

Design and Fabrication of Wireless Charging Using LCC-S Compensator for Use in Subsurface Vehicles

A.Nasiri¹, S.Riahy², R.Hahmaram³, H.Molaei⁴

¹ Assistant Professor, Imam Hussein (AS) University, Tehran, Iran. Email:nasirieng@gmail.com

² Master's student, Imam Hussein (AS) University, Tehran, Iran.Email: saeedriahy@ihu.ac.ir

³ Associate Professor, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran. Email:rhaghmrm@ihu.ac.i

⁴ PhD student, Imam Hossein University, Tehran, Iran. Email:kpmollaei@ihu.ac.ir

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 00 January 2020

Received in revised form: 00 March 2020

Accepted: 04 May 2020

Available online: 21 May 2020

Keywords: Induction Power Transmission, Wireless Power Transmission, Compensatory Network.

ABSTRACT

In this study, the SS and LCC-S compensating networks in the wireless power transmission circuit have been investigated. The relationship between coupling coefficient and diameter of circular pads and finding the appropriate coupling coefficient for power transfer with maximum and minimum power change with selected compensators was investigated. The aerial distance in power transmission has an inverse relationship with the coupling coefficient. The circular pad is highly sensitive to changes in the coupling coefficient. The aerial distance and the lack of complete overlap of the two pads reduce the efficiency and transmission power. Therefore, in order to ensure the efficiency of the circuit in the most appropriate case, different compensatory networks were investigated in terms of efficiency and power changes, voltage and output current changes, dependence on coupling coefficient and degree of freedom for imposing limitations. In this study, the performance of wireless power transmission with a power of 3 kW is improved. As a result, it improved the efficiency of the converter and reduced the instantaneous changes in current and voltage. The results have been reviewed and confirmed using PSIM software. To confirm the design and simulation results, a 120 W prototype was simulated and constructed with an LCC-S compensator.

Cite this article: A.Nasiri, S.Riahy, R.Hahmaram, H.Molaei “Design and Fabrication of Wireless Charging Using LCC-S Compensator for Use in Subsurface Vehicles” *AppliedElectromagnetics*, vol. 13(1), pp. 40-54, 2020.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26450103.1404.13.1.6.1>



© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein

طراحی و ساخت شارژ بدون سیم با استفاده از جبران ساز LCC-S با قابلیت استفاده در وسایل نقلیه زیرسطحی

ابوالفضل نصیری^۱، سعید ریاحی^۲، رضا حق مرام^۳، حسین ملایی^۴

^۱ استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. ایمیل: nasirieng@gmail.com

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. ایمیل: saeedriahy@ihu.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. ایمیل: rhaghmrm@ihu.ac.ir

^۴ دانشجوی دکتری، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. ایمیل: kpmollaei@ihu.ac.ir

چکیده

در این پژوهش به بررسی شبکه‌های جبران ساز **LCC-S** و **SS** در مدار انتقال توان بدون سیم پرداخته شده است. رابطه میان ضریب تزویج با قطر پدهای دایره‌ای و یافتن مقدار ضریب تزویج مناسب برای انتقال توان با بیشینه بازده و کمینه تغییر توان با جبران سازهای منتخب مورد پژوهش قرار گرفت. فاصله هوایی در انتقال توان، رابطه عکس با ضریب تزویج دارد. پد دایره‌ای نسبت به تغییر ضریب تزویج حساسیت بالایی دارد. فاصله هوایی و عدم همپوشانی کامل دو پد سبب کاهش بازده و توان انتقالی می‌گردد. لذا برای اطمینان‌پذیری از کارایی مدار در مناسب‌ترین حالت، شبکه‌های جبران ساز متفاوت از نظر تغییرات بازده و توان، تغییرات ولتاژ و جریان خروجی، وابستگی به ضریب تزویج و درجه آزادی برای اعمال محدودیت‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در این تحقیق، به بهبود عملکرد انتقال توان بدون سیم با توان **۳ kW** پرداخته می‌شود. در نتیجه موجب بهبود بازده میدل و کاهش تغییرات لحظه‌ای جریان و ولتاژ گردید. نتایج با استفاده از نرم‌افزار **PSIM**، بررسی و مورد تأیید قرار گرفته است. برای تأیید طراحی و نتایج شبیه‌سازی، یک نمونه **W ۱۲۰** با جبران ساز **LCC-S** شبیه‌سازی و ساخته شد.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۲/۳۱

کلید واژه ها:

انتقال توان القایی، انتقال توان بدون

سیم، شبکه جبران ساز

استناد: نصیری، ابوالفضل، ریاحی، سعید، حق مرام، رضا، ملایی، حسین. طراحی و ساخت شارژ بدون سیم با استفاده از جبران ساز LCC-S با قابلیت استفاده در وسایل نقلیه زیرسطحی. الکترومغناطیس کاربردی. (۱۴۰۴); ۱۳(۱): ۴۵-۵۴.

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/۲۰.۱۰۰.۱.۱.۲۶۴۵۵۱۵۳.۱۴۰۴.۱۳.۱.۶.۱>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.

ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع).



۱- مقدمه

سیم‌پیچ دارد، به همین منظور در برخی موارد از سیم‌پیچ چندلایه و یا چند سیم‌پیچ موازی با یکدیگر استفاده می‌شود [۱۷] و [۱۸]. بازده بالا و حالت ولتاژ و جریان خروجی ثابت در انتقال توان به ترتیب برای کاهش هزینه عملیاتی و تسهیل شارژ باتری از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۹] و [۲۰]. برای افزایش فاصله هوایی و غلبه بر تأثیرات ضریب تزویج از ساختارهای چند ورودی و چند خروجی (MIMO) و نظیر این موارد نیز می‌توان استفاده نمود [۲۱] و [۲۲]. خواص سیم‌پیچ انتقال توان بدون سیم زیرسطحی غوطه‌ور در آب دریا ویژگی‌هایی نظیر وابستگی به فرکانس امیدانس سیم‌پیچ، اندوکتانسهای خودی و متقابل، و اثرات اشکال سیم‌پیچ را می‌طلبد [۲۳] و [۲۴]. به‌منظور دستیابی به توان و بازده بالا در انتقال توان بدون سیم، ساختار مدار ورودی سری-خروجی موازی مبتنی بر سیم‌پیچ‌های دوطرفه، برای ارتقای ظرفیت انتقال توان با نیمه‌هادی با تلفات پایین ارائه شده است [۲۵]. برای افزایش فاصله و کاهش اثر ضریب تزویج بدون افزایش تعداد لایه‌های سیم‌پیچ، همچنین به دلیل خاصیت اندوکتانس بالای سیم‌پیچ‌ها، ولتاژ و جریان انتقال‌یافته غیر هم‌فاز هستند و بازده و توان سامانه کاهش می‌یابد که به‌منظور کاهش این اثر می‌توان از شبکه جبران ساز استفاده کرد [۲۶] - [۲۸]. استفاده از منابع تغذیه سوئیچینگ و ایجاد مدار تشدید در شبکه جبران ساز موجب افزایش بازده میدلهای الکترونیک قدرت در سامانه انتقال توان بی‌سیم شده است. [۲۹] و [۳۰]. برای به حداکثر رساندن راندمان انتقال توان القایی تک‌مرحله‌ای از طرح شارژ توان ثابت استفاده شده است [۳۱] و [۳۲]. ساختارهای ساده بیشتر در حالت سکون کامل کاربرد دارند و محدودیت‌هایی نظیر موج‌های زیرآب و تغییرات ناگهانی کمیت‌های الکتریکی با تغییر ضریب تزویج که سبب آسیب جدی به سامانه می‌شود، کاربری این شبکه‌ها در زیردریا را کم اثر می‌کنند [۳۳]. از مدولاسیون دیجیتال برای شارژ بدون سیم وسایل نقلیه برقی در توان بالا با استفاده از مبدل چند سطحی و تقویت‌کننده یکپارچه، به‌عنوان مبدل سمت اولیه استفاده می‌شود [۲۸]. با بررسی شرایط امیدانس و مشخصه ولتاژ و جریان ورودی می‌توان حالت خروجی با جریان یا ولتاژ ثابت، میزان وابستگی به تغییرات ضریب تزویج، مقاومت در برابر تغییرات ناگهانی کمیت‌های الکتریکی و موارد نظیر را در مبدل را پیدا نمود. [۳۴].

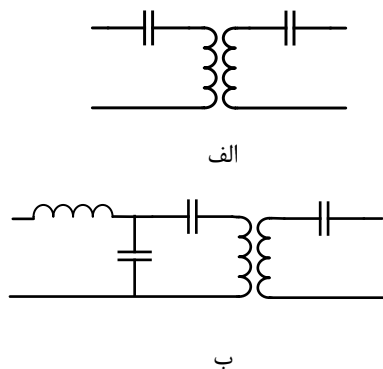
در این تحقیق نخست به بررسی نتایج شبکه‌های جبران ساز SS و LCC-DS پرداخته می‌شود. بازده سامانه با جبران ساز SS و LCC-DS بسیار نزدیک به یکدیگر است اما ویژگی‌های جبران ساز LCC-DS نظیر تأثیر ضریب تزویج بهتر از ساختار SS است. اما درجه آزادی زیاد در سمت ثانویه به دلیل عدم دسترسی آسان، خطرپذیری را به دلیل امکان آسیب در حین عملیات بالا می‌برد [۱]. ویژگی جبران ساز LCC-S بسیار شبیه به LCC-DS است اما در سمت ثانویه درجه آزادی و فضای نصب کمتر

با گسترش استفاده از وسایل نقلیه برقی، باتری‌ها و شارژ آن‌ها جهت رفع محدودیت‌های الکتریکی موردتوجه قرار گرفته است [۱] و [۲]. شارژ باتری در وسایل نقلیه برقی، نقش کلیدی در کارایی و قیمت آن‌ها دارد [۳]. وسایل نقلیه برقی محدودیت‌هایی نظیر چگالی توان و انرژی کم منابع انرژی نسبت به سوخت فسیلی را دارا هستند [۴] و [۵]. در وسایل نقلیه الکتریکی، اندازه کوچک ذخیره‌سازهای انرژی، مسافت قابل پیمایش کمتر از وسایل نقلیه با سوخت فسیلی و مدت‌زمان شارژ مجدد وسایل نقلیه الکتریکی بالاست. لذا دسترسی بیشتر به ایستگاه‌های شارژ و روش‌های انتقال توان موردتوجه است [۶]. سامانه‌های زیرسطحی به دلیل شرایط محیط عملیاتی، شرایط شارژ باتری متفاوتی نسبت به دیگر وسایل نقلیه برقی دارند. به دلیل ضدآب بودن بدنه سامانه، دسترسی به باتری و منابع تغذیه دشوار است. همچنین با توجه به محدودیت چگالی توان و منابع انرژی، مسافت پیمایشی کمی دارند. زمان زیاد شارژ مجدد، خطرات ناشی از اتصال فیزیکی نازل سبب شد تا محققان به دنبال روشی ایمن و کاربردی برای انتقال توان در این وسایل نقلیه باشند [۷]. سامانه‌های زیرسطحی به دلیل محدودیت‌هایی که در شارژ باتری‌های خوددارند در اغلب موارد نیاز به شارژرهای بدون سیم دارند. تفاوت‌هایی بین انتقال توان باسیم و انتقال توان بدون سیم وجود دارد که سبب شده است انتقال توان بدون سیم کلیدی‌تر از روش باسیم باشد و باعث پیشرفت صنعت وسایل نقلیه برقی زیرسطحی شود. انتقال توان بدون سیم می‌تواند از طریق القای مغناطیسی با کمک سیم‌پیچ، انتقال الکتریکی از طریق پد فلزی و یا امواج مکانیکی انجام شود [۸]. بازده شارژر بدون سیم در مقابل شارژر باسیم مقدار کمتری است [۹]. کاهش بازده به دلیل تلفات در سیم‌های رابط، پدها و تلفات افزایش فاصله هوایی و کاهش ضریب تزویج است [۱۰] و [۱۱]. با کمک انتقال توان بدون سیم می‌توان محدودیت‌های شارژر را کاهش داد، ضمناً به دلیل مدیریت شارژ باتری و عدم دخالت فیزیکی انسان، شارژ باتری با اطمینان بیشتری انجام می‌پذیرد [۱۲] و [۱۳]. حذف نازل انتقال توان، سبب افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری هنگام شارژ می‌شود [۱۴]. زمان شارژ با توجه به رفع محدودیت اتصال فیزیکی به منبع و محل شارژ معین کاهش می‌یابد [۶] و [۱۲].

ساختار سیم‌پیچ در کنار شبکه جبران ساز از جمله قسمت‌های پراهمیت در سامانه انتقال توان هستند. با توجه به ساختمان بدنه و شرایط کاری وسیله نقلیه، شکل و نوع پد را انتخاب می‌کنند و با توجه به شرایط کاری، شکل پد و نحوه عملکرد، شبکه جبران ساز را طراحی می‌کنند [۱۵] و [۱۶]. انتقال توان القایی رابطه مستقیم با قطر پد و خاصیت اندوکتانسی

تلفات سامانه به جهت غیر هم فاز بودن کمیت‌ها قرار می‌گیرند. شبکه جبران ساز اثر اندوکتانس متقابل پدها را محدود می‌کند و توان راکتیو را کاهش می‌دهد. شبکه جبران ساز بازده سامانه را افزایش داده و در حالت حداکثر قرار می‌دهد. همچنین کاهش تلفات سبب کاهش دمای سیم‌پیچ و افزایش عمر و بهره‌وری آن می‌گردد. شبکه جبران ساز کمیت‌های خروجی ولتاژ و جریان را تثبیت می‌کند و سامانه انتقال توان ویژگی‌های منبع ولتاژ و یا جریان را به خود می‌گیرد [۳۷]. با کمک شبکه جبران ساز تغییرات ناگهانی ولتاژ و جریان ناشی از تغییرات ضریب تزویج را تا حد زیادی دفع کرد. در سامانه زیرسطحی، سمت ثانویه شبکه جبران ساز باید سبک و با فضای نصب کم انتخاب شود. عدم دسترسی آسان به درون سامانه زیرسطحی سبب می‌گردد سمت ثانویه با حداقل درجه آزادی ممکن طراحی شود [۸]. به همین منظور از میان تمام شبکه‌های جبران سازی، جبران‌سازهای با ثانویه خازن سری انتخاب می‌شوند تا علاوه بر فضای نصب کم، قابلیت اطمینان سامانه افزایش یافته و در حالت ولتاژ و جریان ثابت عمل کند [۱۱].

در این پژوهش جبران‌سازهای SS و LCC-S مورد بررسی قرار گرفتند. شکل (۱) شمای شبکه‌های جبران ساز منتخب را نمایش می‌دهد.



شکل (۱). شبکه‌های جبران ساز انتقال توان بدون سیم الف) SS ب) LCC-S

جبران‌سازهای SS و LCC-S به دلیل کمیت‌های متقارن و مشخصه خروجی ولتاژ و جریان ثابت به‌طور گسترده در سامانه‌های انتقال توان بدون سیم استفاده می‌شوند. بنابراین مقایسه بین این دو ساختار انجام می‌شود.

مدار انتقال توان با جبران ساز SS در شکل ۲- نشان داده شده است. L_1 اندوکتانس سیم‌پیچ اولیه و L_2 اندوکتانس ثانویه، C_1 و C_2 خازن جبران ساز سری، V_{AB} ولتاژ اینورتر، I_p جریان سمت اولیه و I_s جریان ثانویه است.

مدار سامانه انتقال توان با جبران ساز LCC-S نیز در شکل ۳- نشان داده شده است. L_f اندوکتانس جبران ساز، C_1 و C_2 خازن جبران ساز سری، V_{AB} ولتاژ اینورتر، I_p جریان اولیه و I_s جریان ثانویه است.

است. به این منظور در این پژوهش به بررسی ویژگی‌های شبکه جبران ساز SS و LCC-S در سامانه انتقال توان با پد دایره‌ای و مقایسه نتایج با یکدیگر درصدد یافتن شبکه جبران ساز مناسب با بیشترین بازده، وزن و حجم مناسب، تغییرات کم در ولتاژ و جریان خروجی، درجه آزادی بالا و تثبیت توان خروجی پرداخته شده است. بدین منظور سامانه انتقال توان با شبکه‌های جبران ساز مختلف در شرایط یکسان مورد بررسی قرار می‌گیرند و یک ضریب تزویج معین به ازای حفظ ویژگی‌های مذکور تعیین می‌شود و با کمک ضریب تزویج رابطه بین فاصله هوایی و اندازه پد بیان می‌شود. در نهایت یک سامانه انتقال توان با شبکه جبران ساز با وزن و فضای نصب مناسب در وسیله نقلیه در فاصله هوایی مناسب با بیشترین محدوده تغییرات لحظه‌ای ارائه می‌شود.

در ادامه، در بخش دوم قسمت‌های مختلف سامانه انتقال توان بدون سیم معرفی می‌شوند سپس بخش سوم به طراحی سامانه با شبکه جبران ساز پرداخته می‌شود در نهایت در بخش چهارم به بررسی نتایج شبیه‌سازی و ساخت مقایسه کمیت‌های مختلف دو شبکه جبران ساز پرداخته شده است. در نهایت نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲- مبانی انتقال توان بدون سیم

۲-۱- عملکرد ترانسفورماتوری سیم‌پیچ‌ها

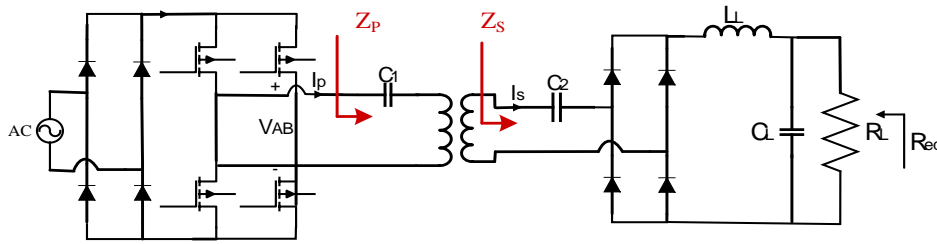
یکی از رایج‌ترین روش‌های انتقال توان با کمک سیم‌پیچ (در حالت ترانسفورماتوری) است. بازده سامانه انتقال توان با ضریب تزویج میان دو سیم‌پیچ رابطه مستقیم دارد به طوری که با افزایش ضریب تزویج، بازده سامانه انتقال توان نیز افزایش می‌یابد. ضریب تزویج و فاصله هوایی با یکدیگر رابطه عکس دارند و ایجاد فاصله هوایی زیاد موجب افزایش اندوکتانس نشستی و سبب کاهش بازده و توان انتقالی می‌گردد [۳۵] و [۳۶].

سیم‌پیچ‌ها با توجه به شرایطی نظیر فاصله هوایی پدها، تحمل جریان عبوری، شکل بدنه و محیط کاری سامانه در اندازه، شکل و مقدار اندوکتانس مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

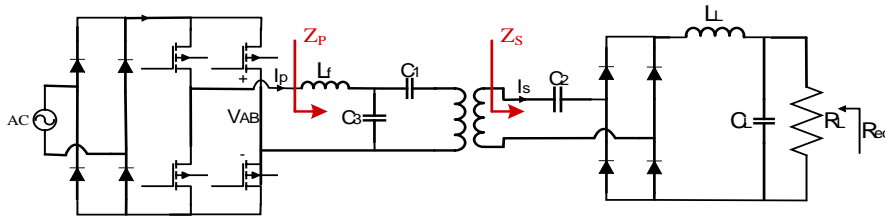
اندوکتانس و تعداد دور سیم‌پیچ به دلیل رابطه مستقیم فاصله هوایی انتقال توان با قطر و خاصیت مغناطیسی سیم‌پیچ از اهمیت بالایی برخوردار است. فرکانس کاری بالا اثر پوستی روی سیم‌پیچ‌ها را بیشتر می‌کند و سبب افزایش تلفات در سامانه می‌گردد، به همین دلیل از سیم لیتز در طراحی سیم‌پیچ استفاده می‌شود که سطح مقطع سیم‌های سیم‌پیچ و مقاومت سیم‌پیچ را کاهش داده و سبب افزایش بازده در سامانه می‌گردد.

۲-۲- شبکه‌های جبران ساز

مجموعه‌ای از سلف و خازن‌ها شبکه جبران ساز را تشکیل می‌دهند، که در سمت اولیه و ثانویه مبدل جهت کاهش تأثیر ضریب تزویج و



شکل (۲). مدار سامانه انتقال توان با جبران ساز SS



شکل (۳). مدار سامانه انتقال توان با جبران ساز LCC-S

ولتاژ خروجی اینورتر پس از جبران سازی به سمت ثانویه منتقل می‌شود از رابطه (۷) محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$V_{AB} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \cos\left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \quad (7)$$

V_o ولتاژ خروجی سامانه پس از یک‌سوسازی است که به بار منتقل می‌گردد. برای محاسبه ولتاژ V_o از رابطه (۸) استفاده می‌شود:

$$V_o = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{AB}' \quad (8)$$

V_{AB}' ولتاژ خروجی قبل یک‌سوسازی و V_o ولتاژ خروجی سامانه است. C_{eq} از طریق رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$C_{eq} = \frac{\pi^2 \sin \theta}{\omega \cdot R(\cos(\gamma\theta) + 1)} \quad (9)$$

θ زاویه فاز و R مقاومت معادل سامانه است.

طراحی شبکه جبران ساز با توجه ساختار شبکه متفاوت است برای این منظور در جدول (۱) روابط محاسبه شبکه‌های جبران ساز نمایش داده شده است.

$$\omega_r = \gamma \pi f \quad (10)$$

C_1 خازن سری سمت اولیه و C_2 خازن سری سمت ثانویه و C_3 خازن موازی سمت اولیه است.

k ضریب تزویج میان سیم‌پیچ‌هاست. ضریب تزویج سیم‌پیچ‌ها از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (11)$$

برای بررسی شرایط سامانه، فاصله هوایی‌های مرجع بافاصله‌های یکسان انتخاب می‌شوند. سپس با توجه به آن فاصله هوایی سامانه طراحی و کمیت‌های مختلف در فاصله هوایی‌های مختلف برای شبیه‌سازی شرایط دریا مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۳- طراحی مدار جبران ساز

برای طراحی مدار جبران ساز باید مقاومت‌های معادل سامانه در نظر گرفته شوند. با محاسبه مقاومت معادل و ولتاژ ورودی و خروجی می‌توان جریان‌های سمت اولیه و ثانویه را محاسبه کرد و طراحی سیم‌پیچ، خازن و سلف مناسب برای شبکه جبران ساز را انجام داد. محاسبات و طراحی المان‌های سامانه انتقال توان با شبکه‌های جبران ساز SS و LCC-S در ادامه ارائه شده است. مقاومت معادل سامانه از سمت اولیه با کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$Z_{ref} = \frac{j\omega \cdot M I_s}{I_p} = \frac{\omega^2 M^2}{R_{eq}} \left(1 + j\omega C_{eq} R_{eq}\right) \quad (1)$$

از رابطه (۲)، I_p و رابطه (۳)، I_s برای جبران ساز LCC-S محاسبه می‌شود [۲۴]:

$$I_p = \frac{V_{AB}}{j\omega L_f} \quad (2)$$

$$I_s = \frac{(j\omega M I_p)(1 + j\omega R_{eq} C_{eq})}{R_{eq}} \quad (3)$$

همچنین از روابط (۴) و (۵) جریان‌های اولیه و ثانویه مدار جبران ساز SS محاسبه می‌شود [۳۱]:

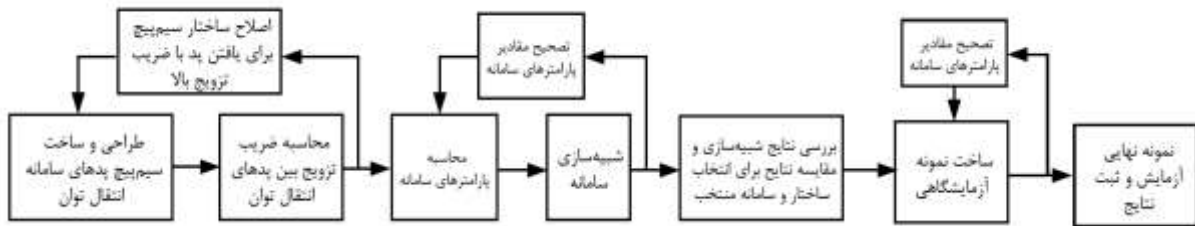
$$I_p = \frac{\gamma V_o \sin\left(\frac{B}{\gamma}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{\gamma} - \pi + \theta\right)}{\pi \omega M} \quad (4)$$

$$I_s = \frac{\gamma V_o \sin\left(\frac{\alpha}{\gamma}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{\gamma} - \pi\right)}{\pi \omega M} \quad (5)$$

که α و B زاویه هدایت ساق‌های اینورتر، M القای متقابل سیم‌پیچ‌ها و ω فرکانس زاویه‌ای مدار است. θ نیز اختلاف فاز بین جریان‌های اولیه و ثانویه است. مقاومت معادل بار از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$R_{eq} = \frac{\lambda R_L}{\pi^2} \quad (6)$$

انتخاب شده حالت مناسب برای شارژ در زیرسطحی است. همچنین جهت کاهش تلفات مبدل، با استفاده از مدار جبران ساز شرایط کلید زنی نرم برای کلیدها فراهم شده است. بدین ترتیب که با هم فاز نمودن ولتاژ و جریان کلیدها شرایط کلید زنی نرم ایجاد می‌گردد. در شکل (۴) بلوک دیاگرام طراحی و ساخت سامانه انتقال توان بی‌سیم نشان داده شده است.



شکل (۴). بلوک دیاگرام طراحی و ساخت سامانه انتقال توان بی‌سیم

۴- نتایج آزمایشگاهی

جدول (۲). اندوکتانس پدها در فاصله هوایی مختلف

فاصله (mm)	اولیه (uH)	ثانویه (uH)	ضریب تزویج
۰	۹۰.۷	۹۲.۳	۰.۸۵
۱۵	۶۹.۲	۶۸.۳	۰.۴۹۱
۳۰	۶۴.۵	۶۳.۸	۰.۲۸
۴۵	۶۳.۳	۶۲.۳	۰.۱۶۲
۶۰	۶۲.۹	۶۱.۷	۰.۱

همان‌طور که از نمودار شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است، تغییرات بازده در سامانه با جبران ساز طراحی شده بر اساس فاصله هوایی مرجع ۴.۵ cm و ضریب تزویج ۰.۱۶، بازده با کمترین تغییرات را نسبت به دیگر فاصله‌های مرجع دارد. ضریب تزویج در بازه ۰/۲۵ - ۰/۱۵، مناسب طراحی شبکه جبران ساز برای پدهای دایره‌ای است. بر اساس نتایج جدول (۳)، در فاصله هوایی ۳ cm بیشترین بازده در سامانه انتقال توان حاصل می‌گردد. با بررسی این موارد می‌توان دریافت ضریب تزویج در حدود ۰/۳ فاصله مناسبی را برای انتقال توان فراهم خواهد کرد. بر اساس جدول ۲- فاصله هوایی مناسب و قطر پد در سیم‌پیچ‌های دایره‌ای با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و افزایش قطر سیم‌پیچ‌ها، امکان افزایش فاصله هوایی انتقال توان میان دو پد را فراهم می‌کند.

بازده سامانه در ساختار LCC-S در اکثر فواصل هوایی بیشتر از ساختار SS است. دامنه تغییرات بازده در فواصل هوایی در ساختار LCC-S کمتر از ساختار SS است، به طوری که تغییرات بازده سامانه با جبران ساز LCC-S کمتر از ۳/۵٪ است.

ساختاری مناسب قرارگیری در سامانه است که کمترین تغییرات بازده و بیشترین تثبیت توان به ازای تغییرات ضریب تزویج در بیشترین بازه را دارا باشد. برای بررسی شرایط مختلف و مشاهده تغییرات در خروجی، مبدل تثبیت توان در مدار مورد استفاده قرار نگرفته است و طراحی شرایط بدون مبدل تثبیت توان انجام پذیرفته است، به همین دلیل شرایط نهایی

پس از طراحی قسمت‌های مختلف مدار انتقال توان، شبیه‌سازی با توان ۳ kW انجام پذیرفت. نتایج در فاصله هوایی‌های مختلف ثبت شدند. طراحی سامانه بر اساس حداکثر فاصله ۱۲ cm انجام شد. اندازه ضریب تزویج و خاصیت اندوکتانس پدهای دایره‌ای شکل در سمت اولیه و ثانویه با توجه به فاصله قرارگیری دو پد نسبت به یکدیگر در جدول ۲- ارائه شده است. قطر پدها ۱۲ cm بوده و اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها در حالت غیر تزویج به ترتیب در اولیه و ثانویه برابر ۶۲/۹ uH و ۶۱/۷ uH است. اندازه‌گیری مقادیر برای ضرایب بیشتر از ۰/۱ انجام پذیرفت. با توجه به روابط بخش طراحی و محاسبه مقدار اندوکتانس سیم‌پیچ‌ها، شبیه‌سازی سامانه با شبکه‌های جبران ساز انجام پذیرفت. نتایج در جدول ۳- قابل مشاهده است. همچنین در شکل‌های ۵ و ۶ نمودارهای بازده - فاصله هوایی جبران‌سازهای ارائه شده است. روش انجام این آزمایش بدین صورت است که چند فاصله هوایی به‌عنوان فاصله هوایی مرجع برای طراحی جبران ساز انتخاب شده‌اند. سپس در این فواصل هوایی، بدون تغییر المان‌های طراحی شده، سامانه در فاصله هوایی‌های مختلف مورد آزمایش قرار گرفت و تغییرات کمیت‌های خروجی و بازده سامانه بررسی شدند.

جدول (۱). روابط محاسبه شبکه جبران ساز

ساختار	محاسبات
SS	$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1 L_1}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}}$
LCC-S	$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 - M)}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}} = \frac{1}{\sqrt{C_3 L_f}}$ $L_f = M$

جدول (۳). کمیت‌های ورودی و خروجی و بازده ساختارهای LCC-S و SS در بازه‌های متفاوت با بارهای متفاوت

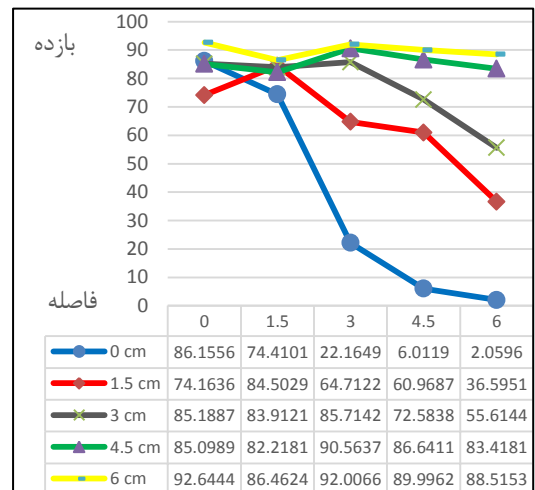
فاصله هوایی	فاصله هوایی مرجع	بازده SS	بازده LCC-S	SS				LCC_S			
				I_{out}	V_{out}	I_{in}	V_{in}	I_{out}	V_{out}	I_{in}	V_{in}
۰	۰	۸۶.۱	۸۷.۳۶	۳۵.۸	۸۶.۱	۳۵.۸	۱۰۰	۳۹.۵	۷۱	۳۲.۱	۱۰۰
۱.۵		۷۴.۴۴	۷۱.۱۵	۳۳.۵	۸۴	۳۷.۸	۱۰۰	۱۰	۳۷	۵.۲	۱۰۰
۰	۱.۵	۷۴.۱	۸۱.۸	۳۸.۹	۸۳	۳.۶	۱۰۰	۲۹.۹	۹۱	۳۳.۳	۱۰۰
۱.۵		۸۴.۵	۸۷.۷	۳۹.۵	۷۵	۳۵.۱	۱۰۰	۴۰	۷۲	۳۲.۹	۱۰۰
۱.۵	۳	۸۳.۹	۸۷	۳۴.۴	۸۶	۳۵.۳	۱۰۰	۳۲.۲	۸۸.۵	۳۳.۸	۱۰۰
۳		۸۵.۷	۸۷	۳۹.۴	۷۵	۳۴.۵	۱۰۰	۳۹.۶	۷۵.۱	۳۴.۲	۱۰۰
۱.۵	۴.۵	۸۲.۲	۸۷.۶	۳۴.۴	۷۷	۳۲.۲	۱۰۰	۳۵	۸۵.۵	۳۴.۲	۱۰۰
۳		۹۰.۶	۸۸.۳	۴۰	۷۶.۱	۳۳.۶	۱۰۰	۳۹.۳	۷۴.۷	۳۳.۱	۱۰۰
۴.۵		۸۶.۶	۸۷	۴۵	۶۷.۷	۳۵.۲	۱۰۰	۴۰.۱	۷۲.۳	۳۳.۳	۱۰۰
۳	۶	۹۲	۹۱.۳	۴۰.۷	۷۴	۳۳	۱۰۰	۳۱.۱	۹۵.۴	۳۲.۵	۱۰۰
۴.۵		۹۰	۸۹.۴	۴۱.۱	۷۰	۳۲.۲	۱۰۰	۳۸.۵	۷۶.۹	۳۳.۱	۱۰۰
۶		۸۸.۵	۸۷.۷	۴۸.۵	۶۳.۱	۳۴.۶	۱۰۰	۴۷.۸	۶۲.۳	۳۴	۱۰۰

شارژر با دو ساختار LCC-S, SS در دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت شبیه‌سازی شده است (جدول (۴)). طبق جدول (۴) با توجه به فاصله هوایی مرجع، در ساختار LCC-S اگر فاصله هوایی میان پدها کمتر از فاصله هوایی مرجع طراحی شود، تغییرات جریان خروجی کم می‌شود. در فاصله‌های بیشتر از فاصله طراحی نیز رفتاری با تغییرات ولتاژی کم دارد. برای اثبات نتایج به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی و با توجه به انتخاب شبکه جبران ساز LCC-S، نمونه ۱۲۰W در فاصله هوایی منتخب با جبران ساز LCC-S، شبیه‌سازی و ساخته شده است. در شکل ۷- نمای کلی سامانه ساخته شده قابل مشاهده است. نتایج شبیه‌سازی و نمونه ساخته شده در شکل‌های ۸ تا ۱۱ قابل مشاهده است.

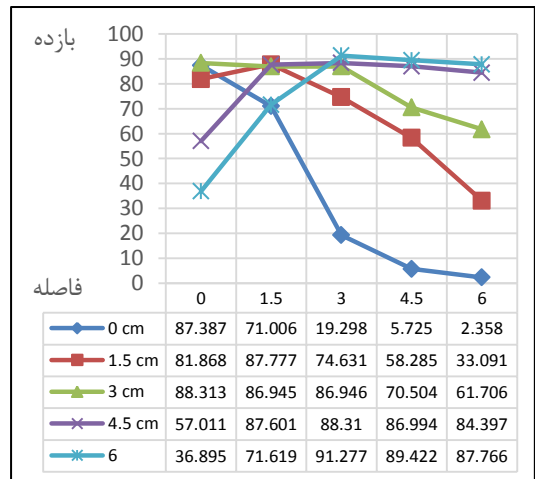
جدول (۴). ویژگی‌های ساختار شبکه جبران ساز در سامانه

ساختار سمت اولیه	نوع منبع توان	اندازه و حجم ساختار
SS	ولتاژ	کم
LCC-S	ولتاژ و جریان	زیاد

با توجه به نتایج حاصل شده و برابری نتایج شبیه‌سازی و نمونه ساخته شده، دریافت شد که نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار psim تأیید شده است. از شکل (۹) می‌توان دریافت که مبدل DC-AC سامانه در حالت کلید زنی نرم قرار دارد و صحت عملکرد جبران ساز را تأیید می‌کند.



شکل (۵). نمودار بازده-فاصله با جبران ساز SS

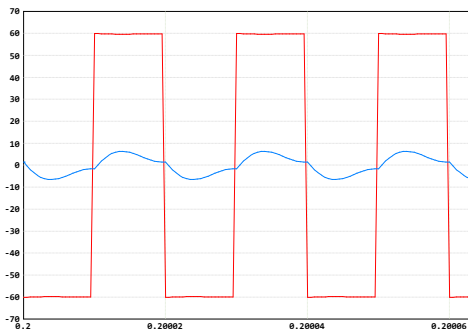


شکل (۶). نمودار بازده-فاصله با جبران ساز LCC-S

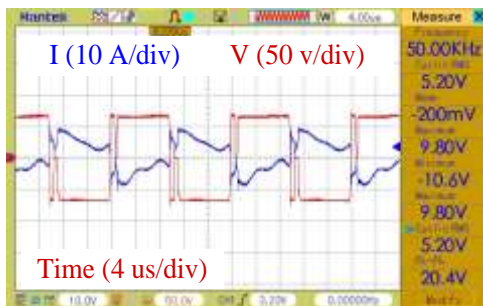
جدول (۵). مقادیر کمیت‌های سامانه انتقال توان بی‌سیم

مقدار	علامت کمیت	مقدار	علامت کمیت
۱۰/۲ uH	M	۱۹۱ nF	C _۱
۵۰ kHz	F	۱۶۳ nF	C _۲
۴۵ mm	D	۹۹۳ nF	C _p
۰/۶ Ω	R _L	۶۳/۳ uH	L _۱
۰/۶ Ω	R _L	۶۲/۳ uH	L _۲
۲۴ Ω	R _{Load}	uH	L _r
		۲۸/۴	

مبدل‌ها نشان از عملکرد صحیح سامانه و شبکه جبران ساز است.



الف

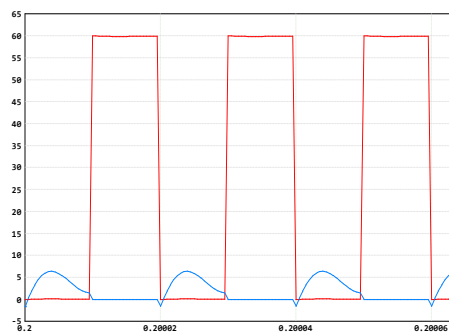


ب

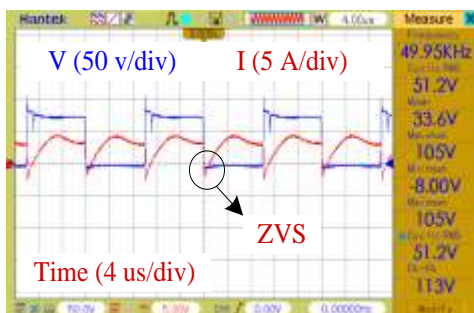


شکل (۷). نمای کلی مدار آزمون آزمایشگاهی

شکل (۸). ولتاژ و جریان خروجی اینورتر در فاصله هوایی ۳ cm بافاصله مرجع ۴/۵ cm (الف) شبیه‌سازی (ب) نمونه ساخته شده



الف



ب

شکل (۹). ولتاژ و جریان خروجی روی کلید در فاصله هوایی ۳ cm بافاصله مرجع ۴/۵ cm (الف) شبیه‌سازی (ب) نمونه ساخته شده

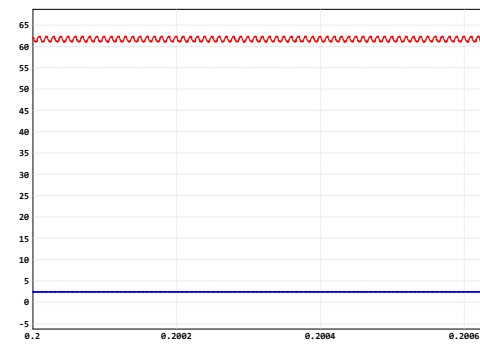
در جدول (۵) مقادیر المان‌های سامانه انتقال توان ساخته شده با توان ۱۲۰ W آورده شد.

۴- نتیجه‌گیری

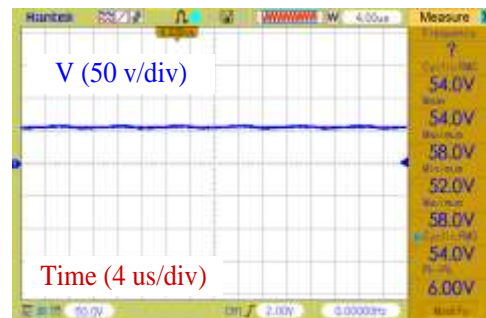
با توجه به برتری‌های شبکه جبران ساز LCC-S در سامانه انتقال توان بی‌سیم مورد استفاده قرار گرفته است. بازده LCC-S در فاصله هوایی ثابت نسبت به جبران ساز SS از ای خروجی ۳ kW، حدود ۳/۵٪ تغییرات مثبت دارد. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، فاصله هوایی ۴/۵ cm مناسب برای طراحی جبران ساز و فاصله ۳ cm مناسب جهت انتقال توان است. بیشترین بازده در این فاصله بدون نیاز به مبدل DC-DC برابر ۸۷/۷٪ است و تغییرات کمتر از ۲٪ را به ازای تغییرات کمتر از ۲۰٪ قطر پد نیز متحمل می‌شود. نسبت فاصله هوایی به قطر پد مناسب حدود ۴۰٪ بوده و ضریب تزویج در محدوده ۰/۲ تا ۰/۵ است. ضریب تزویج مناسب برای انتقال توان با بازده حداکثر در محدوده ۰/۲۵ - ۰/۱۵ است. برای اثبات نتایج شبیه‌سازی یک نمونه ۱۲۰ W با شبکه جبران ساز LCC-S شبیه‌سازی و ساخته شد. توان خروجی سامانه در نمونه ساخته شده ۱۲۰ W و بازده سامانه ۸۷/۷٪ شد و در شبیه‌سازی سامانه توان ۱۲۰ W با بازده ۸۹٪ حاصل شد. خطای شبیه‌سازی و نمونه ساخته شده ۱/۳٪ است. دریافت توان ۱۲۰ W در شبیه‌سازی و نمونه عملی با خطای کم در محاسبه بازده، همچنین حالت سوئیچینگ

۵- مراجع

- [۱] Z. Yan, Y. Zhang, K. Zhang, B. Song, and C. Mi, "Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for AUVs," IET Power Electronics, vol. ۱۲, no. ۱۰, pp. ۲۵۵۹-۲۵۶۵, ۲۰۱۹.
- [۲] H. Wang, U. Pratik, A. Jovicic, N. Hasan, and Z. Pantic, "Dynamic wireless charging of medium power and speed electric vehicles," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. ۷۰, no. ۱۲, pp. ۱۲۵۵۲-۱۲۵۶۶, ۲۰۲۱.
- [۳] Y. Zhang, S. Chen, X. Li, and Y. Tang, "Design of high-power static wireless power transfer via magnetic induction: An overview," CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, vol. ۶, no. ۴, pp. ۲۸۱-۲۹۷, ۲۰۲۱.
- [۴] S. A. Q. Mohammed and J.-W. Jung, "A comprehensive state-of-the-art review of wired/wireless charging technologies for battery electric vehicles: Classification/common topologies/future research issues," IEEE Access, vol. ۹, pp. ۱۹۵۷۲-۱۹۵۸۵, ۲۰۲۱.
- [۵] A. Nasiri, M. Gangi, and S. M. Alavi, "Performance Improvement of High Voltage Transformer in Klystron Amplifier Power Supply by Magnetizing Current Balancing," Nashriyah-i Muhandisi-i Barq va Muhandisi-i Kamyutar-i Iran, vol. ۱۱۱, no. ۲, pp. ۱۵۰-۱۵۶, ۲۰۲۴ (In Persian).
- [۶] G. Palani, U. Sengamalai, P. Vishnuram, and B. Nastasi, "Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles," Energies (Basel), vol. ۱۶, no. ۵, p. ۲۱۳۸, ۲۰۲۳.
- [۷] X. Yan, L. Wang, Z. Chai, S. Zhao, Z. Liu, and X. Sun, "Electric vehicle battery simulation system for mobile field test of off-board charger," Energies (Basel), vol. ۱۲, no. ۱۵, p. ۳۰۲۵, ۲۰۱۹.
- [۸] J. Van Mulders et al., "Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases," Sensors, vol. ۲۲, no. ۱۵, p. ۵۵۷۳, ۲۰۲۲.
- [۹] P. K. Chittoor, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards," IEEE access, vol. ۹, pp. ۶۹۲۳۵-۶۹۲۶۶, ۲۰۲۱.
- [۱۰] A. Nasiri and M. R. Banaei, "A new magnetron driving method using a phase shifted active clamp forward converter for sulfur plasma tube applications," IET Power Electron., vol. ۱۴, no. ۲, pp. ۴۴۲-۴۵۳, ۲۰۲۱.
- [۱۱] A. Nasiri, M. R. Banaei, S. M. Alavi, and S. Hosseinzadeh, "A New Control Method for Magnetron Lamp Power Supply Using Forward-Flyback Converter With Active Clamp," IEEE Trans. On Plasma Science., vol. ۵۱, no. ۸, pp. ۲۳۹۰-۲۳۹۸, Aug. ۲۰۲۳.
- [۱۲] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z. Y. Shao, and L. Jian, "The state-of-the-arts of wireless electric vehicle charging via magnetic resonance: principles, standards and core technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. ۱۱۴, p. ۱۰۹۳۰۲, ۲۰۱۹.
- [۱۳] A. I. Mahmood, S. K. Gharghan, M. A. Eldosoky, and A. M. Soliman, "Near- field wireless power transfer used in biomedical implants: A comprehensive review," IET

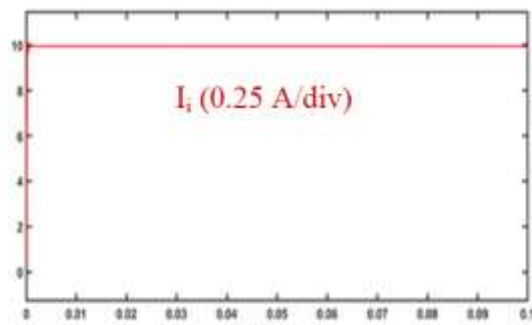


الف

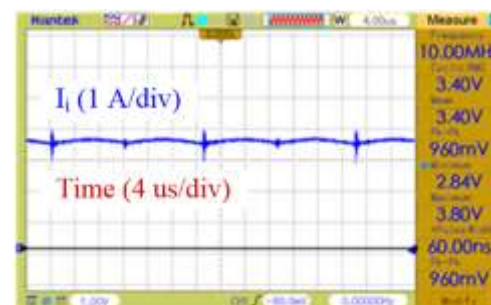


ب

شکل (۱۰). ولتاژ و جریان خروجی سامانه در فاصله هوایی ۳ cm با فاصله مرجع ۴/۵ cm (الف) شبیه‌سازی (ب) نمونه ساخته شده



الف



ب

شکل (۱۱). شکل موج جریان ورودی مبدل (الف) شبیه‌سازی (ب) نمونه آزمایشگاهی

- applications,” IEEE Access, vol. ۸, pp. ۶۵۴۳۲–۶۵۴۴۲, ۲۰۲۰.
- [۲۶] Y. Li et al., “Efficiency analysis and optimization control for input-parallel output-series wireless power transfer systems,” IEEE Trans Power Electron., vol. ۳۵, no. ۱, pp. ۱۰۷۴–۱۰۸۵, ۲۰۱۹.
- [۲۷] K. Sivagami, J. Channegowda, and P. Damodharan, “Recent Advances in Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging,” Power Electronics for Green Energy Conversion, pp. ۵۴۵–۵۷۲, ۲۰۲۲.
- [۲۸] W. V. Wang, D. J. Thrimawithana, and M. Neuburger, “An Si MOSFET-based high-power wireless EV charger with a wide ZVS operating range,” IEEE Trans. Power Electron., vol. ۳۶, no. ۱۰, pp. ۱۱۱۶۳–۱۱۱۷۳, ۲۰۲۱.
- [۲۹] Y. Guo, Y. Zhang, B. Yan, K. Wang, Z. Zhang, and L. Wang, “Interoperability analysis of compensation network in electric vehicle wireless charging system,” in ۲۰۱۸ IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), ۲۰۱۸.
- [۳۰] M. Hadizade, R. Haghmaram, A. Nasiri, and H. mollaie, “Improved Soft Switching Range (ZVS) in Wireless Charger,” Scientific Journal of High Speed Craft Engineering, vol. ۲۲ no. ۶۲, pp. ۲۴–۳۲, ۲۰۲۴ (In Persian).
- [۳۱] N. Z. Saadabad, S. H. Hosseini, A. Nasiri, and M. Sabahi, “New soft- switched high gain three- port DC–DC converter with coupled inductors,” IET Power Electronics, vol. ۱۳, no. ۱۹, pp. ۴۵۶۲–۴۵۷۱, ۲۰۲۰.
- [۳۲] N. Z. Saadabad, A. Nasiri, and J. Nekoui, “A new three-port DC/DC converter with soft switching, for PV applications,” International Journal of Circuit Theory and Applications, doi.org/۱۰.۱۰۰۲/cta.۴۱۰۷
- [۳۳] A. Nasiri, and S. J. Tabatabaei, “Optimal Design of Pedestal Mechanism Servo Electric Motor,” Scientific Journal of High Speed Craft Engineering, vol. ۲۱, no. ۶۱, pp. ۴۵–۵۱, ۲۰۲۳. (In Persian).
- [۳۴] J. Hou, Q. Chen, Z. Zhang, S.-C. Wong, and K. T. Chi, “Analysis of output current characteristics for higher order primary compensation in inductive power transfer systems,” IEEE Trans. Power Electron., vol. ۳۳, no. ۸, pp. ۶۸۰۷–۶۸۲۱, ۲۰۱۷.
- [۳۵] M. R. Banaei, A. Nasiri, S. M. Alavi, and S. Hosseinzadeh, “Voltage Control of Magnetron Power Supply Utilizing Active Clamp Flyback Converter,” Scientific Journal of Applied Electromagnetics, vol. ۷, no. ۱, pp. ۷۳–۸۲, ۲۰۱۹. (In Persian).
- [۳۶] A. Nasiri, M.R. Banaei, S. M. Alavi, and SH. Hosseinzadeh, “A New Driving Method for a Magnetron Tube Using Phase-Shifted HalfBridge Converter,” Journal of Radar, vol. ۸, no. ۲, pp. ۹–۲۰, ۲۰۲۰. (In Persian).
- [۳۷] I.-S. Sorlei et al., “Fuel cell electric vehicles—A brief review of current topologies and energy management strategies,” Energies (Basel), vol. ۱۴, no. ۱, p. ۲۵۲, ۲۰۲۱.
- Power Electronics, vol. ۱۵, no. ۱۶, pp. ۱۹۳۶–۱۹۵۵, ۲۰۲۲.
- [۱۴] J. Shi, D. Li, and C. Yang, “Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications,” Journal of Zhejiang University SCIENCE C, vol. ۱۵, no. ۱, pp. ۵۱–۶۲, ۲۰۱۴.
- [۱۵] H. Liu, L. He and B. Cheng, “A Powerless Fractional-Order WPT System with Extended Zero Voltage Switching Region,” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, doi: ۱۰.۱۱۰۹/TIE.۲۰۲۴.۳۴۴۷۷۳۳.
- [۱۶] W. Li, W. Mei, Q. Yuan, Y. Song, Z. Dongye, and L. Diao, “Detuned Resonant Capacitors Selection for Improved Misalignment Tolerance of LCC-S Compensated Wireless Power Transfer System,” IEEE Access, vol. ۱۰, pp. ۴۹۴۷۴–۴۹۴۸۴, ۲۰۲۲.
- [۱۷] M. G. S. Pearce, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Robust ferrite-less double D topology for roadway IPT applications,” IEEE Trans Power Electron, vol. ۳۴, no. ۷, pp. ۶۰۶۲–۶۰۷۵, ۲۰۱۸.
- [۱۸] S.-J. Jeon and D.-W. Seo, “Effect of additional transmitting coils on transfer distance in multiple-transmitter wireless power transfer system,” IEEE Access, vol. ۱۰, pp. ۹۱۷۴–۹۱۸۳, ۲۰۲۲.
- [۱۹] A. Zakerian, S. Vaez-Zadeh, and A. Babaki, “A dynamic WPT system with high efficiency and high power factor for electric vehicles,” IEEE Trans Power Electron, vol. ۳۵, no. ۷, pp. ۶۷۳۲–۶۷۴۰, ۲۰۱۹.
- [۲۰] S. Riahy, R. Haghmaram, and A. Nasiri, “Investigation of Methods of Compensation of Wireless Power Transmission in Semi-Dynamic Mode and Selection of Suitable Air Distance,” Scientific Journal of High Speed Craft Engineering, vol. ۲۲ no. ۶۲, pp. ۵۲–۶۲, ۲۰۲۴ (In Persian).
- [۲۱] E. Chaidee, A. Sangswang, S. Naetiladdanon, and S. Nutwong, “An Inverter Topology for MultiTransmitter Wireless Power Transfer Systems,” IEEE Access, vol. ۱۰, pp. ۳۶۵۹۲–۳۶۶۰۵, ۲۰۲۲.
- [۲۲] X. Liu, T. Wang, F. Gao, M. M. Khan, X. Yang, and D. J. Rogers, “A resonant inductor integrated-transformer-based receiver for wireless power transfer systems,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ۷۰, no. ۴, pp. ۳۶۱۶–۳۶۲۶, ۲۰۲۲.
- [۲۳] Q. Zhu, L. Wang, Y. Guo, C. Liao, and F. Li, “Applying LCC compensation network to dynamic wireless EV charging system,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. ۶۳, no. ۱۰, pp. ۶۵۵۷–۶۵۶۷, ۲۰۱۶.
- [۲۴] T. Orekan, P. Zhang, T. Orekan, and P. Zhang, “Study and Analysis of Underwater Wireless Power Transfer,” Underwater Wireless Power Transfer: Smart Ocean Energy Converters, pp. ۳۵–۴۹, ۲۰۱۹.
- [۲۵] C. Cai, Y. Zhang, S. Wu, J. Liu, Z. Zhang, and L. Jiang, “A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging