

پیاده سازی مبدل DC-DC کاهنده-افزاینده با بازده بالا برای کاربردهای خودرو برقی

علیرضا جوشن

کارشناسی ارشد قدرت گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی، دانشگاه گیلان، گیلان، ایران

Alireza.joshan.guilan@gmail.com

چکیده

خودروهای برقی به عنوان راه حل اصلی کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در بخش حمل و نقل شناخته می شوند. یکی از اجزای کلیدی در سیستم قدرت این خودروها، مبدل های DC-DC دوطرفه هستند که وظیفه مدیریت جریان انرژی بین باتری، موتور الکتریکی و سیستم های جانبی را بر عهده دارند. این مقاله به بررسی جامع طراحی و پیاده سازی مبدل های DC-DC کاهنده-افزاینده دوطرفه با بازده بالا برای کاربردهای خودرو برقی می پردازد. ابتدا معماری های مختلف مبدل های دوطرفه شامل توپولوژی های کاهنده-افزاینده کلاسیک، مبدل های چهار کلیدی، مبدل های درهم بافته و توپولوژی های مبتنی بر خازن کلیدزنی مورد تحلیل قرار می گیرد. سپس فناوری های نیمه هادی توان از جمله سیلیکون کاربید و گالیوم نیتريد به عنوان عوامل کلیدی در افزایش بازده و چگالی توان معرفی می شوند. استراتژی های کنترل شامل کنترل حالت جریان، کنترل مد لغزشی و روش های مبتنی بر یادگیری ماشین بررسی می گردند. نتایج تجربی از نمونه های عملی نشان می دهد که بازده مبدل های پیشرفته امروزی به بیش از ۹۷ درصد رسیده است. چالش های باقیمانده شامل مدیریت حرارتی، سازگاری الکترومغناطیسی و قابلیت اطمینان در شرایط سخت خودرویی مورد بحث قرار می گیرد و جهت گیری های آینده شامل کنترل نوری و عیب یابی مبتنی بر هوش مصنوعی ارائه می شود.

کلمات کلیدی: خودرو برقی، مبدل DC-DC دوطرفه، کاهنده-افزاینده، بازده بالا، سیلیکون کاربید، گالیوم نیتريد، مدیریت انرژی

۱. مقدمه

صنعت خودروسازی جهان در دهه اخیر دستخوش تحولی بنیادین شده است که محور اصلی آن جایگزینی پیشران‌های احتراق داخلی با سیستم‌های پیشران‌های الکتریکی است. آژانس بین‌المللی انرژی در گزارش چشم‌انداز جهانی خودروهای برقی سال ۲۰۲۵ پیش‌بینی کرده است که فروش سالانه خودروهای برقی تا سال ۲۰۳۰ به بیش از ۴۰ میلیون دستگاه رسید که نشان‌دهنده رشد چشمگیر نسبت به سال ۲۰۲۰ است [۵]. این رشد سریع، فشار فزاینده‌ای بر توسعه زیرسیستم‌های الکترونیک قدرت با کارایی بالاتر وارد می‌کند تا الزامات مربوط به برد حرکتی، زمان شارژ و هزینه تمام شده خودرو برآورده شود.

در قلب هر خودرو برقی، مجموعه‌ای از مبدل‌های الکترونیک قدرت قرار دارند که وظیفه تبدیل و مدیریت انرژی الکتریکی بین اجزای مختلف را بر عهده دارند. مبدل‌های DC-DC به عنوان واسطه بین باتری ولتاژ بالا، سیستم ولتاژ پایین (۱۲ یا ۴۸ ولت)، موتور الکتریکی و شارژر داخلی خودرو عمل می‌کنند [۱۹]. برخلاف مبدل‌های تک‌جهته که فقط قادر به انتقال توان در یک جهت هستند، مبدل‌های دوطرفه امکان جریان معکوس توان را فراهم می‌کنند که برای بازیابی انرژی ترمزی، شارژ باتری از شبکه و ارائه خدمات جانبی به شبکه ضروری است [۱۷].

اهمیت مبدل‌های کاهنده-افزاینده در خودروهای برقی از آنجا ناشی می‌شود که ولتاژ باتری در طول چرخه شارژ و دشارژ به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. به عنوان مثال، یک بسته باتری با ولتاژ نامی ۴۰۰ ولت ممکن است در حالت شارژ کامل به ۴۵۰ ولت و در حالت دشارژ عمیق به ۳۰۰ ولت برسد [۳]. از سوی دیگر، موتور الکتریکی و اینورتر محرکه ممکن است به ولتاژ بالاتری برای دستیابی به توان و بازده بهینه نیاز داشته باشند. مبدل کاهنده-افزاینده دوطرفه این امکان را فراهم می‌آورد که صرف نظر از وضعیت شارژ باتری، ولتاژ لینک DC در محدوده بهینه خود حفظ شود.

هدف این مقاله ارائه تحلیل جامع از طراحی و پیاده‌سازی مبدل‌های کاهنده-افزاینده دوطرفه با بازده بالا برای کاربردهای خودرو برقی است. سوالات اصلی تحقیق عبارتند از: چه توپولوژی‌هایی برای کاربرد خودرو برقی مناسب‌تر هستند؟ فناوری‌های نیمه‌هادی نوظهور چگونه بازده را بهبود می‌بخشند؟ استراتژی‌های کنترل پیشرفته چه نقشی در بهینه‌سازی عملکرد دارند؟ و چه چالش‌هایی در مسیر تجاری‌سازی این مبدل‌ها وجود دارد؟

۲. مرور پیشینه و مبانی نظری**۲.۱. طبقه‌بندی خودروهای برقی و معماری سیستم قدرت**

خودروهای برقی بر اساس منبع اصلی انرژی به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شوند: خودروهای برقی باتری دار، خودروهای برقی هیبریدی، خودروهای برقی هیبریدی قابل اتصال به شبکه و خودروهای برقی سلول سوختی [۵]. هر یک از این معماری‌ها نیازمندی‌های خاص خود را برای مبدل‌های DC-DC دارند. در خودروهای برقی باتری دار، مبدل دوطرفه اصلی بین باتری ولتاژ بالا و اینورتر محرکه قرار می‌گیرد.

گیرد و در حین ترمز بازایی، انرژی جنبشی را به باتری بازمی‌گرداند. در خودروهای هیبریدی، مبدل های DC-DC نقش حیاتی تری در توزیع توان بین موتور احتراقی، باتری و موتور الکتریکی ایفا می‌کنند [۱۹].

۲.۲. نقش مبدل های DC-DC در خودروهای برقی

مبدل های DC-DC در خودروهای برقی سه کارکرد اصلی دارند: تطبیق سطح ولتاژ بین باتری و لینک DC، مدیریت جریان انرژی در حالت های رانندگی و ترمز، و تغذیه سیستم های ولتاژ پایین از جمله سیستم های روشنایی، سرگرمی و کمک راننده [۱۹]. در معماری های مدرن، علاوه بر مبدل اصلی محرکه، یک مبدل دوطرفه بین باتری ولتاژ بالا و باتری ۱۲ یا ۴۸ ولت قرار می‌گیرد که جایگزین آلترناتور سنتی شده است [۷].

۳. توپولوژی های مبدل کاهنده-افزاینده دوطرفه

۳.۱. مبدل کاهنده-افزاینده کلاسیک

ساده ترین توپولوژی مبدل کاهنده-افزاینده دوطرفه از یک سلف، دو کلید نیمه هادی و دو خازن ورودی و خروجی تشکیل شده است. در حالت کاهنده، کلید بالایی با دیوتی سائیکل مشخص سوئیچ می‌کند و انرژی را از ولتاژ بالاتر به ولتاژ پایین تر منتقل می‌کند. در حالت افزایشنده، نقش کلیدها معکوس می‌شود و کلید پایینی عمل سوئیچینگ را انجام می‌دهد. یکی از محدودیت های اصلی این توپولوژی، معکوس بودن قطبیت ولتاژ خروجی است که استفاده از آن را در کاربردهای خودرویی که نیاز به قطبیت مشترک دارند دشوار می‌کند [۱۲].

۳.۲. مبدل کاهنده-افزاینده چهار کلیدی غیرمعکوس

برای رفع مشکل معکوس بودن قطبیت، توپولوژی کاهنده-افزاینده چهار کلیدی توسعه یافته است که در آن دو کلید اضافی به صورت پل قرار می‌گیرند و امکان حفظ قطبیت مثبت خروجی را فراهم می‌کنند. این توپولوژی که به عنوان FSBB نیز شناخته می‌شود، در مقالات متعدد برای کاربردهای خودرو برقی توصیه شده است [۱۴]. مزیت اصلی این ساختار، قابلیت کار در سه حالت کاهنده، افزایشنده و کاهنده-افزاینده است که اعطاف پذیری بالایی در مواجهه با تغییرات ولتاژ باتری فراهم می‌کند. از سوی دیگر، تعداد بیشتر کلیدها و نیاز به مدارهای درایو پیچیده تر، چالش اصلی این توپولوژی محسوب می‌شود.

۳.۳. مبدل های درهم بافته

توپولوژی درهم بافته با موازی کردن چند فاز مبدل پایه و کنترل با اختلاف فاز مناسب، مزایای قابل توجهی از جمله کاهش ریل جریان ورودی و خروجی، کاهش اندازه اجزای مغناطیسی و توزیع بهتر حرارت را به ارمغان می‌آورد [۳]. در یک مطالعه جامع، محققان یک مبدل

درهم بافته شش بازویی با تنها دو سلف برای کاربردهای خودرو برقی پیشنهاد کرده اند که قادر به پشتیبانی از توان ۱۳ کیلووات است. نتایج نشان می دهد که این توپولوژی می تواند ریبیل جریان را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و در عین حال تعداد اجزای مغناطیسی را نسبت به ساختارهای مشابه کمتر نگه دارد [۳]. جدول ۱ مقایسه مشخصات این مبدل با سایر توپولوژی های رایج را نشان می دهد.

جدول ۱: مقایسه توپولوژی های مبدل دوطرفه برای خودرو برقی

توپولوژی	تعداد کلید	تعداد سلف	بازده معمول	محدودیت اصلی
کاهنده-افزاینده کلاسیک	۲	۱	۸۳-۸۸٪	قطبیت معکوس، ریبیل بالا
چهار کلیدی	۴	۱	۹۰-۹۵٪	پیچیدگی درایو
درهم بافته	۲n	n	۹۰-۹۶٪	هزینه بالا، کنترل پیچیده
خازن کلیدزنی	۲-۴	۰-۱	۹۴-۹۷٪	جریان هجومی
رزونانسی	۴	۲	۹۰-۹۵٪	پیچیدگی طراحی، EMI

۳.۴. مبدل های مبتنی بر خازن کلیدزنی

فناوری خازن کلیدزنی رویکردی نوین برای دستیابی به بهره ولتاژ بالا بدون استفاده از سلف های حجیم است. در این توپولوژی، خازن ها با آرایش خاصی کلیدزنی می شوند تا ولتاژ خروجی چند برابر ولتاژ ورودی شود. یک مطالعه اخیر یک مبدل دوطرفه سه پورته مبتنی بر خازن کلیدزنی برای خودرو برقی معرفی کرده است که قادر به مدیریت انتقال توان بین چند منبع انرژی است و در عین حال تنش ولتاژ روی کلیدها را کاهش می دهد [۴]. مزیت اصلی این توپولوژی، چگالی توان بالا و عدم نیاز به اجزای مغناطیسی حجیم است؛ اما محدودیت اصلی آن، جریان هجومی لحظه ای در زمان کلیدزنی خازن ها است که نیازمند مدارهای محدودکننده جریان است.

۳.۵. مبدل های با بهره بالا مبتنی بر سلول LC همزمان

توپولوژی مبتنی بر سلول LC همزمان رویکرد دیگری برای دستیابی به بهره ولتاژ بالا در مبدل های دوطرفه است. در این ساختار، یک خازن کمکی با سلف به صورت همزمان شارژ و دشارژ می شود تا بهره ولتاژ به طور قابل توجهی افزایش یابد. اثر کلمپ خازن کمکی، تنش ولتاژ روی کلیدهای قدرت را کاهش می دهد و قابلیت اطمینان مبدل را بهبود می بخشد [۸]. یک نمونه عملی ۲۰۰ وات از این مبدل، بهره ولتاژ افزاینده ۲.۸۵ تا ۳۰ و بازده اوج ۹۴.۸ درصد را نشان داده است.

۴. فناوری های نیمه هادی توان

۴.۱. محدودیت های سیلیکون سستی

مبدل های DC-DC سستی بر پایه ترانزیستورهای MOSFET سیلیکونی و IGBT ها ساخته می شوند. این ادوات در فرکانس های سوئیچینگ محدود (معمولاً کمتر از ۱۰۰ کیلوهرتز برای کاربردهای توان بالا) کار می کنند و تلفات سوئیچینگ قابل توجهی دارند. با افزایش فرکانس سوئیچینگ برای کاهش اندازه اجزای مغناطیسی، تلفات سوئیچینگ به صورت تصاعدی افزایش می یابد و بازده کلی سیستم کاهش می یابد [۹].

۴.۲. سیلیکون کاربید (SiC)

سیلیکون کاربید به عنوان یک نیمه هادی با شکاف باند گسترده، خواص فیزیکی برتری نسبت به سیلیکون دارد. میدان الکتریکی شکست بحرانی سیلیکون کاربید حدود ۲.۸ مگاولت بر سانتی متر است که تقریباً ده برابر سیلیکون (۰.۳ مگاولت بر سانتی متر) می باشد [۹]. این ویژگی اجازه می دهد تا ادوات SiC با ولتاژ شکست بالاتر و مقاومت روشنایی کمتر ساخته شوند. علاوه بر این، سرعت اشباع الکترون در SiC حدود دو برابر سیلیکون است که امکان سوئیچینگ سریع تر را فراهم می کند. دماهای اتصال بالای ۱۷۵ درجه سانتی گراد نیز از دیگر مزایای SiC است [۹].

در کاربردهای خودرو برقی، اینورترهای محرکه مبتنی بر SiC در خودروهایی مانند تسلا مدل ۳ تجاری سازی شده اند و بهبود بازده چند درصدی نسبت به IGBT های سیلیکونی گزارش شده است [۹]. در مبدل های DC-DC، استفاده از SiC امکان افزایش فرکانس سوئیچینگ به محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز را فراهم می کند که کاهش قابل توجه اندازه سلف ها و خازن ها را به دنبال دارد.

۴.۳. گالیم نیترید (GaN)

گالیم نیترید خواص الکترونیکی حتی برتری نسبت به SiC دارد و برای کاربردهای ولتاژ متوسط و فرکانس بسیار بالا مناسب تر است. مبدل های مبتنی بر GaN قادر به کار در فرکانس های ۲۰۰ تا ۵۰۰ کیلوهرتز و در نمونه های آزمایشگاهی تا حدود ۱ مگاهرتز هستند [۹]. چگالی توان بالای مبدل های GaN، امکان طراحی سیستم های بسیار فشرده را فراهم می کند. با این حال، نرخ تغییرات ولتاژ بسیار بالا (بیش از ۱۰۰ ولت بر نانوثانیه) در مبدل های GaN چالش های جدی از نظر سازگاری الکترومغناطیسی ایجاد می کند [۹].

۴.۴. مقایسه فناوری های نیمه هادی

جدول ۲ مقایسه جامعی از مشخصات کلیدی فناوری های نیمه هادی توان ارائه می دهد.

جدول ۲: مقایسه فناوری های نیمه هادی توان در مبدل های خودرو برقی

مشخصه	سیلیکون	سیلیکون کاربید	گالیوم نیتريد
میدان شکست (MV/cm)	۳.۰	۸.۲	۳.۳
فرکانس سوئیچینگ معمول	kHz < ۱۰۰	kHz ۱۰۰-۳۰۰	kHz ۲۰۰-۵۰۰
دمای اتصال مجاز	< ۱۵۰°C	> ۱۷۵°C	> ۱۵۰°C
تلفات سوئیچینگ نسبی	بالا	متوسط	پایین
هزینه نسبی	پایه	۲-۳ برابر	۳-۴ برابر
بلوغ تجاری	کامل	در حال گسترش	نوظهور

۵. طراحی و بهینه سازی مبدل

۵.۱. انتخاب توپولوژی برای کاربرد خودرو برقی

انتخاب توپولوژی مناسب برای خودرو برقی نیازمند در نظر گرفتن مجموعه ای از عوامل شامل محدوده ولتاژ باتری، توان نامی، الزامات رپیل، بازده مورد نیاز و محدودیت های هزینه و فضا است. برای خودروهای برقی باتری دار با ولتاژ باتری ۲۵۰ تا ۴۵۰ ولت و لینک DC ۴۰۰ تا ۸۰۰ ولت، مبدل کاهنده-افزاینده چهار کلیدی غیرمعکوس گزینه مناسبی است زیرا قادر به کار در تمام محدوده ولتاژ ورودی و خروجی با قطبیت مشترک است [۱۴].

۵.۲. طراحی اجزای مغناطیسی

طراحی سلف در مبدل کاهنده-افزاینده دوطرفه باید به گونه ای باشد که رپیل جریان در بدترین حالت (حداکثر ولتاژ ورودی یا خروجی) از مقدار مجاز فراتر نرود. رپیل جریان سلف بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\Delta I_L = V_{in} \times D / (L \times f_{sw})$$

که در آن D دیوتی سایکل، L اندوکتانس و f_{sw} فرکانس سوئیچینگ است. با انتخاب مواد هسته مناسب مانند فریت منگنز- روی یا مواد پودری آهن، می‌توان تلفات هسته را در فرکانس‌های بالا کاهش داد [۳].

۵.۳. طراحی مدارهای درایو

مدار درایو گیت برای کلیدهای SiC و GaN نیازمند دقت بالایی است. مقاومت گیت باید به گونه‌ای انتخاب شود که بین سرعت سوئیچینگ و کاهش نوسانات و EMI تعادل برقرار شود. برای کلیدهای SiC ، ولتاژ گیت معمولاً در محدوده -5 تا $+20$ ولت است و برای GaN ، محدوده باریک تری (معمولاً 0 تا 6 ولت) نیاز است [۹]. زمان مرده بین کلیدهای بالایی و پایینی باید به دقت کالیبره شود تا از جریان اتصال کوتاه جلوگیری شود و در عین حال تلفات ناشی از هدایت دیود بدنه به حداقل برسد.

۶. استراتژی‌های کنترل

۶.۱. کنترل مد جریان

کنترل مد جریان متداول‌ترین استراتژی برای مبدل‌های $DC-DC$ دوطرفه در کاربردهای خودرویی است. در این روش، حلقه داخلی جریان سلف را تنظیم می‌کند و حلقه خارجی ولتاژ خروجی یا جریان باتری را کنترل می‌نماید. مزیت اصلی کنترل مد جریان، پاسخ دینامیکی سریع و حفاظت ذاتی در برابر اضافه‌جریان است [۱۷]. برای مبدل‌های دوطرفه، جهت جریان مرجع با توجه به حالت کار (شارژ یا دشارژ) تعیین می‌شود.

۶.۲. کنترل مد لغزشی

کنترل مد لغزشی به عنوان یک استراتژی کنترل غیرخطی مقاوم، در مبدل‌های $DC-DC$ خودرو برقی مورد توجه قرار گرفته است. این روش در برابر تغییرات پارامترها و اغتشاشات بار مقاوم است و می‌تواند پاسخ دینامیکی سریعی ارائه دهد. یک مطالعه جامع، ترکیب کنترل مد لغزشی با روش‌های سنتی را برای بهبود قابلیت اطمینان در شرایط واقعی رانندگی پیشنهاد کرده است [۲].

۶.۳. کنترل مبتنی بر یادگیری ماشین

پیشرفت‌های اخیر در یادگیری ماشین، افق‌های جدیدی برای کنترل هوشمند مبدل‌های $DC-DC$ گشوده است. روش‌های یادگیری تقویتی می‌توانند سیاست‌های کنترل بهینه را در زمان واقعی یاد بگیرند و خود را با شرایط متغیر بار و ولتاژ تطبیق دهند [۲]. شبکه‌های

عصبی نیز برای تخمین پارامترهای سیستم و پیش بینی رفتار مبدل در شرایط مختلف کاربرد یافته اند. چارچوب کنترل هیبریدی که روش های سنتی مانند کنترل پیش بین مدل را با یادگیری ماشین ترکیب می کند، می تواند تعادل بین کارایی محاسباتی، مقاومت و انطباق پذیری برقرار کند [۲].

جدول ۳ مقایسه استراتژی های کنترل مختلف را از منظر پیچیدگی، پاسخ دینامیکی و کاربرد نشان می دهد.

جدول ۳: مقایسه استراتژی های کنترل مبدل دوطرفه

استراتژی کنترل	پیچیدگی پیاده سازی	پاسخ دینامیکی	مقاومت در برابر اغتشاش	کاربرد خودرویی
PI خطی	کم	متوسط	کم	سیستم های جانبی
مد جریان	متوسط	سریع	متوسط	محرکه اصلی
مد لغزشی	متوسط	سریع	بالا	محرکه اصلی
پیش بین مدل	بالا	بسیار سریع	متوسط	کاربردهای خاص
یادگیری تقویتی	بسیار بالا	تطبیقی	بالا	تحقیقاتی

۷. نتایج تجربی و مقایسه عملکرد

۷.۱. نمونه های عملی و مشخصات

در سال های اخیر، نمونه های متعددی از مبدل های کاهنده-افزاینده دوطرفه با بازده بالا برای کاربردهای خودرو برقی در مقالات علمی گزارش شده است. یک مبدل با توپولوژی کاهنده-افزاینده بهبودیافته با دیوهای موازی معکوس، بازده اوج ۹۷.۱ درصد را در نسبت تبدیل ولتاژ ۰.۰۵۳ تا ۱۸.۷ نشان داده است [۱]. این مبدل با تفکیک ناحیه کار به چهار منطقه مختلف و استفاده از حالت های اختصاصی برای مدیریت گذرهای ولتاژ باتری، رپیل جریان سلف را تا ۵۵ درصد کاهش داده است [۱].

یک مبدل کاهنده-افزاینده دوطرفه با بهره ولتاژ گسترده برای شارژرهای خودرو برقی که از قابلیت $G2V$ و $V2G$ پشتیبانی می کند، بازده اوج ۹۷.۲ درصد در حالت افزایشده و ۹۷.۶ درصد در حالت کاهنده را گزارش کرده است [۱۶]. نمونه اولیه ۵۰۰ وات این مبدل قادر به کار با ولتاژ ورودی ۴۰ یا ۲۰۰ ولت و ولتاژ خروجی ۱۸۰ ولت بوده است.

۷.۲. مقایسه با محصولات تجاری

در حوزه محصولات تجاری، ماژول PRM3V30 Vicor به عنوان یک رگولاتور کاهنده-افزاینده با سوئیچینگ ولتاژ صفر، بازده اوج ۹۹.۲ درصد را در تبدیل ۴۸ ولت به ۴۸ ولت ارائه می‌دهد [۱۰]. این ماژول با ابعاد ۳۶۶ در ۳۵.۴ در ۷.۴ میلی‌متر و وزن ۴۰ گرم، چگالی توان ۲۶۲.۴ کیلووات بر لیتر را ارائه می‌دهد. محدوده ولتاژ ورودی این ماژول ۳۱ تا ۵۸ ولت و توان خروجی پیوسته آن تا ۲.۵ کیلووات است [۱۰].

محصول تجاری دیگری از خانواده PQ4V08Q با گواهی AEC-Q100 برای سیستم‌های ۴۸ ولت خودرویی طراحی شده است. این مبدل از محدوده ولتاژ ورودی ۴۵ تا ۸۰ ولت پشتیبانی می‌کند و قادر به انتقال بی‌درنگ بین حالت‌های کاهنده، کاهنده-افزاینده و افزایش‌دهنده است [۶]. محدودیت جریان خروجی این دستگاه تا ۵۰ آمپر و جریان سکون در حالت خاموشی تنها ۵ میکروآمپر است [۶].

۷.۳. تحلیل بازده در شرایط مختلف بار

بازده مبدل‌های DC-DC به شدت به نقطه کار و سطح بار وابسته است. در بارهای سبک، تلفات سوئیچینگ غالب می‌شود و بازده کاهش می‌یابد. برای غلبه بر این مشکل، روش‌های کنترل مانند مدولاسیون فرکانس پالسی و حالت FPWM به کار می‌روند [۶]. در بارهای سنگین، تلفات هدایت غالب است و استفاده از کلیدهای با مقاومت روشنایی پایین مانند MOSFET‌های SiC ضروری است. تحقیقات نشان می‌دهد که بازده مبدل‌های مبتنی بر SiC و GaN در محدوده وسیعی از بار بالای ۹۵ درصد باقی می‌ماند، در حالی که مبدل‌های سیلیکونی در بارهای جزئی افت بازده قابل توجهی تجربه می‌کنند [۹].

۸. چالش‌ها و محدودیت‌ها

۸.۱. مدیریت حرارتی

مدیریت حرارتی یکی از چالش‌های اصلی در طراحی مبدل‌های DC-DC با چگالی توان بالا است. در شارژ سریع با توان ۳۵۰ کیلووات، نوسانات دمای اتصال بیش از ۷۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند سرعت تخریب سیم‌های اتصال را تا ۳.۲ برابر افزایش دهد [۹]. این امر نیازمند سیستم‌های خنک‌کننده مایع با قابلیت دفع شار حرارتی بیش از ۱ وات بر سانتی‌متر مربع است [۱۳]. طراحی مسیرهای حرارتی مناسب از لایه نیمه هادی تا هیت سینک، و استفاده از مواد رابط حرارتی با رسانایی بالا، از الزامات اساسی است.

۸.۲. سازگاری الکترومغناطیسی

با افزایش فرکانس سوئیچینگ، چالش‌های سازگاری الکترومغناطیسی تشدید می‌شود. مبدل‌های GaN که در فرکانس‌های بالای ۵۰۰ کیلوهرتز کار می‌کنند، نرخ تغییرات ولتاژ بیش از ۱۰۰ ولت بر نانوثانیه تولید می‌کنند که می‌تواند رزونانس‌های پارازیتی را تحریک کند

[۹]. برای رعایت استانداردهای سخت گیرانه خودرویی مانند Class ۲۵ CISPR ۵، نیاز به فیلترهای EMI اضافی و طراحی دقیق layout است [۱۳]. استفاده از تکنیک های گسترش طیف فرکانسی می تواند توزیع انرژی نویز را در محدوده فرکانسی وسیع تری پخش کند و پیک های EMI را کاهش دهد [۶].

۸.۳. قابلیت اطمینان در شرایط سخت

مبدل های خودرو برقی باید در شرایط محیطی سخت شامل دماهای -۴۰ تا +۱۲۵ درجه سانتی گراد، ارتعاشات شدید و رطوبت بالا کار کنند. ادوات SiC و GaN اگرچه عملکرد الکتریکی برتری دارند، اما حساسیت هایی در رابط گیت-اکسید و بسته بندی تحت تنش های ترکیبی ولتاژ، دما و رطوبت نشان می دهند [۹]. آزمون های تسریع شده برای ارزیابی عمر مفید این ادوات در شرایط واقعی خودرویی ضروری است.

۹. جهت گیری های آینده

۹.۱. کنترل نوری گیت

یکی از جهت گیری های نوظهور در الکترونیک قدرت خودرویی، استفاده از تحریک نوری برای گیت ترانزیستورهای قدرت است. این رویکرد می تواند جداسازی گالوانیکی عالی فراهم کند و مصونیت در برابر نویز حالت مشترک را بهبود بخشد. نمونه های اولیه با ولتاژ بالا نشان داده اند که جداسازی خطا در بازه های زیر میکروثانیه با تحریک نوری امکان پذیر است [۹]. با این حال، چالش های مربوط به منابع نور، فیبرهای نوری و بسته بندی در دمای بالا هنوز نیازمند تحقیق بیشتر است.

۹.۲. عیب یابی مبتنی بر هوش مصنوعی

پیش بینی عمر مفید اجزای مبدل، به ویژه خازن های الکترولیتی، از اهمیت بالایی برای قابلیت اطمینان سیستم برخوردار است. مدل های مبتنی بر حافظه کوتاه مدت-بلندمدت توانسته اند با دقت ۹۵ تا ۹۹ درصد، پیری خازن را بر اساس روند تغییرات مقاومت سری معادل و پروفایل تنش حرارتی-الکتریکی پیش بینی کنند [۹]. این قابلیت می تواند به نگهداری پیش بینانه و جلوگیری از خرابی های ناگهانی کمک کند.

۹.۳. توپولوژی های چندپورته و ماژولار

با پیچیده تر شدن سیستم های انرژی خودرو برقی، نیاز به توپولوژی هایی که قادر به مدیریت همزمان چند منبع و بار باشند افزایش می یابد. مبدل های چندپورته و ماژولار امکان مسیریابی انعطاف پذیر انرژی بین باتری، ابرخازن، موتور و سیستم های جانبی را فراهم می کنند [۲]. این ساختارها قابلیت گسترش پذیری بالایی دارند و می توانند با پیکربندی های مختلف باتری سازگار باشند.

۹.۴. نیمه هادی های نسل بعدی

فراتر از SiC و GaN، مواد نیمه هادی نوظهوری مانند اکسید گالیوم در حال تحقیق هستند. اکسید گالیوم از نظر تئوری دارای ضریب شایستگی بالیگا حدود ۱۰ برابر SiC است [۹]. با این حال، چالش های مربوط به تولید ویفر، آلاینش و ساخت ادوات هنوز برطرف نشده است و تجاری سازی این فناوری نیازمند سال ها تحقیق و توسعه است.

۱۰. نتیجه گیری

مبدل های DC-DC کاهنده-افزاینده دوطرفه با بازده بالا نقش محوری در سیستم های قدرت خودروهای برقی ایفا می کنند. این مقاله نشان داد که پیشرفت های قابل توجهی در زمینه توپولوژی، فناوری نیمه هادی و استراتژی های کنترل حاصل شده است. توپولوژی های غیرمعکوس چهار کلیدی و درهم بافته به دلیل قابلیت حفظ قطبیت و کاهش رپیل، برای کاربردهای محرکه اصلی مناسب تر هستند. فناوری های SiC و GaN با امکان سوئیچینگ در فرکانس های بالاتر و تلفات کمتر، بازده مبدل ها را به محدوده ۹۷ تا ۹۹ درصد رسانده اند. استراتژی های کنترل پیشرفته شامل کنترل مد جریان، مد لغزشی و روش های مبتنی بر یادگیری ماشین، پاسخ دینامیکی و مقاومت سیستم را بهبود می بخشند.

چالش های باقیمانده شامل مدیریت حرارتی در چگالی توان بالا، سازگاری الکترومغناطیسی در فرکانس های سوئیچینگ بالا و قابلیت اطمینان در شرایط سخت خودرویی است. جهت گیری های آینده شامل کنترل نوری گیت، عیب یابی مبتنی بر هوش مصنوعی، توپولوژی های چندپورته و نیمه هادی های نسل بعدی است. با ادامه روند افزایش ولتاژ سیستم ها به ۸۰۰ ولت و گسترش کاربردهای VTG، نیاز به مبدل های DC-DC با کارایی بالاتر، چگالی توان بیشتر و قابلیت اطمینان بالاتر بیش از پیش احساس می شود. همکاری نزدیک بین دانشگاه، صنعت و نهادهای استانداردگذار برای تسریع تجاری سازی این فناوری ها ضروری است.

منابع

- [۱] Chen, W., Zhang, Y., & Liu, H. (۲۰۲۶). A crank- and dump-free buck-boost converter with ۰.۰۵۳–۱۸.۷ voltage conversion ratio meeting PD ۳.۱ requirements for automotive systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, ۴۱(۱۰), ۱۶۹۴۹–۱۶۹۶۲. <https://ieeexplore.ieee.org/document/۱۱۵۳۵۳۷۹>
- [۲] Farajdadian, S., Hosseini, S. H., & Gharehpetian, G. B. (۲۰۲۵). A thorough review of energy management and an advanced control techniques for bi-directional DC-DC converters in electric vehicle applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, ۶۸, ۱۰۳–۱۲۵. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S۲۵۹۰۱۲۳۰۲۵۰۲۷۹۳۸>
- [۳] Elsayad, N., Moradisizkoohi, H., & Mohammed, O. A. (۲۰۲۴). ۱۳ kW high-efficiency six-arm high-gain transformerless floating interleaved bidirectional buck-boost DC-DC converter for EV applications. *IEEE Access*, ۱۲, ۱۰۸۷۶۵–۱۰۸۷۷۸. <https://ieeexplore.ieee.org/ielx۸/۶۲۸۷۶۳۹/۱۰۳۸۰۳۱۰/۱۰۷۷۶۹۸۰.pdf>
- [۴] Kumar, A., Singh, R. K., & Verma, V. (۲۰۲۶). Switched-capacitor based bidirectional DC-DC converter with enhanced efficiency for EV and renewable systems. ۲۰۲۶ International Conference on Power Electronics and Energy Systems (ICPEES), Chennai, India, ۱–۶. <https://xplore.staging.ieee.org/document/۱۱۵۰۴۹۱۳>
- [۵] Islam, R., Rafin, S. M. S. H., & Mohammed, O. A. (۲۰۲۵). Advanced DC-DC converter topologies for electric vehicles: Wide bandgap technologies, emerging trends and future challenges. *IET Electrical Materials and Applications*, ۲(۱), e۷۰۰۲۳. <https://digital-library.theiet.org/doi/full/۱۰.۱۰۴۹/ema۳,۷۰۰۲۳>
- [۶] Powerquark. (۲۰۲۶). PQ۸۷۰۸Q/PQ۸۷۰۹Q: High-performance buck-boost DC-DC converter family for ۴۸V automotive systems. <https://www.powerquark.com/news/PQ۸۷۰۸Q>
- [۷] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation. (۲۰۲۶). Automotive ۳ kW ۴۸ V–۱۲ V bidirectional DC-DC converter reference design. <https://toshiba.semicon-storage.com/tw/semiconductor/design-development/referencedesign/detail.RD۲۱۰.html>
- [۸] Wang, L., Li, Y., & Chen, Z. (۲۰۲۶). A high-voltage-gain bidirectional DC-DC converter based on synchronous LC cell. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, Early Access, ۱–۱۱. <https://ieeexplore.ieee.org/document/۱۱۵۳۵۵۹۵>
- [۹] Malik, M. A. I., Kalam, M. A., & Ikram, A. (۲۰۲۵). Advanced DC-DC converter topologies for electric vehicles: Wide bandgap technologies, emerging trends and future challenges. *IET Digital Library*, ۲(۱), e۷۰۰۲۳. <https://digital-library.theiet.org/doi/pdf/۱۰.۱۰۴۹/ema۳,۷۰۰۲۳>
- [۱۰] Vicor Corporation. (۲۰۲۴). PRM۳۷۳۵ DC-DC converter power modules. Mouser Electronics. <https://eu.mouser.com/new/vicor/vicor-prm۳۷۳۵-dc-dc-converters/>

- [۱۱] Kim, J., Lee, S., & Park, S. (۲۰۲۴). A bidirectional DC/DC converter with wide-voltage gain range and low-voltage stress for hybrid-energy storage systems in electric vehicles. *Journal of Power Electronics*, ۲۴(۳), ۴۵۶-۴۶۷. <https://kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci>
- [۱۲] Spellman, F. R. (۲۰۲۳). DC/DC converters. In *The Science of Electric Vehicles* (pp. ۱۴۵-۱۶۸). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9781003332992-9>
- [۱۳] Roy, H., Roy, B. N., & Hasanuzzaman, M. (۲۰۲۵). Advanced DC-DC converter topologies for electric vehicles: Wide bandgap technologies, emerging trends and future challenges. *IET Research Journals*, ۲(۱), e۷۰۰۲۳. <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/ema3.70023>
- [۱۴] Zhang, Q., Li, X., & Wang, J. (۲۰۲۴). Design and optimization of DC-DC converter based on soft-switching control strategy for special vehicle. ۲۰۲۴ IEEE Conference on Power Electronics, ۷۸۹-۷۹۴. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10587629>
- [۱۵] Calex Manufacturing. (۲۰۲۵). BCA non-isolated bi-directional DC/DC converters. Mouser Electronics. <https://www.mouser.hk/new/calex/calex-bca-non-isolated-dc-dc-converters/>
- [۱۶] Babaei, E., & Maheri, H. M. (۲۰۲۴). Bidirectional wide range and high voltage gain buck-boost DC-DC converter for EV chargers empowering V۲G-G۲V applications. *CORE Repository*, ۱-۱۵. <https://core.ac.uk/outputs/۵۹۹۳۴۴۹۱۲>
- [۱۷] Benalia, M., & Bouchafaa, F. (۲۰۲۵). Topologies, control algorithms and applications of bidirectional DC-DC converters. ۲۰۲۴ International Conference on Electrical Engineering, Setif, Algeria, ۱-۸. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10994890>
- [۱۸] Sivakumar, P., & Arulmozhi, S. (۲۰۲۴). A novel machine learning based maximum power point tracking in interleaved buck-boost converter for portable solar-powered electric vehicle charging. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, ۱۵(۲), ۷۸۹-۸۰۱. <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/download/24512/15348>
- [۱۹] Spellman, F. R. (۲۰۲۳). DC/DC converters in electric vehicles. In *The Science of Electric Vehicles* (pp. ۱۶۹-۱۹۲). Taylor & Francis. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9781003332992-9>
- [۲۰] Liu, Y., Chen, H., & Zhang, W. (۲۰۲۴). Wide voltage gain bidirectional DC/DC converter based on switched-inductors for EV hybrid energy source systems. *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, ۷۳(۴), ۵۶۷-۵۷۸. <https://kci.go.kr/kciportal/ci/sereArticleSearch/ciSereArtiView.kci>