

طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت با ساختار چندسطحی و کلیدزنی نرم برای خودروهای برقی

سید سجاد میراکبری

کارشناسی ارشد مهندسی برق (گرایش قدرت)، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
sajjad.mirakbari@gmail.com

چکیده

هدف: بررسی شرایطی است که در آن تلفیق ساختارهای چندسطحی با راهبردهای کلیدزنی نرم می‌تواند کارایی، کیفیت موج و چگالی توان سامانه‌های الکترونیک قدرت خودرو برقی را بهبود دهد. روش: مرور روایتی - تحلیلی ساختاریافته بر آثار علمی واقعی و قابل‌بازایی، با اولویت مطالعات سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۶ و دسته‌بندی شواهد برحسب حوزه کاربرد، توپولوژی، نوع کلیدزنی و سطح اعتبارسنجی انجام شد. یافته‌ها: اینورترهای NPC و ANPC در باس‌های ولتاژ بالا ظرفیت کاهش تنش کلید و بهبود شکل‌موج دارند؛ در مقابل، تعادل نقطه خنثی، توزیع حرارت و افزایش قطعات محدودیت ایجاد می‌کند. کموتاسیون تشدید کمی امکان کاهش تلفات سوئیچینگ را نشان داده است، اما انرژی شاخه کمی و ناحیه بار جزئی باید سنجیده شود. در شارژر دوطرفه، DAB چندسطحی، LLC و CLLC/CLLLC گزینه‌هایی با آزادی‌های کنترلی متفاوت هستند و پوشش وسیع ZVS نیازمند انتخاب هم‌زمان توپولوژی و مدولاسیون است. نتیجه‌گیری: انتخاب بهینه یک حکم مستقل از کاربرد نیست، بلکه به نقشه کارکرد، انرژی اتلافی کل، تنش حرارتی، EMC، هزینه و ایمنی وابسته است. این مقاله چارچوب مقایسه و روند اعتبارسنجی مرحله‌ای ارائه می‌کند؛ هیچ آزمایش یا شبیه‌سازی جدیدی در این پژوهش انجام نشده است.

واژگان کلیدی: مبدل چندسطحی؛ کلیدزنی نرم؛ اینورتر کششی؛ پل فعال دوگانه؛ کلیدزنی در ولتاژ صفر؛ خودرو برقی؛ شارژ دوطرفه.

۱. مقدمه

گذار از سامانه‌های محرکه احتراقی به خودروهای برقی، مسئله طراحی مبدل را از یک جزء مستقل به یک مسئله سطح سامانه تبدیل کرده است. کارایی مبدل علاوه بر انرژی مصرفی، بر ظرفیت سامانه خنک‌کاری، اندازه ادوات مغناطیسی، قابلیت اطمینان نیمه‌رساناها، کیفیت جریان موتور و سازگاری الکترومغناطیسی اثر می‌گذارد. افزایش ولتاژ باس از حدود ۴۰۰ به کلاس ۸۰۰ ولت، در توان یکسان جریان را کاهش می‌دهد، ولی تنش عایقی و الزامات کلیدزنی را سخت‌تر می‌سازد. مرورهای تخصصی نشان می‌دهند ساختارهای چندسطحی برای تقسیم تنش ولتاژ و بهبود کیفیت موج مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱-۳].

در یک اینورتر دوسطحی، هر تغییر حالت ممکن است گام ولتاژی بزرگی بر پایانه موتور اعمال کند. افزایش تعداد سطوح، اندازه گام‌های ولتاژ را کاهش می‌دهد؛ با این حال، تعداد قطعات، راهبرد تعادل ولتاژ خازن‌ها و توزیع حرارت پیچیده‌تر می‌شود. در سوی دیگر، کلیدزنی نرم با بهره‌گیری از شرایط جریان و ولتاژ در لحظه انتقال حالت، انرژی تلف‌شده در کلیدزنی را محدود می‌کند. ترکیب این دو ایده بالقوه سودمند است، اما جمع جبری مزایای آن‌ها خودبه‌خود حاصل نمی‌شود [۴-۶].

پرسش اصلی این مقاله آن است که تحت چه قیود فنی، تلفیق ساختار چندسطحی با کموتاسیون نرم در درایو کششی و شارژر خودرو برقی بر ساختارهای متعارف برتری دارد. پرسش‌های فرعی شامل انتخاب توپولوژی، وسعت ناحیه کلیدزنی نرم، محدودیت‌های بار سبک، کنترل نقطه خنثی، سازگاری با ادوات سیلیکون‌کاربید و آزمون قابلیت اطمینان است. نوآوری این نوشتار در چارچوب مقایسه مبتنی بر «حوزه کارکرد، زیان کل، هزینه کنترلی و ریسک حرارتی» است و نه ادعای ساخت نمونه یا دستیابی به رکورد بازده.

دامنه بحث دو زیرسامانه متمایز را در بر می‌گیرد: اینورتر جریان مستقیم به متناوب برای محرکه الکتریکی و مبدل‌های ایزوله دوطرفه در شارژر درون‌خودرویی یا ایستگاهی. هرچند هر دو از کلیدهای توان استفاده می‌کنند، موج جریان، نسبت تبدیل، تعریف کارکرد ایمن و آزادی مدولاسیون در آن‌ها متفاوت است؛ از این‌رو تعمیم مستقیم یک نتیجه از شارژر به درایو کششی صحیح نیست.

۲. روش‌شناسی مرور و چارچوب تحلیل

این مطالعه از نوع مرور روایتی - تحلیلی ساختاریافته است؛ نه مرور نظام‌مند به معنای دارای پروتکل ثبت‌شده و نه پژوهش تجربی. جست‌وجوی هدفمند با کلیدواژه‌های Electric, ZCS, ZVS, switching Soft, inverter Multilevel, NPC, CLLC, LLC, DAB, vehicle, ANPC و اولویت به مقالات منتشرشده طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۶ داده شد و چند اثر بنیادی قدیمی‌تر برای توضیح سابقه فناوریانه استفاده گردید. شواهد گزارش‌شده از صفحات ناشر و فراداده قابل بازیابی اخذ شده‌اند؛ متن کامل همه مقالات در دسترس نبوده است.

ورود منابع به سنتز تحلیلی بر سه معیار استوار بود: ارتباط مستقیم با محرکه یا شارژر خودرو برقی؛ وجود بحث روشن درباره توپولوژی، مدولاسیون یا انتقال نرم؛ و امکان شناسایی اثر از طریق DOI یا رکورد رسمی. مطالعات صرفاً مرتبط با تولید تجدیدپذیر تنها هنگامی استفاده شدند که مکانیسم آن‌ها قابلیت انتقال فنی به موضوع داشت. گزارش‌های فاقد شواهد کافی برای استخراج عدد عملکردی در مقایسه کمی لحاظ نشدند.

برای جلوگیری از مقایسه نامعتبر، هر شاهد در چهار سطح تفکیک شد: استنتاج نظری، نتیجه شبیه‌سازی، نمونه آزمایشگاهی کم‌توان و آزمون نزدیک به مقیاس کاربردی. شاخص‌هایی همچون بازده بیشینه بدون مشخص بودن نقطه کار، توان نامی، دمای محیط و حدود ولتاژ برای رتبه‌بندی قطعی کافی نیستند. همچنین داده‌های از منابع متفاوت تجمیع آماری نشده‌اند؛ زیرا طراحی نمونه‌ها، روش اندازه‌گیری و شرایط کاری همسان نیست.

قالب ارجاع درون متن برای مهندسی برق به صورت شماره‌ای مبتنی بر IEEE تنظیم شده است؛ در فهرست منابع، عنوان کامل، سال، محل انتشار و DOI درج شده و در مواردی که هویت کامل نویسندگان مستقلاً احراز نشده، از حدس زدن نام نویسنده پرهیز شده است. بنابراین کتاب‌شناسی حاضر یک فهرست شناسایی معتبر مبتنی بر عنوان و شناسه پایدار است، نه ادعای انطباق کامل با همه ریز جزئیات APA ۷.

۳. معماری الکترونیک قدرت خودرو برقی

زنجیره توان یک خودرو برقی باتری محور معمولاً شامل بسته باتری، باس جریان مستقیم، اینورتر کششی، ماشین الکتریکی و مبدل کم‌ولتاژ برای شبکه جانبی است. در خودروهای قابل شارژ از شبکه، شارژر درون‌خودرویی نیز یک طبقه یکسوساز اصلاح ضریب توان و اغلب یک طبقه ایزوله DC-DC دارد. انتخاب ساختار در هر نقطه از زنجیره باید با محدوده ولتاژ باتری، توان لحظه‌ای، بارگذاری چرخه رانندگی و نیاز به بازتولید انرژی ترمزی تطبیق داده شود [۳، ۲۲].

درایو کششی با تغییرات شدید گشتاور و سرعت مواجه است؛ لذا تلفات در بار جزئی و کنترل دینامیکی جریان اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقابل، شارژر معمولاً مسیرهای تنظیم جریان ثابت و ولتاژ ثابت را طی می‌کند، ولی گستره نسبت تبدیل باتری و عملکرد برگشت‌پذیر شبکه به خودرو یا خودرو به شبکه، بهره‌برداری از کلیدزنی نرم را دشوار می‌کند [۷، ۱۱، ۱۲].

استفاده از تراشه‌های پهن‌بند مانند SiC و GaN، از نظر انرژی سوئیچینگ و قابلیت فرکانس بالا فرصت می‌آفریند؛ با وجود این، لبه‌های تند ولتاژ، ظرفیت پارازیتی کابل و سیم‌پیچ موتور و مسیر جریان مد مشترک را تحریک می‌کنند. کاهش تنش ولتاژ هر کلید در ساختار چندسطحی الزاماً به معنای حذف مسائل EMI نیست؛ مسیرهای بازگشت جریان، شیلدینگ و توالی کلیدزنی همچنان تعیین‌کننده‌اند [۶].

از دید مهندسی سامانه، انتخاب بهترین مبدل با کمینه کردن یک شاخص به‌تنهایی صورت نمی‌گیرد. وزن نسبی انرژی اتلافی، جرم، حجم، قیمت BOM، سرویس‌پذیری، کنترل خطا و بلوغ تولید انبوه برای خودروی سواری، اتوبوس برقی و شارژر سریع متفاوت است. توصیه نهایی باید این ناهمگونی کاربرد را حفظ کند.

۴. اصول فیزیکی مبدل‌های چندسطحی

مبدل چندسطحی با ترکیب چند ولتاژ جزئی، شکل موج خروجی پله‌ای تولید می‌کند. برای باس یکسان، کاهش ارتفاع هر پله به کاهش محتوای برخی هارمونیک‌ها و تنش ناشی از تغییرات سریع ولتاژ کمک می‌کند، اما میزان بهبود وابسته به نوع مدولاسیون و توزیع حالت‌های کلیدزنی است. تعداد سطوح به‌تنهایی شاخص کیفیت موج نیست؛ فیلتر، نقطه کار موتور و ولتاژ مد مشترک نیز باید ارزیابی شوند [۱، ۲، ۱۹].

در ساختار دیودبست نقطه خنثی (NPC)، خازن‌های لینک جریان مستقیم باس را تفکیک می‌کنند و دیودهای کلمپ وضعیت‌های میانی را می‌سازند. مزیت مهم آن بهره‌گیری از ادوات با ولتاژ نامی پایین‌تر در باس ولتاژ بالا است؛ در مقابل، تعادل ولتاژ نقطه خنثی و نابرابری تلفات میان ادوات محدودیت ایجاد می‌کند. پژوهش اندازه‌گذاری خازن لینک نشان می‌دهد ظرفیت لازم تابع مدولاسیون و مشخصات موتور است، نه صرفاً توان نامی [۲۸].

در ANPC، بخشی از مسیرهای کلمپ به‌وسیله کلیدهای فعال کنترل می‌شوند. این آزادی برای هدایت جریان و توزیع تلفات مفید است ولی تعداد تصمیم‌های کنترلی و احتمال گذرهای ناخواسته را افزایش می‌دهد. بررسی کنترل دمای پیوند در اینورتر ANPC بر اهمیت توزیع دینامیکی تنش حرارتی و محدودیت اتکای صرف به بازده لحظه‌ای تأکید می‌کند [۲۹].

ساختار خازن شناور، ولتاژهای میانی را با خازن‌های کمکی تولید می‌کند و می‌تواند انتخاب حالت افزونه را برای متعادل‌سازی ولتاژ فراهم سازد. بهای آن تعداد خازن، اندازه شبکه اندازه‌گیری، جریان شارژ اولیه و نیاز به مدیریت نوسان است. در پل H

آبشاری نیز سلول‌ها ذاتاً مدولارند، اما فراهم کردن منابع DC مستقل در یک خودروی تک‌باتری ممکن است به مدارات واسطه اضافی نیاز داشته باشد.

جدول ۱. مقایسه کیفی ساختارهای چندسطحی (سنتز تحلیلی بر مبنای [۱، ۲، ۱۹، ۲۸، ۲۹])

کاربرد بالقوه	چالش تعیین‌کننده	مزیت غالب	توپولوژی
درایو مرجع	تنش کامل باس و dv/dt	کنترل ساده و بلوغ بالا	دوسطحی
درایو ۸۰۰ ولتی	تعادل نقطه خنثی	تقسیم تنش و کیفیت موج	NPC سسطحی
درایو پرتوان	کنترل حرارت و تعداد کلید	انعطاف مسیر جریان	ANPC
مبدل فشرده	تعداد و شارژ خازن	حالت‌های افزونه	خازن شناور
سامانه‌های چندماژولی	تأمین منابع مستقل	مدولار و توسعه‌پذیر	پل H آبشاری

۵. مبانی کلیدزنی نرم و مدل اتلاف

کلیدزنی در ولتاژ صفر (ZVS) زمانی اتفاق می‌افتد که ولتاژ دو سر کلید در آستانه روشن شدن به نزدیک صفر برسد؛ کلیدزنی در جریان صفر (ZCS) به انتقال حالت در جریان نزدیک صفر اطلاق می‌شود. این دو شرایط یکسان نیستند و هر یک به ویژگی نیمه‌رسانا و جهت انتقال انرژی حساس‌اند. مشاهده موج ولتاژ پایین به‌تنهایی برای اثبات ZVS کافی نیست و باید زمان‌بندی فرمان گیت و جریان مسیر کموتاسیون نیز ثبت شود [۴، ۵].

در یک تخمین مرتبه اول، تلفات کل می‌تواند به صورت $P_{gate} + P_{cap} + P_{mag} + P_{sw} + P_{cond} = P_{total}$ در $P_{aux} +$ نوشته شود. در روش سخت کلیدزنی، P_{sw} به فرکانس و انرژی هر رویداد متناسب است، اما انرژی مؤثر تابع ولتاژ، جریان، دما، اندوکتانس حلقه و مقاومت گیت است. در روش نرم کلیدزنی، کاهش P_{sw} با افزایش احتمالی جریان گردشی و P_{cond} مبادله می‌شود؛ بنابراین صفر کردن انرژی روشن شدن به‌تنهایی کمینه اتلاف کل نیست.

شرط تحقق ZVS در بسیاری از پل‌های فعال، آن است که انرژی ذخیره‌شده در مسیر کموتاسیون برای تخلیه یا شارژ ظرفیت خروجی کلیدها کافی باشد. نمایش ساده انرژی به شکل $E_{Coss,eq} \geq I_{comm}^2 L_{eq}(1/2)$ است؛ این نابرابری شرط راهنمای تقریبی است، نه معیار کافی برای هر مدار. جهت جریان، زمان مرده و دینامیک دیود بدنه یا کانال معکوس نیز باید در مدل وارد شود [۸، ۲۷].

در بار سبک، انرژی موجود در نشتی ترانسفورماتور یا سلف کموتاسیون کاهش می‌یابد و ناحیه ZVS ممکن است از دست برود. راه‌حلهایی مانند شیف‌ت فاز چندگانه، تغییر فرکانس، تغییر نسبت تبدیل مؤثر یا شاخه کمکی مطرح شده‌اند؛ هر راهکار باید با تلفات افزوده، سادگی حفاظتی و سرعت گذرا سنجیده شود [۲۳، ۲۷].

جدول ۲. تفکیک مفاهیم انتقال نرم و کنترل شکل موج

حدود تفسیر	شرط عملیاتی	مفهوم
تأیید همزمان ولتاژ و فرمان گیت	ولتاژ کلید هنگام روشن شدن نزدیک صفر	ZVS
ممکن است تنش ولتاژ باقی بماند	جریان مسیر در لحظه تغییر حالت نزدیک صفر	ZCS
لزومی به ZVS/ZCS کلید ندارد	محدود کردن جهش جریان شارژ خازن	charging Soft
به معنای کلیدزنی نرم نیست	کاهش شیب ولتاژ خروجی	dv/dt Low

۶. تلفیق ساختار NPC و مدار کموتاسیون تشدید

ساختار سه‌سطحی NPC با مدار کموتاسیون قطب تشدید کمی (ARCP) یکی از نمونه‌های روشن تلفیق دو فناوری است. مقاله منتشر شده در Electronics Industrial on Transactions IEEE، گذرهای خاص دیود کلمپ به ترانزیستور را با شاخه تشدید کنترل می‌کند؛ در نمونه سه کیلوواتی، ZVS برای کلیدهای بیرونی اصلی و ZCS برای کلیدهای کمکی گزارش شده است [۵]. این نتیجه نشان‌دهنده امکان‌پذیری فنی است، نه اثبات مقیاس‌پذیری مستقیم به توان صدها کیلووات.

طراحی ARCP باید از تحلیل مسیر انرژی در هر حالت شروع شود. جریان شاخه کمکی پیش از لحظه کموتاسیون در جهت مناسب شکل می‌گیرد تا ظرفیت‌های خروجی و دیودهای کلمپ در یک توالی کنترل‌شده جابه‌جا شوند. تأخیر تحریک کلید کمکی، اشباع سلف تشدید، تنش جریان اوج و تضمین نداشتن شوتهای الزامات اساسی هستند؛ حذف یکی از آنها ممکن است سود حاصل از کاهش انرژی سوئیچینگ را از بین ببرد.

مزیت نظری روش کمکی آن است که در بازه‌ای از جریان بار، انرژی کموتاسیون با شاخه کنترل‌شونده تأمین می‌شود. اما اگر شاخه کمکی در هر سیکل بارگذاری قابل توجهی داشته باشد، افزایش تلفات هدایتی و حجم اجزا رخ می‌دهد. بنابراین باید انرژی اتلافی از بار صفر تا بار نامی بر حسب زمان، نه فقط در نقطه توان نامی، با ساختار سخت‌کلیدزن مقایسه شود.

از جنبه کنترل صنعتی، حفاظت مدار کمکی، تشخیص شکست ZVS و واکنش ایمن هنگام خطای سنسور ضروری است. راهبرد بازگشت به حالت سخت‌کلیدزنی محدود شده ممکن است تداوم کار را حفظ کند، اما باید نشان داده شود که ولتاژ و حرارت نیمه‌رسانا از حدود مجاز فراتر نمی‌رود. پژوهش‌های آتی باید نتایج ARCP را در چرخه رانندگی و آزمون تکرارپذیری حرارتی دنبال کنند.

۷. پل فعال دوگانه چندسطحی برای شارژ دوطرفه

مبدل پل فعال دوگانه (DAB) دو پل کلیدزنی را از طریق ترانسفورماتور فرکانس بالا و راکتانس انتقال توان متصل می‌کند. انتقال توان معمولاً با اختلاف فاز ولتاژ دو پل کنترل می‌شود و ذات دوطرفه آن برای شارژ و V2G جذاب است. با این حال، در نسبت‌های ولتاژ دور از حالت تطبیق، جریان گردشی و جریان مؤثر افزایش یافته و محدوده ZVS کاهش می‌یابد [۷، ۸، ۱۱].

در گونه چندسطحی، دامنه و شکل موج پل‌ها درجه آزادی بیشتری دارد و توالی ولتاژها را می‌توان برای کنترل جریان سلف و لحظه کموتاسیون طراحی کرد. پژوهش بهینه‌سازی مدولاسیون DAB چندسطحی نشان داده است که مدولاسیون شبه‌دوسطحی و شیفت فاز چندگانه می‌تواند پیچیدگی تحلیل را محدود کند و در نمونه چهارسطحی بهبود رفتار کلیدزنی نرم را نشان دهد [۴]. این شواهد به‌طور مستقیم کارایی همه آرایش‌های خودروبی را تضمین نمی‌کنند.

کنترل شیفت فاز منفرد (SPS) از نظر اجرا ساده است ولی در برخی نقاط کار جریان RMS بیشتری ایجاد می‌کند. شیفت فاز دوگانه و سه‌گانه، تعداد پارامترهای قابل تنظیم را افزایش داده و می‌تواند کاهش جریان گردشی، تنظیم توان و حفاظت ZVS را هم‌زمان هدف بگیرد. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به‌ویژه در حضور محدودیت زمان مرده، تأخیر کنترل و اشباع ترانسفورماتور اهمیت دارد [۴، ۲۳، ۲۷].

در نسخه‌های مدولار یا چندماژولی، گسترش توان و پوشش ولتاژ باتری با سری/موازی کردن سلول‌ها آسان‌تر می‌شود؛ ولی اشتراک توان، نابرابری پارامترها و جریان‌های ناخواسته حلقوی باید کنترل شود. معماری چندماژولی گزارش شده در IECON برای توان هدف ۲۲ کیلووات و گستره خروجی وسیع طراحی شده و نمونه آزمایشگاهی کوچک‌مقیاس نیز ارائه کرده است [۹]. تفکیک عملکرد طراحی نامی از نتیجه نمونه کوچک برای تفسیر درست آن ضروری است.

۸. خانواده مبدل‌های تشدید LLC، CLLC و CLLC

مبدل LLC با شبکه‌ای از عناصر القایی و خازنی و بهره‌گیری از امپدانس فرکانس وابسته، در محدوده‌ای از نقاط کار انتقال انرژی کارآمدی فراهم می‌کند. حساسیت بهره تبدیل به فرکانس، امکان تنظیم ولتاژ خروجی را می‌دهد، ولی در باتری دارای پنجره ولتاژ گسترده می‌تواند به محدوده فرکانس نامطلوب بینجامد. علاوه بر آن، تحقق ZVS در بار سبک به جریان مغناطیس‌کننده و نسبت عناصر تشدید وابسته است [۱۲، ۱۳].

در مبدل CLLC، شبکه تشدید در دو سمت ترانسفورماتور شکل می‌گیرد و قابلیت تنظیم و تقارن عملکرد در دو جهت انتقال انرژی تقویت می‌شود. افزودن عناصر CLLC ممکن است ناحیه نرم‌کلیدزنی و انعطاف تابع انتقال را گسترش دهد، اما شمار پارامترهای حساس، تلفات هسته و پیچیدگی ساخت را بالا می‌برد. نمونه چنددرگاهی با مخزن CLLC برای ادغام خورشیدی و شارژ EV، بازده‌های بیشینه متفاوتی برای مسیرهای انرژی گزارش کرده است؛ این اعداد به دلیل تفاوت مسیرها قابل مقایسه مستقیم با یکدیگر نیستند [۱۰].

رویکردهای GLCL با خاصیت‌های جریان ثابت و ولتاژ ثابت ذاتی نیز معرفی شده‌اند. مطالعه‌ای در IFAC-PapersOnLine تحقق ZVS سمت اولیه را در مدل شبیه‌سازی برای دو فاز شارژ CC و CV بررسی کرده است [۱۲]. برتری یک ساختار باید با آزمون گذر از CC به CV، تحمل پراکندگی قطعات و محدودیت کنترل فرکانس اعتبارسنجی شود؛ شبیه‌سازی معادل اثبات آزمایشگاهی نیست.

پژوهش ۲۰۲۵ درباره بهینه‌سازی پارامترهای LLC از الگوریتم نقطه داخلی برای توسعه ناحیه نرم‌کلیدزنی در هر دو جهت توان استفاده می‌کند [۱۳]. اهمیت روش‌شناختی آن، مدل‌سازی هم‌زمان جریان شارژ و دشارژ و اعمال قیود بر پارامترهاست. بالاین‌حال، هر روش بهینه‌سازی به دقت مدل، حساسیت ساخت قطعه و اعتبار قیود وابسته است؛ یک نقطه بهینه ریاضی بدون تحلیل تفرانس، نسخه آماده تولید نیست.

۹. مدولاسیون و مدیریت نقطه خنثی

مدولاسیون بردار فضایی (SVM) و PWM مبتنی بر حامل با جابه‌جایی فاز یا سطح، درجات آزادی متفاوتی برای کنترل کیفیت جریان، فرکانس مؤثر و ولتاژ خازن‌ها دارند. در ساختار سه‌سطحی، حالت‌های افزونه می‌توانند برای موازنه نقطه خنثی به کار روند؛ اما انتخاب حالت همچنین تعیین می‌کند کدام کلید گرم‌تر شود و چه تغییری در ولتاژ مد مشترک ایجاد گردد. بنابراین تابع هزینه کنترل باید بیش از خطای ولتاژ خروجی باشد [۲۸، ۲۹].

کنترل پیش‌بین مدل (MPC) امکان لحاظ مستقیم محدودیت جریان، ولتاژ خازن، تعداد تغییر حالت و تخمین تلفات را فراهم می‌کند. مرورهای اخیر کنترل هوشمند اینورترهای چندسطحی را در سامانه شارژ مورد توجه قرار داده‌اند [۱۷، ۱۸]. با وجود این، مقایسه الگوریتم‌ها باید نرخ نمونه‌برداری، بار محاسباتی، قطعیت زمان اجرا و کیفیت مدل ماشین را نیز شامل شود.

پیاده‌سازی نرم‌کلیدزنی با کنترل چندسطحی یک مسئله زمان‌بندی مشترک است. اگر مدولاسیون برای بهبود THD، توالی کموتاسیون را عوض کند، ممکن است جریان لازم برای ZVS در کلید خاصی فراهم نباشد. راهبرد مطلوب ابتدا قیود ایمنی و جریان مجاز را تثبیت می‌کند، سپس از میان حالت‌های مجاز، کم‌اتلاف‌ترین حالت را برمی‌گزیند.

در کاربرد خودرویی، حفظ پایداری در گذرهای سریع بار مهم‌تر از دستیابی به بازده بیشینه در شرایط آزمایشگاهی ثابت است. جداسازی حلقه سریع جریان، حلقه متوسط تعادل خازن و مدیریت آهسته دما می‌تواند پیچیدگی را قابل کنترل کند؛ بالاین‌حال، پایداری چندحلقه‌ای و تعامل با زمان مرده باید از طریق تحلیل فرکانسی و آزمون سخت‌افزار در حلقه سنجیده شود.

۱۰. انتخاب نیمه‌رسانا، مغناطیس و مدیریت حرارتی

انتخاب MOSFET سیلیکون کاربید یا ترانزیستور GaN تنها بر اساس کم‌بودن مقاومت روشن یا بار گیت کافی نیست. ولتاژ تحمل، انرژی ظرفیت خروجی، رفتار هدایت معکوس، محدوده دمایی، بلوغ بسته‌بندی و شرایط اتصال کوتاه تعیین‌کننده‌اند. ساختار چندسطحی ممکن است امکان استفاده از کلیدهای با ولتاژ نامی کمتر را فراهم آورد؛ اما تعداد کلیدها و مدارهای گیت ایزوله افزایش می‌یابد [۱۹، ۶].

بهبود بازده، الزاماً بهبود یکنواخت دما نیست. توزیع نامتقارن حالت‌های هدایت در NPC و ANPC موجب می‌شود برخی کلیدها چرخه حرارتی شدیدتری تحمل کنند. به همین دلیل، بررسی حرارت پیوند و هموارسازی تلفات به سطح تصمیم‌گیری مدولاسیون منتقل شده است [۲۹]. معیار قابلیت اطمینان باید دامنه نوسان دما و تعداد چرخه‌های حرارتی را همراه با بیشینه دما در نظر بگیرد.

در سامانه‌های تشدید، طراحی مغناطیس یک مسئله مشترک الکترومغناطیسی و حرارتی است. افزایش فرکانس حجم هسته را کاهش می‌دهد، ولی تلفات هسته، اثر پوستی و مجاورتی و ظرفیت بین‌سیم‌پیچی را افزایش می‌دهد. در DAB، اندوکتانس نشی ممکن است به‌عنوان عنصر انتقال توان به‌کار رود؛ کنترل پراکندگی ساخت و شار DC برای جلوگیری از اشباع ضروری است.

مدیریت حرارتی نهایی باید شامل مقاومت تماس، مسیر خنک‌کننده، افت فشار، هم‌بستگی دما و زمان و شرایط محیطی باشد. افزایش چند دهم درصد بازده در یک نقطه کار اگر با افزودن مدار کمکی پرهزینه و پیچیده همراه شود، ممکن است در ارزیابی هزینه چرخه عمر مزیت نداشته باشد.

۱۱. سازگاری الکترومغناطیسی و کیفیت توان

کاهش اندازه پله ولتاژ در مبدل چندسطحی می‌تواند تنش عایقی سیم‌پیچ، جریان یاتاقان و تحریک مد مشترک را محدود کند، ولی اثر نهایی تابع شکل موج سوئیچینگ و الگوی زمین‌کردن است. مطالعه مقایسه‌ای مبدل‌های پهن‌بند برای سامانه کششی ۸۰۰ ولتی اختلاف‌های قابل توجهی در بازده و EMI میان دوسطحی و سه‌سطحی گزارش کرده است [۶]. این مقادیر در شرایط آزمایش مطالعه معتبرند و نباید به تمام موتورهای کششی تعمیم داده شوند.

کلیدزنی نرم می‌تواند برخی جبهه‌های سریع و فراجش را کاهش دهد، اما مسیرهای تشدید ممکن است نوسان فرکانس بالا ایجاد کنند. در نتیجه، طراحی فیلتر EMI به‌صورت مستقل از تحلیل ZVS کافی نیست. استخراج مدل پارازیتی کابل، ترانسفورماتور و خازن‌های Y به پیش‌بینی جریان نشی و اثرات تزویج کمک می‌کند.

در شارژر متصل به شبکه، کیفیت توان سمت ورودی شامل ضریب توان، اعوجاج هارمونیک و پاسخ به ناپایداری ولتاژ شبکه است. پژوهش درباره یک مبدل تک‌مرحله‌ای CLLC ادعاهای شبیه‌سازی درباره کیفیت توان و کلیدزنی نرم ارائه می‌کند [۱۵]؛ ارزیابی کاربرد صنعتی آن نیازمند آزمون انطباق، رفتار خطا و اندازه‌گیری تلفات واقعی است.

هر مقایسه باید THD جریان فاز، طیف ولتاژ مد مشترک، پیک‌های ولتاژ پایانه ماشین و امواج گذرای حالت خطا را به‌طور مجزا گزارش کند. تجمیع همه این آثار در عبارت مبهم «کیفیت توان بهتر» سبب از دست‌رفتن قابلیت تکرارپذیری مطالعه می‌شود.

۱۲. قابلیت اطمینان، ایمنی و مدیریت خطا

افزایش تعداد قطعات، مجموعه خرابی‌های ممکن را گسترش می‌دهد، ولی ساختار ماژولار هم‌زمان ظرفیت بازآرایی و تحمل برخی خطاها را ایجاد می‌کند. بنابراین نتیجه درباره قابلیت اطمینان چندسطحی به راهبرد ایزوله‌سازی خطا، میزان افزونگی و امکان تداوم عملکرد با توان کاهش یافته وابسته است. مقایسه شمار کلیدها بدون بررسی پوشش تشخیص خطا گمراه‌کننده است. عیب‌هایی مانند اتصال کوتاه کلید، بازماندن کلید، خرابی سنسور جریان، عدم تعادل خازن و از دست رفتن فرمان گیت در ساختارهای چندسطحی پیامدهای متمایزی دارند. افزون بر حفاظت اضافه‌جریان، تشخیص سریع فقدان ZVS و پیشگیری از روشن شدن در ولتاژ بالا در مدارهای کمکی ضرورت دارد. زمان پاسخ حفاظت باید با انرژی خطای نیمه‌رسانا تطبیق یابد.

در DAB ایزوله، نشت جریان و فاصله عایقی بین سمت باتری و شبکه، نسبت تبدیل ترانسفورماتور و جابه‌جایی ولتاژ اتصال خازنی از نکات بنیادی هستند. آزمون‌های ارتعاش، رطوبت، شوک دمایی و اتصال ناخواسته، بخشی از اعتبارسنجی صنعتی‌اند که نمونه آزمایشگاهی روی میز آن‌ها را پوشش نمی‌دهد.

قابلیت اطمینان باید با روش‌هایی مانند تحلیل حالات خرابی و آثار آن (FMEA)، برآورد چرخه عمر حرارتی و آزمون تنش شتاب یافته بررسی شود. هدف این نیست که پیچیده‌ترین مدار همواره رد شود؛ بلکه هزینه افزونگی باید با فایده تداوم سرویس و ایمنی مقایسه گردد.

۱۳. سنتز مقایسه‌ای و یافته‌های حاصل از مرور

اولین یافته، مکمل بودن مشروط دو فناوری است: چندسطحی‌سازی عمدتاً تنش ولتاژ و کیفیت شکل‌موج را هدف می‌گیرد؛ کلیدزنی نرم عمدتاً انرژی گذرهای سوئیچینگ را. در نتیجه، حوزه‌های سودمندی آن‌ها هم‌پوشانی دارد، اما این دو جانشین یکدیگر نیستند. هنگامی که مدولاسیون چندسطحی جریان کموتاسیون را کاهش دهد، ممکن است تحقق ZVS دشوارتر شود و طراحی باید دوباره بهینه شود [۴-۶].

دومین یافته، اهمیت پنجره بهره‌برداری است. بازده قله‌ای یک مبدل شارژ با ولتاژ و بار مطلوب ممکن است برای سامانه‌ای که بخش بزرگی از زمان را در بار جزئی می‌گذراند نماینده نباشد. مقالاتی که محدوده وسیع ولتاژ را با تغییر حالت‌های عملکردی، نسبت تبدیل مؤثر یا تغییر فرکانس پوشش می‌دهند، به این شکاف طراحی پاسخ می‌دهند [۲۳، ۲۴، ۲۷، ۳۱].

سومین یافته، گره خوردن انتخاب توپولوژی با الگوریتم کنترل است. ANPC، NPC و DAB چندسطحی در غیاب مدیریت نقطه خنثی، توزیع گرما یا شیف‌ت فاز مناسب لزوماً مزیتی ندارند. کنترل هوشمند می‌تواند در چارچوب قیود فیزیکی سودمند باشد، ولی پیچیدگی محاسباتی و خطر وابستگی به مدل باید صریح سنجیده شود [۱۷، ۱۸، ۲۹].

چهارمین یافته، فاصله شواهد آزمایشگاهی و بلوغ تولید است. نمونه‌های سه و پنج کیلوواتی، تحلیل امکان‌پذیری و راهبردهای کنترل را تقویت می‌کنند، اما شواهد لازم برای خودروهای پرتوان شامل دوام، حجم سامانه خنک‌کاری، هزینه تولید، رفتار اتصال کوتاه، EMC و تست چرخه رانندگی است. این فاصله پژوهشی نباید با برون‌یابی ساده بازده نمونه کوچک پوشانده شود.

جدول ۳. سنتز مقایسه‌ای بدون رتبه‌بندی عددی غیرهمسان (مبتنی بر [۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۳])

ارزیابی لازم	محدودیت	شاخص اثرگذار	گزینه
تلفات چرخه رانندگی	مدار کمکی و جریان اوج	کاهش انرژی کموتاسیون	ARCP + NPC
چرخه حرارتی	بار کنترل و گیت	بازآرایی مسیر حرارتی	ANPC سه‌سطحی
نقشه ZVS در دو جهت	کنترل جریان گردش	درجات آزادی شکل موج	DAB چندسطحی
تحلیل تترانس	تغییر فرکانس در بازه وسیع	سادگی نسبی مخزن تشدید	LLC

ازمون ولتاژ متغیر	حساسیت پارامترها	دوطرفگی و تقارن بیشتر	CLLC/CLLLC
-------------------	------------------	-----------------------	------------

۱۴. چارچوب پیشنهادی طراحی و ارزیابی

گام نخست تعریف مأموریت الکتریکی است: برای درایو، نقشه سرعت - گشتاور و ولتاژ باتری؛ برای شارژر، محدوده توان، پروفیل CC/CV و عملکرد $V2G$. سپس قیود سخت مانند حداکثر تنش کلید، حد جریان RMS ، الزامات عایقی، ابعاد و هزینه تعیین می‌شود. بدون چنین نقشه مأموریتی، بهینه‌سازی در یک نقطه کار ممکن است معماری نامناسبی تولید کند.

گام دوم انتخاب چند گزینه قابل مقایسه است؛ برای نمونه دوسطحی SiC ، NPC سه‌سطحی، $ANPC$ سه‌سطحی و NPC همراه $ARCP$ در بخش درایو؛ یا DAB عادی، DAB چندسطحی و $CLLC$ در بخش شارژ. همه نامزدها باید با فرض‌های یکسان ولتاژ، توان، محیط و معیار خنک‌کاری مدل شوند. مقایسه تنها در صورتی معنادار است که مرز سامانه و سهم مدارهای جانبی ثابت نگه داشته شود.

گام سوم، حل بهینه‌سازی چندهدفه است. تابع هدف می‌تواند ترکیبی وزن‌دار از انرژی چرخه کار، جرم، هزینه، تنش حرارتی و ریسک EMC باشد و قیود به صورت محدودیت ولتاژ خازن، جریان اوج و ناحیه ZVS تعریف شوند. وزن‌ها باید به‌عنوان ترجیح مهندسی اعلام شوند نه نتایج تجربی؛ حساسیت نتیجه نسبت به وزن‌ها نیز باید گزارش گردد.

گام چهارم اعتبارسنجی تدریجی است: تحلیل مدار در حالت ایده‌آل، افزودن پارازیت‌ها و مدل حرارتی، شبیه‌سازی سوئیچینگ، اجرای کنترل بلادرنگ، سخت‌افزار در حلقه و نمونه فیزیکی. اندازه‌گیری هم‌زمان موج گیت، ولتاژ درین - سورس، جریان کموتاسیون و دمای پیوند برای اثبات ادعای نرم‌کلیدزنی ضروری است.

جدول ۴. مسیر پیشنهادی طراحی و صحنه‌گذاری مهندسی

خروجی قابل بررسی	ورودی الزامی	مرحله
ماتریس نقاط کار	پنجره ولتاژ، توان و چرخه کار	تعریف مأموریت
گزینه‌های هم‌تراز	توپولوژی و نیم‌رسانا	انتخاب نامزد
محدوده ZVS و نقشه تلفات	پارازیت، حرارت، EMC	مدل چندفیزیکی
شواهد آزمون با عدم قطعیت	HIL و نمونه سخت‌افزاری	اعتبارسنجی

۱۵. بحث انتقادی و پیامدهای کاربردی

برای خودرو سواری با فضای محدود، یک اینورتر سه‌سطحی می‌تواند نسبت به سامانه دوسطحی در کاهش تنش پایانه موتور و ارتقای عملکرد مفید باشد؛ با این حال، افزودن $ARCP$ تنها زمانی توصیه می‌شود که صرفه انرژی و کاهش نیاز خنک‌کاری بیش از جرم و نرخ خرابی قطعات کمکی باشد. تعیین این آستانه نیازمند مدل چرخه رانندگی و قیمت واقعی قطعات است [۵، ۶].

برای شارژر دوطرفه، DAB مزیت عملی در ایزولاسیون و کنترل جهت توان دارد. هنگامی که دامنه ولتاژ باتری بسیار گسترده باشد، مدولاسیون پیشرفته، نسبت تبدیل قابل تغییر یا نسخه‌های تشدید می‌توانند زیان جریان گردشی را کنترل کنند [۲۳، ۲۴، ۳۱]. با این حال، کنترل پیچیده اگر در سخت‌افزار خودرو و شرایط خطا به‌خوبی آزمون نشود، مزیت بازده را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد.

در شارژ سریع ایستگاهی، فضای بیشتری برای مازولار کردن و موازی‌سازی وجود دارد. ساختار چندماژولی ممکن است تعمیرپذیری و دسترسی‌پذیری را بهبود دهد؛ ولی تعادل جریان، کنترل اتصالات و تعامل با شبکه مشکل‌ساز می‌شود. فناوری‌های خورشیدی - چنددرگاهی نیز باید در برابر نوسان تابش و حالت‌های قطع و وصل باتری ارزیابی شوند [۹، ۱۰، ۳۰].

اختلاف ظاهری نتایج ادبیات اغلب از ناهمسانی معیارها ناشی می‌شود: برخی بازده در خروجی نامی را گزارش می‌کنند، برخی توان و ولتاژ دیگری دارند و برخی فقط شبیه‌سازی را بررسی کرده‌اند. به همین علت، این مقاله رتبه‌بندی عددی ساختگی تولید نمی‌کند و به جای آن شرایط برتری هر گزینه را در جدول‌های کیفی مستند می‌سازد.

۱۶. محدودیت‌ها و مسیر پژوهش آینده

مهم‌ترین محدودیت این مرور نبود دسترسی به متن کامل و داده خام یکسان برای همه منابع است؛ از این رو ارزیابی ریسک سوگیری، بازتحلیل بازده و فراتحلیل کمی انجام نشده است. روش انتخاب هدفمند نیز جامعیت یک مرور نظام‌مند ثبت‌شده را ندارد. در نتیجه، یافته‌ها چارچوب تصمیم‌سازی فنی هستند و نه برآورد آماری برتری یک توپولوژی.

پژوهش آینده باید یک بستر آزمون هم‌تراز برای دوسطحی، NPC، ANPC و NPC-ARCP با توان، ولتاژ، شرایط خنک‌کاری و فرکانس قابل قیاس ارائه کند. اندازه‌گیری بازده در ماتریس سرعت - گشتاور، طیف EMI، نویز آکوستیکی و دمای پیوند امکان تفکیک مزیت‌های واقعی از آثار جانبی را فراهم می‌کند.

در بخش شارژر، لازم است محدوده کلیدزنی نرم در صفحه ولتاژ باتری - توان و در هر دو جهت $G2V/V2G$ نقشه‌برداری شود. آزمایش حساسیت در برابر تلرانس L و C ، پیرشدگی خازن، تغییر دمای هسته و خطاهای نمونه‌برداری کنترل می‌تواند قابلیت اعتماد الگوریتم‌های چندشیفت فاز را روشن سازد.

موضوع دیگر تلفیق کنترل پیش‌بین و تخمین دمای پیوند با الزام‌های ایمنی عملکردی است. توسعه الگوریتمی با زمان اجرای تضمین‌شده، قابلیت بازگشت ایمن و نیاز محاسباتی محدود، برای فاصله‌گرفتن از نمونه‌های آزمایشگاهی و رسیدن به سامانه تولیدی ضروری است.

۱۷. نتیجه‌گیری

مرور تحلیلی نشان می‌دهد ساختارهای چندسطحی و کلیدزنی نرم دو اهرم مکمل اما مستقل در طراحی الکترونیک قدرت خودرو برقی‌اند. چندسطحی‌سازی در کنترل تنش ولتاژ و شکل‌موج مفید است و کلیدزنی نرم می‌تواند انرژی گذار را کاهش دهد، اما افزایش مسیرهای هدایت، عناصر تشدید و پیچیدگی کنترل سود خالص را مشروط می‌کند.

برای محرکه‌های ۸۰۰ ولتی، NPC و ANPC در کنار ادوات پهن‌بند نامزدهای قابل دفاع‌اند؛ تلفیق مدار ARCP با NPC در مطالعات آزمایشگاهی امکان‌پذیر گزارش شده، ولی ارتقا به توان صنعتی و دوام خودرویی هنوز مستلزم اعتبارسنجی مستقل است. در بخش شارژر، DAB چندسطحی و مبدل‌های تشدید در پوشش توان دوطرفه و گستره ولتاژ فرصت دارند؛ انتخاب میان آن‌ها باید با نقشه کامل کارکرد انجام گیرد.

پاسخ نهایی به پرسش تحقیق این است که «مبدل بهینه» یک توپولوژی عمومی ثابت نیست. راه‌حل مناسب حاصل برقراری توازن قابل اندازه‌گیری بین انرژی چرخه کار، حجم، هزینه، تنش حرارتی، EMI، قابلیت اطمینان و ایمنی است. برای ادعای برتری صنعتی باید این معیارها در شرایط آزمون همسان و داده قابل بازتولید گزارش شوند.

منابع و مآخذ

- [۱] A Review of Multilevel Inverter Topologies in Electric Vehicles: Current Status and Future Trends. (۲۰۲۱). IEEE Open Journal of Power Electronics, ۲, ۱۵۵-۱۷۰. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2021.3063550>.
- [۲] A Survey on the State-of-the-Art and Future Trends of Multilevel Inverters in BEVs. (۲۰۲۳). Electronics, ۱۲(۱۳), ۲۹۹۳. <https://doi.org/10.3390/electronics12132993>
- [۳] Review of Electric Vehicle Charging Technologies, Standards, Architectures, and Converter Configurations. (۲۰۲۳). IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267164>
- [۴] Modulation and Soft-Switching Optimization Control of Multilevel Dual Active Bridge DC-DC Converters. (۲۰۲۵). IEEE Transactions on Power Electronics, ۴۰(۱), ۱۹۳۶-۱۹۵۱. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3450989>
- [۵] A Three-Level Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter for ۸۰۰-V Electric Vehicle Powertrain. (۲۰۲۵). IEEE Transactions on Industrial Electronics, ۷۲(۲), ۱۳۳۶-۱۳۴۶. <https://doi.org/10.1109/TIE.2024.3426071>
- [۶] Efficiency and EMI Analysis of WBG-based Multilevel Inverters for ۸۰۰ V Electric Vehicle Traction Systems. (۲۰۲۴). IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. <https://doi.org/10.1109/APEC48139.2024.10509224>
- [۷] Soft-switching dual active bridge converter-based bidirectional on-board charger for electric vehicles under vehicle-to-grid and grid-to-vehicle control optimization. (۲۰۲۴). Journal of Engineering and Applied Science, ۷۱, ۴۹. <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00284-z>
- [۸] A Unified Dual Active Bridge Model Based on Improved Extended Describing Function With Dead Time Compensation for Electric Vehicles. (۲۰۲۴). IEEE Access, ۱۲, ۸۱۳۷۴-۸۱۳۸۷. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3410351>
- [۹] A Multilevel, Multimodule DC-DC Converter Architecture For Universal Electric Vehicle (EV) Battery Charging Applications. (۲۰۲۴). IECON ۲۰۲۴. <https://doi.org/10.1109/IECON50916.2024.10905196>
- [۱۰] A Multiport Configuration of Dual Active Bridge CLLLC Resonant Converter for Solar Powered Electric Vehicle Fast Charging. (۲۰۲۴). IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. <https://doi.org/10.1109/ECCE50643.2024.10861469>
- [۱۱] Dual Active Bridge Converter with Interleaved and Parallel Operation for Electric Vehicle Charging. (۲۰۲۴). Energies, ۱۷(۱۷), ۴۲۵۸. <https://doi.org/10.3390/en17174258>
- [۱۲] A Variable Frequency CC-CV Charging for Electric Vehicles with CLCL Resonant Converter. (۲۰۲۴). IFAC-PapersOnLine, ۵۷, ۱۳۱-۱۳۶. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.05.023>
- [۱۳] Optimization approach of LLC resonant converter parameters for electric vehicles based on interior-point algorithm. (۲۰۲۵). Scientific African, ۳۰, e۰۲۹۳۹. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e۰۲۹۳۹>
- [۱۴] Super twisting sliding mode control for high-efficiency and fast charging of electric vehicles using current-fed resonant converter: ۴۰۰ V and ۸۰۰ V validation. (۲۰۲۵). Results in Engineering, ۲۸, ۱۰۷۹۴۵. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107945>
- [۱۵] A single-stage AC/DC electric vehicle charging converter with an integrated CLLC resonant circuit. (۲۰۲۶). Sustainable Energy Technologies and Assessments, ۸۵, ۱۰۴۸۲۵. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2026.104825>
- [۱۶] A novel approach to modeling and experimenting a solar-fed H_۱ configuration for battery swapping stations in rural and commercial areas using a dual phase CLLC DC-DC resonant converter. (۲۰۲۴). Journal of Energy Storage, ۸۹, ۱۱۱۶۰۹. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111609>
- [۱۷] Model predictive controller-based Convolutional Neural Network controller for optimal frequency tracking of resonant converter-based EV charger. (۲۰۲۴). Results in Engineering, article ۱۰۳۶۵۸. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103658>
- [۱۸] Examining the current advancements in intelligent multilevel inverters for electric vehicle charging applications. (۲۰۲۵). Scientific African, ۲۹, e۰۲۷۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e۰۲۷۹۹>
- [۱۹] Advances and Perspectives in Multilevel Converters: A Comprehensive Review. (۲۰۲۴). Electronics, ۱۳(۲۳), ۴۷۳۶. <https://doi.org/10.3390/electronics13234736>

- [۲۰] Enhancing power quality in electric vehicles and battery energy storage systems using multilevel inverter topologies – A review. (۲۰۲۰). Journal of Energy Storage, ۱۱۰, ۱۱۰۲۷۴. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.110274>
- [۲۱] The Electric Vehicle Surge: Effective Solutions for Charging Challenges with Advanced Converter Technologies. (۲۰۲۰). Energy Engineering, ۱۲۲(۲), ۴۳۱–۴۶۹. <https://doi.org/10.32604/ee.2020.000134>
- [۲۲] A Comprehensive Review on Charging Topologies and Power Electronic Converter Solutions for Electric Vehicles. (۲۰۲۴). Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, ۱۲(۳), ۶۷۵–۶۹۴. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2023.000107>
- [۲۳] An Efficient Dual-Active-Bridge Converter for Wide Voltage Range by Switching Operating Modes With Different Transformer Equivalent Turns Ratios. (۲۰۲۴). IEEE Transactions on Power Electronics, ۳۹(۸), ۹۷۰۵–۹۷۱۶. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3397882>
- [۲۴] Reconfigurable Dual Active Bridge Converter for Wide Voltage Range EV Charging Applications. (۲۰۲۴). IECON ۲۰۲۴. <https://doi.org/10.1109/IECON50916.2024.10906467>
- [۲۵] Analysis, Design, and Control of the Dual Active Bridge Converter for EV Battery Charging. (۲۰۲۴). ۲۰۲۴ Third International Conference on Power, Control and Computing Technologies. <https://doi.org/10.1109/ICPCCT60072.2024.10474716>
- [۲۶] Dual-Transformer-Based DAB Converter With Asymmetrical Power Transmission and High-Power Density for Electric Vehicles. (۲۰۲۴). IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, ۱۲(۲), ۱۷۴۲–۱۷۵۳. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2024.3355019>
- [۲۷] Partition Variable Frequency and EPS Hybrid Control to Achieve Full Load Range ZVS for Dual Active Bridge Converters. (۲۰۲۴). IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, ۱۲(۱), ۱۴۳–۱۵۵. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2023.3304811>
- [۲۸] Capacitor sizing of three-level neutral point clamped voltage source inverter for electric vehicles: Effects of modulation and motor characteristics. (۲۰۲۴). IET Power Electronics. <https://doi.org/10.1049/pel2.12660>
- [۲۹] Junction Temperature Control of a Traction Inverter Based on Three-Level Active Neutral Point-Clamping. (۲۰۲۰). Energies, ۱۸(۹), ۲۲۴۱; see correction Energies ۲۰۲۶, ۱۹(۱), ۸۸. <https://doi.org/10.3390/en18092241>
- [۳۰] A vehicle-to-grid enabled bidirectional multilevel converter for renewable energy-integrated electric vehicle charging system. (۲۰۲۰). Sustainable Energy Technologies and Assessments, ۸۳, ۱۰۴۶۳۴. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.104634>
- [۳۱] A Novel Current-Fed Dual-Active-Bridge DC–DC Converter for Ultra-Wide Output Voltage Range Electric Vehicle Battery Charger. (۲۰۲۰). IEEE Transactions on Power Electronics, ۴۰(۱۱), ۱۷۳۳۹–۱۷۳۵۴. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.3084223>