

## ДВОНАПРАВЛЕНИЙ КАСКАДНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ ДЛЯ ПОТУЖНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОНАКОПИЧЕННЯ В МЕРЕЖАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ SMART GRID

Ю.В. Руденко\*, докт. техн. наук, В.В. Мартинов\*\*, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна  
e-mail: [rudenko@ied.org.ua](mailto:rudenko@ied.org.ua)

*Розглянуто електромагнітні процеси у двонаправленому каскадному перетворювачі постійного струму з можливістю підвищення та зниження рівнів вихідної напруги в обох напрямках передачі енергії для систем накопичення електроенергії. За допомогою метода усереднення в просторі станів отримано математичну модель імпульсного перетворювача. Визначено аналітичні вирази для розрахунку пульсаційних характеристик двонаправленого каскадного перетворювача, за допомогою яких можна розрахувати основні параметри перетворювача постійної напруги, які забезпечують допустимі пульсації напруги на шинах постійного струму та струму силового дроселя. Для ілюстрації розробленої методики розрахунку визначено пульсаційні характеристики та параметри 30 кВт перетворювача для різних режимів навантаження з шинами постійного струму 400 і 700 В для застосування в системах накопичення енергії. Двонаправлений перетворювач був розрахований, проаналізований та промодельований у пакетах Mathcad/PSim на холостому ході та за різних рівнів навантаження з метою підтвердження ефективності проведених досліджень. Бібл. 7, рис. 2.*

**Ключові слова:** метод усереднення в просторі станів, системи накопичення електроенергії, двонаправлений перетворювач постійної напруги, неізолюваний чотириквadrантний двонаправлений перетворювач.

Широке впровадження та використання систем розподіленого виробництва електроенергії в Україні накладає нові виклики щодо забезпечення стабільності електромереж через переривчастий характер роботи відновлюваних джерел енергії, що особливо має важливе значення у воєнний та повоєнний час у зв'язку з виникненням аварійних станів обладнання. Тому це потребує реалізації необхідних заходів зі створення нового та модернізації існуючого електрообладнання в цих системах, що сприятиме відновленню енергетичного сектору економіки України.

Сучасні системи електропостачання повинні забезпечувати балансування попиту й пропозиції енергії в будь-який момент часу та забезпечувати максимальну ефективність використання електроенергії [1, 2]. Акумуляторні системи енергонакопичення є одним із раціональних рішень для комерційних та побутових застосувань у мережах електропостачання, що відповідають сучасним вимогам експлуатації. Такі системи можуть покращувати безпеку електропостачання та забезпечити подолання пікового попиту на електроенергію, особливо коли вони є невід'ємною частиною локальної мережі з функціональністю високого рівня керування SMART GRID [3–5].

Одними із ключових елементів у системах енергонакопичення є двонаправлені перетворювачі постійної напруги (ДППН). Вони забезпечують гнучкість керування потоком енергії та її напрямком між пристроєм збереження енергії – акумуляторною батареєю та іншими вузлами системи [6,7].

**Метою роботи** є дослідження параметрів двонаправленого каскадного перетворювача постійної напруги для акумуляторної системи енергонакопичення та визначення їхніх ефективних значень для побудови одиничного модуля потужністю 30 кВт.

Основою побудови потужних систем енергонакопичення в мережах енергопостачання SMART GRID потужністю на десятки та сотні кіловат можуть слугувати перетворювальні модулі з одиничною потужністю до 30 кВт, що об'єднуються між собою в багатомодульну систему. Перетворювальні модулі зазвичай складаються з двонаправлених перетворювачів постійної напруги та інвертора, з'єднаних послідовно.

Базові перетворювачі постійного струму, такі як перетворювачі понижувального, підвищувального та підвищувально-понижувального типу (та їхні похідні), не мають можливості двонаправленої передачі енергії. Це обмеження пов'язане з наявністю діодів у їхній структурі, які запобігають протікати зворотному струму. Однак однонаправлені перетворювачі можуть бути перетворені в двонаправлені за допомогою їхньої комбінації, наприклад, з'єднання понижувального та підвищувального перетворювачів в єдину структуру двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача постійної напруги. Топологія базової схеми двонаправленого перетворювача постійного струму зображена на рис. 1 а. Одним з недоліків цієї структури для деяких застосувань є те, що в напрямку від джерела  $V_A$  до джерела  $V_B$  перетворювач працює лише в режимі пониження напруги, а в напрямку від джерела  $V_B$  до джерела  $V_A$  – лише в режимі підвищення напруги. Для подолання такого обмеження в літературі пропонується багато поліпшених структур [4]. У випадку, коли величини двох напруг на шинах постійного струму є близькими одна до одної, а коефіцієнт передачі перетворювача за напругою менше або більше одиниці, може бути використаний перетворювач buck-boost, який може працювати як перетворювач DC-DC Step-Down або перетворювач DC-DC Step-up залежно від режиму. На рис. 1 б показана конфігурація ДППН на базі вольтореверсивних перетворювачів. Необхідно відмітити, що полярність шин постійного струму в цій схемі – зворотня стосовно загальної землі, що є проблемою в багатьох застосуваннях. Ця проблема може бути вирішена шляхом додавання додаткових ключів у перетворювач, як показано на рис. 1 в. Указана конфігурація може бути представлена як два зворотно підключені перетворювачі за схемою на рис. 1 а.

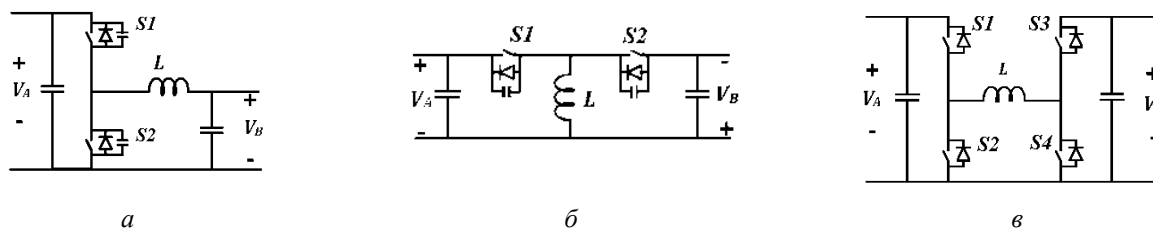


Рис. 1

За цією каскадною топологією в роботі перетворювача можливими є всі чотири квадранти функціонування, отже, ця топологія дає змогу працювати як в режимі пониження напруги, так і в режимі підвищення в обох напрямках потоку енергії. Чотириквadrантна робота перетворювача за цією топологією робить цю структуру найбільш гнучкою у використанні. Під час передачі енергії від джерела  $V_A$  до  $V_B$  ключі  $S1$ ,  $S4$  повинні бути керованими, у разі передачі енергії в зворотному напрямку керованими повинні бути ключі  $S2$ ,  $S3$ . Більш того, рівні встановленої потужності на перемикальних елементах цього перетворювача є в 1,5–2 рази меншим, ніж перетворювача рис. 1 б, що доповнює переваги каскадної схеми рис. 1 в. Розглянемо електромагнітні процеси в цьому перетворювачі. Вважатимемо, що комутація перемикальних елементів перетворювачів відбувається миттєво, їхні активні опори у відкритому стані дорівнюють нулю, активний опір обмотки дроселя дорівнює нулю.

В усталеному режимі в перетворювачі спостерігаються два інтервали комутації – інтервал накопичення енергії дроселем  $L$  та інтервал її віддачі від дроселя  $L$  у навантаження.

На вказаних інтервалах роботи еквівалентні схеми заміщення перетворювача мають однакову конфігурацію в обох напрямках передачі енергії між джерелами  $V_A$  та  $V_B$ . На інтервалі накопичення дросель через відкриті транзистори одної з пар перемикальних елементів підключено до вхідного джерела енергії з напругою  $U_{ex}$ , а вихідний конденсатор ємністю  $C$  розряджається в навантаження, омичний опір якого позначимо через величину  $R_H$ . На інтервалі віддачі енергії дросель  $L$  через відкриті діоди протилежної пари перемикальних елементів перетворювача підключено до вихідного конденсатора та навантаження.

Під час інтервалу накопичення енергії відбувається розряд вихідного конденсатора постійним струмом навантаження, який позначимо як  $I_H$ . За відомого значення вихідного конденсатора  $C$ , під час інтервалу накопичення, напруга на ньому, а отже і вихідна напруга

перетворювача зменшується на величину  $\Delta U_C$ . Це значення відображає величину пульсації вихідної напруги перетворювача. Отже, це змінення напруги  $\Delta U_C$  пов'язане зі струмом навантаження:

$$\Delta U_C = \frac{1}{C} \int_0^{T_H} i_C dt = \frac{1}{C} \int_0^{T_H} I_H dt; \Delta U_C = \frac{I_H T_H}{C} = \frac{I_H K_3}{fC}, \quad (1)$$

де  $T_H$  – тривалість інтервалу накопичення,  $K_3 = T_H/T$  – відносна тривалість інтервалу накопичення,  $f = 1/T$  – частота комутації перетворювача,  $T$  – період комутації.

Використовуючи вираз (1) та співвідношення для вихідної напруги перетворювача  $U_C = I_H R_H$ , запишемо формулу для визначення коефіцієнта пульсації вихідної напруги перетворювача:

$$K_{PC} = (\Delta U_C)/U_C = K_3/(f \cdot R_H \cdot C). \quad (2)$$

Для визначення коефіцієнта пульсації струму дроселя розрахуємо величину приросту цього струму  $\Delta I_L$  на інтервалі накопичення енергії, яка дорівнює загальній пульсації струму. Для цього використаємо співвідношення для напруги на дроселі протягом інтервалу накопичення  $\Delta I_L = (U_{ex}/L)T_H$ , а також вираз для регульовальної характеристики понижувально-підвищувального перетворювача, в режимі якого працює каскадний перетворювач, що розглядається:  $U_C = U_{ex}(K_3/(1-K_3))$ . Остаточно маємо:

$$\Delta I_C = U_C(1-K_3)/(f \cdot L). \quad (3)$$

Для подальшого розрахунку коефіцієнта пульсації струму дроселя необхідно визначити середній струм дроселя  $I_{Lcp}$ , якій збігається із середнім вхідним струмом перетворювача на інтервалі накопичення та який визначається, виходячи з балансу вхідної і вихідної потужностей. У такому разі отримаємо:  $I_{Lcp} = U_C/(1-K_3)R_H$ .

Після перетворень запишемо вираз для коефіцієнта пульсації струму дроселя:

$$K_{PL} = (1-K_3)^2/\tau_L^*, \quad (4)$$

де  $\tau_L^* = L/(R_H T)$  – відносна постійна часу.

Визначимо пульсаційні характеристики каскадного двонаправленого перетворювача згідно з формулами (2), (4) для таких параметрів у двох режимах передачі енергії: у режимі передачі енергії від акумуляторної батареї (АБ) до інвертора (ІН), та в зворотному напрямку – від ІН до АБ. Прийmemo, що постійна напруга на стороні АБ може змінюватися в межах 400–480 В. На стороні ІН – постійна напруга на рівні 700 В.

Таким чином, враховуючи відсутність активних втрат енергії і внаслідок цього – однакову задану потужність навантаження перетворювача 30 кВт для двох напрямків, визначимо опір навантаження: у режимі АБ–ІН опір складає 16 Ом, у режимі ІН–АБ – від 5,3 до 7,7 Ом. У ході проведених розрахунків визначено параметри накопичувального дроселя ( $L=5$  мГн) та вхідного й вихідного конденсаторів ( $C_{ex}=C_{вих}=500$  мкФ), які забезпечують в обох напрямках у робочій зоні комутації рівень пульсацій вихідної напруги не більше 0,6 % та рівень пульсацій струму дроселя не більше 3 % за частоти комутації 20 кГц. Результати розрахунків відображені на рис. 2.

У результаті проведених досліджень розроблено методику та за допомогою метода усереднення в просторі станів визначено аналітичні вирази для розрахунку параметрів двонаправленого перетворювача постійного струму для систем накопичення електроенергії з можливістю роботи в чотирьох квадрантах. Отримані аналітичні вирази для розрахунку пульсаційних характеристик каскадного двонаправленого перетворювача дають змогу визначити основні параметри чотириквadrантного перетворювача напруги, які забезпечують допустимі пульсації як за напругою на шинах постійного струму, так і за струмом дроселя. Двонаправлений перетворювач був промодельований у пакеті PSim на холостому ходу та за різних навантажень. Отримані результати підтверджують ефективність проведених розрахунків, що дає змогу реалізувати необхідні вихідні параметри двонаправленого перетворювача

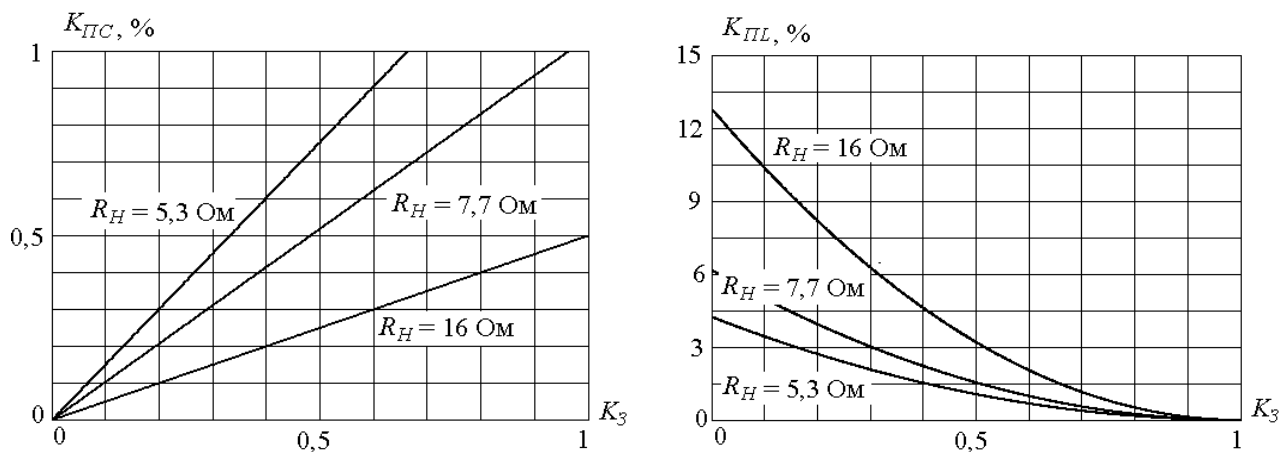


Рис. 2

за заданого обмеження на величину пульсацій напруги на шинах постійного струму та струму дроселя перетворювача.

Фінансується за держбюджетною темою "Розвиток теорії та наукове обґрунтування принципів побудови потужних імпульсних напівпровідникових перетворювачів з нелінійним динамічним навантаженням модульної структури" (Джерело-3). Державний реєстраційний номер роботи 0119U001289. КПКВК 6541030.

1. Zhimin Wang, Lihan Qin, Chenghong Gu, Furong Li. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation. *Zhimin Power & Energy Society General Meeting*. IEEE. 2015. Pp. 1–12.
2. Жаркін А.Ф., Новський В.А., Мартинов В.В., Пазєєв А.Г., Палачов С.О., Руденко Ю.В. Системи накопичення енергії на основі застосування потужних двонаправлених перетворювачів. *Вісник НТУ «ХПИ», серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків:НТУ «ХПИ». 2018. Вип.26 (1302). Т.1. С. 25–33.
3. Leadbetter J., Swan L. Battery storage system for residential electricity peak demand shaving. *Energy Build*. 2012. No55. Pp. 685–692.
4. Restrepo C., Salazar A., Schweizer H. Residential battery storage: is the timing right? *IEEE Electrification Mag*. 2015. 3 (3). Pp. 14–21.
5. Zharkin A., Novskyi V., Martynov V. Development of Powerful Unified Inverter Modules for Energy Storage Systems. 2019 *IEEE 6th International Conference*. April 17–19, 2019. Kyiv, Ukraine. Pp.144149
6. Ahamed Ejas, Senthilkumar S. Review of Bidirectional DC-DC Converters. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2017. Vol.2. Issue 1. Pp. 182–189.
7. Жаркін А.Ф., Новський В.О., Мартинов В.В., Пазєєв А.Г., Системи накопичення енергії на основі застосування потужних двонаправлених перетворювачів. *Вісник НТУ «ХПИ», серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії*. Харків:НТУ «ХПИ», 2019. Вип.20 (1345). С. 4–14.

## BIDIRECTIONAL CASCADED DC CONVERTER FOR POWERFUL ENERGY STORAGE SYSTEM IN SMART GRID POWER SUPPLY NETWORKS

Yu.V. Rudenko, V.V. Martynov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiyi ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: [rudenko@ied.org.ua](mailto:rudenko@ied.org.ua)

*Electromagnetic processes in a bidirectional cascade DC converter with the possibility of increasing and decreasing the output voltage levels in both directions of energy transfer for electric power storage systems are considered. Using the method of averaging in the state space, a mathematical model of the pulse converter was obtained. Analytical expressions for calculating the ripple characteristics of a bidirectional cascade converter have been determined, with the help of which you can calculate the main parameters of the constant voltage converter, which provide permissible voltage ripples on the DC buses and power choke current. To illustrate the developed calculation methodology, the ripple characteristics and parameters of a 30 kW converter for various load modes with 400V and 700V DC busbars for use in energy storage systems are determined. The bidirectional converter was calculated, analyzed and simulated in Mathcad/PSim packages at idle speed and at different load levels in order to confirm the effectiveness of the conducted research. Ref. 7, fig. 2.*

**Keywords:** method of averaging in state space, electric power storage systems, bidirectional constant voltage converter, non-isolated four-quadrant bidirectional converter.

1. Zhimin Wang, Lihan Qin, Chenghong Gu, Furong Li. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation. *Zhimin Power & Energy Society General Meeting*. IEEE. 2015. Pp. 1–12.
2. Zharkin A.F., Novs'kyi V.A., Martynov V.V., Pazyeyev A.H., Palachov S.O., Rudenko Yu.V. Systemy nakopychennya enerhiyi na osnovi zastosuvannya potuzhnykh dvonapravlenykh peretvoryuvachiv. *Visnyk NTU «KHPY»: Novi rishennya v suchasnykh tekhnolohiyakh*. Kharkiv:NTU «KHPI», 2018. V.1. Is. 26 (1302). Pp. 25–33. (Ukr)
3. Leadbetter, J. Swan L. Battery storage system for residential electricity peak demand shaving. *Energy Build*. 2012. No 55. Pp. 685–692.
4. Restrepo C., Salazar A., Schweizer H. Residential battery storage: is the timing right? *IEEE Electrification Mag*. 2015. 3. (3). Pp. 14–21.
5. Zharkin A., Novskyi V., Martynov V. Development of Powerful Unified Inverter Modules for Energy Storage Systems. *2019 IEEE 6th International Conference*. April 17–19, 2019, Kyiv, Ukraine. Pp. 144–149.
6. Ahamed Ejas, Senthilkumar S. Review of Bidirectional DC-DC Converters. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2017. V.2. Is. 1. Pp. 182–189.
7. Zharkin A.F., Novs'kyi V.O., Martynov V.V., Pazyeyev A.H., Systemy nakopychennya enerhiyi na osnovi zastosuvannya potuzhnykh dvonapravlenykh peretvoryuvachiv. *Visnyk NTU «KHPY»: Elektrychni mashyny ta elektromekhanichne peretvorennya enerhiyi*. Kharkiv: NTU «KHPY», 2019. Is.20 (1345). Pp. 4–14. (Ukr)

Надійшла: 31.05.2023

Прийнята: 15.06.2023

Submitted: 31.05.2023

Accepted: 15.06.2023