

АНАЛІЗ ВИБОРУ ТИПУ ІНВЕРТОРІВ ДЛЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ: ПЕРЕТВОРЮВАЧІ НАПРУГИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧІ СТРУМУ, ГІБРИДНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Вінницький національний технічний університет;

Анотація

У роботі проаналізовано три основні топології інверторів для фотоелектричних станцій: перетворювачі напруги (VSI), перетворювачі струму (CSI) та гібридні перетворювачі (ZSI/qZSI). Розглянуто алгоритми MPPT, особливості схемотехніки енергетичних буферних ланок, методи просторово-векторної модуляції та критерії вибору типу інвертора залежно від умов експлуатації.

Ключові слова: фотоелектрична станція, інвертор, VSI, CSI, MPPT, SVPWM, THD, гібридний інвертор, ZSI, HESS.

Abstract

The paper analyzes three main inverter topologies for photovoltaic stations: voltage source inverters (VSI), current source inverters (CSI), and hybrid inverters (ZSI/qZSI). MPPT algorithms, energy buffer circuit features, space vector modulation methods, and inverter type selection criteria depending on operating conditions are considered.

Keywords: photovoltaic station, inverter, VSI, CSI, MPPT, SVPWM, THD, hybrid inverter, ZSI, HESS.

Вступ

Активна інтеграція фотоелектричних станцій (ФЕС) в енергосистему України зумовлює зростаючу потребу у правильному виборі типу інвертора [1, 2]. Фотомодулі генерують постійний струм (DC), тоді як електричні мережі функціонують на змінному струмі (AC), що робить інвертор ключовим елементом будь-якої ФЕС. Світовий ринок PV-інверторів у 2024 році оцінювався у 16,3 млрд дол. США з прогнозом зростання до 39 млрд дол. до 2033 року з річним темпом приросту 10,2%. Невірний вибір топології знижує ККД станції на 2–5%, збільшує рівень гармонічних спотворень (THD) понад нормативний поріг 5% за стандартом IEEE 1547-2018 [8] та скорочує термін служби обладнання. Метою роботи є порівняльний аналіз топологій VSI, CSI та гібридних перетворювачів і обґрунтування критеріїв їхнього раціонального вибору [4, 7].

Результати дослідження

Залежно від структури DC-ланки інвертори поділяються на три категорії [4, 10]. У перетворювачах напруги (VSI) паралельно джерелу живлення встановлюється конденсаторна батарея, яка стабілізує напругу та поглинає пульсації струму від інверторного моста. Електролітичні конденсатори, що застосовуються у VSI, мають термін служби 10–15 років і є основним джерелом відмов цієї топології [10]. У перетворювачах струму (CSI) послідовно з джерелом живлення встановлюється дросель постійного струму, що підтримує стабільний вхідний струм. На відміну від конденсаторів, дроселі не піддаються тепловій деградації, забезпечуючи ресурс до 25 років, що відповідає повному життєвому циклу фотомодулів, проте мають значно більші габарити та масу [4, 10].

Управління обома типами інверторів здійснюється через алгоритм відстеження точки максимальної потужності (MPPT) [11]. Метод інкрементальної провідності (INC) забезпечує вищу динамічну точність порівняно з класичним алгоритмом збурення та спостереження (P&O): він виключає постійні коливання робочої точки навколо оптимуму та миттєво реагує на різкі зміни хмарності, що робить його промисловим стандартом для інверторів потужністю понад 30 кВт [11, 4, 1]. Формування якісної синусоїди на виході забезпечується просторово-векторною ШІМ (SVPWM), яка підвищує коефіцієнт використання напруги DC-ланки на 15% порівняно з класичною синусоїдальною ШІМ та суттєво

знижує рівень THD вихідного струму [4, 7, 12].

Ключова відмінність топологій виявляється при аварійних режимах. При короткому замиканні у мережі 0,4 кВ конденсатор DC-ланки VSI миттєво розряджається через силові транзистори, що вимагає надшвидкодійних систем захисту з часом реакції 1–3 мкс. Вхідний дросель CSI природно обмежує швидкість наростання аварійного струму, надаючи системі захисту кілька мілісекунд для безпечного зняття імпульсів керування без ризику руйнування напівпровідникових кристалів [4, 10, 8]. Застосування спеціалізованих RB-IGBT у топології CSI додатково знижує статичні втрати провідності на 25–30% порівняно зі стандартною схемою послідовного з'єднання транзистора та діода [4, 13].

Гібридні перетворювачі типу qZ-Source (qZSI) усувають головний недолік обох класичних топологій — неможливість одночасного підвищення та зниження напруги в один каскад без додаткових DC/DC перетворювачів [9, 13]. Унікальність цієї топології полягає в тому, що інверторний міст може штатно перебувати у стані наскрізного короткого замикання (shoot-through state), коли енергія накопичується в дроселях імпедансної LC-ланки з подальшим підвищенням вихідної напруги. Чим більший відносний час цього стану, тим вищий коефіцієнт підвищення напруги на виході [9]. Інтеграція qZSI з гібридними системами накопичення HESS (акумуляторні батареї разом із суперконденсаторами) збільшує термін служби АКБ на 30–40% завдяки розподілу спектра потужності: базове навантаження спрямовується на АКБ, а пікові кидки струму поглинаються суперконденсаторами [6, 15]. Програмне забезпечення контролерів підтримує режими Grid-Following (синхронізація через фазову автопідстройку частоти) та Grid-Forming (режим віртуального синхронного генератора), що забезпечує активну стабілізацію мережі 0,4 кВ з високою концентрацією фотоелектричних установок [12, 15].

Практичний аналіз виконано на базі промислової мережевої ФЕС потужністю 330 кВт (три інвертори Sungrow SG110CX паралельно) у Вінницькій області [1, 2]. При середньорічній інсоляції 1150 год/кВт розрахункова річна генерація станції становить 374,6 МВт·год. Обраний VSI-інвертор забезпечує ККД 98,7%, THD менше 3%, дев'ять незалежних MPPT-входів та вбудований захист класу IP66, що повністю відповідає вимогам IEEE 1547-2018 та умовам експлуатації на відкритому майданчику [4, 8]. Система технічного діагностування, що включає моніторинг еквівалентного послідовного опору конденсаторів, температури IGBT та опору ізоляції, дозволяє виявляти понад 50% потенційних відмов на ранній стадії [4, 2].

Порівняльний аналіз трьох типів інверторів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльні характеристики типів інверторів для ФЕС

Параметр	VSI	CSI	Гібридний (qZSI)
Макс. ККД, %	97–98,5	94–96	95–97
THD струму, %	< 3	5–8	< 3
Захист від КЗ	Потребує SPD	Вбудований	Вбудований
Термін служби DC-ланки	10–15 років	25 років	15–20 років
Буст-Boost в 1 каскад	Ні	Ні	Так
Вартість, ум. од.	1,0	1,4	1,6

Висновки

Проведений аналіз дозволяє сформулювати чіткі критерії вибору топології інвертора для ФЕС. VSI є оптимальним рішенням для промислових мережевих станцій потужністю від 30 кВт завдяки найвищому ККД, найнижчому рівню THD та широкій доступності на ринку. CSI доцільно застосовувати на об'єктах з нестабільним живленням та частими короткими замиканнями у мережі завдяки вбудованому природному захисту та тривалому ресурсу індуктивної DC-ланки. Гібридні qZSI-інвертори з HESS є перспективними для автономних та резервних систем, де необхідне одноетапне перетворення з широким діапазоном вхідних напруг та тривала автономна робота. Вибір типу інвертора є комплексним інженерним рішенням, що визначається умовами підключення до мережі, вимогами до надійності та техніко-економічними показниками конкретного об'єкта [4, 5, 8].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Любарцева Ю. І. Проблеми якості електроенергії при впровадженні фотоелектричних станцій в мережі 0,4 кВ // Вісник ПДТУ. Серія: Технічні науки. — 2025. — URL: https://journals.urau.ua/vestnikpgtu_tech/article/view/344730
2. Діагностування обладнання фотоелектричних станцій. — Репозитарій ВНТУ. — URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/44396>
3. Андреолі А. Ю. Дослідження гібридної вітро-сонячно-дизельної системи. — Репозитарій ЧДУ, 2025. — URL: <https://er.chdtu.edu.ua/handle/ChSTU/8350>
4. Marignetti F., Di Stefano R. L., Rubino G., Giacomobono R. Current Source Inverter (CSI) Power Converters in Photovoltaic Systems: A Comprehensive Review // Energies. — MDPI, 2023. — Vol. 16, No. 21. — P. 7319. — DOI: 10.3390/en16217319
5. A review on topology and control strategies of high-power inverters in large-scale photovoltaic power plants // Heliyon. — Elsevier, 2025. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025007145>
6. Miñambres-Marcos V. M. et al. A Grid Connected Photovoltaic Inverter with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage // Sensors. — MDPI, 2017. — DOI: 10.3390/s17081856. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5580073/>
7. Малогулко Ю. В. Електрошадні технології в електроенергетичних системах: конспект лекцій. — Вінниця: ВНТУ, 2026.
8. IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. — IEEE, 2018. — DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112
9. Peng F. Z. Z-Source Inverter // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2003. — Vol. 39, No. 2. — P. 504–510. — DOI: 10.1109/TIA.2003.808920
10. Siwakoti Y. P., Peng F. Z., Blaabjerg F., Loh P. C., Town G. E. Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review // IEEE Transactions on Power Electronics. — 2015. — Vol. 30, No. 2. — P. 699–716. — DOI: 10.1109/TPEL.2014.2313746
11. Sera D., Mathe L., Kerekes T., Spataru S. V., Teodorescu R. On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems // IEEE Journal of Photovoltaics. — 2013. — Vol. 3, No. 3. — P. 1070–1078. — DOI: 10.1109/JPHOTOV.2013.2261118
12. Rachid A. et al. Grid-Forming Inverters in Photovoltaic Power Systems: A Comprehensive Review // Energies. — MDPI, 2026. — Vol. 19, No. 5. — P. 1244. — DOI: 10.3390/en19051244
13. A review on modulation techniques of Quasi-Z-source inverter for grid-connected photovoltaic systems // Renewable Energy Focus. — Elsevier, 2024. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772671124003899>
14. LCL Filter Design with Passive Damping for Photovoltaic Grid Connected Systems // IEEE Conference Publication. — IEEE, 2015. — DOI: 10.1109/ICCEP.2015.7110945
15. Review of Photovoltaic-Battery Energy Storage Systems for Grid-Forming Operation // Batteries. — MDPI, 2024. — Vol. 10, No. 8. — P. 288. — DOI: 10.3390/batteries10080288

Бондар Олександр Віталійович — студент групи ВДЕ-236, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sasha000bondar@gmail.com

Науковий керівник: **Сікорська Олена Вікторівна** — доц. кафедри ЕСС, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: sikorskaov@vntu.edu.ua

Bondar Oleksandr V. — Department of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: sasha000bondar@gmail.com

Supervisor: **Sikorska Olena V.** — Associate Professor Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, e-mail: sikorskaov@vntu.edu.ua