

# شارژر بیسیم پربازده خودروی برقی با حساسیت کاهش یافته نسبت به ناهمراستائی با استفاده از اینورتر چندسطحی

فرزاد تهامی<sup>۱</sup> امیررضا پورفخرائی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

[tahami@sharif.edu](mailto:tahami@sharif.edu)

۲- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه مک مستر- همیلتون- کانادا

[poorfaka@mcmaster.ca](mailto:poorfaka@mcmaster.ca)

**چکیده:** در کاربردهای متنوعی انتقال توان بیسیم به عنوان جایگزینی برای انتقال توان از طریق کابل مورد توجه می‌باشد. در کاربرد شارژر خودروهای برقی، شارژرهای بیسیم می‌توانند مزیت‌هایی همچون افزایش ایمنی و راحتی بیشتر را فراهم کنند. با استفاده از شارژر بیسیم نوع دینامیک (در حال حرکت) می‌توان مقدار انرژی مورد نیاز برای ذخیره در باتری را کاهش داد. بخاطر محدودیت فرکانس و ولتاژ، ممکن است ایجاد توان زیاد لازم برای شارژ باتری در زمان کوتاه توسط شارژر بیسیم دینامیک با اینورترهای دوسطحی معمولی عملی نباشد. بنابراین استفاده از توپولوژی‌های دیگر که بتواند به صورت همزمان توان، فرکانس و بازده زیادی را فراهم کنند اجتناب ناپذیر است. بدین منظور در این مقاله یک اینورتر چندسطحی برای افزایش توان قابل انتقال و بازده پیشنهاد داده شده است که علاوه بر این می‌تواند با کاهش هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان، حساسیت سیستم انتقال توان بیسیم نسبت به ناهمراستائی کوئل‌ها را نیز بهبود دهد. نتایج شبیه‌سازی و آزمایش بر روی سیستم انتقال بیسیم ۶ کیلووات ساخته شده، بازده زیاد و اعوجاج هارمونیک کم جریان را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** انتقال توان بیسیم، اینورتر چندسطحی، خودروی برقی، اعوجاج هارمونیک، ناهمراستائی، الگوهای رانندگی

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.4.39

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۵/۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر فرزاد تهامی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف - دانشکده‌ی مهندسی برق

## ۱- مقدمه

در دهه‌های گذشته، نگرانی‌های جدی در مورد تأثیر تغییرات آب و هوایی و آلودگی هوا بر سلامتی انسان به وجود آمده است. آلودگی ناشی از حمل و نقل، بخش عمده‌ای از آلودگی داخل شهری را شامل می‌شود. در نتیجه این نگرانی‌ها، دولت‌ها بیش از پیش بر لزوم کاهش دی‌اکسیدکربن و سایر آلاینده‌های خودروها تأکید دارند. تنها راه رسیدن به استانداردهای سختگیرانه کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در خودروها، استفاده از خودروهای هیبریدی و برقی است [۱]. مزیت دیگر این خودروها بازده انرژی بیشتر و آلودگی صوتی کمتر آنهاست. با این وجود، سه مانع عمده برای استفاده فراگیر از خودروهای برقی وجود دارد؛ محدود بودن حداکثر مسافت قابل پیمایش یا بُرد<sup>۱</sup> خودرو، قیمت زیاد باتری، و همچنین نبود شبکه عمومی شارژ خودروهای برقی. اگرچه در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌های بوجود آمده در فناوری باتری، قیمت و حجم باتری خودرو برقی کاهش یافته است، اما باتری همچنان عامل اصلی محدودکننده برای گسترش استفاده از خودروهای برقی است [۲،۳].

امروزه سیستم‌های انتقال توان بیسیم برای استفاده در کاربردهای متنوعی پیشنهاد شده‌اند. از کاربردهایی با توان پایین مانند سیستم‌های رادیو شناسه (RFID)<sup>۲</sup> گرفته تا کاربردهای توان بالایی همچون انتقال توان به موتورهای زیر آب و یا شارژ کردن خودروهای برقی [۴]. شارژرهای بیسیم خودروهای برقی، با فراهم آوردن امکان شارژ خودرو در توقف‌های کوتاه و حتی در حال حرکت می‌توانند نیاز خودرو به داشتن باتری بزرگ برای افزایش برد را برطرف کنند و بدین ترتیب علاوه بر افزایش برد، باعث کاهش وزن و قیمت خودرو شوند. شارژرهای استاتیک که معمولاً برای استفاده در پارکینگ‌ها و در چهارراه‌های شلوغ مناسب هستند می‌توانند حداکثر مسافت قابل پیمایش را در رانندگی داخل شهری افزایش دهند. در مقابل، شارژرهای دینامیک خودروی برقی با نصب در مسیر بزرگراه‌ها می‌توانند حداکثر مسافت قابل پیمایش را در الگوی رانندگی<sup>۳</sup> بزرگراهی افزایش دهند [۵].

در چنین حالت‌هایی که خودرو برقی فقط برای زمان کوتاهی روی شارژر قرار می‌گیرد لازم است توان شارژر را بسیار زیاد انتخاب کرد تا انرژی کافی به باتری خودرو منتقل شود. بر اساس روابط انتقال بیسیم توان، افزایش ولتاژ سمت اولیه سیستم انتقال توان بیسیم مستقیماً بر افزایش توان قابل انتقال سیستم تأثیرگذار است [۶]. با افزایش ولتاژ خط DC سمت اولیه، تنش ولتاژ بر روی کلیدهایی نیمه رسانای اینورتر افزایش می‌یابد. برای این که اینورتر بتواند بدون مشکل در ولتاژ زیاد کار کند، دو راهکار وجود دارد؛ استفاده از کلیدهایی با تحمل ولتاژ بالا، یا تغییر در ساختار اینورتر مورد استفاده.

در این مقاله، یک ساختار اینورتر چندسطحی بر مبنای ساختار کلمپ دیودی<sup>۴</sup> بدین منظور پیشنهاد داده شده و پیاده‌سازی شده است.

چنانکه نشان داده خواهد شد استفاده از ساختار چندسطحی امکان افزایش توان سیستم انتقال توان بیسیم را بدون افزایش جریان کلیدها ممکن می‌سازد. همچنین استفاده از ماسفت‌های ولتاژ پایین باعث افزایش بازده مبدل چندسطحی نسبت به مبدل دوسطحی معادل خواهد شد. علاوه بر این، مبدل چندسطحی قابلیت مدولاسیون سینوسی و تولید شکل موج ولتاژ و جریان با محتوای هارمونیک کم را دارد [۷-۹]. حذف هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان باعث کاهش تلفات ناشی از اثر پوستی در سیم‌پیچ‌ها و تلفات خازن‌های تشدید می‌شود. از نظر ایمنی، محدودیت‌های سختگیرانه‌تری برای تداخل الکترومغناطیسی ناشی از جریان‌های فرکانس بالا وجود دارد [۱۰] که کاهش هارمونیک‌ها از این نظر هم مفید است.

تحقیقات متعددی در زمینه شارژرهای بیسیم و تأثیر آن‌ها بر افزایش مسافت قابل پیمایش خودروهای برقی انجام شده است. در [۱۱] داده‌های ترافیکی واقعی برای بررسی تأثیر یک شارژر بیسیم دینامیک بر روی تغییرات سطح شارژ یک خودروی برقی در حال رانندگی استفاده شده است. در [۱۲] یک بررسی جامع در مورد ساختارهای مختلف جبران‌سازی و شیلدهای مغناطیسی برای شارژرهای بیسیم خودروی برقی انجام شده است. یک شارژر بیسیم دینامیک با توان ۳۵ کیلووات و بازده حداکثر ۷۴ درصد در [۱۳] معرفی و ساخته شده است. با توجه به این که ناهمراستایی<sup>۵</sup> در کاربرد شارژ خودروهای برقی بسیار محتمل است، برخی از مطالعات به بررسی طراحی‌های مقاوم نسبت به ناهمراستایی پرداخته‌اند [۱۴، ۱۵]. در نهایت تحلیل اقتصادی شارژرهای بیسیم در [۱۶، ۱۷] انجام شده است.

در این مقاله پس از مرور اصول اولیه سیستم انتقال توان بیسیم، در بخش سوم، تأثیر افزایش توان و ولتاژ سیستم انتقال بیسیم توان بر مسافت قابل پیمایش خودروی برقی با استفاده از الگوهای رانندگی استاندارد بررسی می‌شود. پس از آن، در بخش چهارم، افزایش بازده سیستم و کاهش اعوجاج هارمونیک سیم‌پیچ‌ها با استفاده از مبدل پیشنهادی بررسی می‌شود و پس از آن، نتایج شبیه‌سازی با مقادیر مختلف بار و ناهمراستایی بررسی و نتایج آزمایش‌های عملی ارائه خواهند شد.

## ۲- اصول انتقال توان بیسیم

یک سیستم انتقال بیسیم توان معمولاً از دو سیم پیچ تشکیل شده است که مثل سیم‌پیچ‌های یک ترانسفورمر عمل می‌کنند. سیم پیچ اولیه (فرستنده) یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند که این میدان متغیر به نوبه خود در سیم‌پیچ ثانویه (گیرنده) یک ولتاژ متناوب القا می‌کند. پس از یکسوسازی ولتاژ خروجی با استفاده از یکسوساز دیودی، ولتاژ DC به دست آمده به سیستم شارژر اعمال می‌شود تا بتوان باتری‌ها را شارژ کرد. با توجه به تزویج بسیار ضعیف بین دو سیم‌پیچ لازم است که فرکانس کار این ترانسفورمر زیاد باشد تا جریان مغناطیس‌کننده آن محدود شود. با این حال، با توجه به بزرگ بودن

$$P_{Cu} = R_l I_l^2 + (R_s + R_l) I_l^2 \quad (3)$$

$I_l$  جریان سیم‌پیچ فرستنده و برابر است با:

$$I_l = \frac{j\omega M V_s}{(R_l + R_s)(R_r + R_l) + (\omega M)^2} \quad (4)$$

رابطه (۲) بازده انتقال توان بیسیم را نشان می‌دهد. باید در نظر داشت که در محاسبه بازده کل مبدل باید تلفات یکسوساز سمت ثانویه و همچنین تلفات کلیدزنی در کلیدهای اینورتر که می‌توانند قابل مقایسه با سایر تلفات باشند را هم در نظر گرفت. روابط تحلیلی محاسبه این تلفات و حدود آن در شرایط مختلف در [۱۹] ارائه داده شده‌اند.

در یک سیستم انتقال توان بیسیم، افزایش اندوکتانس تزویج بین دو سیم‌پیچ اولیه و ثانویه، بازده سیستم را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، هنگامی که سیستم در فرکانس تشدید کار می‌کند بازده سیستم حداکثر مقدار ممکن است. از طرف دیگر در مورد توان قابل انتقال، حداکثر توان در ساختار سری-سری معمولاً در دو فرکانس خارج از تشدید رخ می‌دهد. بنابراین، با توجه به این که فرکانس حداکثر بازده و فرکانس حداکثر توان مساوی نیستند، دو نوع کنترل مختلف بر پایه حداکثر نمودن بازده یا توان قابل انتقال برای سیستم انتقال توان بیسیم با ساختار سری-سری ممکن است [۶].

### ۳- تأثیر افزایش توان و ولتاژ شارژر بیسیم بر مسافت قابل پیمایش خودروی برقی

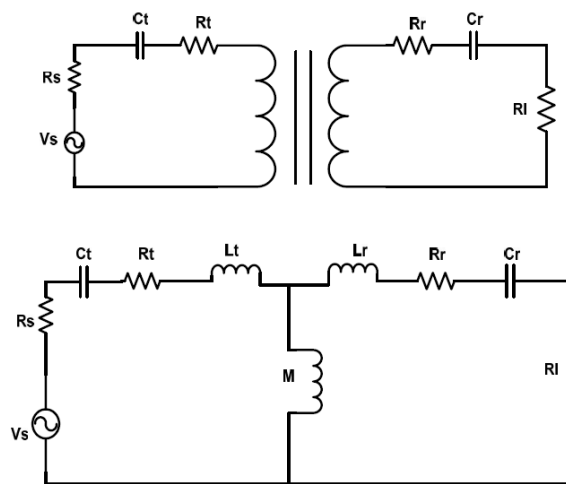
همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، شارژرهای بیسیم خودروهای برقی، مسافت قابل پیمایش این خودروها را افزایش می‌دهند. افزایش توان این شارژرها، می‌تواند به افزایش برد خودرو کمک کند. در ادامه تأثیر افزایش ولتاژ سمت فرستنده بر افزایش توان و مسافت قابل پیمایش خودرو بررسی می‌شود. برای این منظور، یک مدل خودروی برقی بر مبنای خودروی شورلت اسپارک<sup>۶</sup> در محیط سیمولینک<sup>۷</sup> شبیه‌سازی می‌شود. مشخصات کلی خودروی مدل‌سازی شده در جدول (۱) نشان داده شده است. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی این مدل در الگوهای رانندگی مختلف، با داده‌های واقعی آزمایش‌های این خودرو معتبر بودن مدل را تأیید می‌کنند.

جدول (۱): مشخصات خودروی شبیه‌سازی شده

Chevrolet Spark EV 2016	مدل خودرو
54 Ah	ظرفیت باتری
132 km	مسافت حداکثر رانندگی ترکیبی شهری و بزرگراهی
105 kW	قدرت موتور

با توجه به این که یک الگوی استاندارد رانندگی مدت زمان طولانی‌تری نسبت به شبیه‌سازی سیستم الکترونیک قدرت به طول

اندوکتانس‌های پراکنده، عملاً بیشتر ولتاژ روی اندوکتانس‌های پراکنده افت کرده و توان قابل ملاحظه‌ای به بار منتقل نمی‌شود. در ساده‌ترین حالت می‌توان خازن‌هایی با سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه سری کرد تا در فرکانس کلیدزنی با اندوکتانس‌های پراکنده هر سمت تشدید کرده و افت ولتاژ روی آنها صفر شود. بدین ترتیب امکان انتقال توان با بازده زیاد فراهم می‌شود [۶]. خازن‌های تشدید می‌توانند به صورت موازی نیز با سیم‌پیچ اولیه یا ثانویه قرار بگیرند. در صورتی که خازن در سمت اولیه به صورت موازی قرار گیرد، منبع ورودی باید از نوع جریان باشد و چنانچه خازن در سمت ثانویه به صورت موازی قرار گیرد به معنای تبدیل شدن خروجی به منبع جریان خواهد بود [۱۸]. در این مقاله نیز خازن‌های تشدید به صورت سری در هر دو طرف قرار داده شده‌اند. نمودار سیستم انتقال بیسیم توان سری-سری و مدار معادل ترنسفورمری آن در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل،  $C_l$  و  $C_r$  به ترتیب خازن‌های تشدید فرستنده و گیرنده،  $M$  اندوکتانس مغناطیس‌کننده،  $L_r$  و  $L_l$  اندوکتانس‌های پراکندگی سیم‌پیچ فرستنده و گیرنده، و  $R_r$  و  $R_l$  مجموع مقاومت سیم‌پیچ‌ها و خازن در اولیه و ثانویه هستند. همچنین  $R_l$  مقاومت بار و  $R_s$  مقاومت معادل سمت منبع شامل مقاومت معادل ماسفت‌های اینورتر است. مقادیر خازن‌های  $C_l$  و  $C_r$  به نحوی انتخاب می‌شوند که در فرکانس کلیدزنی با اندوکتانس‌های  $L_r$  و  $L_l$  تشدید کنند [۶].



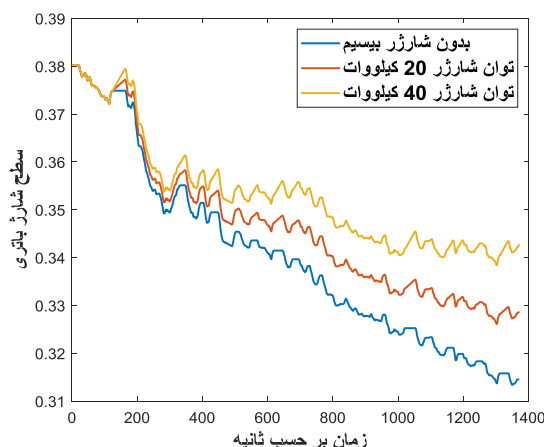
شکل (۱): نمودار مداری و مدار معادل ترنسفورمری یک سیستم انتقال توان بیسیم با جبران‌سازی سری-سری

در صورتی که سیستم در فرکانس تشدید کار کند، جریان بار، بازده و تلفات اهمی از روابط زیر قابل محاسبه است [۶]:

$$I_l = \frac{j\omega M V_s}{(R_l + R_s)(R_r + R_l) + (\omega M)^2} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{R_l I_l^2}{R_l I_l^2 + P_{Cu} + P_{fe}} \quad (2)$$

که در آن:

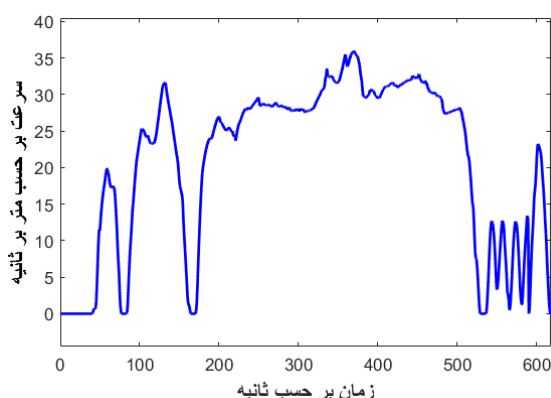


شکل (۳): مقایسه سطح شارژ باتری در رانندگی شهری

### ۳-۲- الگوی رانندگی در بزرگراه

در هنگام رانندگی در بزرگراه، با توجه به ناچیز بودن دفعات توقف خودرو، امکان استفاده از شارژر استاتیک به جز در پارکینگ‌های بین راهی وجود ندارد. بنابراین بکارگیری شارژرهای بیسیم دینامیک در طول مسیر، راهکار مناسبی برای افزایش مسافت قابل پیمایش است. به دلیل ملاحظات اقتصادی امکان نصب فرستنده انتقال توان بیسیم در تمامی طول مسیر وجود ندارد. در این بخش از مقاله، فرض می‌شود ۲ کیلومتر از ۱۳ کیلومتر در الگوی رانندگی SFTP US06 با شارژرهای دینامیک پوشش داده شده باشد. شکل (۴) الگوی رانندگی مورد نظر در بزرگراه و شکل (۵) تغییرات سطح شارژ باتری را در انتهای این مسیر با دو توان مختلف شارژر مقایسه می‌کند.

چنانکه از نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های (۳) و (۵) قابل مشاهده است، با افزایش توان شارژر بیسیم خودروی برقی در هر دو حالت، میزان تأثیر شارژرها بر افزایش مسافت قابل پیمایش بیشتر می‌شود. طبق رابطه (۱) یکی از راه‌های افزایش توان قابل انتقال در سیستم انتقال توان بیسیم، افزایش ولتاژ ورودی سیستم است.



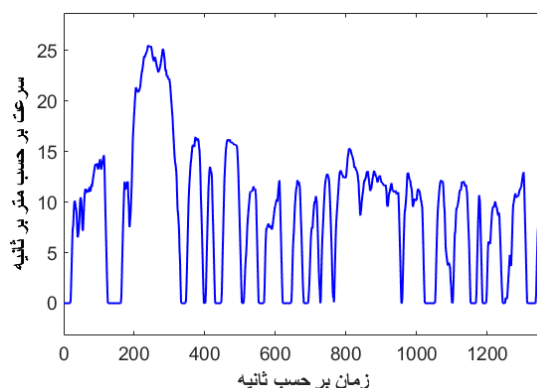
شکل (۴): الگوی رانندگی SFTP US06

می‌انجامد و با توجه به متفاوت بودن پله‌های زمانی شبیه‌سازی‌ها، نمی‌توان مدل دقیق سیستم انتقال بیسیم توان را در مدل خودروی برقی قرار داد. بنابراین پس از شبیه‌سازی دقیق سیستم انتقال بیسیم توان در نرم‌افزار PLECS، داده‌های بازده و توان سیستم استخراج شده و در قالب یک جدول به عنوان ورودی به مدل خودروی برقی داده شده‌اند. همین روند برای مدل‌های موتور و اینورتر هم انجام شده است. در ادامه این بخش، تأثیر افزایش ولتاژ سمت اولیه سیستم انتقال بیسیم توان بر افزایش مسافت قابل پیمایش خودروی برقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های انجام شده، بر مبنای دو الگوی رانندگی شهری و بزرگراهی انجام شده‌اند.

### ۳-۱- الگوی رانندگی شهری

مشخصه مهم رانندگی شهری، دفعات زیاد توقف و حرکت دوباره خودروهاست. بنابراین، در یک الگوی رانندگی شهری شارژرهای استاتیک نصب شده در چهارراه‌ها و پارکینگ‌ها می‌توانند برای شارژ باتری مورد استفاده قرار بگیرند.

در این بخش از مقاله، الگوی UDDS [20] برای بررسی این مسئله انتخاب شده است (شکل (۲)). قابل ذکر است که با توجه به ملاحظات عملی، قرار دادن فرستنده انتقال توان بیسیم در تمامی محل‌های توقف خودرو ممکن نیست. تعداد شارژرها و مقدار مناسب طول پوشش داده شده از مسیر شارژرهای بیسیم بسته به توان شارژرها، ظرفیت باتری خودروها، ملاحظات اقتصادی و شهری می‌تواند متفاوت بوده و به صورت نوعی بین ۱۰ تا ۳۰ درصد باشد [21]. در اینجا فرض می‌شود ۲۵ درصد از توقف‌های خودرو با شارژرهای بیسیم استاتیک پوشش داده شده‌اند. شکل (۳) با استفاده از شبیه‌سازی سطح شارژ باتری را در رانندگی با الگوی UDDS و با دو توان مختلف برای شارژرها مقایسه می‌کند.



شکل (۲): الگوی رانندگی UDDS [20]

بازده کل سیستم کمک می‌کند. با توجه به قیمت بسیار کمتر ماسفت ولتاژ پائین استفاده از مبدل چندسطحی موجب افزایش قابل ملاحظه قیمت مبدل نمی‌شود. در ادامه مقاله با استفاده از شبیه‌سازی، بازده مبدل‌های دوسطحی و پنج‌سطحی در حالت‌های مختلف ناهمراستایی و بار با هم مقایسه می‌شود.

جدول (۲): مقایسه قیمت و مشخصات دو نمونه ماسفت از یک سازنده

[۲۵]

نام ماسفت	$V_{ds-max}$ (ولت)	$I_{d-max}$ (آمپر)	$R_{ds-25}$ (میلی اهم)	تلفات کلیدزنی (میلی وات)	قیمت (دلار آمریکا)
IXFK2 6N120 P	1200	26	500	0.47	25.5
IXFH4 0N30	300	40	85	0.11	4.12

#### ۴-۲- کاهش اعوجاج کلی هارمونیک

یکی دیگر از مزایای استفاده از مبدل چندسطحی، قابلیت تولید شکل موج نزدیکتر به سینوسی در خروجی مبدل است. با بسط فوریه شکل موج مربعی اینورتر دوسطحی می‌توان اندازه هرکدام از مؤلفه‌های هارمونیک ولتاژ را محاسبه کرد:

$$V_k = \frac{4}{k\pi} \sin(2k\pi ft) \quad ; k = 2n - 1 \quad (5)$$

تأثیر هارمونیک‌های ولتاژ در ایجاد جریان سیم‌پیچ‌ها متفاوت است. با توجه به این که ساختار جریان‌ساز انتقال توان بیسیم در نقطه کار نامی مانند یک فیلتر میان‌گذر در فرکانس اصلی عمل می‌کند، هارمونیک‌های مرتبه بالا فیلتر شده و جریان خروجی دارای شکل موجی تقریباً سینوسی با فرکانس هارمونیک اصلی است. با این وجود چنانچه به علت ناهمراستایی سیم‌پیچ‌ها ضریب تزویج تغییر کند، و یا اینکه برای کنترل توان خروجی فرکانس کلیدزنی را تغییر دهیم، فرستنده خارج از محدوده فرکانس تشدید کار خواهد کرد. این مسأله موجب عبور هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان خواهد شد.

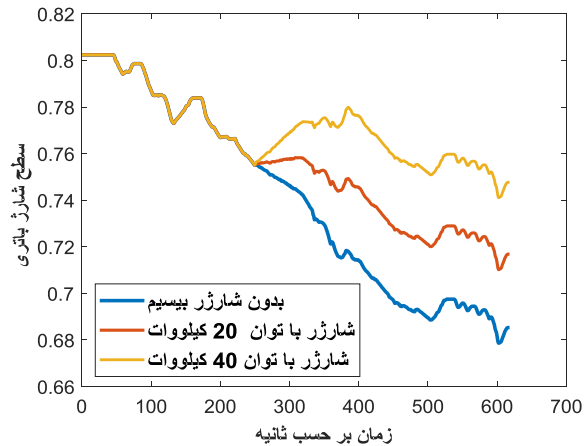
مؤلفه‌های هارمونیک جریان در سیستم انتقال توان بیسیم از دو جهت می‌تواند بر روی عملکرد سیستم شارژر بیسیم تأثیر منفی بگذارد:

۱- جریان‌های فرکانس بالای گذرنده از سیم‌پیچ‌ها به دلیل

اثر پوستی تلفات را افزایش می‌دهند. همچنین تلفات در خازن‌های جریان‌ساز بر اثر جریان‌های فرکانس بالا افزایش پیدا می‌کند.

۲- در استاندارد تعیین شده برای میزان مجاز تداخل الکترومغناطیسی<sup>۹</sup>، سطح مجاز برای فرکانس‌های بالا به مراتب کمتر است [9]. جریان‌های فرکانس بالای اینورتر دوسطحی می‌توانند تداخل الکترومغناطیسی فرکانس بالا تولید کند.

استفاده از اینورتر چندسطحی با تولید شکل موجی با محتوای هارمونیک به مراتب کمتر می‌تواند هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان



شکل (۵): تغییرات سطح شارژر باتری برای رانندگی در بزرگراه

#### ۴- اینورتر چندسطحی برای انتقال توان بیسیم

در چند دهه اخیر، اینورترهای چندسطحی به دلیل مزایای مختلفی از قبیل بهبود کیفیت شکل موج خروجی، کاهش تلفات کلیدزنی نسبت به مبدل‌های دوسطحی، و همچنین قابلیت استفاده از کلیدهایی با ولتاژ پایین‌تر از ولتاژ ورودی، کاربردهای مختلفی در زمینه‌های درایو موتور، انرژی‌های نو، خطوط انتقال DC و ادوات FACTS پیدا کرده‌اند [۲۴-۲۲].

در اینورتر با افزایش ولتاژ سمت فرستنده، تنش ولتاژ روی کلیدها افزایش پیدا می‌کند. انتخاب کلیدهایی با ولتاژ بیشتر، و یا تغییر ساختار اینورتر سمت اولیه، دو راهکار ممکن برای جلوگیری از آسیب رسیدن به کلیدها هستند. کلیدهای نیمه‌رسانای مناسب برای فرکانس‌های زیاد مورد نیاز در کاربرد انتقال توان بیسیم از نوع ماسفت قدرت هستند. ماسفت‌ها معمولاً برای ولتاژهای زیاد در دسترس نیستند و یا مقاومت کانال بسیار زیادی دارند. بنابراین در این مقاله، یک مبدل چندسطحی کلمپ دیودی با ماسفت‌های ولتاژ پائین به عنوان راهکاری مناسب برای این منظور پیشنهاد و پیاده‌سازی شده است. علاوه بر افزایش توان قابل انتقال، استفاده از مبدل‌های چندسطحی موجب افزایش بازده مبدل و کاهش اعوجاج هارمونیک جریان سیم‌پیچ‌ها می‌شود.

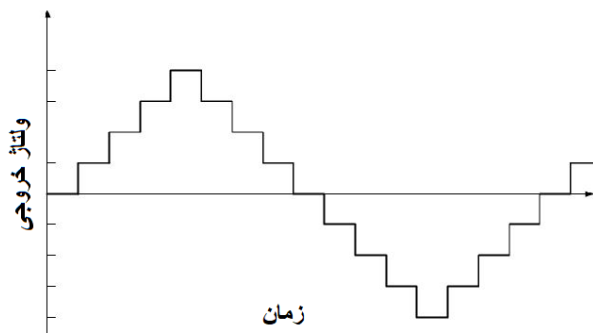
#### ۴-۱- افزایش بازده

با توجه به ساختار مبدل چندسطحی، حداکثر ولتاژ قرار گرفته روی هر کلید، برابر با بخشی از ولتاژ ورودی است. به عنوان مثال در مبدل پنج-سطحی مورد استفاده در این مقاله، ولتاژی برابر با یک چهارم ولتاژ ورودی روی هر ماسفت قرار می‌گیرد. این مسأله، استفاده از ماسفت‌های ولتاژ پایین و همین‌طور ادوات GaN را در این کاربرد ممکن می‌سازد. به عنوان نمونه در جدول (۲) مشخصات اصلی و قیمت دو ماسفت با سطح ولتاژ متفاوت از یک شرکت مقایسه شده‌اند. کاهش قابل توجه مقاومت و تلفات کلیدزنی در ماسفت ولتاژ پائین، به افزایش

## ۵- مقایسه اینورتر پیشنهادی با نوع دوسطحی رایج در کاربرد انتقال توان بیسیم

برای مقایسه ساختارهای دوسطحی و چندسطحی در کاربرد انتقال بیسیم توان، شبیه‌سازی کامل سمت فرستنده سیستم شارژر بر مبنای مدل تلفات دقیق ادوات نیمه‌رسانا در نرم افزار PLECS انجام شده است. مشخصات اساسی سیستم انتقال توان بیسیم و مشخصات ماسفت‌های استفاده شده برای دو ساختار شبیه‌سازی شده در جدول-های (۴) و (۵) نشان داده شده‌اند.

شکل (۸) تغییرات بازده سیم‌پیچ‌ها، توان خروجی و درصد اعوجاج هارمونیکی جریان مبدل دوسطحی بر حسب فرکانس کلیدزنی مبدل را با استفاده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار اعوجاج هارمونیکی در برخی نقاط عملکرد مبدل افزایش می‌یابد.



شکل (۷): ولتاژ خروجی اینورتر پنج‌سطحی

جدول (۴): مشخصات اساسی سیستم انتقال توان بیسیم

پارامتر	مقدار
خودالقای اولیه و ثانویه	100 $\mu$ H
خازن سری اولیه و ثانویه	33 nF
ولتاژ ورودی	540 V
مقاومت پارازیت AC سیم‌پیچ‌ها	140 mOhms
توان خروجی نامی	6 kW
فرکانس نامی کلیدزنی	85 kHz

جدول (۵): مشخصات دو نوع ماسفت استفاده شده برای شبیه‌سازی

پارامتر/ساختار	دوسطحی	پنج‌سطحی
شماره قطعه	STW30N80K5	IRFB4227PbF
مقاومت کانال	150 mOhms	20 mOhms
بار بازیابی معکوس دیود بدنه	9950 nC	430 nC
زمان بازیابی معکوس دیود بدنه	555 ns	100 ns

سیم‌پیچ‌ها را کاهش دهد. بدین ترتیب حساسیت سیستم انتقال توان به تغییر فرکانس فیلتر در اثر ناهمراستایی کاهش پیدا خواهد کرد.

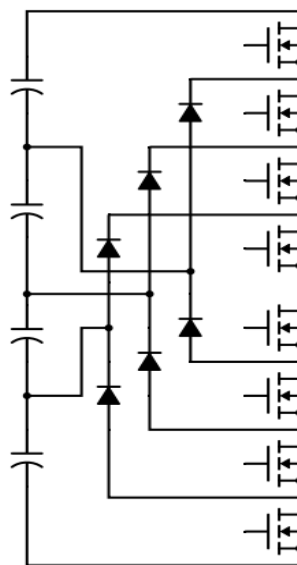
## ۴-۳- توپولوژی اینورتر

توپولوژی‌های مختلفی برای اینورترهای چندسطحی وجود دارد. مهم‌ترین ویژگی‌های این توپولوژی‌ها به طور خلاصه در جدول (۳) مقایسه شده‌اند.

جدول (۳): مقایسه انواع توپولوژی اینورترهای چندسطحی [۲۶]

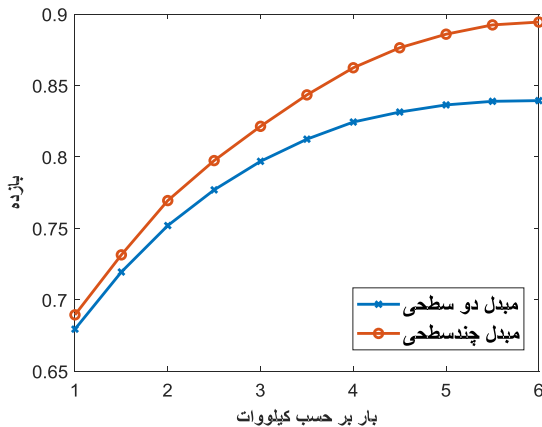
توپولوژی	مزایا	معایب
ساختار چندسطحی با کلمپ دیودی	- سادگی پیاده‌سازی - عدم نیاز به منبع ایزوله - عدم استفاده از خازن‌های معلق	- قیمت بالا برای تعداد سطح زیاد
ساختار چندسطحی با خازن‌های معلق	- قیمت پایین‌تر برای تعداد سطوح زیاد - عدم نیاز به منبع ایزوله	- پیچیدگی کنترل به دلیل نیاز به ثابت نگاه داشتن ولتاژ خازن‌ها - قابلیت اطمینان پایین - چگالی توان پایین
ساختار چندسطحی با پل‌های H سری	- کنترل ساده - ساختار مدولار با قابلیت تحمل خطا	- نیاز به منبع ولتاژ ایزوله
ساختار چندسطحی مدولار	- ساختار مدولار با قابلیت تحمل خطا - عدم نیاز به منبع ایزوله	- پیچیدگی کنترل به دلیل نیاز به ثابت نگاه داشتن ولتاژ خازن‌ها - قابلیت اطمینان پایین

با توجه به مزایا و معایب هر کدام از ساختارهای جدول (۳)، در این مقاله اینورتر کلمپ دیودی پنج‌سطحی انتخاب شده است. شکل (۶) یکی از دو ساق مدار اینورتر پیشنهادی و شکل (۷) شکل موج ولتاژ خروجی آن را نشان می‌دهد.

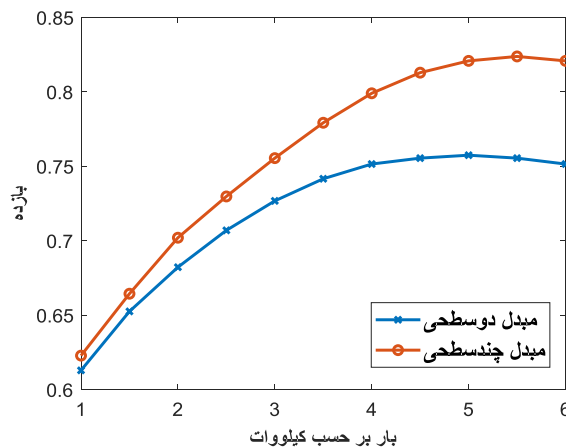


شکل (۶): اینورتر پنج‌سطحی کلمپ دیودی





شکل (۱۰): بازده دو مبدل بر حسب تغییرات بار در حالت ناهمراستایی ۵ سانتی متر

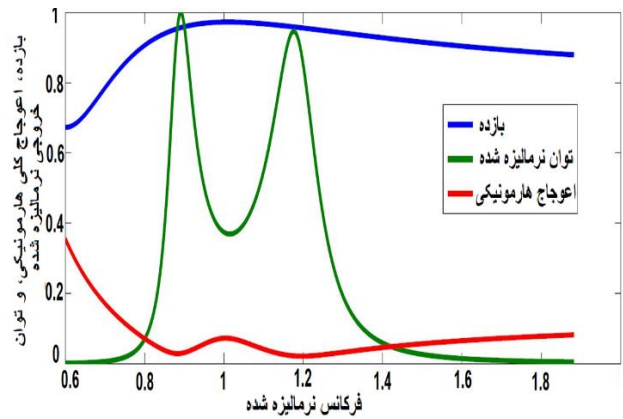


شکل (۱۱): - بازده دو مبدل بر حسب تغییرات بار در حالت ناهمراستایی ۱۰ سانتی متر

همچنان که مشاهده می‌شود، در بار کامل و بدون ناهمراستایی، میزان بازده مبدل پنج‌سطحی در حدود ۴ درصد بیشتر از مبدل دوسطحی است. تفاوت بازده دو مبدل در حالت وجود ناهمراستایی مشهودتر است، به طوری که با ناهمراستایی به میزان ۵ و ۱۰ سانتی متر، بازده مبدل چندسطحی در بار کامل به ترتیب ۵/۵ و ۷ درصد بیشتر از مبدل دوسطحی است. لازم به ذکر است که مقادیر بازده فوق تنها با در نظر گرفتن تلفات سیم‌پیچ‌ها و کلیدهای اینورتر انجام شده است. در عمل به دلیل تلفات دیگری مانند تلفات در مقاومت سری معادل خازن‌ها، تلفات یکسوساز خروجی، و تلفات در شیلد مغناطیسی قرار داده شده برای سیم‌پیچ‌ها، اختلاف بازده دو مبدل بیشتر خواهد شد.

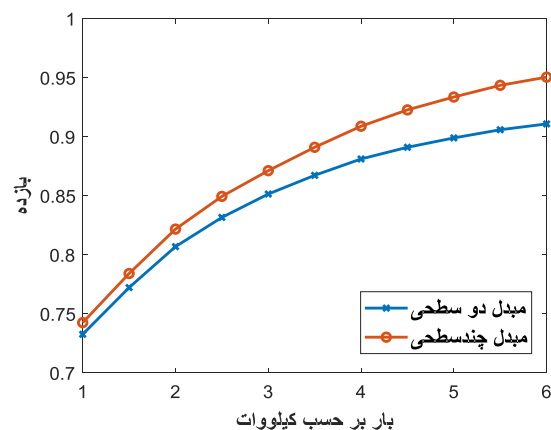
## ۶- نتایج آزمایش

برای تأیید نتایج شبیه‌سازی، یک مبدل پنج‌سطحی کلمپ دیودی با قابلیت انتقال توان حداکثر شش کیلووات با ساختاری مشابه با شکل (۶) ساخته شده و آزمایش مختلفی روی آن انجام شد.



شکل (۸): تغییرات بازده، توان خروجی و درصد اعوجاج هارمونیک جریان مبدل دوسطحی بر حسب فرکانس کلیدزنی

با شبیه‌سازی سیستم انتقال توان بیسیم، بازده دو اینورتر در مقادیر مختلف بار محاسبه و مقایسه شده‌اند. تغییرات بازده دو مبدل بر حسب بار در حالت عدم وجود ناهمراستایی در شکل (۹) دیده می‌شود.



شکل (۹): بازده دو مبدل بر حسب تغییرات بار در حالت عدم وجود ناهمراستایی

برای تعیین تأثیر ناهمراستایی سیم‌پیچ‌ها بر عملکرد مبدل‌ها، ابتدا تغییر ضریب تزویج با استفاده از تحلیل مغناطیسی محاسبه شده‌اند. بر اساس تحلیل انجام شده با نرم افزار ANSYS Maxwell، ناهمراستایی به میزان ۵ و ۱۰ سانتی‌متر مطابق جدول (۶) موجب کاهش به ترتیب ۱۸ و ۳۴ درصدی ضریب تزویج متقابل می‌شود [۲۷]. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تغییرات بازده را بر حسب تغییرات بار در حالت ناهمراستایی نشان می‌دهد.

جدول (۶): ضریب تزویج متقابل در ناهمراستایی‌های مختلف

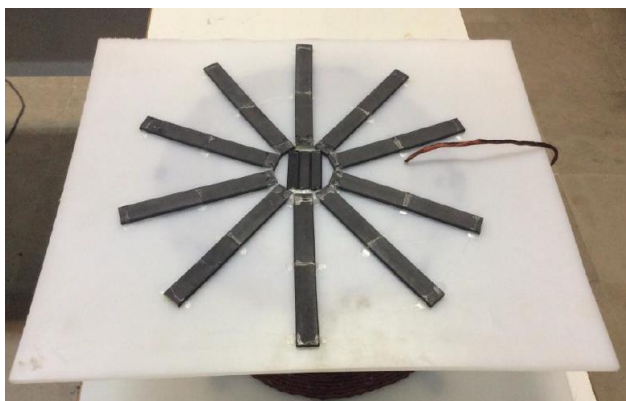
شرایط ناهمراستایی	تزویج متقابل
بدون ناهمراستایی	101 uH
ناهمراستایی ۵ سانتی متر	83 uH
ناهمراستایی ۱۰ سانتی متر	67 uH



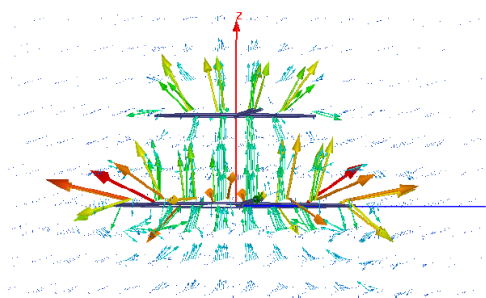
شکل (۱۲): برد مدار چاپی سیستم پیاده‌سازی شده



شکل (۱۳): سیم‌پیچ فرستنده (و مشابه آن برای گیرنده)



شکل (۱۴): - شیلد مغناطیسی پشت هر کدام از سیم‌پیچ‌ها



شکل (۱۵): میدان اطراف سیم‌پیچ‌ها بدون هسته‌های فریت

برای متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌های خط DC، از سه مبدل باک-بوست استفاده شده است. به این صورت که مبدل اول ولتاژ مجموع دو خازن بالائی را با ولتاژ مجموع دو خازن پایینی برابر نگاه می‌دارد. مبدل دوم ولتاژ دو خازن بالایی را با هم متعادل نگاه می‌دارد و مبدل باک-بوست سوم وظیفه متعادل‌سازی ولتاژ دو خازن پایینی را دارد.

از یک پردازنده سیگنال دیجیتال TMS320F28335 برای کنترل پالس‌های مبدل و همچنین کنترل پالس‌های مبدل‌های باک-بوست استفاده شده است. همچنین جریان مستقیم متوسط ورودی اینورتر توسط این پردازنده اندازه‌گیری می‌شود تا در محاسبات بازده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول (۷) مشخصات اصلی سیستم پیاده‌سازی شده شامل اطلاعات خازن‌ها، سیم‌پیچ‌ها، هسته‌های فریت، ادوات نیمه‌رسانای مورد استفاده و درایور گیت استفاده شده را نشان می‌دهد.

جدول (۷): مشخصات سیستم پیاده‌سازی شده

پارامتر	مقدار
خودالقای اولیه	96 uH
خودالقای ثانویه	102 uH
خازن تشدید اولیه	33 nF
خازن تشدید ثانویه	31 nF
قطر داخلی سیم‌پیچ اولیه و ثانویه	24 cm
قطر خارجی سیم‌پیچ اولیه و ثانویه	35 cm
تعداد دور سیم‌پیچ اولیه و ثانویه	14
مقاومت AC سیم‌پیچ اولیه	131 mOhms
مقاومت AC سیم‌پیچ ثانویه	140 mOhms
فاصله سیم‌پیچ‌ها از هم	20 cm
ماسفت‌های قدرت	IRFB4227PbF
پردازنده	DSP-TMS320F28335
درایور گیت ماسفت‌ها	ICL7667s
ولتاژ خط DC	540 V
سطح مقطع هر شاخه فریت	1.6 mm <sup>2</sup>
تعداد شاخه‌های فریت	10

برد مدار چاپی طراحی و مونتاژ شده در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. سیم‌پیچ‌های استفاده شده برای فرستنده و گیرنده نیز در شکل (۱۳) نشان داده شده‌اند. در پشت سیم‌پیچ‌ها میله‌هایی از جنس فریت به عنوان شیلد مغناطیسی به منظور افزایش ضریب تزویج و همچنین محدود کردن میدان مغناطیسی به فضای بین دو سیم‌پیچ استفاده شده‌اند که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شوند.

در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، با استفاده از نرم افزار Ansys Maxwell، تأثیر قرار دادن هسته‌های فریت بر محدود نمودن میدان به فضای بین دو سیم‌پیچ نمایش داده شده است.



شکل موج جریان سیم پیچ فرستنده در شکل (۱۸) نشان داده شده است. اعوجاج هارمونیک کل جریان فرستنده حداکثر ۲/۴ درصد است. این در حالی است که طبق نتایج شبیه سازی، اعوجاج هارمونیک مبدل دوسطحی، در شرایط بیان شده از نظر میزان ناهمراستایی، تا ۲۷ درصد می رسد [۲۷].

با مقایسه ی نتایج حاصل از سیستم پیاده سازی شده و نتایج شبیه سازی ملاحظه می شود که این نتایج با دقت خوبی با هم سازگاری دارند. تفاوت حداکثر دو درصدی این نتایج به موارد در نظر گرفته نشده در شبیه سازی مربوط می شود که پیش تر به آن ها اشاره شد.

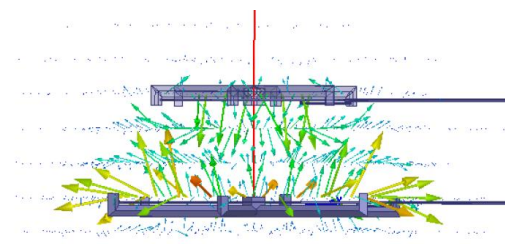
## ۷- نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که شارژرهای بیسیم خودروی برقی راهکاری مؤثر برای حل دو مانع اساسی توسعه استفاده از خودروهای برقی هستند؛ از یک طرف این شارژرها حداکثر مسافت قابل پیمایش خودرو را افزایش می دهند و از طرف دیگر نیاز به استفاده از باتری بزرگ را برطرف کرده، موجب کاهش قیمت و وزن خودروهای برقی می شوند. بر اساس نتایج شبیه سازی به دست آمده در این مقاله، یک شارژر بیسیم استاتیکی با توان ۴۰ کیلووات و با پوشش ۲۵ درصدی توقف های خودرو در رانندگی داخل شهری، می تواند میزان تخلیه انرژی باتری را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، شارژرهای دینامیک خودروی برقی با توان ۴۰ کیلووات و با پوشش ۴ کیلومتر از هر ۱۳ کیلومتر در هنگام رانندگی در بزرگراه می تواند میزان تخلیه انرژی باتری را تا ۶۰ درصد کاهش دهد.

در این مقاله نشان داده شد که یکی از راهکارهای مؤثر افزایش توان شارژرهای بیسیم خودروی برقی افزایش ولتاژ خط DC اینورتر است. برای استفاده از کلیدهای نیمه رسانا با مقاومت کمتر، یک سیستم انتقال توان بیسیم بر مبنای اینورتر پنج سطحی کلمپ دیودی پیشنهاد و ساخته شد. نتایج شبیه سازی و نتایج آزمایش عملی نشان دادند که بازده این مبدل نسبت به ساختار دوسطحی به مقدار قابل ملاحظه ای بیشتر است. به علاوه، با تولید شکل موج ولتاژ خروجی سینوسی به جای شکل موج مربعی، از میزان هارمونیک های فرکانس بالای جریان کاسته می شود که این مسئله خود موجب کاهش تلفات در سیم پیچ ها و خازن های تشدید بخصوص در حالت ناهمراستایی سیم پیچ ها می شود.

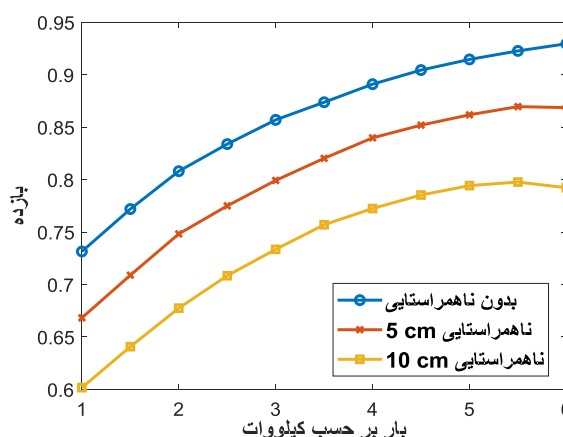
## مراجع

- [1] Asia-Pacific Economic Cooperation. The Impact of Government Policy on Promoting New Energy Vehicles NEVs The Evidence in APEC Economie, March 2017, www.apec.org.
- [2] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O'Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu et al., "Lithium-ion battery fast charging: A review," ETransportation, vol. 1, p. 100011, 2019.
- [3] F. T. Davidson, D. Tuttle, J. D. Rhodes, and K. Nagasawa, "Switching to electric vehicles could save the

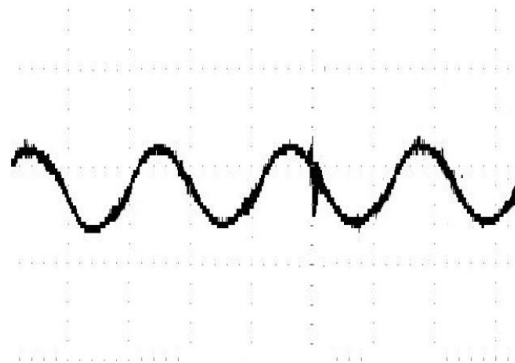


شکل (۱۶): میدان اطراف سیم پیچ ها با هسته های فریت

مقایسه شکل های (۱۵) و (۱۶) نشان می دهد که حتی قرار دادن تعداد کمی هسته فریت در پشت سیم پیچ ها باعث کاهش قابل توجه شدت میدان نشتی و تداخل مغناطیسی بر سایر وسایل می شود. بازده سیستم پیاده سازی شده بر حسب تغییرات توان خروجی مبدل در مقادیر مختلف ناهمراستایی در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل محدودیت تجهیزات اندازه گیری موجود در آزمایشگاه، نتایج نشان داده شده برای بازده بر اساس اندازه گیری توان از خط DC ورودی تا خط DC خروجی است و توان تلف شده در یکسوساز سه فاز تغذیه ورودی و همچنین توان مصرفی سیستم کنترل و مبدل های باک-بوست متعادل کننده ولتاژ خازن ها لحاظ نشده اند.



شکل (۱۷): بازده سیستم پیاده سازی شده بر حسب تغییرات توان خروجی مبدل در مقادیر مختلف ناهمراستایی



شکل (۱۸): شکل موج جریان سیم پیچ فرستنده

- Emerging Technologies: Wireless Power (2015 WoW). IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [۱۸] سرمست قهفرخی، بهینه‌سازی انتقال توان بیسیم دینامیک به منظور حداکثر شدن توان انتقالی به خودروهای برقی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۸.
- [۱۹] مرادی، طراحی سیستم انتقال توان بیسیم با فرکانس هارمونیک جریان برای شارژر خودروی برقی، رساله‌ی دکترا، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۶.
- [20] Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), United States Environmental Protection Agency (EPA), 2015-12-22.
- [21] Pantic, Z., Bai, S., and Lukic, S. M. "Inductively coupled power transfer for continuously powered electric vehicles," in Proc. IEEE Veh. PowerPropulsion Conf., 2009, pp. 1271–1278.
- [۲۲] فشکی فراهانی، حسینی علی‌آبادی، جوادی، پرکار، "یک ساختار جدید برای اینورترهای منبع ولتاژ سه فاز چند سطحی بر مبنای یک منبع تغذیه DC با تعداد کم سوئیچ و دیود"، نشریه‌ی مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۵.
- [۲۳] تودجی، "استفاده از اینورتر چندسطحی با کنترل‌کننده غیرخطی مستقیم برای اتصال مزرعه خورشیدی به شبکه"، نشریه‌ی مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال پانزدهم، شماره اول، ۱۳۹۷.
- [۲۴] صباحی، گندمی، سعیدآبادی، "مبدل چند سطحی متصل به شبکه با ایمنی بالا با قابلیت اخذ بیشینه توان از سلول خورشیدی"، نشریه‌ی مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، ۱۳۹۵.
- [25] <https://www.littelfuse.com>
- [26] Panagis, Panagiotis, Fotis Stergiopoulos, Pantelis Marabeas, and Stefanos Manias. "Comparison of state of the art multilevel inverters." In 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 4296-4301. IEEE, 2008.
- [۲۷] پورفرخانی، طراحی و ساخت سیستم شارژ بی سیم خودروی برقی با مبدل های چندسطحی و با قابلیت جبران ناهمراستایی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۹۵.
- us billions, but timing is everything," Oct 2019. [Online]. Available: <https://theconversation.com/switching-to-electric-vehiclescould-save-the-us-billions-but-timing-is-everything-106227>.
- [۴] حسن زاده، صانعی، طراحی و پیاده سازی سیستم انتقال انرژی بیسیم برای کاربردهای توان پایین، نشریه‌ی مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال هفدهم، شماره دوم، ۱۳۹۹.
- [5] S. Chopra and P. Bauer, "Driving range extension of ev with on-road contactless power transfer—a case study," IEEE transactions on industrial electronics, vol. 60, no. 1, pp. 329–338, 2011.
- [6] Vilathgamuwa, D. M., and J. P. K. Sampath. "Wireless power transfer (WPT) for electric vehicles (EVS)—Present and future trends." In Plug in electric vehicles in smart grids, pp. 33-60. Springer, Singapore, 2015.
- [7] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, "Multilevel power converters," Power electronics handbook, pp. 451–482, 2007.
- [8] A. Salami and B. Bayat, "Total harmonic distortion minimization of multilevel converters using genetic algorithms," Applied Mathematics, vol. 4, no. 07, p. 1023, 2013.
- [9] Y. Jang and M. M. Jovanović, "A new three-level soft-switched converter," in Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 1059–1065.
- [10] Kim, Jonghoon, Hongseok Kim, Chiuk Song, In-Myoung Kim, Young-il Kim, and Joungho Kim. "Electromagnetic interference and radiation from wireless power transfer systems." In 2014 IEEE international symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), pp. 171-176. IEEE, 2014.
- [11] C. A. García-Vázquez, F. Llorens-Iborra, L. M. Fernández-Ramírez, H. Sánchez-Sainz, and F. Jurado, "Evaluating dynamic wireless charging of electric vehicles moving along a stretch of highway," in 2016 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM). IEEE, 2016, pp. 61–66.
- [12] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, and P. T. Balsara, "Wireless power transfer for vehicular applications: Overview and challenges," IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 1, pp. 3–37, 2017.
- [13] J. Huh, S. Lee, C. Park, G.-H. Cho, and C.-T. Rim, "High performance inductive power transfer system with narrow rail width for on-line electric vehicles," in 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, 2010, pp. 647–651.
- [14] J. L. Villa, J. Sallan, J. F. S. Osorio, and A. Llombart, "Highmisalignment tolerant compensation topology for icpt systems," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 945–951, 2011.
- [15] Y. Nagatsuka, N. Ehara, Y. Kaneko, S. Abe, and T. Yasuda, "Compact contactless power transfer system for electric vehicles," in The 2010 International Power Electronics Conference-ECCE ASIA-. IEEE, 2010, pp. 807–813.
- [16] S. Jeong, Y. J. Jang, and D. Kum, "Economic analysis of the dynamic charging electric vehicle," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 11, pp. 6368–6377, 2015.
- [17] A. Shekhar, M. Bolech, V. Prasanth, and P. Bauer, "Economic considerations for on-road wireless charging systems-a case study," in 2015 IEEE PELS Workshop on

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> range

<sup>2</sup> radio-frequency identification

<sup>3</sup> driving cycle

<sup>4</sup> diode clamped

<sup>5</sup> misalignment

<sup>6</sup> Chevrolet Spark

<sup>7</sup> Simulink

<sup>8</sup> electromagnetic interference