Magnetic Spiral Resonant Coupling

S. Moeini¹, J. Bazrafshan², S. A. Torabi^{*3}

School of Engineering Science, College of Engineering, University of Tehran

(Received: 11/01/2020; Accepted: 27/04/2020)

Abstract

Non-radiative wireless power transfer systems based on magnetic resonant coupling have received the attention of many researchers, due to their high efficiency over distances greater than the diameter of their coils and their mid-range of operations. In this article, the design and implementation of a 4-wireless power transmission system consisting of a power coil (drive loop), a transmitting coil (Tx coil), a receiving coil (Rx coil) and a load coil (load loop) is presented. Power is transmitted when the frequency of the E class amplifier is equal to the self-resonant frequency of the transceiver coils. The purpose of this paper is to achieve the highest efficiency without designing an additional impedance matching system. This condition is achieved by varying the coupling factor between the power coil (load) and the two resonators. The maximum efficiency is 93% at 15 cm and using this method results in efficiency improvements of 56.3% and 35.6% at the distances of 60 cm and 100 cm respectively, compared to the case of the coils being fixed.

Keywords: Wireless Power Transfer, 4-Coils, Efficiency, Magnetic Resonant Coupling

* Corresponding author E-mail: ab.reza.torabi@ut.ac.ir