نشریه مطالعات برق آپادانا
دوره ۱، شماره ۱، زمستان ۱۴۰۲، ۳۱-۳۸
ajes.apadana.ac.ir

مبدل‌های مورد استفاده در خودروهای برقی با کمترین میزان ضریب اغتشاش هارمونیکی

حسین روستا | دانشجوی کارشناسی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

امیرحسین معدلی * | دکتری تخصصی، گروه برق، مؤسسه آموزش عالی آپادانا، شیراز، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

چکیده

وسایل نقلیهٔ الکتریکی (EVs) به‌طور فزاینده‌ای به‌عنوان یک راه‌حل حمل و نقل پایدار محبوب می‌شوند. با این حال، پذیرش گستردهٔ آن‌ها اغلب با چالش های مربوط به اختلالات هارمونیک سیستم الکتریکی مواجه می‌شود. هارمونیک‌ها می‌توانند بر عملکرد اجزای مختلف خودرو تأثیر منفی بگذارند و باعث مشکلات کیفیت برق شوند. این مقاله بر مبدل‌های مورد استفاده در EV با هدف دستیابی به کمترین ضریب اختلال هارمونیک تمرکز دارد. توپولوژی‌های مبدل مختلف، استراتژی‌های کنترل و تکنیک‌های فیلتر برای شناسایی مؤثرترین روش‌ها برای به حداقل رساندن اعوجاج هارمونیک، تجزیه‌وتحلیل و مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که ملاحظات طراحی دقیق و اجرای الگوریتم‌های کنترل پیشرفته و روش‌های فیلتر می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی اختلالات هارمونیک را در مبدل‌های EV کاهش دهد و کارآیی کلی سیستم و کیفیت توان را بهبود بخشد.

کلیدواژه‌ها: وسایل نقلیهٔ الکتریکی، ضریب اغتشاش هارمونیکی، کیفیت توان، مبدل

* نویسندهٔ مسئول: a.moadeli@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

استقرار شارژرهای وسایل نقلیهٔ الکتریکی یک جنبهٔ حیاتی برای انتقال انرژی به سمت آینده و ایجاد حمل‌ونقل پایدار است. در حالی‌که خودروهای برقی مزایای متعددی را ارائه می‌کنند، ادغام زیرساخت شارژ در سیستم‌های قدرت چالش‌هایی را برای پایداری و قابلیت اطمینان شبکه ایجاد می‌کند. با درک انواع مختلف شارژر، فناوری‌های شارژ و اجرای استراتژی‌های مدیریت بار مؤثر، ذینفعان می‌توانند به این چالش‌ها رسیدگی کرده و از انتقال روان و کارآمد به یک سیستم حمل‌ونقل برقی اطمینان حاصل کنند. آینده دارای پیشرفت‌های امیدوارکننده در فناوری شارژ و یکپارچه‌سازی شبکه است که فرصت‌هایی را برای افزایش پایداری شبکه، یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر و راه‌حل‌های حمل‌ونقل پایدار ارائه می‌دهد (Araria et al., 2020).

مبدل‌های DC-DC نقش مهمی در عملکرد خودروهای الکتریکی (EVs) ایفا می‌کنند. آن‌ها برای تبدیل برق DC با ولتاژ بالا از باتری EV به ولتاژهای پایین‌تر مورد نیاز زیرسیستم‌های مختلف خودرو، مانند درایو موتور، سیستم‌های کمکی و لوازم الکترونیکی روی برد، استفاده می‌شوند. در اینجا چند نکتهٔ کلیدی در مورد مبدل‌های DC-DC در خودروهای الکتریکی بیان می‌گردد (Bughneda et al., 2021; Jayakumar et al., 2021; Aishwarya & Gnana Sheela, 2021):

۱. تبدیل ولتاژ: وظیفهٔ اصلی مبدل DC-DC تبدیل برق ولتاژ بالا DC از باتری (معمولاً چند صد ولت) به ولتاژهای کمترِ مورد نیازِ اجزای مختلف خودرو است. برای مثال، مبدل ممکن است ولتاژ را کاهش دهد تا سیستم الکتریکی ۱۲ ولت، از جمله چراغ‌ها، سیستم‌های سرگرمی و سایر لوازم جانبی را تأمین کند.

۲. عملیات دو طرفه: مبدل‌های DC-DC در وسایل نقلیهٔ الکتریکی اغلب به‌گونه‌ای طراحی می‌شوند که به‌صورت دوطرفه کار کنند. این بدان معنی است که آن‌ها نه تنها می‌توانند ولتاژ را پایین بیاورند بلکه می‌توانند آن را افزایش دهند. این قابلیت برای کاربردهایی مانند ترمز احیاکننده، که در آن انرژی تولید شده در هنگام ترمزگیری دوباره گرفته شده و در باتری ذخیره می‌شود، بسیار مهم است.

۳. راندمان: راندمان یک عامل حیاتی در مبدل‌های DC-DC است، زیرا هرگونه تلفات توان در طول تبدیل می‌تواند بازده کلی خودرو را کاهش دهد. مبدل‌های با راندمان بالا برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی و به حداکثر رساندن برد رانندگی وسیلهٔ نقلیهٔ الکتریکی مطلوب هستند.

۴. جداسازی: در برخی موارد، مبدل‌های DC-DC در خودروهای الکتریکی ممکن است ویژگی‌های جداسازی را در خود جای دهند. ایزولاسیون برای ایجاد جداسازی گالوانیکی بین سیستم‌های الکتریکی مختلف، تضمین ایمنی و محافظت از الکترونیک حساس در برابر نویزهای ولتاژ بالقوه یا نویز استفاده می شود.

۵. مدیریت حرارتی: از آنجایی‌که مبدل های DC-DC سطوح توان قابل‌توجهی را مدیریت می‌کنند، در حین کار گرما تولید می‌کنند. مدیریت حرارتی مناسب، از جمله سینک‌های حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده، برای حفظ دمای مبدل در محدودهٔ قابل قبول و اطمینان از عملکرد قابل اعتماد ضروری است.

۶. یکپارچه‌سازی و کنترل: در خودروهای برقی مدرن، مبدل‌های DC-DC اغلب در سیستم الکترونیک قدرت خودرو، همراه با سایر قطعات مانند اینورترها، کنترل‌کننده‌های موتور و سیستم‌های مدیریت باتری ادغام می‌شوند. یکپارچه‌سازی امکان کنترل بهتر، هماهنگی و بهینه‌سازی جریان نیرو در داخل خودرو را فراهم می‌کند.

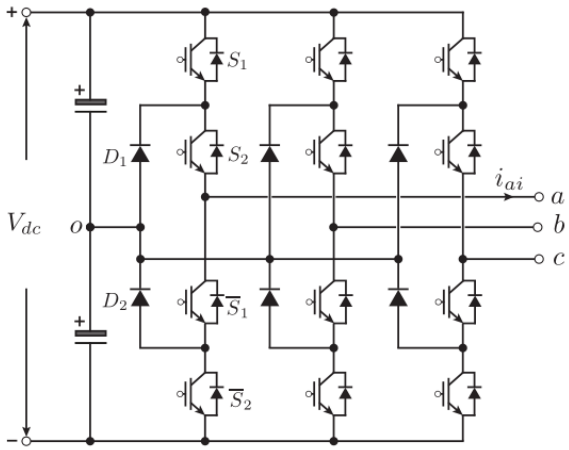
به‌طور کلی، مبدل‌های DC-DC اجزای ضروری در وسایل نقلیهٔ الکتریکی هستند که مدیریت کارآمد توان و تنظیم ولتاژ را برای زیرسیستم‌های مختلف ممکن می‌سازند. آن‌ها با اطمینان از توزیع و تبدیل مناسب توان الکتریکی به عملکرد کلی، برد و قابلیت اطمینان وسایل نقلیهٔ الکتریکی کمک می‌کنند.

۲- توپولوژی‌های مورد بحث

در این بخش، بررسی مختصری از رایج‌ترین توپولوژی‌ها ارائه شده است. توپولوژی‌های در نظر گرفته‌شده در این مقاله در ادامه نشان و توضیح داده شده است.

۲-۱- توپولوژی دیود کلمپ شده (NPC)

با توجه به سوابق، اولین اینورتر چندسطحی یک اینورتر آبشاری بود که در سال ۱۹۷۵ با دیودهایی که منبع را مسدود می‌کردند، طراحی شد. این اینورتر بعداً به اینورتر چندسطحی با دیود پیشنهادشده در [۵-۶] هدایت شد. این توپولوژی در شکل ۱ نشان داده شده است. هر یک از خروجی‌های سه فاز اینورتر به یک ولتاژ باس DC مشترک که به سه سطح روی دو خازن باس DC تقسیم می‌شود متصل می‌گردد. وجود تعداد زیاد دیودهای کلمپ منجر به هزینهٔ بالا و محدودیت‌های متفاوت برای کاربردهای سطح ولتاژ بالا می‌شود. علاوه بر این، یک کنترل خاص برای متعادل‌کردن ولتاژهای خازن مورد نیاز است. در نتیجه، بیشتر کاربردهای عملی یک اینورتر چند سطحی با کلمپ دیودی به سطح پایین‌تر از پنج سطح محدود می‌شود.



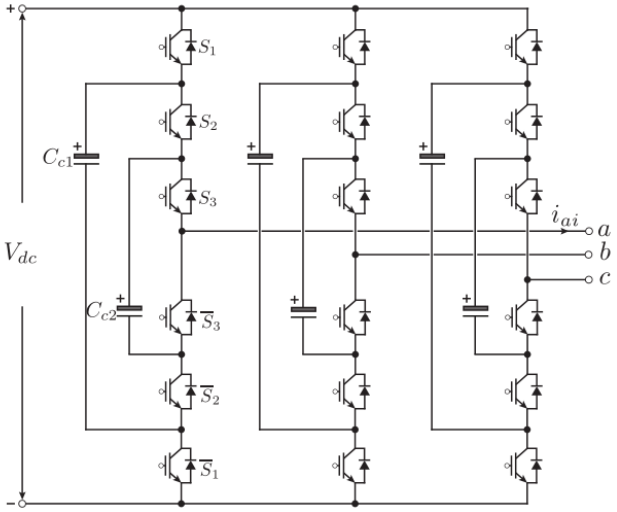
شکل ۱. توپولوژی دیود کلمپ‌شده (NPC)

۲-۲- توپولوژی خازن کلمپ‌شده

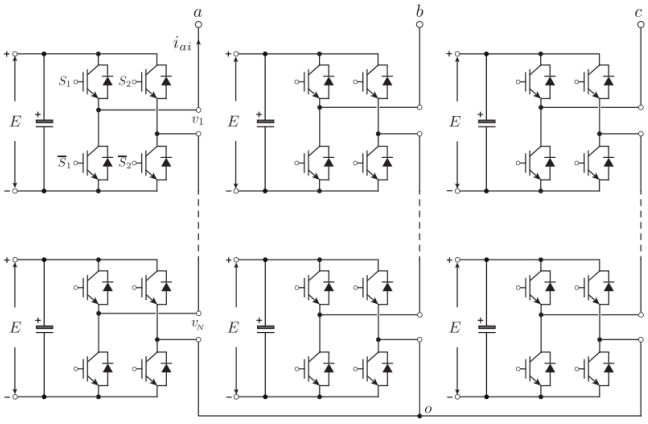
نوع دیگری از اینورتر چندسطحی که توپولوژی مشابه با توپولوژی NPCMLI دارد، اینورتر خازن معلق یا اینورتر چندسطحی با خازن کلمپ‌شده نامیده می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است (Kampitsis et al., 2022). با این حال؛ به جای استفاده از دیودهای کلمپ، از خازن‌ها برای حفظ ولتاژها در مقادیر مطلوب استفاده می‌کند. این موضوع به‌عنوان جایگزین خوبی برای توپولوژی NPC برای تسلط بر برخی از کاستی‌های آن در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳- توپولوژی آبشاری H-Bridge

توپولوژی اینورتر چندسلولی آبشاری (CMCI)، از چند جهت با NPCMLI و CCMLI متفاوت است، به ویژه در نحوهٔ ساخت شکل موج ولتاژ چندسطحی. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، شکل موج پله را با استفاده از اینورترهای پل کامل آبشاری با منابع DC جداگانه ایجاد می‌کند. توپولوژی آبشاری امکان استفاده از منابع dc با مقادیر ولتاژ متفاوت را فراهم می‌کند و می‌توان با تعداد نسبتاً کم مؤلفه به شکل موج‌های چندسطحی با وضوح بالا دست یافت.



شکل ۲. توپولوژی خازن کلمپ‌شده چهار سطحی

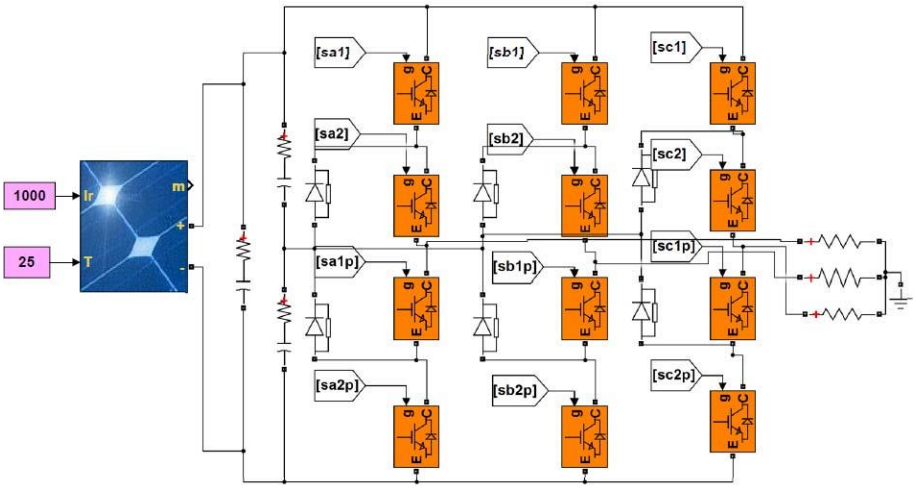


شکل ۳. توپولوژی آبشاری H-Bridge

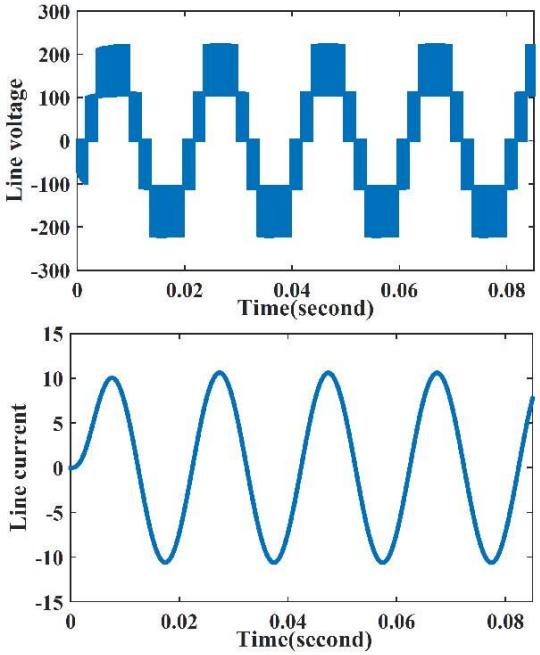
۳- شبیه‌سازی

در این بخش، رایج‌ترین توپولوژی مبدل‌های چندسطحی که در خودروهای برقی به آرایهٔ PV متصل می‌شوند، در شش مطالعهٔ موردی مورد بررسی قرار می‌گیرند. با مقایسهٔ شکل‌های موج خروجی و ویژگی‌های آن‌ها، مناسب‌ترین پیکربندی اینورتر یافت خواهد شد. همهٔ سناریوها در موقعیت‌های یکسان با استفاده از منبع آرایهٔ PV و بارهای یکسان انجام شده‌اند. ماژول آرایهٔ PV، از نوع سلول خورشیدی CS5C90M با ۴۰ رشتهٔ موازی و ۱۰ ماژول متصل به سری در هر رشته، توسط تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع و در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و بار مقاومتی سه فاز R=10 اهم مورد تست قرار خواهد گرفت.

شکل ۴ یک NPC سه سطحی مدل اینورتر منبع PV را در Matlab نشان می‌دهد. اینورتر به آرایهٔ PV از پیش تعریف‌شده و بار متصل است. شکل موج ولتاژ و جریان این شبیه‌سازی در شکل ۵ نشان داده شده است.



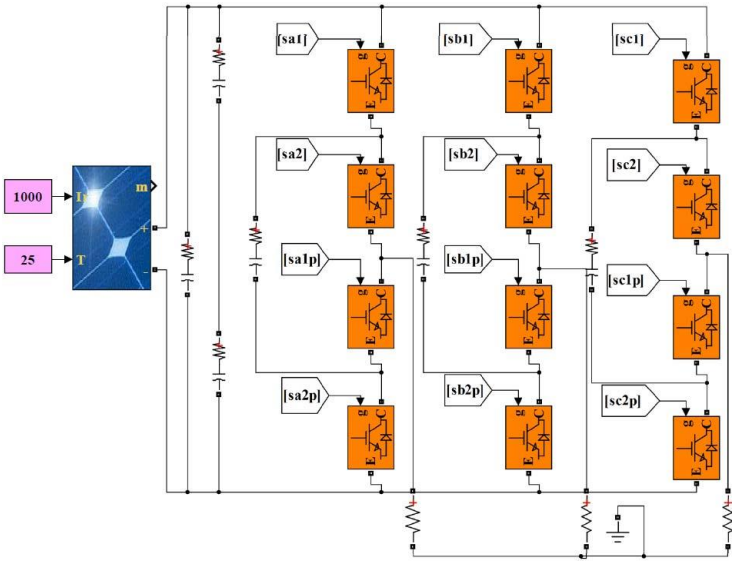
شکل ۴. مدل سه سطحی NPC برای منبع PV در Matlab/Simulink



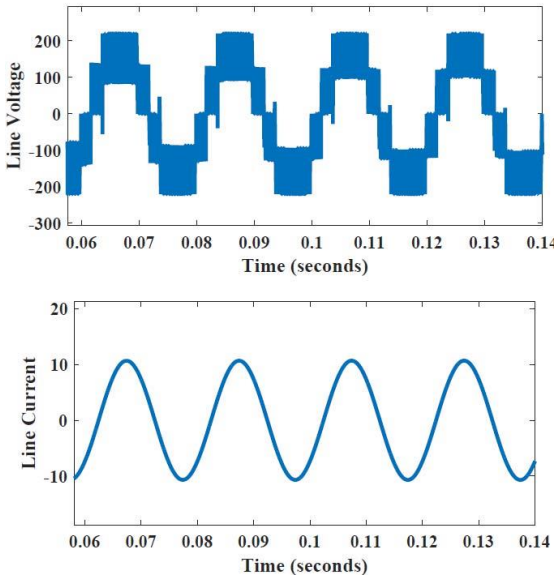
شکل ۵. ولتاژ و شکل موج اینورتر NPC سه سطحی

مقدار اعوجاج هارمونیک کل (THD) هر شکل موج توسط Matlab/Simulink محاسبه می‌شود. به این ترتیب مقادیر خازن ۲۲۰۰ میکروفاراد در نظر گرفته شده و THD ولتاژ خط برای این مطالعهٔ موردی ۳۶/۲۲ ٪ خواهد بود. علاوه بر این، راندمان اینورتر به‌صورت ۹۸/۹۳٪ محاسبه شده است.

مدل اینورتر منبع PV با خازن سه سطحی در شکل ۶ نشان داده شده است. مقادیر خازن ۱۰۰۰ میکروفاراد است. شکل موج ولتاژ و جریان این شبیه‌سازی در شکل ۷ آورده شده است. ولتاژ خط THD برای این توپولوژی اینورتر ۴۸/۸۹٪ بوده و بازده به صورت ۹۸/۶۵٪ محاسبه می‌شود.

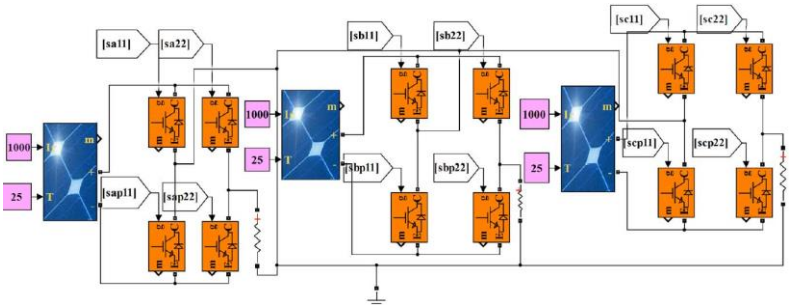


شکل ۶. مدل اینورتر منبع PV با خازن سه سطحی برای منبع PV در Matlab/Simulink

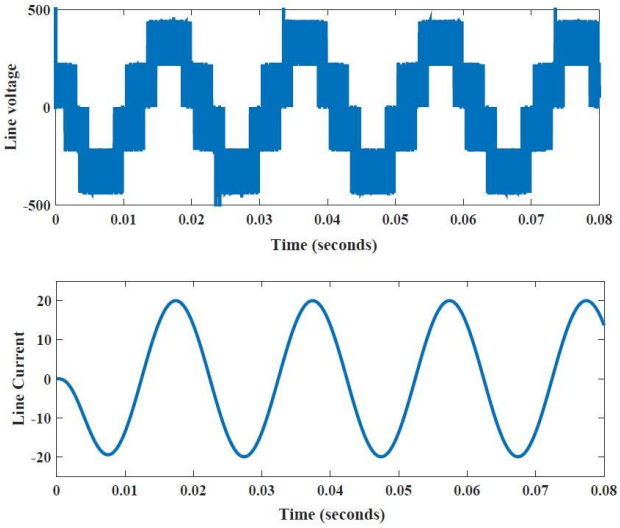


شکل ۷. شکل موج ولتاژ و جریان با خازن سه سطحی

شکل ۸ مدل اینورتر آبشاری سه سطحی برای منبع PV را در Matlab نشان می‌دهد و شکل موج ولتاژ و جریان آن در شکل ۹ آورده شده است. THD ولتاژ خط برای این مدل ۴۷/۱۸٪ به‌دست آمده است و بازده به‌صورت ۸۳/۳۳٪ درصد محاسبه می‌شود.



شکل ۸. مدل اینورتر آبشاری سه سطحی برای منبع PV در Matlab



شکل ۹. شکل موج ولتاژ و جریان با مدل اینورتر آبشاری سه سطحی

امروزه مبدل‌های با بهرهٔ بالای DC-DC بخش مهمی از سیستم‌های تجدید پذیر انرژی می‌باشد. مبدل‌های DC-DC توانایی افزایش یا کاهش یک منبع ثابت ولتاژ DC را فراهم می‌کنند. مبدل‌ها نه‌تنها می‌توانند در وسایلی مانند اتومبیل و به‌عنوان منبع تغذیه استفاده شوند، بلکه می‌توانند برای انجام کارهایی از جمله افزایش عمر باتری برای مدت‌زمان قابل‌توجهی مورد استفاده قرار گیرند. در مقایسه با مبدل سه فاز تمام موج، مبدل‌های چاپر بوست دارای هزینهٔ کمتر، ساختار ساده‌تر سیستم کنترلی و قابلیت اطمینان بالاتر می‌باشند و می‌توانند دستیابی به حداکثر توان در یک محدودهٔ عملیاتی خاص داشته باشند (Lee et al., 2021). مبدل‌های تشدیدی (رزونانسی) نیز به دلیل داشتن توپولوژی‌های مختلف، مشخصه‌های متنوع، ویژه و مفید بخش فعالی از تحقیقات در زمینهٔ الکترونیک قدرت را تشکیل می‌دهند و کاربرد گسترده‌ای در ماژول‌های تنظیم‌کنندهٔ ولتاژ، بالاست لامپ‌های فلورسنت، اصلاح ضریب توان، شارژ خازن، گرمایش القایی، جوش، منابع تغذیهٔ ولتاژ بالا و غیره دارند. به دلیل سوئیچینگ نرم و عملکرد در فرکانس بالا، راندمان مبدل بالا و اندازهٔ آن کوچک خواهد بود. در حالی‌که اکثریت کارهای قبلی در مورد مبدل‌های تشدیدی روی روش تجزیه‌وتحلیل و تکنیک‌های کنترل برای کاربردهای بالا انجام شده ولی در مورد مناسب بودن این مبدل‌ها برای استفاده به‌عنوان یک منبع تغذیهٔ جریان ثابت تحقیقات بسیار کمی صورت گرفته است. این کاربرد یا به‌طور ذاتی مورد نیاز است و یا می‌توان سودمندانه از آن در کاربردهایی مانند جوش قوس الکتریکی، درایو دیود زنری، منابع تغذیهٔ مغناطیسی، شارژ خازن، سیستم‌های روشنایی، شارژ باتری، فرایندهای الکتروشیمیایی و غیره استفاده کرد.

در یک منبع تغذیه سوئیچینگ ولتاژ یا جریان از طریق سویچ کردن یک المان ذخیره‌کنندهٔ انرژی مثل سلف یا خازن تنظیم می‌شود. المان‌های سوئیچینگ ایدئال (مثل ترانزیستوری که در خارج از ناحیهٔ فعال کار می‌کند) در حالت بسته مقاومتی نداشته و در حالت باز هم جریانی از آن‌ها عبور نمی‌کند؛ بنابراین این دسته از منابع تغذیه به لحاظ نظری می‌توانند بازده ۱۰۰ درصد داشته باشند. این یعنی اینکه تمامی توان ورودی به بار منتقل می شود و هیچ کسری از آن از طریق گرما هدر نمی‌رود. در واقع رگولاتور ولتاژ، مداری است که می‌تواند با تغییر ولتاژ ورودی یا تغییر جریان بار، ولتاژ دو سر بار را ثابت نگه دارد. در منابع تغذیه، مدار رگولاتور بین صافی و بار قرار می‌گیرد به این ترتیب تمامی تغییرات ولتاژ منبع تغذیه که به دوسر خازن صافی می‌رسد را حذف کند و ولتاژ تثبیت‌شده‌ای به بار می‌رسد (Easley et al., 2021).

۴- نتیجه‌گیری

به حداقل رساندن اختلالات هارمونیک در مبدل‌های مورد استفاده در وسایل نقلیهٔ الکتریکی برای اطمینان از عملکرد بهینه و کیفیت توان بسیار مهم است. از طریق تجزیه‌وتحلیل توپولوژی‌های مبدل مختلف، استراتژی‌های کنترل و تکنیک‌های فیلتر، بدیهی است که می‌توان اقدامات مؤثری برای دستیابی به کمترین ضریب اختلال هارمونیک انجام داد. با طراحی دقیق سیستم‌های مبدل، پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترل پیشرفته و یکپارچه‌سازی روش‌های فیلتر مناسب، سازندگان خودروهای الکتریکی می‌توانند اعوجاج‌های هارمونیک را کاهش دهند و کارآیی و قابلیت اطمینان کلی خودروهای خود را بهبود بخشند. کاهش اختلالات هارمونیک نه تنها عملکرد تک تک اجزا را افزایش می‌دهد، بلکه به پایداری و طول عمر سیستم الکتریکی EV کمک می‌کند. تحقیقات آتی باید به کشف طرح‌های مبدل و تکنیک‌های کنترل مبدل برای بهینه‌سازی بیشتر استراتژی‌های کاهش هارمونیک و پیشبرد توسعهٔ وسایل نقلیهٔ الکتریکی به سمت آیندهٔ حمل‌ونقل پاک‌تر و پایدارتر ادامه دهد.

منابع

Aishwarya, V., & Gnana Sheela, K. (2021). Review of reduced-switch multilevel inverters for electric vehicle applications. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, *49*(9), 3053-3110.

Araria, R., Berkani, A., Negadi, K., Marignetti, F., & Boudiaf, M. (2020). Performance analysis of DC-DC converter and DTC based fuzzy logic control for power management in electric vehicle application. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, *53*(1), 1-9.

Bughneda, A., Salem, M., Richelli, A., Ishak, D., & Alatai, S. (2021). Review of multilevel inverters for PV energy system applications. *Energies*, *14*(6), 1585.

Easley, M., Shadmand, M. B., & Abu-Rub, H. (2021). Computationally-efficient optimal control of cascaded multilevel inverters with power balance for energy storage systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *68*(12), 12285-12295.

Jayakumar, V., Chokkalingam, B., & Munda, J. L. (2021). A comprehensive review on space vector modulation techniques for neutral point clamped multi-level inverters. *IEEE Access*, 9, 112104-112144.

Kampitsis, G., Batzelis, E. I., Mitcheson, P. D., & Pal, B. C. (2022). A Clamping-Circuit-Based Voltage Measurement System for High-Frequency Flying Capacitor Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *37*(10), 12301-12315.

Lee, S. S., Yang, Y., Siwakoti, Y. P., & Barzegarkhoo, R. (2021). Improved cascaded H-Bridge multilevel inverters with voltage-boosting capability. *Electronics*, *10*(22), 2801.

استناد به این مقاله: روستا، حسین، و معدلی، امیرحسین. (۱۴۰۲). مبدل‌های مورد استفاده در خودروهای برقی با کمترین میزان ضریب اغتشاش هارمونیکی. *نشریه مطالعات برق آپادانا*، ۱(۱)، ۳۱-۳۸.