

4. Patterson, D. & Colton, Jessica & Mularcik, Brad & Kennedy, Byron & Camilleri, Stephanie & Rohoza, Rafal. (2009). A comparison of radial and axial flux structures in electrical machines. 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC '09. 1029 - 1035. 10.1109/IEMDC.2009.5075331.

5. Bhuvaneshwari, V & Carounagarane, Carunaiselvane. (2024). Characteristic Stability Analysis of Axial Flux Motors in Comparison with Radial Flux Motors Subjected to EV Application. 10.1109/PESGRE58662.2023.10404745.

Науковий консультант Нечаус А.О., доцент кафедри автомобільної електроніки, канд. техн. наук

Божко Артем Вадимович, ст. гр. АЕ-42-22
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
artem.bozhko39@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОПОТУЖНОГО ТЯГОВОГО ІНВЕРТОРА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Підвищення питомих характеристик силового агрегату електромобіля дозволяє підвищити його масо-габаритні показники та, відповідно, його економічність, що визначає більший запас ходу. Тяговий інвертор силової установки є одним з основних елементів, оскільки він забезпечує передачу енергії тягової акумуляторної батареї до тягового двигуна. Своєю чергою тяговий інвертор складається з ряду компонентів, які визначаються його схемою та способом керування. Силкові напівпровідникові вентиля інвертора повинні забезпечити передачу заданого рівня потужності, що визначає вимоги до їх технічних характеристик, та також до інших компонентів, одним з яких є конденсатор ланки постійного струму перетворювача.

Основними шляхами підвищення характеристик тягового інвертора є застосування спеціальних схем його побудови та застосування відповідних методів керування. Застосування нових схемних рішень та алгоритмів керування передбачає попереднє теоретичне обґрунтування та математичне моделювання. Сегментована схема інвертора дозволяє значно знизити вимоги до конденсатора ланки постійного струму. На рисунку 1 показано схему трифазного сегментованого інвертора.

У схемі фазні гілки інвертора та обмотки статора двигуна розділені на дві групи. Завдяки розподілу ШІМ між двома групами, пульсації струму шини постійного струму, а отже, і ємність конденсатора, можуть бути значно зменшені. При використанні сегментованого інвертора можливе зниження пульсацій струмів більше ніж на 50%. Також можливе зниження струму шини постійного струму більше ніж на 25%. Це зниження струмів приводить до зменшення розміру конденсатора та струмоведучих проводів. Крім того, струми ланки постійного струму обернено пропорційні напрузі. Наприклад, коли напруга шини була збільшена з 400 В до 800 В, пульсації струму ланки постійного струму зменшилися вдвічі.

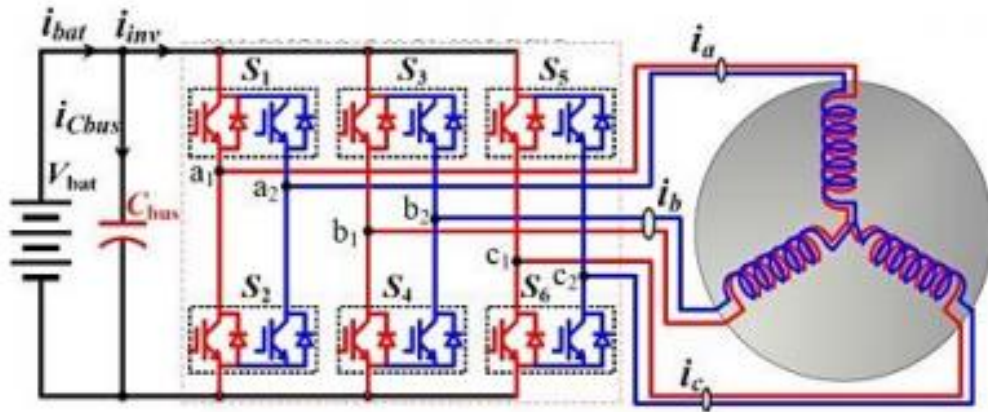


Рисунок 1 – Схема трифазного сегментованого інвертора

Напруга акумулятора регулюється силовими ключами відповідно до певної схеми ШІМ для регулювання струму двигуна (i_x , $x = a, b, c$) та напруги. Протягом одного періоду комутації струми двигуна відносно постійні, а струм постійного струму інвертора i_I є сумою трьох струмів верхніх плечей інвертора і визначається за формулою

$$i_I = (S_{a1} + S_{a2})i_a + (S_{b1} + S_{b2})i_b + (S_{c1} + S_{c2})i_c, \quad (1)$$

де S_{x1}, S_{x2} ($x = a, b, c$) є функціями комутації подвійних інверторів для фазної гілки x і мають лише значення 1 та 0, залежно від того, чи увімкнено верхній чи нижній перемикач.

Наприклад, i_I дорівнюватиме $-2i_c$, коли $S_{x1} = S_{x2} = \{1,1,0\}$, коли S_{x1} залишається $\{1,1,0\}$, а S_{x2} перемикається на $\{1,0,0\}$, i_I дорівнюватиме $i_a - i_c$. Таким чином, i_I перемикатиметься між двома значеннями струму на частоті комутації, що створює пульсації струму, які повинен погасити конденсатор ланки постійного струму. У практичних реалізаціях функції перемикання (S_{x1}, S_{x2}) визначаються схемою модуляції.

Виходячи з обраної схеми модуляції, i_I має 19 можливих значень залежно від комбінацій функцій перемикання, причому деякі з них будуть кращими за інші з точки зору зменшення пульсацій струму конденсатора. Теоретично, якщо $i_I = i_b$, струм конденсатора i_C дорівнюватиме нулю. На практиці, оскільки i_I має лише 19 можливих дискретних значень, досягти повного врівноваження неможливо, тобто слід підбирати найближчі значення i_I у кожен момент часу, щоб мінімізувати пульсації струму конденсатора.

У кожен момент часу 19 можливих значень струму інвертора включають з 9 позитивних, 9 негативних та 1 нульове значення. На рисунку 2 показано всі додатні значення струму i_I , які можна обрати у межах фазового кута від 0 до $\pi/3$, коли величина синусоїдного струму нормалізована (тобто, якщо $i_a = \cos(\theta)$, то $2i_a = 2\cos(\theta)$).

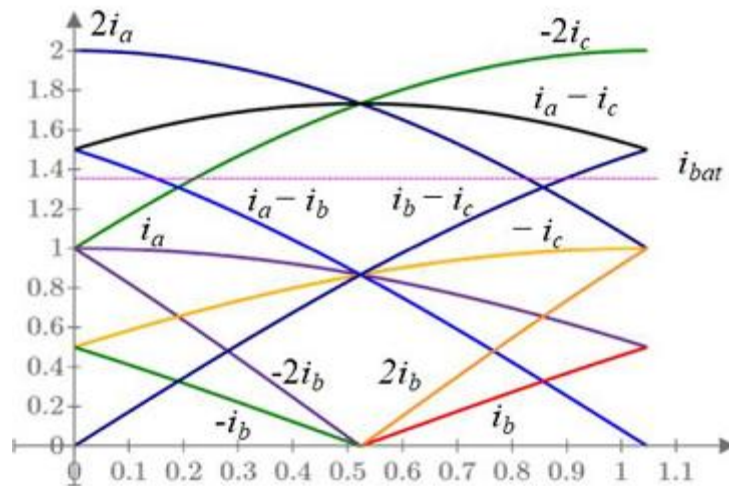


Рисунок 2 – Всі додатні значення струму інвертора, які можна обрати у межах фазового кута від 0 до $\pi/3$

Залежно від величини струму та фазового кута, певні значення струму ближчі до величини струму батареї. Наприклад, при $\theta = 0$, найближчими значеннями струму до заданого значення будуть $i_a - i_c$, $i_a - i_b$, а також $-2i_c$. Якщо обирати ці три значення струму, пульсації струму конденсатора будуть мінімізовані.

На рисунку 3 зображено можливі вектори керування ШІМ для сегментованого інвертора.

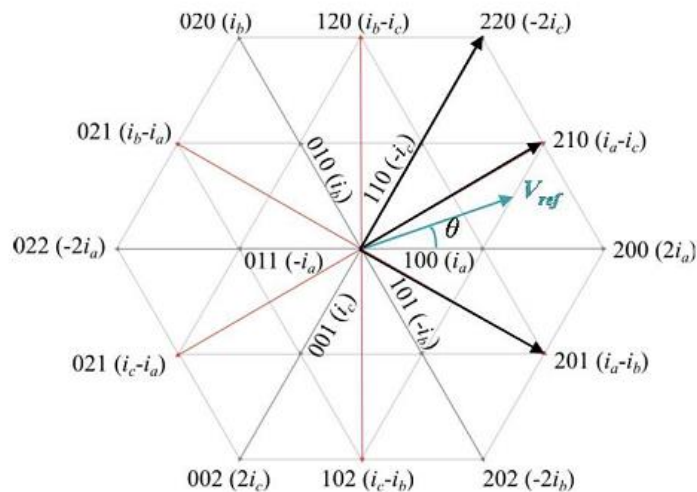


Рисунок 3 – Просторові вектори ШІМ для сегментованого інвертора

Порівняно з схемою з одним інвертором, схема з двома інверторами вводить додаткові 6 довгих векторів та 6 середніх векторів. Загальна кількість 18 ненульових векторів потроєє можливі значення струму i_i , які можна використовувати для формування струму, ближчого до струму акумулятора.

Розраховані коефіцієнти заповненості наведені на рисунку 4.

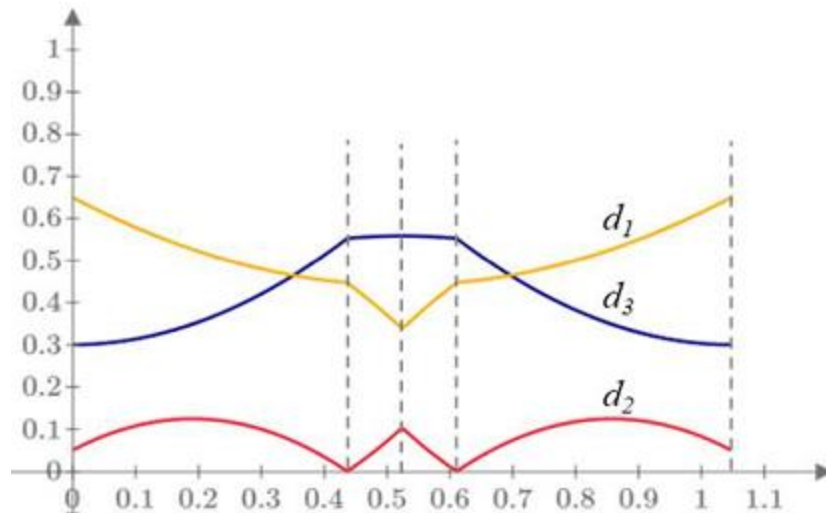


Рисунок 4 – Коефіцієнти заповненості залежно від θ у діапазоні $[0, \pi/3]$

Після визначення коефіцієнтів заповненості послідовність перемикання слід забезпечити таким чином, щоб мінімізувати кількість перемикань протягом одного періоду.

Висновки

Запропонована схема тягового інвертора, а також способу його керування дозволяє зменшити струмове навантаження як на силові напівпровідникові вентиля, так і на конденсатор ланки постійного струму, що своєю чергою дозволяє підвищити питому потужність інвертора в цілому.

Наведене теоретичне обґрунтування дозволяє побудувати математичну модель секціонованого тягового інвертора та сформулювати алгоритм керування, який забезпечує мінімальні пульсації напруги ланки постійного струму силового перетворювача.

Проведене дослідження підтверджує теоретичні висновки і демонструє значне покращення параметрів електричної енергії, які визначають параметри складових компонентів інвертора. Отримані орієнтовні значення показників ефективності потребують натурних досліджень на фізичних моделях.

Література

1. Бороденко, Ю. М. Мехатронні системи автомобіля : підручник / Ю. М. Бороденко, А. В. Гнатов, Щ. В. Аргун ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків : ХНАДУ, 2023. – Ч. 1 : Силовий привід. – 300 с.

2. Taha, Wesam & Azer, Peter & Callegaro, Alan & Emadi, Ali. (2022). Multiphase Traction Inverters: State-of-the-Art Review and Future Trends. IEEE Access. 10. 4580-4599. 10.1109/ACCESS.2022.3141542.

3. Medina-Sánchez, Martin & Yepes, Alejandro & López Sánchez, Óscar & Doval-Gandoy, J. (2025). Carrier Phase-Shift PWM With Minimum Stator Current-Ripple RMS for Symmetrical Six-Phase Induction Motor Drives With Nearly

Sinusoidal Winding Distribution. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 10.1109/JESTPE.2025.3565805.

4. Butt, Osama & Butt, Tallal & Ashfaq, Muhammad & Talha, Muhammad & Raihan, Siti & Hussain, Majid. (2022). Simulative Study to Reduce DC-Link Capacitor of Drive Train for Electric Vehicles. Energies. 15. 10.3390/en15124499.

5. Su, Gui-Jia & Wilkins, Jon & Xue, Lingxiao & Ozpineci, Burak & Sahu, Raj & Gurpinar, Emre. (2023). A High-Power Density Segmented Traction Drive Inverter. 1825-1830. 10.1109/ECCE53617.2023.10361985.

6. Xue, Lingxiao & Su, Gui-Jia & Ozpineci, Burak. (2021). DC-Ripple-Energy Adaptive-Minimization (DREAM) Modulation Scheme for a High Power Density Inverter. 186-191. 10.1109/APEC42165.2021.9487324.

Науковий консультант Нечаус А.О., доцент кафедри автомобільної електроніки, канд. техн. наук

Босенко Богдан Максимович, студент групи АЕ-46-22
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ CAR SCANNER ELM OBD2

Вступ

Стрімкий розвиток автомобільної галузі у світі супроводжується активним впровадженням електромобілів (EV), які поступово стають важливою складовою сучасної транспортної системи. Це обумовлено їх екологічними перевагами, високою енергоефективністю, зниженням залежності від традиційних палив та перспективами розвитку сталої мобільності. Разом із поширенням EV зростає і потреба у вдосконаленні методів їх технічного обслуговування та діагностики.

На відміну від автомобілів з двигунами внутрішнього згоряння, EV мають специфічну конструкцію, до складу якої входять високовольтна акумуляторна батарея, система керування зарядом, електродвигун, інвертор, перетворювачі напруги, електронні блоки керування та велика кількість датчиків. Надійність і безпечність роботи цих систем значною мірою залежать від своєчасного виявлення несправностей, відхилень у робочих параметрах та правильного аналізу технічного стану транспортного засобу (ТЗ) [1-3].

У сучасних умовах особливого значення набувають цифрові засоби діагностики, які дозволяють отримувати оперативну інформацію про стан систем автомобіля без складного розбирання чи тривалих перевірок. Одним із доступних і поширених засобів є використання OBD2-сканерів та спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема Car Scanner ELM OBD2. Цей інструмент дає змогу зчитувати коди помилок, контролювати параметри роботи окремих систем у реальному часі, аналізувати дані з електронних блоків керування та оцінювати технічний стан електромобіля. Завдяки доступності, простоті застосування та достатній інформативності такий підхід є