

بررسی روش‌های جبران‌سازی انتقال توان بی‌سیم در حالت نیمه دینامیک و انتخاب فاصله هوایی مناسب با قابلیت استفاده در

سامانه‌های زیرسطحی

سعید ریاحی^۱، رضا حق مرام^۲ و ابوالفضل نصیری^۳

۱-دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، saeedriahy@ihu.ac.ir

۲-دانشیار دانشکده برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، rhaghmm@ihu.ac.ir

۳-استادیار دانشکده فنی، سیگنالی و فضای، دانشگاه افسری و تربیت پاسداری امام حسین (ع)، nasirieng@gmail.com

چکیده:

در این تحقیق به بررسی روش‌های جبران‌سازی به کار رفته در سامانه انتقال بدون سیم در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی پرداخته شده است. انتخاب فاصله هوایی مناسب برای انتقال توان بدون سیم به ملاحظات فنی نیاز دارد. در کنار این موارد باید ویژگی هر سیم‌پیچ و ساختار شبکه جبران‌سازی نیز مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش ساختار شبکه‌های جبران‌سازی رایج برای سامانه انتقال توان در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی مورد بررسی قرار گرفته و پس از بررسی ویژگی‌های مختلف هر شبکه جبران‌ساز، برای شبکه‌های منتخب بررسی و آزمایش بیشتر انجام پذیرفته‌است. فاصله هوایی انتقال توان در سامانه رابطه عکس با ضریب تزویج سامانه دارد به نحوی که با افزایش بیش از حد فاصله هوایی ضریب تزویج بسیار کاهش می‌یابد و انتقال توان بطور کامل قطع می‌گردد، لذا بازه ضریب تزویج ایده‌آل در سامانه با سیم‌پیچ‌های دایره‌ای شکل به ازای تغییر فاصله هوایی بیان شد. در پایان ساختار شبکه جبران‌ساز مناسب سامانه انتقال توان در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی با توان ۳kW انتخاب شده و فاصله هوایی مناسب برای دریافت توان با بیشترین بازده انتخاب گردیده است. بازده سامانه با شبکه جبران‌ساز منتخب و فاصله هوایی معین در حدود ۸۹٪ بدون استفاده از مبدل کنترل‌کننده برای کاهش فضای نصب و ابعاد در سمت ثانویه و در فاصله هوایی تقریبی ۴۰٪ قطر پد حاصل شد. نتایج تحقیق با استفاده از نرم افزار Psim، بررسی و مورد تایید قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی:

انتقال توان بدون سیم، شبکه جبران‌ساز، نیمه‌دینامیک

Investigation of Methods of Compensation of Wireless Power Transmission in Semi-Dynamic Mode and Selection of Suitable Air Distance with Usability in Subsurface Systems

Saeed Riahy¹, Reza Haghmaram², Abolfazl Nasiri³

1 Electrical Engineering Department, Imam Hossein University

2,3 Raad Center, Electrical Faculty, Imam Hossein University

Abstract:

This study investigates the compensation methods used in the wireless power transfer system in the semi-dynamic subsurface mode. Choosing the appropriate air gap for wireless power transfer requires technical considerations. Along with these, the characteristics of each coil and the compensation network structure should also be considered. In this study, the structure of common compensation networks for the power transfer system in the semi-dynamic subsurface mode was investigated and after examining the different characteristics of each compensation network, further investigation and testing was performed for the selected networks. The air gap of power transfer in the system has an inverse relationship with the coupling coefficient of the system, so that with

increasing the air gap excessively, the coupling coefficient decreases significantly and the power transfer is completely cut off, so the ideal coupling coefficient range in the system with circular coils was expressed for changing the air gap. The appropriate compensation network structure for wireless power transmission in semi-dynamic mode with 3 kW power and appropriate airspace for receiving the maximum efficiency power was selected. Suitable efficiency of the converter was obtained with the selected compensator network and an approximate air distance of 40% of the diameter of the pad. The results of the research have been investigated and confirmed using PSIM software.

Keywords: Compensating network, Semi-dynamics, Wireless power transmission

کاهش می‌دهد [9]، [12]. دلیل اهمیت سطح شارژ باتری و قابلیت اطمینان سیستم و عدم دخالت فیزیکی انسان، شارژ باتری با ایمنی، سرعت و بازده بیشتر نسبت به شارژر سیم‌دار از شارژر بدون سیم استفاده می‌شود [13-15]. مرجع [16] نمونه‌ای از پدهای انتقال توان برای شارژر را طراحی نموده است و کمیت‌های طراحی کلیدی برای تعیین تأثیر آنها بر توان سیم‌پیچ و عملکرد آن را مورد بررسی قرار داده است. در مرجع [17]، سیر تکامل ساختار جفت‌کننده مغناطیسی مورد بررسی قرار گرفته و یک جفت‌کننده مغناطیسی مبتنی بر سیم‌پیچ دوقطبی با یک روش جفت‌سازی محیطی جدید ارائه نموده است. سیم‌پیچ‌های حلقوی به‌طور گسترده در سامانه شارژر بدون سیم زیر آب استفاده می‌شود اما وزن سیم‌پیچ حلقوی، بار منبع تغذیه و وسایل نقلیه زیر آب را به شدت افزایش می‌دهد. در [18]، یک سامانه انتقال توان زیرسطحی با ساختار پدهای سیم‌پیچ خمیده برای انطباق با بدنه استوانه‌ای وسایل نقلیه زیر آب خودران پیشنهاد شده است. سیم‌پیچ‌ها در حالت‌های تک‌قطبی و دوقطبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ساختار سیم‌پیچ دوقطبی دارای ثانویه سنگین تری نسبت به ساختار سیم‌پیچ خمیده تک‌قطبی است. میدان الکترومغناطیسی در وسایل نقلیه زیر آب ساختار سیم‌پیچ دوقطبی بسیار کوچکتر از ساختار سیم‌پیچ خمیده تک‌قطبی است، به این معنی که ساختار سیم‌پیچ دوقطبی تأثیر کمتری بر ادوات الکترونیکی در وسایل نقلیه زیر آب دارد. فناوری انتقال توان بدون سیم به دو حالت کلی متحرک و ثابت دسته‌بندی می‌شود. نمونه رایج انتقال توان بدون سیم حالت ثابت (استاتیک) است. در شارژر بدون سیم استاتیک فاصله گیرنده و فرستنده همواره در یک اندازه معین و تقریباً ثابت می‌باشد. در این حالت ناهماهنگی میان پدها و مشکلات ضریب تزویج در نظر گرفته نمی‌شود. مشکلات مذکور با تنظیم دقیق شبکه جبران‌ساز و طراحی مناسب یک مبدل تثبیت توان در ثانویه تا حدود بسیار زیادی مرتفع می‌شوند [6-8].

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر گسترش صنایع و مصرف سوخت‌های فسیلی سبب افزایش آلودگی‌های زیست محیطی و تغییرات آب و هوایی شده‌اند. به همین منظور فعالیت خودروهایی برقی، وسایل نقلیه عمومی برقی، تجهیزات زیردریایی، کشتی‌ها، حمل و نقل ریلی برقی و نمونه‌های بسیار دیگر افزایش یافته است و انتقال توان الکتریکی و شارژ باتری‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند [1]، [2]. امروزه سامانه‌های شارژ الکتریکی در دو نوع سیم‌دار و بدون-سیم در دسترس هستند. با توجه به کاربرد و فضای استفاده از وسایل الکتریکی یکی از این دو نوع روش شارژر مورد استفاده قرار می‌گیرد. تفاوت‌هایی در بین شارژرهای با اتصال فیزیکی سیم‌دار با سامانه‌های شارژر بدون سیم وجود دارد که سبب شده‌اند روش شارژر بدون سیم، کاربردی‌تر و باعث پیشرفت در صنعت خودروهایی الکتریکی شود [3-7]. انتقال توان بدون سیم به دو دسته کلی میدان نزدیک و میدان دور دسته‌بندی می‌گردد. در میدان نزدیک فرکانس کاری پایین و بصورت امواج الکترومغناطیسی و یا امواج الکتریکی بصورت مسیر انتقال دید مستقیم هستند. در دسته دیگر که میدان دور هستند و به روش تابشی معروف هستند با کمک انتقال امواج رادیویی، مایکروویو و یا تابش نوری توان را منتقل می‌کنند. انتقال توان بدون سیم از طریق القا مغناطیسی و یا امواج آکوستیک انجام می‌شود و دارای مزایا متعددی نسبت به انتقال توان سیم‌دار است [7-9]. انتقال توان بدون سیم می‌تواند محدودیت‌های ذخیره‌سازی انرژی را کاهش دهد. اولین مزیت شارژر بدون سیم حذف کابل انتقال انرژی است؛ در شارژر سیم‌دار، محدودیت محل شارژر مطرح است، با حذف کابل انتقال توان، قابلیت انعطاف-پذیری در محل شارژر افزایش یافت و این مشکل مرتفع شد [10]، [11]. این روش انتقال توان، زمان شارژر را با توجه به کاهش محدودیت‌های اتصال به منبع و محل شارژ شدن،

در حالت متحرک (دینامیک) برای شارژ باتری وسیله نقلیه نیاز به توقف کامل نیست و با حرکت در جهت‌های مختلف نیز می‌توان باتری را شارژ کرد. برای این حالت باید اینورتر فرکانس بالا، سیم‌پیچ‌های مناسب، شبکه جبران‌ساز و تشدیدکننده‌های مناسب با تغییرات ضریب تزویج طراحی شوند [19-22]. حالت نیمه‌دینامیک بسیار نزدیک به حالت استاتیکی است. در این روش، سامانه در ابتدای روند شارژ شرایط با توجه به فاصله هوایی پدها تنظیم می‌شود، سپس این شرایط تا اتمام شارژدهی به باتری ثابت باقی می‌ماند [23, 24]. تغییرات در فاصله هوایی پدها سبب تغییرات ضریب تزویج سیم‌پیچ‌ها می‌شود که باعث به وجود آمدن توان غیرحقیقی مازاد نیاز در خروجی اینورتر و به طبع آن کاهش بازده سامانه و موارد از این قبیل می‌شود که سبب شد شبکه‌های جبران‌ساز در انتقال توان بدون سیم از اهمیت بالایی برخوردار باشند [25]. با توجه به وابسته بودن توان انتقالی و ضریب تزویج میان سیم‌پیچ‌ها، تشخیص موقعیت سیم‌پیچ‌ها و حذف ناهماهنگی میان سیم‌پیچ در انتقال توان بدون سیم بسیار حائز اهمیت است. مرجع [26]، یک استراتژی انتخاب خازن تشدید تنظیم‌شده برای از بین بردن تأثیر تغییر ضریب تزویج بر توان و بازده یک سامانه انتقال توان بدون سیم با استفاده از جبران‌ساز LCC-S پیشنهاد می‌کند. در [27]، طراحی مبدل تشدیدشده با جبران‌ساز مستقل از سیم‌پیچ‌ها برای کاربرد شارژ وسیله نقلیه الکتریکی با شکاف هوایی 80 mm و ولتاژ خروجی با برد وسیع ارائه شده است. به جای داشتن فرکانس تشدید یکسان در مدارهای جبران‌ساز اولیه و ثانویه رایج در این نوع سامانه‌ها، از فرکانس‌های تشدید متفاوت برای برآوردن مشخصات سامانه استفاده شده است.

مقاله [13]، یک روش جدید با استفاده از سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده تعبیه شده در سامانه و ماژول‌های الکترونیک قدرت برای ایجاد یک سامانه تشخیص موقعیت و زمان شارژ بر اساس اثرات توان به جای مانده از یک گیرنده استفاده می‌کند. مرجع [14] یک الگوریتم برای پیش‌گیری از اشباع سیم‌پیچ‌ها ارائه می‌کند. برای این منظور مبدل‌های dc-dc تمام‌پل فعال که در سامانه شارژ استفاده می‌شوند را مورد هدف قرار می‌دهد. پیش‌گیری از اشباع با تشخیص تغییر در شیب جریان سیم‌پیچ‌ها در نزدیکی مرز اشباع و تغییرات چرخه کاری بر روی مبدل حاصل می‌شود. مرجع [21]، یک استراتژی کنترلی برای به حداکثر رساندن بهره‌وری انرژی در شرایط ناهماهنگی مختلف بین پدها و رابطه بین بازده و

نسبت ولتاژهای خروجی اینورترهای سمت فرستنده تحت ناهم‌ترازی‌های مختلف ارائه نمود.

در این پژوهش، تحلیل و بررسی تأثیر تغییر فاصله هوایی بین پدهای گیرنده و فرستنده در شارژر بدون سیم در محدوده تغییرات معین و یافتن مناسب‌ترین ساختار جبران‌سازی با بیشترین بازده در مبدل 3kW با ولتاژ خروجی 60V و جریان خروجی 50A با فرکانس کلیدزنی 50kHz است.

در این پژوهش با شبیه‌سازی شبکه‌های جبران‌ساز مختلف، چند شبکه جبران‌ساز مناسب برای کاربری زیرسطحی انتخاب شد تا شرایط کار سامانه زیرسطحی را فراهم کند. سپس شبکه جبران‌ساز طراحی شده بصورت نیمه‌دینامیک با تغییرات فاصله هوایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و کمیت‌های توان، بازده و تغییرات ناگهانی ولتاژ و جریان بررسی شده‌اند و در نهایت یک ساختار با شرایط مناسب و فاصله هوایی مناسب برای کاربری در انتقال توان بدون سیم نیمه-دینامیک بدون استفاده از مبدل DC-DC تثبیت توان در ثانویه انتخاب شده است.

در ادامه در بخش دوم، قسمت‌های مختلف سامانه انتقال توان بدون سیم القایی معرفی شده است. در بخش سوم روش انجام کار معرفی شده و در بخش آخر نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است.

۲- انتقال توان بدون سیم القایی

۲-۱- سیم‌پیچ انتقال توان

انتقال حامل‌های انرژی به کمک سیم‌پیچ از پرکاربردترین حالت‌های انتقال توان است. نحوه عملکرد این سیم‌پیچ‌ها با کمک قانون القا فارادی و قانون لنز انجام می‌شود و عملکردی شبیه به موتور القایی دارند. با اعمال ولتاژ به دو سر یک سیم‌پیچ و عبور جریان از سیم‌پیچ اول، شارژ مغناطیسی تولید می‌گردد. با قرارگیری سیم‌پیچ دوم در مسیر شار، جریان و ولتاژی در سیم‌پیچ دوم القا می‌شود، هر چه فاصله هوایی میان دو سیم‌پیچ کمتر باشد، توان انتقالی و بازده سامانه بیشتر می‌شود ضمناً برای کاهش جریان‌های گردابی و ایجاد مسیر حلقه بسته برای شار تولیدی از هسته فریت استفاده می‌گردد.

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

۲-۲- مبدل‌های الکترونیک قدرت

پیشرفت انتقال‌دهنده‌های توان بدون سیم مرهون پیشرفت ادوات الکترونیک قدرت است. با پیشرفت دانش در ساخت نیمه‌هادی‌ها، دیود و ترانزیستورهای سریع با توان بالا ساخته شد. در مبدل‌های الکترونیک قدرت ادوات نیمه-هادی کنترل‌پذیر نظیر ماسفت‌ها و IGBT ها نقش مهمی بر عهده دارند. روش‌های مختلف برای کلیدزنی این مبدل‌ها وجود دارد نظیر مدولاسیون پهنای باند (PWM). در هنگام کلیدزنی تداخل الکترومغناطیسی و تغییرات ناگهانی ولتاژ و جریان سبب آسیب‌پذیر شدن مبدل‌ها می‌شود؛ به این منظور از مبدل‌های تشدید شده استفاده شد. در انتقال توان القایی از شبکه جبران‌ساز برای اندوکتانس پدها و تبدیل مبدل‌های الکترونیک قدرت معمولی به مبدل‌های تشدید شده استفاده می‌شوند که به دلیل وجود مبدل‌های تشدید شده، بازده سامانه انتقال توان بیشتر شد. مبدل‌های الکترونیک قدرت مختلف نظیر یکسوساز، اینورتر و چاپر در قسمت‌های مختلف سامانه انتقال توان کاربرد دارند. در این سامانه‌ها از اینورتر برای تولید ولتاژ با فرکانس و سطح ولتاژ معین و از چاپر به منظور کنترل سطح ولتاژ برای شارژ باتری و وسایل الکتریکی، همچنین تثبیت توان خروجی با کنترل ولتاژ و جریان خروجی استفاده می‌شوند.

۲-۳- شبکه‌های جبران‌ساز

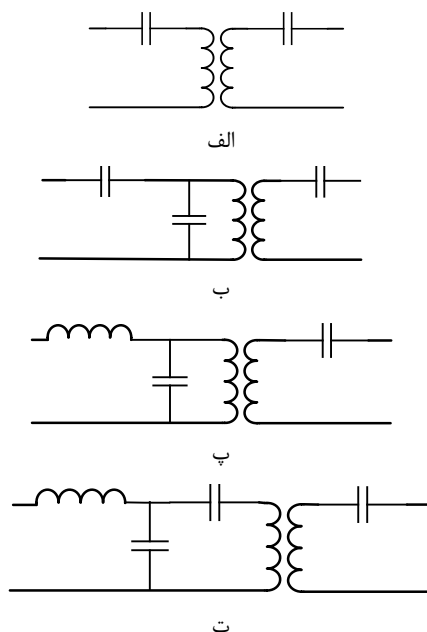
شبکه جبران‌ساز متشکل از مجموعه‌ای از سلف و خازن-هاست که در سمت اولیه و ثانویه سامانه قرار می‌گیرند. برای کاهش تاثیر فاصله‌هوایی پدها و کاهش تلفات سامانه به جهت غیر هم‌فاز بودن کمیت‌ها، کافی است یک شبکه جبران‌ساز با پدها سری شود. شبکه جبران‌ساز اثر اندوکتانس متقابل پدها را محدود می‌کند؛ ضمناً جریان غیرحقیقی را کاهش می‌دهد و تنها به مقدار نیاز برقراری ارتباط میان دو پد در سامانه باقی می‌گذارد. با کمک شبکه جبران‌ساز با ایجاد هم‌فازسازی ولتاژ و جریان و ایجاد شبکه تشدید برای مبدل الکترونیک قدرت، بازده را افزایش داده و در حالت حداکثر قرار می‌دهد. شبکه جبران‌ساز با توجه به نوع و شرایط کاری سامانه، کمیت‌های خروجی را در حالت تغییرات کم ولتاژ یا جریان قرار می‌دهد که به منبع ولتاژ و یا منبع جریان نزدیک می‌شود. شبکه جبران‌ساز مناسب در سامانه زیرسطحی باید سمت ثانویه سبک و با فضای نصب کم انتخاب شود. ضمناً عدم دسترسی آسان به درون زیرسطحی سبب می‌گردد سمت ثانویه با حداقل درجه

آزادی ممکن طراحی شود. به همین منظور از میان تمام شبکه‌ها، جبران‌سازهای با ثانویه خازن سری انتخاب شده‌اند تا علاوه بر فضای نصب کم، قابلیت اطمینان سامانه افزایش یافته و در حالت ولتاژ ثابت عمل کند.

ساختارهای PP و SP به دلیل متغیر بودن ولتاژ در خروجی همچنین ساختار PS بدلیل تغییرات ناگهانی ولتاژ با تغییر فاصله هوایی انتخاب نشده‌اند. جبران‌سازهای پیچیده نظیر LC-LC و LCC-LCC ضمن مستقل بودن از تغییرات ضریب تزویج و تغییرات کم ولتاژ و جریان در خروجی، اما به دلیل درجه آزادی زیاد در سمت ثانویه، نیاز به فضای نصب بیشتر نسبت به ثانویه تک‌عضوی و افزایش تلفات به-سبب وجود المان‌های زیاد، مورد انتخاب قرار نگرفتند. در این پژوهش جبران‌سازهای SS، SP-S، LC-S و LCC-S مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۱ شمای شبکه‌های جبران‌ساز منتخب را نمایش می‌دهد.

۳- طراحی سامانه

برای طراحی سامانه انتقال توان بدون سیم 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، انتخاب خازن مناسب برای شبکه جبران‌ساز و دیگر موارد نیز ممکن می‌گردد.



شکل ۱- شبکه‌های جبران‌ساز انتقال توان بدون سیم

الف) SS ب) SP-S پ) LC-S ت) LCC-S [22]

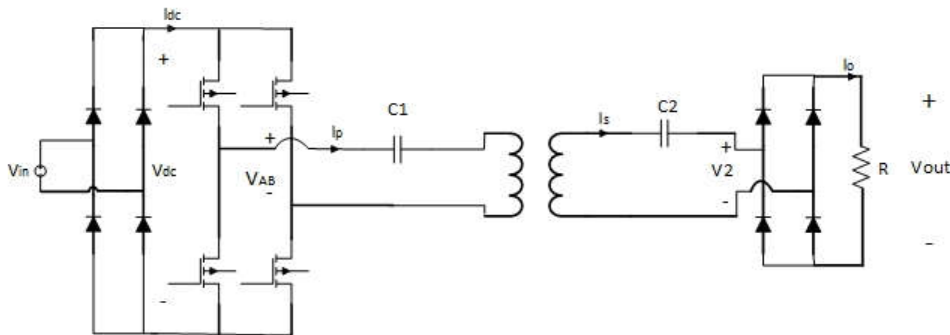
همچنین از رابطه (۴) و (۵) روابط جریان برای جبران‌ساز SS محاسبه می‌شود [7]:

$$I_p = \frac{4V_0 \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{2} - \pi + \theta\right)}{\pi \omega M} \quad (4)$$

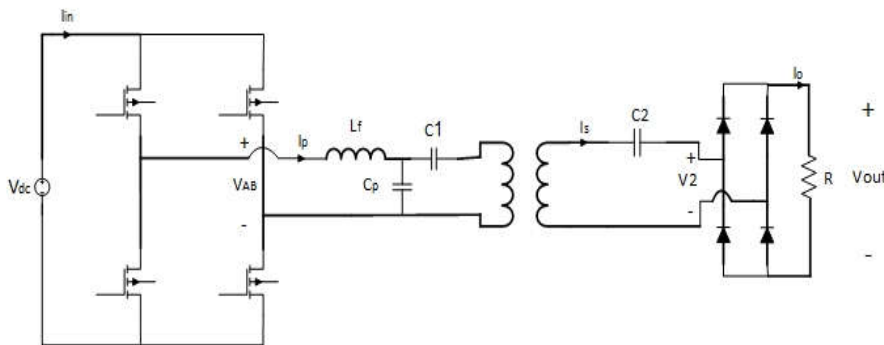
$$I_s = \frac{4V_0 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha}{2} - \pi\right)}{\pi \omega M} \quad (5)$$

که α و β زاویه هدایت ساق‌های اینورتر، M القای متقابل سیم‌پیچ‌ها و ω_0 فرکانس زاویه‌ای مدار است. ولتاژ خروجی اینورتر پس از جبران‌سازی که به سمت ثانویه منتقل می‌شود از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$V_{AB} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{dc} \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (6)$$



شکل ۲- سامانه انتقال توان با شبکه جبران‌ساز SS



شکل ۳- سامانه انتقال توان با شبکه جبران‌ساز LCC-S

k ضریب تزویج میان سیم‌پیچ‌هاست. ضریب تزویج سیم-پیچ‌ها از رابطه (۸) محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p I_s}} \quad (8)$$

برای محاسبه C_{eq} می‌توان از روابط (۱۰) استفاده کرد:

$$C_{eq} = \frac{\pi^2 \sin \theta}{4\omega_0 R (\cos(2\theta) + 1)} \quad (10)$$

که θ زاویه فاز و R مقاومت معادل سامانه است.

برای طراحی شبکه جبران‌ساز فرکانس کلیدزنی مورد نظر است. طراحی شبکه جبران‌ساز با توجه ساختار شبکه

روابط محاسبه مقادیر سامانه با شبکه‌های جبران‌ساز SS و LCC-S برای محاسبه کمیت‌ها و طراحی سامانه در ادامه قرار داده شد. مقاومت معادل سمت اولیه از رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$Z_{ref} = \frac{j\omega_0 M I_s}{I_p} = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_{eq}} (1 + j\omega_0 C_{eq} R_{eq}) \quad (1)$$

I_p جریان سمت اولیه و I_s جریان ثانویه است. از رابطه (۲)، I_p و رابطه (۳)، I_s برای جبران‌ساز LCC-S محاسبه می‌شود [21]:

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

$$I_s = \frac{j\omega M I_p}{R_s + R} \quad (3)$$

ولتاژ خروجی (V_o) سامانه پس از یکسوسازی به بار منتقل می‌گردد. ولتاژ خروجی یکسوساز است. برای محاسبه ولتاژ V_o از رابطه (۷) استفاده می‌شود:

$$V_o = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_{AB}' \quad (7)$$

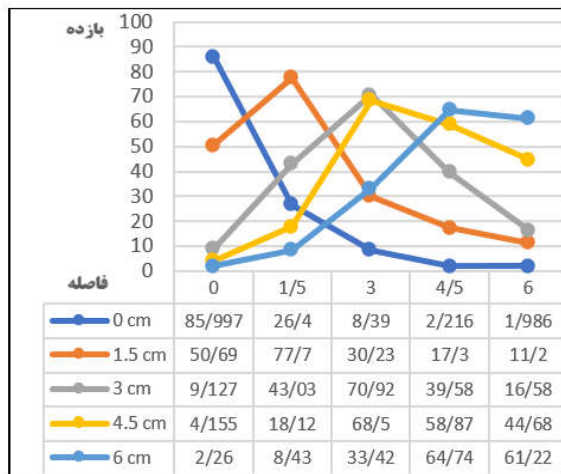
V_{AB}' ولتاژ خروجی قبل یکسوسازی و V_o ولتاژ خروجی سامانه است. I_p سیم‌پیچ سمت اولیه و I_s سیم‌پیچ سمت ثانویه است.

۴- شبیه‌سازی سامانه

شبکه‌های جبران‌ساز طراحی شده‌اند و نتایج مختلف به ازای بارهای مختلف با بیشترین بازده برای سامانه با توان ۳kW در نمودار شکل ۴ تا شکل ۷ نمایش داده شده است. سامانه انتقال توان بدون سیم با قطر پد ۱۱cm مدنظر است. میزان خاصیت سلفی هر سیم‌پیچ و ضریب تزویج به ازای فاصله هوایی‌های مختلف محاسبه و در جدول ۲ نشان داده شد.

جدول ۲- اندوکتانس پدها در فاصله هوایی مختلف

فاصله	اولیه (uH)	ثانویه (uH)	ضریب تزویج
فاصله ۰mm	۹۰٫۷	۹۲٫۳	۰٫۸۵
فاصله ۱۵mm	۶۹٫۲	۶۸٫۳	۰٫۴۹۱
فاصله ۳۰mm	۶۴٫۵	۶۳٫۸	۰٫۲۸
فاصله ۴۵mm	۶۳٫۳	۶۲٫۳	۰٫۱۶۲
فاصله ۶۰mm	۶۲٫۹	۶۱٫۷	۰٫۱



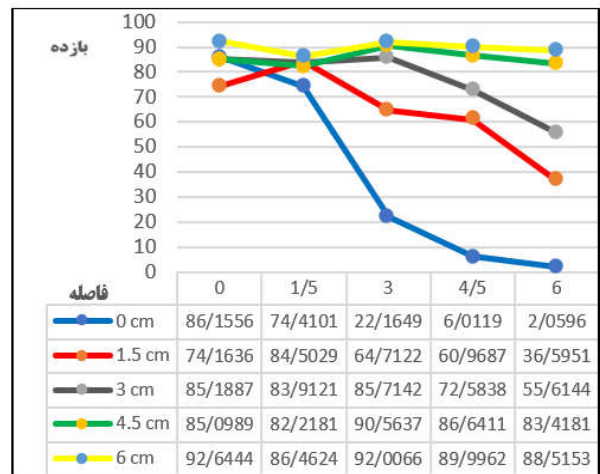
شکل ۵- نمودار بازده-فاصله ساختار SP-S

متفاوت است برای این منظور در جدول ۱ روابط محاسبه شبکه‌های جبران‌ساز مختلف نمایش داده شده است.

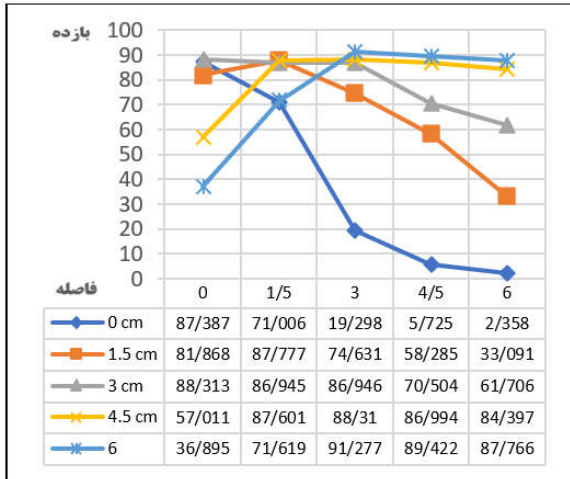
جدول ۱- روابط محاسبه شبکه جبران‌ساز

محاسبات	ساختار
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1 L_1}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}}$	SS
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_p^2}{M} C_1}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{L_p^2}{L_p - M} C_p}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}}$	SP-S
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_p(L_1 - L_M)}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}} \quad L_f = L_M$	LC-S
$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{C_1(L_1 - L_M)}} = \frac{1}{\sqrt{C_2 L_2}} = \frac{1}{\sqrt{C_p L_f}} \quad ; L_f = L_M$	LCC-S

ساختاری انتخاب می‌گردد که کمترین تغییرات بازده و بیشترین تثبیت توان را دارا باشد. سامانه مورد نظر برای کاهش فضای نصب و کاهش وزن سامانه مبدل DC-DC حذف گردید پس فاصله مناسب بر طراحی شبکه جبران‌ساز و فاصله هوایی مناسب شارژ باید با محدوده تغییرات معین تعیین گردد.

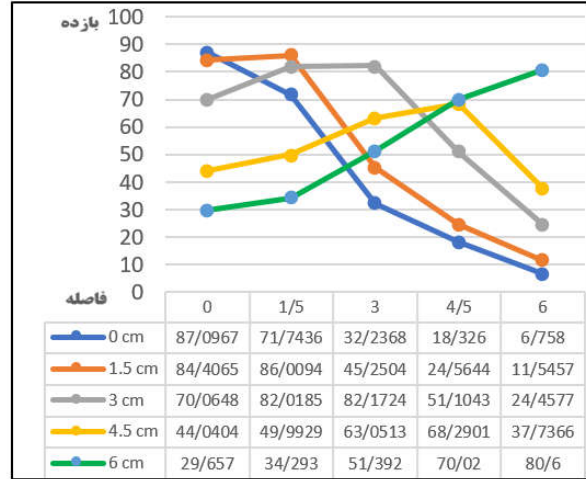


شکل ۴- نمودار بازده-فاصله ساختار SS



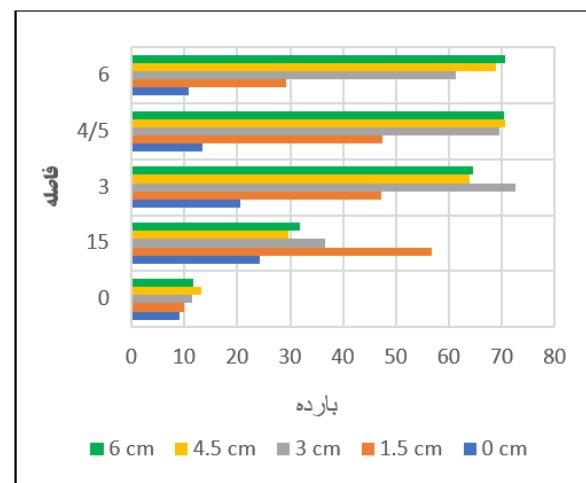
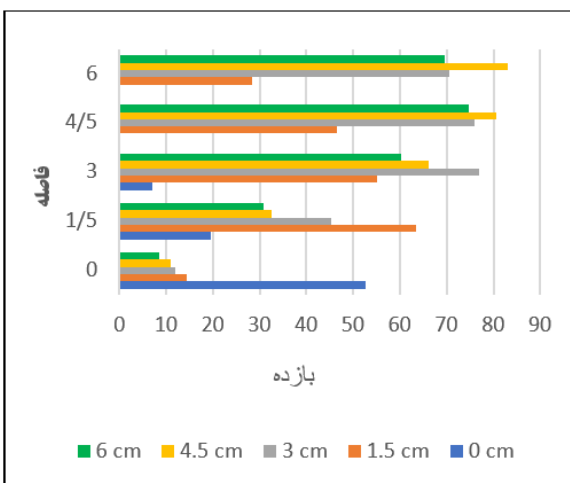
شکل ۷- نمودار بازده-فاصله ساختار LCC-S

ساختار LCC-S و ویژگی‌های نزدیک دارند و در شکل ۴ و شکل ۷ به بررسی ویژگی‌های ساختار در سامانه ۳kW ثابت ۱،۲ اهم انجام شده و انتخاب بین ساختارهای SS و LCC-S در شرایط یکسان را فراهم می‌کند و امکان انتخاب بهتر را فراهم می‌کند. در این نمودارها محور افقی بازده و محور عمودی فاصله هوایی را نمایش می‌دهد. هر فاصله هوایی بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶- نمودار بازده-فاصله ساختار LC-S

در سامانه انتقال توان تثبیت توان و بازده بسیار اهمیت دارد. در شکل ۴ تا شکل ۷ نتایج شبیه‌سازی سامانه با ساختار شبکه جبران‌سازهای مختلف مشاهده می‌شود. در نمودارهای ارائه شده، هر نمودار تغییرات بازده - فاصله هوایی را به ازای طراحی شبکه جبران‌ساز در فاصله هوایی مرجع نشان داده است هر رنگ نمودار به ازای یک مقدار فاصله هوایی مرجع طراحی شده است. ساختارهای LC-S و SP-S با توجه به شکل ۵ و شکل ۶ در فاصله مرجع جبران‌سازی بیشترین بازده را دارند و با تغییر فاصله هوایی تغییرات زیادی دارند و مناسب حالت نیمه‌دینامیک نیستند.



شکل ۸- نمودار بازده-فاصله (الف) ساختار SS با بار ۱،۲ اهم (ب) ساختار LCC-S با بار ۱،۲ اهم

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	۱۰
۱,۵		۷۴,۴۴	۷۱,۱۵	۳۳,۵	۸۴	۳۷,۸	۱۰۰	۱۰	۳۷	۵,۲	۱۰
۰	۱,۵	۷۴,۰۵	۸۱,۷۵	۳۸,۹	۸۳	۴۳,۶	۱۰۰	۲۹,۹	۹۱	۳۳,۳	۱۰
۱,۵		۸۴,۴	۸۷,۵	۳۹,۵	۷۵	۳۵,۱	۱۰۰	۴۰	۷۲	۳۲,۹	۱۰
۱,۵	۳	۸۳,۸	۸۶,۳	۳۴,۴	۸۶	۳۵,۳	۱۰۰	۳۲,۸	۸۸,۵	۳۳,۸	۱۰
۳		۸۵,۶۵	۸۶,۸۱	۳۹,۴	۷۵	۳۴,۵	۱۰۰	۳۹,۵	۷۵,۱	۳۴,۲	۱۰
۱,۵	۴,۵	۸۵,۶۲	۸۵,۴۲	۳۴,۴	۷۷	۳۲,۲	۱۰۰	۳۴,۲	۸۵,۵	۳۴,۲	۱۰
۳		۹۰,۵۹	۸۸,۳	۴۰	۷۶,۱	۳۳,۶	۱۰۰	۳۹,۳	۷۴,۷	۳۳,۱	۱۰
۴,۵		۸۶,۷۴	۸۷,۱۴	۴۵,۱	۶۷,۷	۳۵,۲	۱۰۰	۴۰,۱	۷۲,۳	۳۳,۳	۱۰
۳	۶	۹۲,۱۶	۹۱,۶۶	۴۱۱	۷۴	۳۳	۱۰۰	۳۱,۲	۹۵,۴	۳۲,۵	۱۰
۴,۵		۹۰,۴۳	۸۹,۲۹	۴۱,۶	۷۰	۳۲,۲	۱۰۰	۳۸,۴	۷۶,۹	۳۳,۱	۱۰
۶		۸۸,۶۳	۸۷,۷۶	۴۸,۶	۶۳,۱	۳۴,۶	۱۰۰	۴۷,۸	۶۲,۳	۳۴	۱۰

جدول ۴- ویژگی‌های ساختار شبکه جبران‌ساز در سامانه

ساختار سمت اولیه	نوع منبع توان	اندازه و حجم ساختار
SS	ولتاژ	کم
SP	ولتاژ و جریان	متوسط
LC	ولتاژ	متوسط
LCC	ولتاژ و جریان	زیاد

سامانه شارژ بدون سیم باید توانایی تثبیت توان و ضمنا ویژگی در دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت را داشته باشد. ساختار LCC-S ویژگی این را دارد تا بصورت منبع جریان در فواصل بیشتر از مرجع طراحی جبران‌ساز کار کند و بصورت منبع ولتاژ در فواصل کمتر از فاصله هوایی مرجع جبران‌سازی کار کند. ساختارهای SS، LC-S و SP-S در

طبق جدول ۳ و شکل ۸ مشاهده شد بازده در ساختار LCC-S در اکثر فاصله هوایی‌ها بیشتر از ساختار SS است. ضمنا دامنه تغییرات بازده در فاصله هوایی‌های مرجع در ساختار SS بیشتر از ساختار LCC-S است. همچنین تغییرات بازده در سامانه با جبران‌ساز طراحی شده براساس فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm و ضریب تزویج ۰,۱۶، بازده با کمترین تغییرات را نسبت به دیگر فاصله‌ها دارد. در دو جبران‌ساز بیشترین بازده در فاصله ۳ cm و ضریب تزویج ۰,۲۸ حاصل شد. در شارژر دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت وجود دارد که بعد از بررسی ساختارها نتیجه در جدول ۴ قرار داده شد.

اکثر شرایط ویژگی منبع ولتاژی دارند و حالت کاری وابسته به بار سامانه و فاصله هوایی سامانه است.

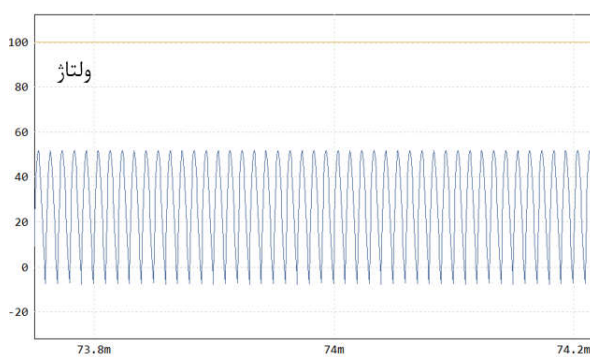
با توجه به بررسی‌های انجام شده و مشاهده نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل ۴ تا شکل ۷ و سپس شکل ۸ و جدول ۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود جبران‌ساز LCC-S مناسب‌ترین شرایط برای انتقال توان با بازده بالا با کمترین دامنه تغییرات در فاصله هوایی برابر را ایجاد می‌کند. ضمناً این ساختار جبران‌سازی تغییرات ولتاژ و جریان را با توجه به سطح بار و تغییرات فاصله محدود می‌کند و در صورت تغییرات بیش از حد محدودیت‌ها سبب جلوگیری از آسیب‌های زیاد به سامانه می‌شوند.

بر این اساس فاصله هوایی با ضریب تزویج بازه ۰,۱۵ تا ۰,۵ فاصله هوایی مناسب جهت دریافت بیشترین بازده و

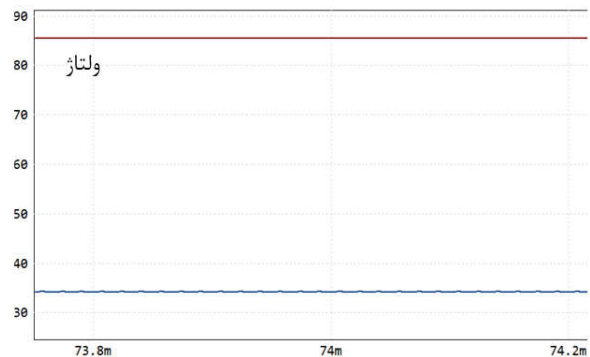
کمترین تغییرات بازده و ولتاژ خروجی است. این فاصله هوایی در سامانه‌ها با پدهای دایره‌ای شکر حدود ۳۰٪ الی ۴۰٪ طول قطر پد را شامل می‌شود.

فاصله هوایی مناسب جهت طراحی جبران‌سازی نیز باید بیشتر از فاصله هوایی انتقال توان انتخاب شود تا علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان بتواند قابلیت جابجایی بیشتری را برای سامانه فراهم کند. فاصله هوایی مرجع طراحی مناسب در حدود ۴۰٪ قطر پد یا ضریب تزویج بازه ۰,۱۵ تا ۰,۲ است.

در شکل ۹ تا شکل ۱۱ کمیت‌های الکتریکی سامانه با جبران‌ساز LCC-S در فاصله هوایی مرجع انتخاب شده طی تغییرات فاصله هوایی میان پدها قابل مشاهده است.

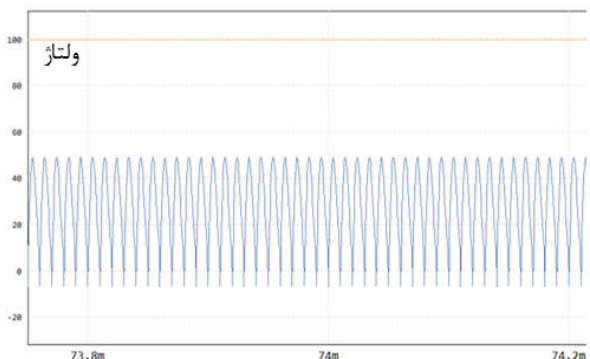


ب



الف

شکل ۹- سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۱,۵ cm در فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm (الف خروجی ب) ورودی

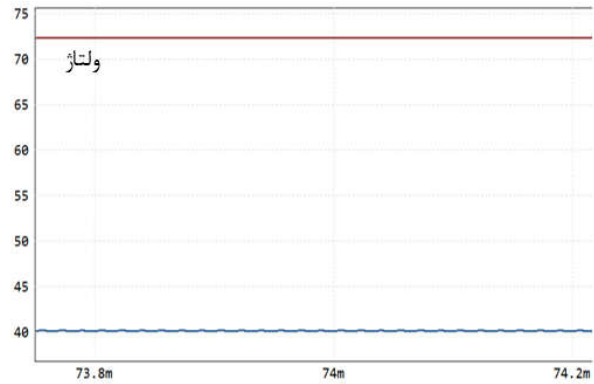
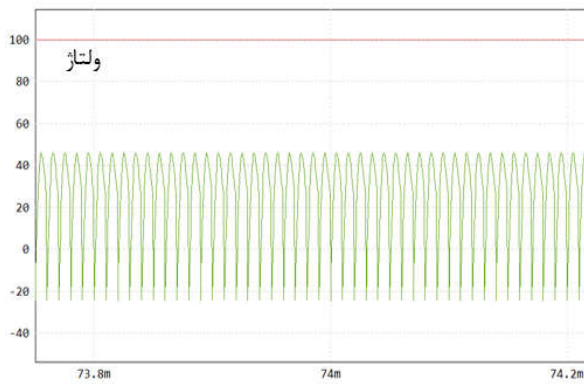


ب



الف

شکل ۱۰- سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۳ cm در فاصله هوایی مرجع ۴,۵ cm (الف خروجی ب) ورودی



ب

الف

شکل (۱) - سامانه با جبران‌ساز LCC_S با فاصله هوایی ۴٫۵ cm در فاصله هوایی مرجع ۴٫۵ cm (الف) خروجی (ب) ورودی

of multiple vehicles,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 42404–42421, 2020.

- [2] G. Li, Q. Sun, L. Boukhatem, J. Wu, and J. Yang, “Intelligent vehicle-to-vehicle charging navigation for mobile electric vehicles via VANET-based communication,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 170888–170906, 2019.
- [3] 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. 6, no. 4, pp. 281–297, 2021.
- [4] A. Masood, J. Hu, A. Xin, A. R. Sayed, and G. Yang, “Transactive energy for aggregated electric vehicles to reduce system peak load considering network constraints,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 31519–31529, 2020.
- [5] S. Y. Choi and C. T. Rim, “Recent progress in developments of on-line electric vehicles,” in *2015 6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, IEEE, 2015, pp. 1–8.
- [6] C. C. Mi, G. Buja, S. Y. Choi, and C. T. Rim, “Modern advances in wireless power transfer systems for roadway powered electric vehicles,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 10, pp. 6533–6545, 2016.
- [7] F. Xu, S.-C. Wong, and K. T. Chi, “Overall loss compensation and optimization control in single-stage inductive power transfer converter delivering constant power,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 37, no. 1, pp. 1146–1158, 2021.
- [8] S. A. Q. Mohammed and J.-W. Jung, “A comprehensive state-of-the-art review of wired/wireless charging technologies for battery electric vehicles:

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی روش‌های جبران‌سازی به کار رفته در سامانه انتقال بدون‌سیم در حالت نیمه‌دینامیک زیرسطحی پرداخته شده است. برای انتخاب فاصله هوایی مناسب برای انتقال توان بدون‌سیم در کنار ویژگی هر سیم-پیچ و مبدل الکترونیک قدرت باید ساختار شبکه جبران-سازی نیز مورد توجه قرار گیرد. در سامانه زیر سطحی بدلیل عدم دسترسی آسان به سامانه زیر آب بخش ثانویه باید پیچیدگی کمی داشته باشد. ویژگی‌های ساختار SS و LCC-S بسیار نزدیک به هم است اما ساختار LCC-S توانایی فعالیت در هر دو حالت کاری جریان ثابت و ولتاژ ثابت را دارد. بازده LCC-S در فاصله هوایی ثابت نسبت به جبران‌ساز SS به ازای خروجی ۳kW، حدود ۲٪ تغییرات نسبت دارد. در LCC-S طبق نتایج شبیه‌سازی قابل اطمینان‌ترین ساختار برای حالت نیمه‌دینامیک است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، فاصله هوایی ۴٫۵cm فاصله مناسب برای طراحی جبران‌ساز و فاصله ۳cm مناسب جهت انتقال توان و شارژ رسانی است. بیشترین بازده در این فاصله بدون نیاز به مبدل تثبیت توان DC-DC برابر ۸۸٫۳٪ 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 ۰٫۴۰ بوده و ضریب تزویج مناسب در محدوده ۰٫۲ تا ۰٫۵ است.

مراجع

- [1] X. Liu, “Dynamic response characteristics of fast charging station-evs on interaction

- AUVs,” *IET Power Electronics*, vol. 12, no. 10, pp. 2559–2565, 2019.
- [19] X. Mou, Y. Zhang, J. Jiang, and H. Sun, “Achieving low carbon emission for dynamically charging electric vehicles through renewable energy integration,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 118876–118888, 2019.
- [20] 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. 35, no. 7, pp. 6732–6740, 2019.
- [21] Y. Li *et al.*, “Efficiency analysis and optimization control for input-parallel output-series wireless power transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 1, pp. 1074–1085, 2019.
- [22] 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. 33, no. 8, pp. 6807–6821, 2017.
- [23] 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, 2013.
- [24] A. Foote and O. C. Onar, “A review of high-power wireless power transfer,” in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, IEEE, 2017, pp. 234–240.
- [25] F. Lu, H. Zhang, H. Hofmann, and C. C. Mi, “An inductive and capacitive combined wireless power transfer system with LC-compensated topology,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 31, no. 12, pp. 8471–8482, 2016.
- [26] 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. 10, pp. 49474–49484, 2022.
- [27] Z. U. Zahid *et al.*, “Design and control of a single-stage large air-gapped transformer isolated battery charger for wide-range output voltage for EV applications,” in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, 2013, pp. 5481–5487.
- Classification/common topologies/future research issues,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19572–19585, 2021.
- [9] G. Palani, U. Sengamalai, P. Vishnuram, and B. Nastasi, “Challenges and Barriers of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 5, p. 2138, 2023.
- [10] J. Van Mulders *et al.*, “Wireless power transfer: Systems, circuits, standards, and use cases,” *Sensors*, vol. 22, no. 15, p. 5573, 2022.
- [11] 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. 15, no. 1, pp. 51–62, 2014.
- [12] Z. Li, K. Dey, M. Chowdhury, and P. Bhavsar, “Connectivity supported dynamic routing of electric vehicles in an inductively coupled power transfer environment,” *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 370–377, 2016.
- [13] 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. 70, no. 12, pp. 12552–12566, 2021.
- [14] S. A. Assadi, H. Matsumoto, M. Moshirvaziri, M. Nasr, M. S. Zaman, and O. Trescases, “Active saturation mitigation in high-density dual-active-bridge DC–DC converter for on-board EV charger applications,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 35, no. 4, pp. 4376–4387, 2019.
- [15] 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. 114, p. 109302, 2019.
- [16] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, “Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems,” *IEEE Trans Power Electron*, vol. 26, no. 11, pp. 3096–3108, 2011.
- [17] 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 applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65432–65442, 2020.
- [18] Z. Yan, Y. Zhang, K. Zhang, B. Song, and C. Mi, “Underwater wireless power transfer system with a curly coil structure for