

СХЕМНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НЕІЗОЛЬОВАНИХ DC-DC-ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

О. С. Яма, к. т. н. О. Ф. Бондаренко

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Україна, м. Київ
bondarenkoaf@gmail.com

Запропоновано класифікацію схемних рішень, що використовуються для поліпшення характеристик неізованих імпульсних DC-DC-перетворювачів класичних топологій, а саме модульних структур (каскадні, багаторівневі, багатofазні та ін.) та додаткових пасивних кіл (помножувачі та підвищувачі вихідної напруги на діодно-конденсаторних, діодно-індуктивних ланках, магнітно-зв'язаних елементах). Розглянуто особливості використання таких схемних рішень, їхні переваги та недоліки, що дозволить спростити вибір найбільш ефективних рішень при побудові джерел живлення зокрема для фотовольтаїчних систем.

Ключові слова: неізований DC-DC-перетворювач, модульна структура, каскадна структура, багаторівнева структура, багатofазна структура, магнітно-зв'язані елементи, поліпшення характеристик.

Для побудови джерел живлення різного призначення, зокрема джерел живлення фотовольтаїчних панелей, тривалий час успішно використовуються класичні топології неізованих імпульсних DC-DC-перетворювачів: підвищувальна, знижувальна, з інвертуванням, топологія Чука, SEPIC, Zeta. За необхідності поліпшення тих чи інших експлуатаційних характеристик таких джерел здійснюють модифікацію класичних топологій за допомогою спеціальних схемних рішень, наприклад шляхом застосування додаткових пасивних кіл та перетворювальних ланок або об'єднання базових модулів в різноманітні структури. Втім аналіз релевантних джерел виявив відсутність систематизованої інформації щодо різновидів таких рішень та особливостей їх застосування [1—9].

Метою цієї роботи є класифікація схемних рішень, що застосовуються для поліпшення різних характеристик класичних топологій неізованих імпульсних DC-DC-перетворювачів, зокрема джерел живлення для фотовольтаїки, яка б дозволила спростити вибір найбільш ефективних рішень при проектуванні таких перетворювачів.

Аналіз показав, що всі відомі на сьогодні схемні рішення можна розділити на декілька груп.

Схемні рішення, націлені на поліпшення регульовальних характеристик джерел живлення. Ця група об'єднує так звані каскадні структури (англ. *cascaded*), що створюються шляхом послідовного з'єднання декількох перетворювальних модулів. При цьому відомі структури, в яких всі модулі є повністю уніфікованими і являють собою одну з класичних топологій (симетричні структури), та структури, в яких тільки один базовий перетворювальний модуль є побудованим за класичною топологією, а всі інші частково повторюють його, не маючи власного елемента регулювання — транзисторного ключа (несиметричні структури). Серед останніх найбільшого розповсюдження отримала квадратична структура (англ. *quadratic*), яка реалізується двома послідовно з'єднаними підвищувальними перетворювальними модулями з усуненням транзисторного ключа в другому модулі. Це змінює лінійний закон регульовальної характеристики перетворювача на квадратичний, забезпечуючи вищий коефіцієнт перетворення за менших значень коефіцієнта заповнення імпульсів керування та знижений рівень пульсації за збереження простоти керування. Загалом використання каскадних структур дозволяє змінити вигляд регульовальних характеристик перетворювачів необхідним чином, що може бути корисним для живлення складних нелінійних навантажень. Однак для таких структур залишається характерною низка недоліків, притаманних

базовим класичним топологіям, а саме наявність перенапруги на ключах (англ. *voltage stress*), обмежений діапазон вхідної напруги тощо [3, 4].

Схемні рішення, направлені на зменшення амплітуди пульсацій вхідного струму та напруги й скорочення небажаного вмісту гармонік. До цієї групи можна віднести різного роду багатофазні структури (англ. *interleaved*), які передбачають паралельне з'єднання декількох перетворювальних модулів, побудованих за однією з класичних топологій, що працюють на загальне навантаження. При цьому перемикання ключів в модулях відбувається з фазовим зсувом. Загалом використання таких структур впливає лише на якість вхідних/вихідних струмів і напруг, не змінюючи коефіцієнт перетворення схеми в порівнянні з базовими класичними топологіями. Завдяки застосуванню багатофазних структур також досягається зменшення втрат на комутацію і перенапруги на ключах та підвищення ефективності. Але на ряду з цим відбувається збільшення кількості пасивних і активних компонентів та ускладнення керування. В залежності від способу з'єднання та топології модулів, багатофазні структури можуть бути симетричними та асиметричними [5, 6]. Так, наприклад, багатофазний асиметричний підвищувально-знижувальний перетворювач може забезпечити безперервний вхідний струм з низьким рівнем пульсацій, що значно підвищує ефективність алгоритмів підтримання точки максимальної потужності (англ. *maximum power point tracking, MPPT*) для фотовольтаїчних застосувань [7].

В рамках цієї групи рішень також відомі складені структури (англ. *stacked*), які зазвичай складаються з двох частин — основної та компенсуючої, побудованих на основі базових топологій. Такі структури дозволяють незалежно від значення коефіцієнта заповнення імпульсів керування мінімізувати пульсації вихідного струму з урахуванням динаміки навантаження із застосуванням всього двох фаз на відміну від багатофазних топологій, де рівень пульсацій залежить від коефіцієнта заповнення імпульсів керування та кількості фаз [4].

Схемні рішення, призначені для збільшення вихідного струму або/та напруги перетворювача. До цієї групи можна віднести багатокоміркові (англ. *multicell*) та багаторівневі (англ. *multilevel*) структури різних конфігурацій, де послідовне з'єднання уніфікованих перетворювальних модулів базової топології забезпечує підвищення вихідної напруги, паралельне з'єднання — вихідного струму, а комбінації послідовно-паралельного з'єднання — обох параметрів одночасно. Окрім збільшення максимальних значень вихідного струму та напруги такі схемні рішення дозволяють поліпшити коефіцієнти використання елементів схеми за струмом та напругою та підвищити ефективність і точність регулювання вихідних параметрів. Поліпшення коефіцієнтів використання досягається шляхом розподілення напруги та струму між декількома модулями, що дозволяє використовувати в них ключі та інші компоненти з нижчими номінальними параметрами. До недоліків цієї групи рішень можна віднести нерівномірний розподіл струму між ключами — більші значення струму на нижчих рівнях перетворювача та необхідність здійснювати балансування напруги на ключах, що ускладнює систему [4, 8].

До цієї групи схемних рішень можна також віднести структури помножувачів та підвищувачів вихідної напруги, побудованих на пасивних колах, які застосовуються з усіма базовими топологіями, окрім знижувальної. Такі структури мають у своїй основі перетворювач однієї з класичних топологій, до якого підключаються діодно-конденсаторні або діодно-індуктивні ланки, які залежно від такту роботи перетворювача комутуються послідовно або паралельно, змінюючи таким чином параметри схеми. Значними перевагами таких структур є можливість досягнення високого коефіцієнта перетворення, високої питомої потужності, ефективності та економічності. Крім того, вони забезпечують невеликі пульсації вихідної напруги та струму, що є перевагою для високовольтних застосувань. Втім однією з основних проблем цих структур є регулювання напруги навантаження, оскільки у певних умовах експлуатації вихідна напруга не має лінійної залежності від коефіцієнта заповнення імпульсів керування, що передбачає підвищення рівня складності систем керування [9]. Також з метою збільшення коефіцієнта перетворення напруги до базових топологій перетворювачів можуть додаватися ланки магнітно-зв'язаних дроселів, завдяки яким енергія, що зберігається в одній обмотці, передається в іншу

через магнітний зв'язок. Для таких схем характерне зменшення пульсацій струму та підвищений ККД. Одночасно із цим, є низка недоліків, пов'язаних зі значними пульсаціями напруги на транзисторах, які спричиняються індуктивністю розсіювання елементів магнітного зв'язку [8].

Гібридні схемні рішення, що забезпечують поліпшення декількох характеристик. Поєднанням схемних рішень з різних груп можна збільшити ефективність роботи перетворювачів. Так, наприклад, поліпшення характеристик джерел живлення для фотовольтаїчних застосувань можна досягти завдяки використанню модульної структури перетворювача у поєднанні із застосуванням додаткових магнітно-зв'язаних компонентів. Це дозволить зменшити перенапругу на ключах, отримати вищий коефіцієнт перетворення, зменшити пульсації та небажаний вміст гармонік вхідного струму, а також підвищити ефективність алгоритмів МРРТ.

Таким чином, запропонована класифікація схемних рішень, що забезпечують поліпшення характеристик неізолюваних імпульсних DC-DC-перетворювачів класичних топологій, дозволить спростити вибір найефективніших рішень в процесі побудови перетворювачів джерел живлення зокрема для фотовольтаїчних систем з урахуванням конкретних технічних вимог.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Alkhalidi A., Elkhateb A., Laverty D. Voltage Lifting Techniques for Non-Isolated DC/DC Converters. *Electronics*, 2023, vol. 12, iss. 3, 718. <https://doi.org/10.3390/electronics12030718>
2. L. Jotham Jeremy, Chia Ai Ooi, Jiashen Teh. Non-isolated conventional DC-DC converter comparison for a photovoltaic system: A review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2020, vol. 12, iss. 1m 013502. <https://doi.org/10.1063/1.5095811>
3. Zhang N., Zhang G., See K. W., Zhang B. A single-switch quadratic buck–boost converter with continuous input port current and continuous output port current. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, no. 5, pp. 4157–4166, <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2017.2717462>
4. Guida V., Guilbert D., Douine B. Literature survey of interleaved DC-DC step-down converters for proton exchange membrane electrolyzer applications. *Transactions on Environment and Electrical Engineering*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 33–43, <http://dx.doi.org/10.22149/teee.v3i1.129>
5. Yau Y.-T., Hwu K.-I., Shieh J.-J. Minimization of output voltage ripple of two-phase interleaved buck converter with active clamp. *Energies* 2021, vol. 14, iss. 16, 5215. <https://doi.org/10.3390/en14165215>
6. Taghizadegan Kalantari N., Ghabeli Sani S., Sarsabahi Y. Implementation and design of an interleaved Cuk converter with selective input current ripple elimination capability. *Int. J. Circ. Theor., Appl.* 2021, vol. 49, iss. 6, pp. 1743–1756. <https://doi.org/10.1002/cta.2940>
7. Seguel J.L., Seleme S.I., Jr., Morais L.M.F. Comparative Study of Buck-Boost, SEPIC, Cuk and Zeta DC-DC Converters Using Different MPPT Methods for Photovoltaic Applications. *Energies*, 2022, vol. 15, iss. 21, 7936. <https://doi.org/10.3390/en15217936>
8. Forouzesh M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A. et al. A survey on voltage boosting techniques for step-up DC-DC converters. *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Milwaukee, WI, USA, 2016, pp. 1–8, <http://dx.doi.org/10.1109/ECCE.2016.7854792>
9. Blaabjerg F., Bhaskar M.S., Padmanaban S. *Non-Isolated DC-DC Converters for Renewable Energy Applications (1st ed.)*. CRC Press, 2021. <https://doi.org/10.1201/9781003129530>

O. Yama, O. Bondarenko

Circuit solutions designed to improve characteristics of non-isolated DC-DC converters

The authors offer a classification of circuit solutions used to improve the characteristics of non-isolated pulsed DC-DC converters of classic topologies, namely modular structures (cascade, multi-level, multi-phase, etc.) and additional passive circuits (multipliers and amplifiers of the output voltage on diode-capacitor, diode-inductive circuits, magnetically connected elements). The paper considers peculiarities of using such circuit solutions, their advantages and disadvantages, which will make it easier to choose the most effective solutions when building power supplies, in particular for photovoltaic systems.

Keywords: non-isolated DC-DC converter, modular structure, cascade structure, multi-level structure, multi-phase structure, magnetically coupled elements, improvement of characteristics.