

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-87>

УДК 621.311: 314.572

ДАВИДЕНКО ЛЮДМИЛА

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0176-2045>

email: l.davydenko@lutsk-ntu.com.ua

ДАВИДЕНКО ВОЛОДИМИР

Луцький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0001-6183-9879>

email: vd19688691@gmail.com

ДАВИДЕНКО НІНА

Донецький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9722-745X>

email: ninadavydenko1992@gmail.com

КОЛЛАРОВ ОЛЕКСАНДР

Донецький національний технічний університет

<http://orcid.org/0000-0001-7877-141X>

email: kollarov@gmail.com

АСПЕКТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ СИСТЕМ: ОГЛЯД ТЕНДЕНЦІЙ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТОПОЛОГІЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Стаття присвячена огляду тенденцій, пов'язаних із розвитком силових перетворювачів електричної енергії для підвищення ефективності роботи відновлюваних джерел енергії, зокрема, фотовольтаїчних систем. Виконано огляд існуючих трансформаторних та безтрансформаторних топологій силових перетворювачів, стратегій модуляції, а також основних аспектів їх функціонування та особливостей застосування в фотовольтаїчних системах різної архітектури. Встановлено, що одним із напрямків підвищення комерційної привабливості фотовольтаїчних систем потужних мережесих фотовольтаїчних систем та однофазних фотовольтаїчних систем невеликої потужності є застосування безтрансформаторних топологій перетворювачів струму (напруги). За результатами проведеного аналізу сформульовано основні завдання, що стосуються ефективного впровадження безтрансформаторних топологій перетворювачів та підвищення ефективності перетворення енергії, отриманої від PV систем, зокрема: зменшення втрат енергії в процесі перетворення; удосконалення способів усунення струмів витоку та зниження гармонійних спотворень струму; мінімізація кількості ключів, що беруть участь у процесі перетворення.

Ключові слова: фотовольтаїка, інвертор, перетворювач, топологія.

DAVYDENKO LIUDMYLA

DAVYDENKO VOLODYMYR

Lutsk National Technical University

DAVYDENKO NINA

KOLLAROV OLEKSANDR

Donetsk National Technical University

ASPECTS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC SYSTEM OPERATION: A REVIEW OF CONVERTER TOPOLOGY APPLICATION TRENDS

This article presents a review of trends related to the development of power electronic converters used in renewable energy systems. The main focus is on the use of power converters to enhance the performance and commercial appeal of photovoltaic (PV) systems. The structure of photovoltaic inverters and their role in ensuring efficient energy conversion from PV systems are analyzed. The review covers existing transformer-based and transformerless converter topologies, modulation strategies, as well as key operational aspects and application features in PV systems with various architectures. The review of development trends and the application of existing inverter topologies suggests that the use of transformerless current (or voltage) converter topologies is one of the modern approaches to increasing the commercial attractiveness of high-power grid-connected PV systems and small-scale single-phase PV systems. Multilevel inverter topologies are considered an effective solution for high-power PV systems, while microinverter technology (both multilevel and single-stage) is viewed as promising for small-scale PV applications. Based on the analysis of the main PV inverter topologies, key directions for improving the energy conversion efficiency from PV systems have been identified. The primary tasks for the effective implementation of transformerless topologies include: reducing energy losses during conversion; improving methods for eliminating leakage currents and minimizing harmonic distortions; and minimizing the number of switching elements involved in the conversion process to increase the reliability and performance of converters. This paper also discusses the challenges associated with these advancements, such as the need for robust control strategies to manage the dynamic behavior of PV systems and the importance of ensuring grid stability.

Keywords: photovoltaic, inverter, converter, topology.

Стаття надійшла до редакції / Received 26.08.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.09.2025

Вступ

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) набувають все більшого поширення для забезпечення потреб споживачів в електричній енергії [1]. Створення, швидкий розвиток, популяризація та

поширення технологій Smart Grid та концепції microgrid зумовили зростання попиту на перетворювальні пристрої, здатні перетворити напругу від ВДЕ на напругу побутової мережі із заданими параметрами якості електричної енергії. Питання удосконалення топології перетворювачів потужності та їх органів керування, методів відстеження потужності, управління генеруванням енергії від ВДЕ займають важливе місце у вирішенні завдання підвищення ефективності роботи ВДЕ та забезпечення ефективного отримання енергії.

Інтеграція ВДЕ в систему електроживлення споживачів вимагає забезпечення їх сумісності з мережею, тобто, виконання вимог щодо узгодження вихідних параметрів їх роботи (потужності, величини і форми напруги, частоти струму) як з характеристиками навантаження споживача електричної енергії, так і з параметрами промислової електричної мережі. Ефективне керування системами ВДЕ потребує використання спеціальних пристроїв силової електроніки, так званих силових перетворювачів електричної енергії, з функцією синхронізації віддачі енергії в мережу, основним призначенням яких є забезпечення відбору максимальної потужності від ВДЕ, перетворення виробленої ВДЕ енергії в енергію, придатну для використання споживачами (корисну енергію), та передачу енергії необхідної якості в електричну мережу [2]. Забезпечення реалізації концепції microgrid, яка передбачає формування автономної мережі електроживлення об'єкту, повністю відокремленої від зовнішньої електричної мережі, створило додатковий вплив на розвиток перетворювачів для систем електроживлення з використанням ВДЕ.

Дослідження у сфері розробки енергоефективних перетворювачів для систем електроживлення з використанням ВДЕ проводяться з моменту створення та широкого розповсюдження систем перетворення відновлюваної енергії. У зв'язку з важливою роллю перетворювачів в перетворенні енергії та регулюванні вихідної потужності з ВДЕ, удосконалення топологій перетворювачів енергії та їх органів керування є одним із шляхів підвищення ефективності роботи ВДЕ. Основними напрямками діяльності у галузі силової електроніки для підвищення ефективності систем електроживлення з ВДЕ є модернізація силової частини перетворювачів та створення нових систем керування, здатних задовольнити низку вимог, що 1) висуваються користувачами, 2) міжнародним та місцевим законодавством з регулювання якості напруги електричної мережі та забезпечення безпеки та захисту, а також 3) забезпечення максимальної вихідної потужності з урахуванням особливостей роботи використовуваних джерел та 4) економічної доцільності [1, 2].

Серед різних відновлюваних технологій енергія вітру і сонячна фотоелектрична енергія є комерційно найбільш привабливою і широко застосовуваною у світі [1]. Слід зазначити, що велика частка електроенергії, виробленої ВДЕ, припадає на фотоелектричні системи (понад 20 %) [3]. Фотовольтаїчні (PV) системи мають великий потенціал і набувають все більшого застосування як у вигляді великих потужних промислових сонячних електростанцій, так і невеликих дахових систем малої потужності [4], що працюють як в автономному режимі, так і разом з мережею [2]. Щоб підвищити комерційну привабливість PV-систем, особливо для підтримки концепції microgrid, значна увага приділяється як удосконаленню PV-елементів, так і розробці ефективних систем силової електроніки для перетворення енергії від PV-модулів [2]. Розвиток силової напівпровідникової електроніки та мікропроцесорної техніки сприяв створенню широкого спектру перетворювачів PV-енергії, які відрізняються між собою топологією, функціональним призначенням та сферою застосування, що зумовлює необхідність аналізу існуючого стану справ для розуміння тенденцій та шляхів їх подальшого удосконалення.

Метою статті є огляд тенденцій розвитку та особливостей застосування силових перетворювачів електричної енергії в фотовольтаїчних системах різної архітектури як важливої складової підвищення ефективності їх функціонування.

Виклад основного матеріалу

Пристрої силової електроніки, які застосовуються в PV системах називають PV інверторами [5]. Щоб зрозуміти особливості застосування пристроїв силової електроніки в PV системах, які топології PV інверторів існують і які задачі були вирішені для їх удосконалення та підвищення ефективності системи перетворення енергії, потрібно охарактеризувати основні особливості процесу передачі енергії від PV модулів в мережу споживача та існуючі архітектури PV систем.

PV модулі належать до джерел енергії, в яких енергія сонячного випромінювання перетворюється в постійний струм [4]. Генерація PV системи (потужність PV генератора) залежить від інтенсивності сонячного випромінювання [6], тому важливим є забезпечити роботу сонячної батареї з максимальною потужністю. При цьому, робоча точка PV модуля, під'єданого до навантаження, не завжди збігається з точкою максимальної потужності нелінійної вольт-амперної характеристики, яка залежить від умов освітленості та температури навколишнього середовища. Значення напруги (струму) на виході PV модулів постійно змінюється внаслідок таких факторів як погодні умови, час доби та температура панелей, і не відповідає навантаженню з точки зору амплітуди та частоти. Крім того, PV модулі зазвичай призначені для постачання енергії в мережу змінного струму. Підключення PV системи до мережі змінного струму зобов'язує до виконання низки вимог стандартів, основними з яких є «контроль генерованої потужності та забезпечення якості електроенергії, безпеки та захисту» [7]. В умовах низьких вихідних характеристик PV модулів та переривчастого характеру PV генерації

застосування пристроїв силової електроніки є важливим інтерфейсом для узгодження параметрів електроенергії, отриманої від PV модулів при широкому діапазоні зміни сонячної інтенсивності, з електричною мережею та постачання споживачам електроенергії необхідної якості [8]. Електричний зв'язок між фотоелектричними панелями та системами змінного струму забезпечують сонячні інвертори, які можуть складатися з одного перетворювача постійного-змінного (DC-AC) струму або каскаду перетворювачів, що мають один або кілька перетворювачів постійного струму (DC-DC) перед перетворювачем постійного-змінного струму (DC-AC).

Враховуючи особливості роботи первинного джерела енергії, пристрої силової електроніки PV систем повинні забезпечувати вирішення таких завдань [4, 7]: 1) підвищення напруги на виході PV системи, для чого застосовується DC-DC перетворювач [6]; 2) перетворення постійного струму від PV модулів в змінний струм стандартної форми, що забезпечує DC-AC перетворювач; 3) забезпечення роботи PV модулів в точці максимальної потужності, що є важливим моментом забезпечення ефективної роботи PV-систем. Таким чином інтеграція PV-систем в електричну мережу споживача передбачає два етапи перетворення енергії, що складають типову двоступеневу схему фотоелектричного інвертора PV системи [9, 10, 11].

Основною вимогою, визначеною особливостями роботи PV джерела енергії, є забезпечення неперервної роботи PV модулів в точці максимальної потужності. DC-DC перетворювач реалізовує завдання як підвищення напруги (струму) [2], так і забезпечення роботи PV системи з максимальною вихідною потужністю [6] для підвищення її ефективності. Процес знаходження вихідної вольт-амперної характеристики у точці максимальної потужності є автоматизованим. Для цього застосовується алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT), вбудований в контролер MPPT [7]. Контролер MPPT витягує максимальну енергію з PV генератора та керує стохастичною поведінкою PV генерації.

У фотоелектричних енергосистемах DC-DC перетворювач є важливим компонентом вихідної потужності. Перетворювачі напруги DC-DC buck, boost або buck-boost є одними з найпопулярніших перетворювачів, які використовуються в фотоелектричній системі для зміни значення вихідної потужності [12]. Відповідно до потреб системи, вони зменшують або збільшують номінальну потужність, таким чином узгоджуючи характеристики PV системи з характеристиками навантаження. Слід зазначити, що DC-DC перетворювачі PV системи, як правило, орієнтовані на оптимізацію процесу перетворення енергії первинного джерела, їх вихідні електричні параметри є функцією сонячного випромінювання і не залежать від режимних параметрів електричної мережі. Відсутність зворотного зв'язку означає, що вихідні параметри фотоелектричної системи не будуть забезпечувати підтримку параметрів (у вигляді інерційного відгуку) мережі. DC-DC перетворювач відповідає за відокремлення робочої точки фотоелектричної системи від керування мережею фотоелектричного інвертора шляхом увімкнення відповідної середньої напруги на стороні постійного струму інвертора. Завданням DC-AC інвертора є «перетворення величини та частоти напруги джерела до фіксованої амплітуди та частоти змінного струму» мережі [6]. Отже, для відбору необхідного обсягу енергії до PV системи приєднують підвищувальний DC-DC перетворювач, а гнучке регулювання параметрів якості електроенергії мережі здійснюється DC-AC інвертором. Залежно від архітектури PV системи PV інвертор може мати один або кілька DC-DC перетворювачів.

Разом з тим, в PV інверторах застосовуються одноступінчасті схеми без DC-DC перетворювача, що сприяє підвищенню ефективності та зниженню ваги та вартості за рахунок зменшення кількості елементів [10, 13]. В таких схемах DC-AC інвертор, крім перетворення постійного струму від PV-системи в змінний струм та контролю струму мережі, забезпечує відстеження точки максимальної потужності та підвищення напруги [7]. Разом з тим, недоліком таких схем є «низький діапазон напруги постійного струму, низька якість електроенергії» [9].

Залежно від режиму роботи PV системи (автономно чи з мережею) розрізняють [14]:

- автономні сонячні інвертори, не під'єднані до зовнішньої електричної мережі, призначені для автономних фотоелектричних систем;
- мережеві сонячні інвертори, що працюють синхронно з централізованою мережею електропостачання та мають функцію автоматичної синхронізації вихідних параметрів PV системи (амплітуди напруги, струму) з аналогічними параметрами електричної мережі з забезпеченням необхідних значень частоти і фази. Крім своїх прямих функцій, такі пристрої забезпечують регулювання основних параметрів мережі: частота напруги, амплітуда тощо;
- гібридні сонячні інвертори, які поєднують властивості автономних і мережевих пристроїв. Такий інвертор має велику кількість налаштувань для оптимізації роботи сонячної системи від загальної електричної мережі та за наявності акумуляторних батарей.

Хоча вихідний каскад у всіх типів інверторів подібний, існує відмінність в схемі керування. Керування PV інверторами (струму та напруги) здійснюється за принципом 1) формування мережі та 2) слідування за мережею [9]. Інвертори, що слідує (стежать) за мережею, покладаються на вимірювання кут зсуву напруги в точці підключення, яка має бути синхронізована з напругою мережі. За результатами вимірювання фазовий кут напруги та частота узгоджуються за допомогою фазового автопідстроювання напруги, який згодом використовується контролером струму. Наразі більшість

комерційних мережевих PV інверторів працюють як джерела, що стежать за мережею, та регулюють свою вихідну потужність за допомогою фазового автопідстроювання напруги. Таким чином, вони відстежують кут зсуву напруги або частоту мережі та не здійснюють активний контроль власної вихідної частоти. Тобто мережевий PV інвертор працює синхронно з промисловою мережею, використовуючи за генератор частоти саму мережу. На противагу цьому, інвертори, що формують мережу, використовують принцип контролю спаду напруги для синхронізації мережі та регулюють напругу в точці підключення. Частота та величина цієї напруги забезпечуються контурами керування активною та реактивною потужністю на основі контролю спаду напруги. Джерело, що формує мережу, активно контролює свою частоту та широко використовується в мікромережах [9].

Залежно від форми вихідного сигналу розрізняють DC-AC інвертори синусоїдного типу («NV-P» інвертори), що генерують вихідний сигнал практично без спотворень синусоїдної форми кривої, та інвертори з модифікованою синусоїдою («NV-M» інвертори), вихідний сигнал яких по формі близький до меандру. Інвертори з модифікованою синусоїдою мають нижчу вартість порівняно з інверторами синусоїдного типу. Проте, значне спотворення синусоїдної форми кривої вихідної напруги є їх суттєвим недоліком, що значно обмежує область їх застосування. Форма вихідного сигналу автономних інверторів зазвичай не є критичною. Проте, до вихідного сигналу мережевих інверторів висувуються жорсткі вимоги. Типовий DC-AC інвертор повинен забезпечувати належну синхронізацію PV генерації з мережею та підтримувати параметри якості електроенергії в електричній мережі. Наявність в спектрі напруги значних рівнів вищих гармонік негативно впливає на роботу більшості електроприймачів. Тому перевага надається PV інверторам, що забезпечують синусоїдну форму вихідної напруги. При цьому, система керування DC-AC інвертор будується так, щоб струм на виході мав синусоїдну форму з низьким значенням гармонійного спотворення струму (THD) (відповідно до вимог стандарту IEEE 1547 значення THD має бути менше 5%).

Слід зазначити, що між фотоелектричними панелями та землею утворюється паразитна ємність, на якій через комутаційний характер фотоелектричних перетворювачів генерується високочастотна напруга. Ця напруга зумовлює виникнення так званого струму витоку на землю, поява якого залежно від топології інвертора та використовуваного методу модуляції спричинює низку проблем [15, 16]: небажане спрацювання системи захисту; поява електромагнітних перешкод та погіршення електромагнітної сумісності; зменшення терміну служби фотоелектричних модулів; гармонійні спотворення струму, що подається в мережу; ураження електричним струмом людей, які торкаються фотоелектричного модуля.

PV інвертор має виконувати низку захисних функцій, зокрема, контролювати підключення PV системи до мережі, забезпечувати ізоляцію фотоелектричного масиву від мережі [6]. Зважаючи на такі широкі завдання топології PV інверторів класифікують як за кількістю стадій обробки енергії, так і за наявністю трансформатора для забезпечення гальванічної розв'язки між клемми панелі та лінією змінного струму [2, 9, 17].

Топології PV інвертора з трансформатором застосовуються для розділення силових кіл систем електроживлення та користувацької мережі відповідно до вимог безпеки, що визначені стандартами [11, 15]. Наявність трансформатора в схемі забезпечує захист від мережевих подій, зменшення струму витоку та запобігає потраплянню постійного струму в електромережу через ефект насичення. Використання топології PV інверторів з наявністю гальванічної розв'язки передбачає встановлення трансформатора у складі схеми підвищувального перетворювача - на стороні високої частоти (HF) або на виході інвертора - на стороні низької частоти (LF) [11, 18]. Трансформатор у складі підвищувального перетворювача працює на підвищеній частоті, що забезпечує зменшення його габаритних розмірів, проте збільшує втрати. Трансформатор, встановлений на виході інвертора, працює на напрузі і частоті мережі, має менші втрати, але є громіздким. Разом з тим, і у випадку топології з низькочастотним трансформатором, і у випадку топології з високочастотним трансформатором встановлення трансформатора хоча й забезпечує відсутність струмів витоку та безпеку, проте знижує ККД [3] та ефективність перетворення енергії отриманої від PV систем [5]. Крім того низькочастотні трансформатори вимагають великого простору для розміщення, збільшують вагу PV інвертора, що ускладнює його установку і збільшує витрати [5].

Безтрансформаторні топології PV інверторів дозволяють уникнути вказаних проблем. Вилучення трансформатора дозволяє зменшити власне споживання інвертора та підвищити ефективність системи перетворення до 98 %, тоді як для трансформаторної топології PV інвертора ефективність складає 92-95 % [19]. Крім того, якщо рівень вихідної напруги PV масиву відповідає вимогам мережі та відсутні вимоги щодо забезпечення безпеки мереж електроживлення можливе застосування безтрансформаторних топологій без підвищення напруги у колі постійного струму. Такі топології фактично містять лише інвертор напруги, а їх перевагою є мала вага, висока надійність та мінімальні втрати, рівень яких залежить лише від параметрів інвертора. В якості вихідного інвертора в такій топології широко застосовуються багаторівневі інвертори напруги для зменшення комутаційних втрат та гармонійних спотворень. Безтрансформаторні топології PV інверторів мають меншу вартість порівняно з трансформаторними. Проте, безтрансформаторні топології PV інверторів мають низку інших недоліків. Оскільки в безтрансформаторних топологіях функції трансформатора виконує

електроніка, то більш уразливі до поломок, оскільки електронні блоки менш надійні, ніж пасивний трансформатор. Головним недоліком безтрансформаторних топологій PV інвертора є наявність струму витоку між PV масивом та землею і, як наслідок, спотворення вихідного струму [3] та можливість потрапляння гармонік в мережу змінного струму.

Вибір топології перетворення сильно залежить від конфігурації фотовольтаїчної системи та її потужності [2]. PV система може складатись з одного PV модуля, а може містити їх велику кількість, що утворюють PV масив. Як наслідок потужність PV системи змінюється в широких межах (від сотень Вт для малих PV систем, призначених для житлових застосувань, до кВт і МВт для великих промислових сонячних електростанцій) [5, 7, 19]. Кількість PV модулів та їх потужність визначає загальну потужність PV системи, а отже і схему її приєднання до електричної мережі. Різний діапазон потужності зумовлює застосування різних архітектур PV систем, розвиток яких відбувався від центральної архітектури (в якій всі PV модулі PV системи під'єднано до одного PV інвертора) до струнної (яка є зменшеним варіантом центральної архітектури і в якій кожен рядок PV модулів (кожна струна) під'єднаний до свого PV інвертора, всі струни працюють на мережу паралельно) та багатострунної (яка поєднує струнну та центральну архітектуру) [6, 7, 20, 21]. Крім того, популяризація концепції microgrid зумовила розвиток технології підключення PV модулів за принципом «під'єднані та працюють», яка реалізована у архітектурі «модуль змінного струму» [20, 22].

Аналізу переваг та недоліків різних архітектур PV систем, особливостей їх застосувань присвячено низка праць [5, 7, 18, 19, 21], тому достатнім буде коротко охарактеризувати основні з них. Перевагами центральної архітектури є порівняно низька вартість питомої встановленої потужності інверторів PV системи, відносна простота конструкції та обслуговування. Проте, така архітектура має низку недоліків, основними з яких є: високі спади напруги та втрати потужності в мережі постійного струму через значну протяжність з'єднувальних проводів між PV модулями та інвертором; різкі коливання генерованої потужності у випадку затінення частини PV модулів; низька надійність та гнучкість; низька ефективність використання PV системи при наявності PV модулів різних типів. Застосування струнної архітектури забезпечує зменшення спадів напруг та втрат потужності в мережі постійного струму за рахунок меншої довжини провідників від PV модулів до інверторів. Багатострунна архітектура має широкі можливості для зміни кількості підключених PV модулів та рівня вихідної потужності. Архітектура «модуль змінного струму» має найбільшу стійкість до ефекту часткового затінення та мінімізує втрати напруги завдяки скороченню довжини провідників постійного струму. Проте, у випадку великої кількості PV модулів ускладнюється обслуговування PV системи та зростає її вартість через велику кількість інверторів.

Архітектура PV системи визначає тип сонячного інвертора для інтеграції PV системи в мережу змінного струму, зокрема, існують такі конфігурації [7]:

- центральний, який забезпечує MPPT для всього PV масиву і недоліком якого є низька ефективність у випадку затінення частини PV модулів;
- струнний (стрігговий), до якого був оновлений центральний інвертор для підвищення ефективності MPPT і який забезпечує MPPT для окремого ряду (окремої струни) PV модулів;
- багатострунний, в якому MPPT відслідковується DC-DC перетворювачем кожного ряду PV модулів, а потім постійний струм перетворюється в змінний в центральному інверторі;
- модуль вбудованого інвертора (мікроінвертор) передбачає інтеграцію інвертора та фотоелектричного модуля в один електричний пристрій. Одноступінчастий самокомутований DC-AC інвертор підтримує MPPT на стороні DC для кожного PV модуля [21], що усуває проблему неефективного MPPT та забезпечує максимально ефективне використання потужності PV модулів, необхідний коефіцієнт потужності, підвищує напругу на стороні AC [14]. Для полегшення MPPT можливе застосування двоступінчастої схеми мікроінвертора [22].

Застосування оптимізаторів потужності в PV системах є однією з нових топологій PV інвертора, яка представляє собою удосконалення багатострунних інверторів доповнених перевагами мікроінверторів [5]. DC-DC перетворювач з'єднано з PV модулем, що забезпечує MPPT для кожного модуля, що забезпечує більш високу ефективність і ширший діапазон напруги MPPT. PV модулі з оптимізатором PV потужності послідовно з'єднуються в струни, а потім з струнним інвертором. Така конфігурація забезпечує підвищення ККД PV інвертора та всієї PV системи, а також її меншу надійність, кількість компонентів, простоту. Проте, вартість такої системи перетворення є висока, а також існує обмеження довжини струни, підвищена вимога до системи безпеки, через ризик виникнення дуги на проводах постійного струму між фотоелектричними модулями і стрігговим інвертором [5].

Залежно від застосувань PV інвертор може бути однофазним, що є більш поширеним для невеликих PV систем, або трифазним, що зазвичай застосовується для більш потужних систем (понад 5 кВт) [6]. Центральну топологію PV інвертора використовують для потужних комерційних або комунальних трифазних PV систем (понад 30 кВт), а багатострунну топологію PV інвертора використовують для комерційних або житлових трифазних (або однофазних систем потужністю 10-30 кВт [7, 19, 23]. Для трифазних або однофазних житлових та комерційних PV систем потужністю 1-10 кВт використовують струнні PV інвертори. Багатострунні інвертори з оптимізаторами та

мікроінвертори використовують для малопотужних (до 1 кВт) житлових PV систем [7, 19, 23]. Мікроінвертори, як правило, використовуються в PV системах невеликої потужності (200-700 Вт), призначених для житлових застосувань [7]. Слід зазначити, що застосування мікроінверторної технології є перспективним напрямком [22]. Кожен PV модуль в топології AC module виробляє електроенергію змінного струму, що підвищує ефективність PV модулів, забезпечує більш гнучке розташування PV модулів, їх сумісність та надійність PV системи, а також можливість розширення PV системи.

Існуюча велика кількість розроблених схем топологій PV інверторів для PV систем різних архітектур спирається на низку базових топологій [7, 9].

Основні топології центральних PV інверторів є такі [7]:

- дворівневі, такі як 1) інвертор джерела напруги (voltage source inverter: VSI) - така топологія має малий розмір, просту конструкцію і високу ефективність, забезпечує легкість управління та має низьку вартість [3, 9], тому є однією з традиційних топологій мережевих PV інверторів, та 2) інвертор джерела струму (current source inverter: CSI) – така топологія має високу надійність, забезпечує управління постійним струмом та підвищення напруги [9], тому його застосування не потребує додаткового перетворення струму для подачі в мережу. Зазвичай, використовуються в PV системах невеликої потужності;
- багаторівневі, що дозволяють отримати синусоїду правильної форми, зокрема, трирівневі, такі як: із затиском нейтральної точки (neutral point clamped: NPC), літаючий конденсатор (Flying capacitor: FC), каскад напівмостів (cascaded half-bridge: H-bridge), які є найбільш часто використовуваними топологіями;
- топології Z-source з трансформатором та без трансформатора.

Базовими топологіями струнних PV інверторів є напівміст (H-bridge: HB) або повний міст (Full-bridge: FB) [7]. Інвертори на основі нейтральної точки (NPC) забезпечують знижену напругу на напівпровідниках, нижчий вихідний вміст гармонік і їх використовують як топології HB [24]. Багато існуючих топологій з трансформатором та без трансформатора для струнних та мультиструнних PV інверторів є удосконаленням базових топологій. Такими топологіями струнних PV інверторів є топології [7]: Low frequency T/f, H4, High frequency T/f, H5, H6, HERIC (highly efficient and reliable inverter concept - концепція високоефективного та надійного інвертора) є, а багатострунних PV інверторів – топології: High frequency T/f, Boost-based VSI, Boost-based-three level NPC, H-bridge, Two-stage non-isolated buck-boost.

Основні топології мікроінверторів є такі [7]:

- з трансформатором, такі як: DC-link: Push-pull (двотактні), Fly-back, H-bridge; псевдо DC-link: Fly-back, Full-bridge, Push-pull; без DC-link: напівхвильовий (Half-wave) та повнохвильовий циклоперетворювач (Full-wave cyclo-converters);
- без трансформатора, такі як: DC-link: Full-bridge, H-bridge, Three-level converters; псевдо DC-link: Full-bridge, H-bridge, Three-level converters; одноступенева: Differential-mode operation, Quasi-Z-source.

Основними топологіями підвищуючих DC-DC перетворювачів, які забезпечують регулювання напруги постійного струму і перетворення її в напругу необхідного рівня, згідно [9] є топології на основі нерезонансних, квазірезонансних та резонансних схем.

Нерезонансні DC-DC перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) є одними з найбільш застосовуваних топологій для PV систем завдяки низькій вартості, невеликій кількості елементів та відносній простоті проектування та реалізації. Однак, такі проблеми, як жорстке перемикання, сильне зворотне відновлення у вихідному діоді, обмежена ефективність, низька щільність потужності та низький коефіцієнт підсилення напруги, роблять їх життєздатним варіантом для малоопотужних PV систем. Крім того, тенденція до збільшення частоти комутації, досягнення оптимальної ваги, розміру, вартості та щільності потужності не повністю узгоджується з ШІМ-перетворювачами. У світлі цих тенденцій для малоопотужних PV систем пропонується застосовувати інші топології нерезонансних перетворювачів, зокрема, перетворювачі прямого та зворотного перемикання, топології з безперервним вхідним струмом (SEPIC, Ćuk та Zeta). Проте, і ці топології мають як переваги, так і низьку недоліків.

Квазірезонансні перетворювачі постійного струму забезпечують можливість роботи PV системи з високою частотою комутації, високим коефіцієнтом підсилення напруги, низьким вхідним пульсаціями, низьким коефіцієнтом трансформації трансформатора та низьким струмовим навантаженням на перемикачі, що зменшує розмір магнітних компонентів та збільшує щільність потужності. Найбільш часто використовуваними топологіями є повномостові (FB), напівмостові (Half-bridge) та двотактні (push-pull) перетворювачі, які забезпечують м'яку комутацію та зменшують негативний вплив високих пульсацій струму, забезпечуючи високу ефективність у значному діапазоні номінальних потужностей [9].

Резонансні перетворювачі потужності підходять для застосування в PV системах середньої та високої потужності та мають низьку переваг порівняно зі звичайними ШІМ-перетворювачами, зокрема, низькі електромагнітні перешкоди, низькі втрати на перемикання, малий об'єм та вага, висока робоча

частота. Існує дві категорії резонансних перетворювачів: резонансні перетворювачі постійного струму з живленням від напруги, які мають меншу кількість компонентів, вищий ККД і роботу на вищій частоті; і резонансні перетворювачі постійного струму з живленням від струму, які не мають пульсуючого вхідного струму, але вимагають великої котушки індуктивності для живлення інвертора [9].

З метою підвищення ефективності функціонування PV систем пропонується низка рішень щодо удосконалення схем PV інверторів ізольованих та неізольованих топологій, методів та технологій контролю та управління для зменшення неузгодженості PV модулів, струмів витоку та втрат в системі перетворення, зниження пульсацій вихідної напруги та гармонійних спотворень струму, підвищення щільності потужності, якості енергії та продуктивності системи [8, 9, 13, 16, 17, 20, 22, 24, 25]. Безтрансформаторні топології PV інверторів отримують все більше визнання та застосування як в мережевих PV системах [16, 24], так і в однофазних PV системах невеликої потужності [25] завдяки високій ефективності, малому розміру та вазі PV інвертора та низькій вартості.

Разом з тим, в безтрансформаторній PV системі коливання напруги в точці між сіткою та фотоелектричним масивом, тобто синфазна напруга (напруга загального режиму - common-mode voltage: CMV), зумовлюють великі струми витоку, що протікають через паразитні конденсатори [8]. Необхідність надійної та компактної дволінійної схеми роз'єднання потужності є однією з головних проблем PV-інверторів без трансформаторів. Крім того, безтрансформаторні топології інверторів вимагають великої кількості напівпровідникових компонентів для підтримки прийняттого рівня якості електроенергії, що збільшує втрати потужності і, таким чином, знижує загальну ефективність. Для вирішення цих проблем пропонуються удосконалення компоновки різних схем DC-DC перетворювачів та DC-AC інверторів для зменшення складності, підвищення надійності та продуктивності системи перетворення енергії [16]; стратегії модуляції та усунення струму витоку, а також тенденції їх розвитку та застосування [3, 7, 15, 19]. Оскільки амплітуда CMV залежить від вибору векторів перемикачів в одній топології, то запропоновано різні модифіковані методи широтно-імпульсної модуляції, які забезпечують зменшення CMV за допомогою активних векторних станів та частково нульових векторних станів для генерації вихідного сигналу (тоді як традиційні методи ШІМ максимально використовують усі векторні стани), зокрема, переривчаста широтно-імпульсна модуляція (DPWM - використовує всі стани активних векторів та часткові нульові вектори для усунення CMV), активна нульова широтно-імпульсна модуляція (AZSPWM), ближня широтно-імпульсна модуляція (NSPWM - використовує суміжні стани активних векторів для генерації вихідного сигналу, який відповідає вимогам завдання) та віддалена широтно-імпульсна модуляція (RSPWM - використовує стани активних векторів - парні або непарні вектори - що призводять до однакової амплітуди CMV) [8]. Крім того, для зменшення CMV пропонуються різні модифікації схеми керування. Такі топології інверторів як FB, NPC, активний NPC, H5, оптимізована H5 (oH5), H6, H8, FC, HERIC розроблено для пом'якшення проблем, пов'язаних з безтрансформаторною роботою мережевих систем [17]. Причому, основний принцип модифікації топології полягає у введенні нових шляхів для ізоляції PV масиву від мережі [8].

Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв в PV системах середньої та великої потужності значну популярність здобули багаторівневі PV інвертори напруги. Багаторівневі PV інвертори базуються на концепції використання кількох джерел постійного струму і численних малопотужних напівпровідникових перемикачів для синтезу сигналу напруги ступінчастої форми та спрямовані на досягнення більших рівнів виробництва електроенергії [26]. Для отримання високої вихідної напруги застосовуються різні алгоритми управління силовими вимикачами при об'єднанні кількох джерел постійного струму. Для вирішення проблеми витоку струму в безтрансформаторних багаторівневих інверторах застосовуються різні методи, які передбачають: 1) модуляційні (наприклад, стратегії біполярної модуляції шляхом підтримки постійної синфазної напруги за рахунок ефективності перетворення та якості вихідного струму); 2) топологічні (наприклад, у топології повного мосту застосовуються додаткові перемикачі постійного або змінного струму); 3) фільтрувальні (наприклад, застосування обхідних контурів з низьким опором для високочастотних синфазних шумів) рішення [26].

Багаторівневі PV інвертори напруги розглядаються як рішення для систем, вимогливих до високої якості енергії та динамічних характеристик, що охоплюють діапазон потужностей від 1 до 30 МВт [26]. Основною перевагою багаторівневих інверторів є покращена форма вихідної напруги та менші втрати в силовій частині. Разом з тим недоліками вказаних пристроїв є збільшення кількості силових ключів та ускладнення системи керування комутацією. Ускладнення топології багаторівневих інверторів та збільшення кількості компонентів може призвести не лише до збільшення об'єму та ваги PV інвертора, а й до зниження ефективності системи перетворення енергії [20]. Слід зазначити, що у випадку багаторівневої топології PV інвертора важливим моментом є вирішення питання як розробки схеми силового кола з меншою кількістю перемикачів (наприклад, завдяки усуненню високочастотних переходів [27] або використанню конструкції підсиленого багаторівневого перетворювача постійного струму: Boosted Multilevel DC Line Converter), так і стратегії перемикачів, що визначає його продуктивність.

Мікроінверторна технологія (як багатоступінчаста так і одноступінчаста) є перспективною для застосування в PV системах малої потужності, оскільки забезпечує гнучке розташування PV модулів, їх сумісність та надійність PV системи. При цьому, топологія безтрансформаторного інвертора фотоелектричних системи має вирішальне значення для застосування малих сонячних електростанцій, підключених до мережі.

Висновки

Аналіз літератури вказує на перспективність безтрансформаторних топологій та великий інтерес до вдосконалення таких схем з метою зниження ваги і вартості систем перетворення з одночасним підвищення ефективності відбору та перетворення потужності від PV систем. Дослідження, що стосуються підвищення ефективності перетворення енергії, отриманої від PV систем, виконуються за такими основними напрямками: 1) удосконалення схем для зменшення їх вартості та підвищення надійності; 2) розробка способів усунення або зменшення струмів витоку; 3) удосконалення законів контролю та управління перетворювачами.

Основними завданнями, які не втрачають своєї актуальності і потребують вирішення для підвищення ефективності систем силових перетворювачів, є зменшення втрат енергії в процесі перетворення напруги (струму), отриманого від PV модулів, а також підвищення надійності та продуктивності перетворювачів. Потребують подальшого дослідження та удосконалення способи усунення струмів витоку та зниження гармонійних спотворень струму для забезпечення якості електричної енергії в мережі. Із схемотехнічних рішень, що дозволяють водночас зменшити втрати енергії та підвищити загальну надійність перетворювача, є мінімізація кількості ключів, що беруть участь у процесі перетворення.

Література

1. S. Zeng, Y. Liu, C. Liu, and X. Nan, "A review of renewable energy investment in the BRICS countries: History, models, problems and solutions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 860–872, 2017. doi:10.1016/j.rser.2017.03.016
2. P. Mohanty, "Role of Power Converters in Distributed solar Power Generation", *Journal of Automation and Control Engineering*, vol.2(1), pp. 38-43, 2014. doi: 10.12720/joace.2.1.38-42
3. A.A. Estévez-Bén, A. Alvarez-Diazcomas, G. Macias-Bobadilla, J. Rodríguez-Reséndiz, "Leakage Current Reduction in Single-Phase Grid-Connected Inverters—A Review". *Applied Sciences*, vol. 10, 2384, 2020. doi:10.3390/app10072384
4. C.H. Han, B.K. Ko, S.Y. Song, and G. Jang, "Application of PV Inverter on distribution system with high penetration of PV", *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 7(1), pp. 263–268, 2017. doi:10.1080/22348972.2017.1373726
5. M.E.T. Souza Junior, and L.C.G. Freitas, "Power Electronics for Modern Sustainable Power Systems: Distributed Generation, Microgrids and Smart Grids—A Review", *Sustainability*, vol. 14, 3597, 2022. doi:10.3390/su14063597
6. W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas, "Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems. Part 1: Systems and Topologies", Technical Report. NREL/TP-581-42672. National Renewable Energy Laboratory. March 2008. Prepared under Task No. WW2C.1000.
7. D. Kolantla, S. Mikkili, S.R. Pendem, and A.A. Desai, "Critical review on various inverter topologies for PV system architectures", *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, pp. 3418-3438, 2020. doi:10.1049/iet-rpg.2020.0317
8. W. Liu, Y. Yang, T. Kerekes, E. Liivik, D. Vinnikov, and F. Blaabjerg, "Common-Mode Voltage Analysis and Reduction for the Quasi-Z-Source Inverter with a Split Inductor", *Applied Sciences*, vol. 10, 8713, 2020. doi:10.3390/app10238713
9. O.M. Rodríguez-Benítez, J.A. Aquí-Tapia, I. Ortega-Velázquez, G. Espinosa-Pérez, "Current Source Topologies for Photovoltaic Applications: An Overview", *Electronics*, vol. 11, 2953, 2022. doi:10.3390/electronics11182953.
10. C.-L. Shen, and J.-C. Su, "Grid-Connection Half-Bridge PV Inverter System for Power Flow Controlling and Active Power Filtering", *International Journal of Photoenergy*, vol. 2012, 760791, 2012. doi:10.1155/2012/760791
11. C. Satish Chandra, and S. K. Jain, "A Review on Single-Phase Transformerless Inverter Topologies for PV Applications" 2021 *IEEE International Conference on Control, Automation, Power and Signal processing (CAPS2021)*, Jabalpur, India, 2021, pp. 1-6. doi: 10.1109/CAPS52117.2021.9730648
12. S. Sarwar, M.Y. Javed, M.H. Jaffery, M.S. Ashraf, M.T. Naveed, and M.A. Hafeez, "Modular Level Power Electronics (MLPE) Based Distributed PV System for Partial Shaded Conditions", *Energies*, vol.15, 4797, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15134797>
13. M. T. Tsai, C. L. Chu, C. M. Mi, J. Y. Lin, and Y. C. Hsueh, "Designing a Single-Stage Inverter for Photovoltaic System Application", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2013, 912487, 2013. doi:10.1155/2013/912487

14. A. El Aroudi, R. Haroun, M. Al-Numay, and M. Huang, "Multiple-Loop Control Design for a Single-Stage PV Fed Grid-Tied Differential Boost Inverter", *Applied Sciences*, vol. 10, 4808, 2020. doi:10.3390/app10144808
15. M.A. Gaafar, M. Orabi, A. Ibrahim, R. Kennel, and M. Abdelrahem, "Common-Ground Photovoltaic Inverters for Leakage Current Mitigation: Comparative Review", *Applied Sciences*, vol. 11, 11266, 2021. doi:10.3390/app112311266,
16. H. Qamar, H. Qamar, N. Korada, and R. Ayyanar, "240°-Clamped PWM Applied to Transformerless Grid Connected PV Converters With Reduced Common Mode Voltage and Superior Performance Metrics", in *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, pp. 153-167, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3155053
17. M. Halim Mondol, M. Kamal Hosain, and M. Shamim Anower, "A New Cross-Six Inverter for Transformerless Grid-Connected Photovoltaic Systems", *2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*, pp. 1-6, 2021. doi: 10.1109/ACMI53878.2021.9528274.
18. F. Iov, M. Ciobotaru, D. Sera, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Power Electronics and Control of Renewable Energy Systems", *2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. P-6-P-28, 2007. doi:10.1109/PEDS.2007.4487668.
19. K. Zeb, I. Khan, W. Uddin, M.A. Khan, P. Sathishkumar, T.D.C. Busarello, I. Ahmad, and H.J. Kim, "A Review on Recent Advances and Future Trends of Transformerless Inverter Structures for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems", *Energies*, vol. 11, 1968, 2018. doi:10.3390/en11081968.
20. D. Mathew, and R. Ch. Naidu, "Investigation of single-stage transformerless buck-boost microinverters", *IET Power Electronic*, vol. 13, Iss. 8, pp. 1487-1499, 2020. doi:10.1049/iet-pel.2019.1237.
21. L. Hassaine, E. OLias, J. Quintero, and V. Salas, "Overview of power inverter topologies and controls structures for grid connected photovoltaic systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.30, pp.796–807, 2014. doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.005
22. H.A. Sher, and K.E. Addoweesh, "Micro-inverters — Promising solutions in solar photovoltaics", *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, pp. 389–400, 2012. doi:10.1016/j.esd.2012.10.002.
23. F. Blaabjerg, D.M. Ionel, *Renewable Energy Devices and Systems with Simulations in MATLAB and ANSYS*; CRC Press: London, UK, 2017.
24. F. B. Grigoletto, "Five-Level Transformerless Inverter for Single-Phase Solar Photovoltaic Applications", in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 3411-3422, 2020. doi:10.1109/JESTPE.2019.2891937
25. M.R. Aalami, M. Zarif, M. Alishahi, A.A. Shojaei, and H.H. Doostabad, "Flying-inductor-cell based inverters for single-phase transformerless PV applications", *IET Power Electronics*, vol.16, pp. 75–91, 2023. doi:10.1049/pel2.12364
26. A. Bughneda, M. Salem, A. Richelli, D. Ishak, and S. Alatai, "Review of Multilevel Inverters for PV Energy System Applications", *Energies*, vol. 14, 1585. 2021. doi:10.3390/en14061585
27. S. Jain and V. Sonti, "A Highly Efficient and Reliable Inverter Configuration Based Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 4, pp. 2865-2875, April 2017, doi:10.1109/TIE.2016.2633537.