

ДОСЛІДЖЕННЯ ІЗОЛЬОВАНОГО ДВОНАПРАВЛЕНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ДЛЯ СИСТЕМИ V2X

Перетворювачі постійного струму в постійний (DC-DC-перетворювачі) широко використовуються у гібридних електричних системах, які включають джерела електричної енергії постійного струму, такі як фотоелектричні сонячні електростанції, паливні елементи тощо, а також електрохімічні накопичувачі електричної енергії. У деяких випадках доцільно, а у деяких – необхідно виконувати DC-DC-перетворювачі з можливістю передачі електричної енергії у дві сторони, наприклад, при заряді електрохімічного накопичувача – від електричної мережі до накопичувача, а при розряді назад – від накопичувача у електричну мережу. Теж саме можна сказати про зарядні станції електромобілів, у яких реалізовано технологію V2X (Vehicle-to-Everything), коли тягова акумуляторна батарея включається у електричну мережу як додатковий накопичувач електричної енергії.

DC-DC-перетворювачі у більш загальному випадку поділяють на ізольовані та неізольовані. Ізольовані мають певні переваги над неізольованими, а саме: забезпечують вищі коефіцієнти перетворення напруги та гальванічні розв'язку первинного та вторинного кола перетворювача. Вказані переваги реалізуються за рахунок використання у складі перетворювача високочастотного двообмоткового трансформатора, наявність якого обумовлює очевидні недоліки такого типу перетворювачів: більша вага, габарити та маса, а також додаткове електромагнітне випромінення.

Ізольовані DC-DC-перетворювачі реалізуються декількома типовими електричними схемами, які поділяють на традиційні (класичні) та новітні. Вибір схеми DC-DC-перетворювача для конкретного застосування передбачає проведення попередніх досліджень з метою визначення оптимального технічного рішення. У даній роботі проведено дослідження схем ізольованих DC-DC-перетворювачів для використання у складі зарядної станції електромобілів з реалізацією технології V2X.

Переваги та недоліки окремих схем ізольованих двонаправлених перетворювачів наведено у таблиці 1.

Методи керування ізольованих двонаправлених перетворювачів:

- одинарний фазовий зсув (Single Phase-Shift – SPS);
- розширений фазовий зсув (Extended Phase-Shift – EPSC);
- потрійний фазовий зсув (Triple Phase-Shift – TPSC);
- перемикання при нульовій напрузі (ZVS – Zero-Voltage Switching);
- перемикання при нульовому струмі (ZCS – Zero-Current Switching);
- модельне предиктивне керування (MPC – Model Predictive Control);
- керування в ковзному режимі (SMC – Sliding Mode Control).

Таблиця 1 – Порівняння ізольованих двонаправлених перетворювачів

Схема	K_n	L	C	Вентилі	Обмотки	Характеристики
Flyback	$ND/(1-D)$	0	2	2	2	10. Проста та економічна конструкція; 11. Висока пульсація вхідного струму; 12. Підходить для малопотужних застосувань.
Cuk	$ND/(1-D)$	2	4	2	2	- Забезпечує плавні вхідні та вихідні струми; - Зменшення пульсації завдяки зв'язаним котушкам індуктивності; - Помірна кількість компонентів.
Push-pull	ND	1	1	4	4	- Висока ефективність при симетричній роботі; - Вимагає точного керування перемикачами; - Підходить для середніх рівнів потужності.
Forward	ND	1	1	3	3	- Ефективна передача енергії; - Обмежений діапазон робочого циклу; - Підходить для малої та середньої потужності.
DAB	змінний	0	2	8	4	- Ефективний для широкого діапазону напруг; - Сприяє двонаправленій передачі енергії; - Популярний для високопотужних застосувань.

Перспективною до застосування схемою двонаправленого ізольованого перетворювача для систем заряду електромобілів з реалізацією технології V2X визначено схему подвійного активного моста (DAB).

У DAB за допомогою відповідних алгоритмів комутації транзисторів на первинній та вторинній сторонах трансформатора (T) створюється високочастотна змінна прямокутна напруга (u_1 та u_2) із зсувом по фазі. Передача енергії відбувається від моста, який випереджає інший за фазою, при цьому напрямок передачі енергії можна легко змінити, змінивши фазовий зсув між напругами u_1 та u_2 (рисунок 1).

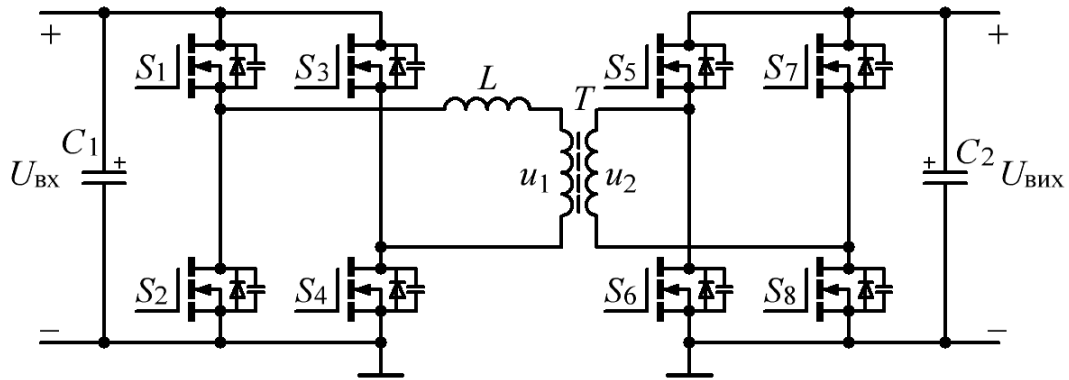


Рисунок 1 – Перетворювач типу DAB

У однофазному DAB первинний та вторинний мости керуються одночасно, при цьому усі транзистори працюють з коефіцієнтом заповнення 50 %. Транзистори у діагоналях мостів вмикаються і вимикаються разом, тому на виході моста формується прямокутна змінна напруга. Для спрощення опису алгоритму комутації припускаємо, що трансформатор має коефіцієнт трансформації $K_T = 1$, тому у розрахунках його можна не враховувати.

Алгоритм комутації містить чотири часові інтервали, які визначаються на основі фазового зсуву між напругами на первинній і вторинній обмотках трансформатора та струмом у котушці індуктивності L (рисунок 2).

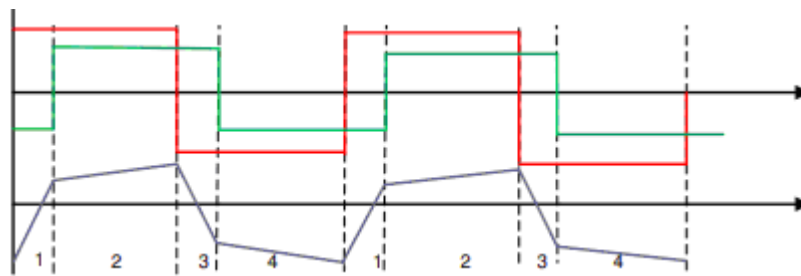


Рисунок 2 – Алгоритм комутації DAB

Протягом першого інтервалу відкриті транзистори S_1 та S_4 на первинній стороні та транзистори S_6 та S_7 на вторинній стороні. Напруга на первинній обмотці U_1 позитивна, а напруга на вторинній обмотці U_2 негативна, струм в індуктивності L змінюється зі швидкістю

$$\frac{di_L}{dt} \sim \frac{U_1 + U_2}{L}. \quad (1)$$

При цьому, протягом першого інтервалу струм котушки індуктивності змінюється від негативного до позитивного значення (рисунок 3).

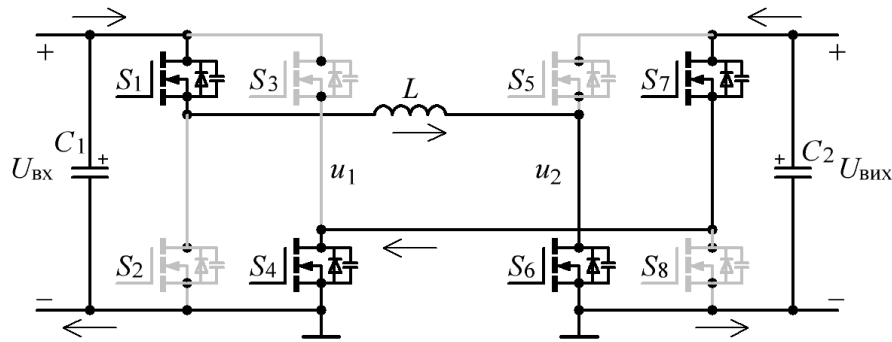


Рисунок 3 – Перший інтервал роботи перетворювача

Аналогічним чином пояснюється робота перетворювача на інших інтервалах.

Під час проектування силового кола DAB важливими є декілька факторів. Найважливішими з них є вибір індуктивності, визначення бажаного фазного зсуву під час роботи, величина вихідного конденсатора, робоча частота перемикавання, тип транзисторів, параметри трансформатора. Багато з цих параметрів взаємопов'язані, і вибір будь-якого з них має прямий вплив на інші. Наприклад, вибір індуктивності безпосередньо впливає на максимальну передану потужність, що, своєю чергою, впливає на фазний зсув роботи перетворювача при заданому рівні потужності.

Основними вихідними даними для проектування системи перетворювача типу DAB є значення вхідної та вихідної напруги, максимальна потужність, передачу якої слід забезпечити. Передача максимальної потужності відбувається при зсуву по фазі $\pi/2$, тому при визначених значеннях вхідної та вихідної напруги змінними, якими можна оперувати є робоча частота перемикавання вентилів та величина індуктивності, величина якої визначає максимальне струмове навантаження на транзистори.

Висновки

Проведено аналіз двонаправлених ізольованих DC-DC-перетворювачів для систем заряду електромобілів з реалізацією технології V2X. Наведено типові схеми перетворювачів, означено їх основні переваги та недоліки.

Проведено аналіз сучасних методів керування двонаправленими ізольованими DC-DC-перетворювачами. Наведено перелік методів та пояснення доцільності їх застосування для різних схем перетворювачів.

Наведено методичку розрахунку та дослідження перетворювача типу DAB.

Література

1. Tong, Y., Salhi, I., Wang, Q., Lu, G., & Wu, S. (2025). Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicles: A Comprehensive Review. *Energies*, 18(9), 2312. <https://doi.org/10.3390/en18092312>.

2. Sharma, Piyush & Palwalia, Dheeraj & Sharma, Ashok. (2024). A Review: Bi-Directional Dc-Dc Converter Topologies. International Journal of Technical Research & Science. 9. 27-35. <https://doi.org/10.30780/specialissue-ISET-2024/029>.
3. Wang, J., Wang, B., Zhang, L., Wang, J., Shchurov, N. I., & Malozyomov, B. V. (2022). Review of bidirectional DC–DC converter topologies for hybrid energy storage system of new energy vehicles. Green Energy and Intelligent Transportation, 1(2), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100010>.
4. Tuluhong, Ayiguzhali & Xu, Zhisen & Chang, Qingpu & Song, Tengfei. (2025). Recent Developments in Bidirectional DC-DC Converter Topologies, Control Strategies, and Applications in Photovoltaic Power Generation Systems: A Comparative Review and Analysis. Electronics. 14. 389. <https://doi.org/10.3390/electronics14020389>.
5. Liu, Yu-Chen & Chen, Chen & Chen, Kai-De & Syu, Yong Long & Nguyen, Anh Dung. (2019). High-Frequency and High-Efficiency Isolated Two-Stage Bidirectional DC-DC Converter for Residential Energy Storage Systems. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. PP. 1-1. <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2019.2953117>.
6. Williamson, Sheldon. (2013). EV and PHEV Energy Storage Systems. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7711-2_3.
7. Tu, Jian & Bai, Zhifeng & Wu, Xiaolan. (2022). Sizing of a Plug-In Hybrid Electric Vehicle with the Hybrid Energy Storage System. World Electric Vehicle Journal. 13. 110. <https://doi.org/10.3390/wevj13070110>.

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

Соломко Максим Ігорович, студент гр. АЕ-46-22, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ “ВІД ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ДО ВСЬОГО” ДЛЯ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

Аналіз сучасних технологій «від транспортного засобу до всього» (Vehicle-to-Everything, V2X) будемо розглядати на прикладі електромобіля. Електромобілі являють собою ключовий компонент сталого транспорту та його екологічної економіки, оскільки вони сприяють зниженню викидів вуглецю, покращенню якості повітря та мінімізації залежності від викопного палива. У цьому контексті технології категорії «від транспортного засобу до всього» визнаються невіддільним елементом розвитку електромобілів.

Зокрема, технологія «від транспортного засобу до всього» V2X в контексті сучасних електромобілів охоплює такі технології, як «від транспортного засобу до електричної мережі» (Vehicle-to-Grid, V2G), «від транспортного засобу до будинку» (Vehicle-to-Building, V2B), «від транспортного засобу до