

УДК 621.314

**ТОПОЛОГІЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ
СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА РАХУНОК ДВОСТУПЕНЕВОГО
ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОТУЖНОСТІ**

Кандидати техн. наук В. П. Нерубацький, О. А. Плахтій,
асп. Д. А. Гордієнко

**TOPOLOGY OF THE ENERGY HARVESTING SYSTEM FOR LARGE-SCALE SOLAR
POWER PLANTS USING A TWO-STAGE DIFFERENTIAL POWER CONVERTER**

PhD (Tech.) V. P. Nerubatskyi, PhD (Tech.) O. A. Plakhtii, postgraduate D. A. Hordiienko

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.207.2024.302007>



Анотація. Проведено аналіз архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій. Розглянуто переваги та недоліки використання підвищувального перетворювача в цих архітектурах. Наведено топологію двоступеневого диференціального перетворювача потужності з характеристиками мережі збору постійного струму, що забезпечує більший вихід енергії для великомасштабних сонячних електростанцій. Наведено

принцип роботи перетворювача і протікання струму у схемі під час перемикання. Проведено розрахунок роботи каскадів балансування струму та вирівнювання напруги, що обробляють часткову потужність і дають змогу групам фотоелектричних панелей працювати на максимальній потужності під впливом умов навколишнього середовища.

Ключові слова: балансування струму та напруги, диференціальний перетворювач потужності, сонячна електростанція, фотоелектрична панель.

Abstract. The capacity of photovoltaic installations continues to grow and reaches hundreds of megawatts. Large-scale PV systems are valued for their high efficiency when their architecture is renewable and reliable. In addition, energy conversion costs are low and the installation is able to mitigate the effects of partial shading. Plants with distributed power electronics converters have demonstrated higher energy output, better reliability, significantly reduced design costs, and greater flexibility in PV plant designs. The article analyzes energy harvesting architectures for large-scale solar power plants. Advantages and disadvantages of using a boost converter in these architectures are considered. The topology of a two-stage differential power converter with DC collection network characteristics is presented, which provides higher energy output for large-scale solar power plants. The principle of operation of the converter and the flow of current in the circuit during switching are presented. The approach is to divide the solar panels into several zones using a central grounding point with a DC collection network and connecting them using a fractional-rated current-voltage balancing converter topology to achieve maximum power point tracking, thus mitigating the effects of partial shading and temperature drop. The proposed topology is characterized by fractional power, higher efficiency, scalability and lower cost. The operation of current balancing and voltage equalization cascades, which process partial power and allow groups of photovoltaic panels to work at maximum power under the influence of environmental conditions, has been calculated. It is shown that the proposed system can be scaled for large-scale solar power plants, while creating homogeneous and heterogeneous photovoltaic installations using photovoltaic panels from different manufacturers.

Keywords: current and voltage balancing, differential power converter, solar power plant, photovoltaic panel.

Вступ. Потужність фотоелектричних установок продовжує зростати і досягає сотень мегават [1, 2]. Великомасштабні фотоелектричні установки (VLS-PV) цінують за високу ефективність, коли їхня архітектура є оновлюваною та надійною. Крім того, витрати на перетворення енергії є низькими, а установка VLS-PV здатна пом'якшити наслідки часткового затінення [3, 4].

Установки VLS-PV з розподіленими перетворювачами силової електроніки продемонстрували вищу видачу енергії, кращу надійність, суттєве зниження витрат на проектування та більшу гнучкість конструкцій фотоелектричних установок [5, 6].

Останні досягнення в силовій електроніці дали змогу розробити

центральні інвертори з більшою щільністю потужності [7, 8]. Центральний інвертор високої потужності АББ (PVS800) здатний досягти максимальної вихідної потужності 2 МВт від максимум 24 окремих входів постійного струму від кількох фотоелектричних ліній. Крім того, з появою вищої напруги кола 1500 В більша кількість фотоелектричних модулів може бути з'єднана послідовно, тим самим зменшуючи кількість об'єднувальних коробок, знижуючи струм і покращуючи загальну ефективність [9, 10].

Наразі відомо декілька типів архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій (рис. 1) [11, 12].

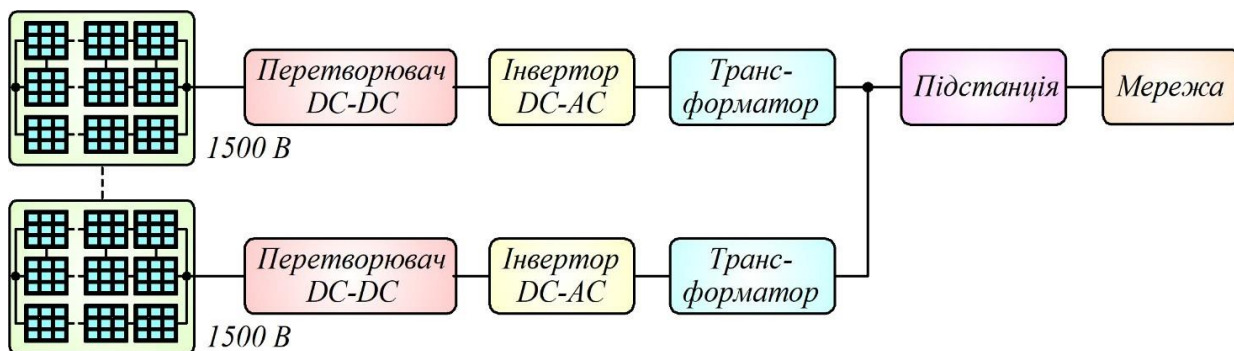


Рис. 1. Архітектура звичайної низьковольтної мережі збору електроенергії

Як показано на рис. 1, кілька фотоелектричних модулів з'єднані послідовно, паралельні групи під'єднані до перетворювача постійного струму та центрального інвертора. Як видно, цей підхід використовує повний номінальний перетворювач DC-DC, а потім інвертор DC-AC для збору різних ділянок великого сонячного поля. Основним недоліком цього підходу є те, що він потребує повноцінних перетворювачів постійного струму та інверторів постійного і змінного струму для

кожної секції фотоелектричних панелей. Відповідно капітальні витрати на установку є високими.

На відміну від цього, на рис. 2 наведено підхід до мережі збору постійного струму середньої напруги, у якому секції сонячної енергії подано та підключено до перетворювача постійного струму, що підвищує напругу фотоелектричної установки від 1500 В постійного струму до 3000 В постійного струму.

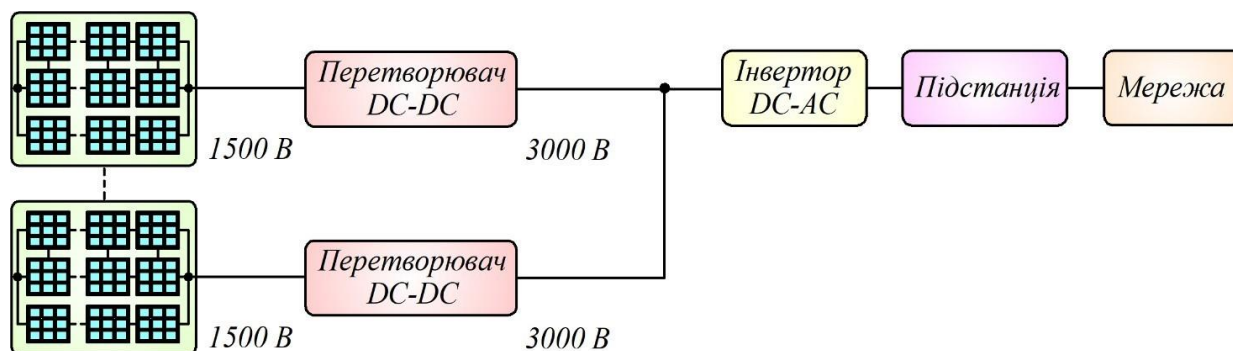


Рис. 2. Архітектура паралельного підключенням фотоелектричних груп із центральним інвертором високої потужності

Як показано на рис. 2, кілька груп фотоелектричних установок з'єднані паралельно, щоб сформувати мережу збору постійного струму середньої напруги. Така архітектура має кілька переваг покращеної ефективності та усунення окремих

інверторів DC-AC. Однак основний недолік використання підвищувального перетворювача DC-DC для кожної секції фотоелектричних панелей у вигляді капітальних витрат все ще існує.

Робота продовжує раніше проведені дослідження і базується на науковому доробку і результатах, частково опублікованих у роботах [13, 14].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Архітектура розподіленого відстеження точок максимальної потужності (DMPPT) є одним із найбільш перспективних рішень для подолання недоліків, пов'язаних із низькою енергоефективністю фотоелектричних панелей [15, 16]. У цій архітектурі є перетворювач DC-DC, призначений для відстеження точки максимальної потужності кожної фотоелектричної панелі. Щоб забезпечити максимальну гнучкість, перетворювачі повинні мати змогу підвищувати і знижувати напругу. Ще однією бажаною характеристикою перетворювачів, використовуваних в архітектурі DMPT, є висока ефективність, але одним із основних недоліків є висока вартість через велику кількість використовуваних перетворювачів [17, 18].

У наукових дослідженнях деякі автори досягли високої ефективності за допомогою перетворювачів, які контролюють лише частину вихідної потужності, таких як послідовно з'єднані перетворювачі, паралельні перетворювачі потужності та перетворювачі з прямим передаванням потужності [19, 20]. Однак такі топології перетворювачів є малоефективними для використання у фотоелектричних системах.

У роботах [21, 22] наведено методи, засновані на пристосуванні продуктивності панелі до точки максимальної потужності фотоелектричної системи. Хоча цей метод намагається відстежити точку максимальної потужності, але суттєвим недоліком є те, що він не відображує характеристики, на які впливають несприятливі і складні фактори, такі як затінення, пошкодження панелей і можливий вихід із ладу окремих елементів.

У роботах [23, 24] наведено загальні підходи, використовувани для зменшення навантаження, розподілення потужності пропорційно номіналу генератора та

продовження терміну служби батареї, але модульні підпанельні фотоелектричні перетворювачі не можуть регулювати напругу на шині постійного струму у відповідь на зміни навантаження.

Відомі також дослідження топологій, які можуть збільшити або зменшити потужність фотоелектричних панелей [25, 26]. Ці топології мають ефект підвищення ефективності, однак ефективність самої системи обмежена, оскільки інтенсивність сонячного світла, що потрапляє на панелі, змінюється залежно від сезону, часу і погодних умов.

Отже, використання фотоелектричних панелей із метою покращення умов експлуатації енергетичних систем, транспортних засобів і зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище, а також подальші дослідження високоефективних і недорогих перетворювачів енергії є актуальним невирішеним завданням.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження режиму балансування струму та вирівнювання напруги за рахунок топології двоступеневого диференціального перетворювача, що дасть змогу підвищити максимальну потужність системи збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій під впливом умов навколишнього середовища. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- розглянути архітектуру збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій;

- навести топологію двоступеневого диференціального перетворювача потужності з балансуванням струму та вирівнюванням напруги;

- навести результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великомасштабної фотоелектричної установки.

Основна частина дослідження.
Топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності. На рис. 3 наведено топологію двоступеневого

диференціального перетворювача потужності з характеристиками мережі збору постійного струму середньої напруги.

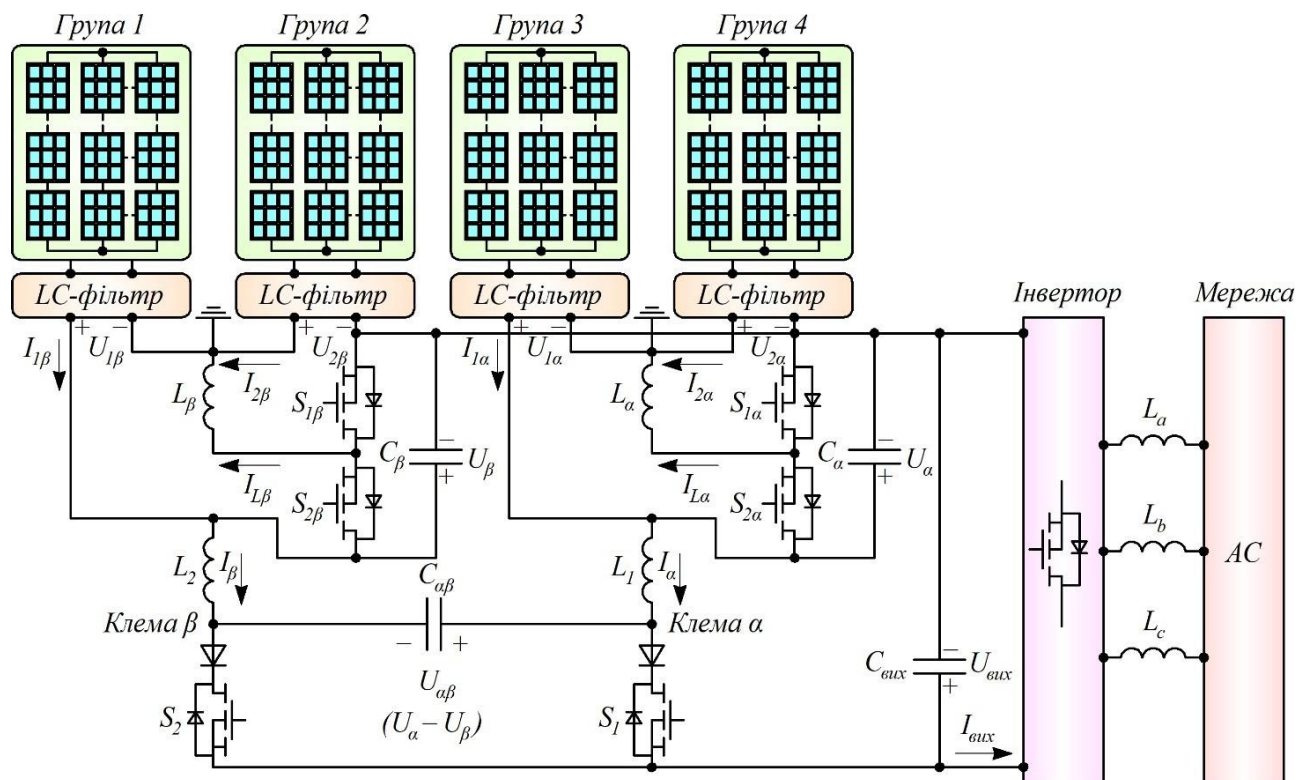


Рис. 3. Топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великих фотоелектричних установок

Як видно з рис. 3, два набори фотоелектричних установок (групи 1 і 2) з'єднані послідовно з заземленням у центрі. Вони внутрішньо під'єднані до перетворювача балансування струму з частковим номінальним значенням, який полегшує незалежне керування струмами фотоелектричної установки ($I_{1\beta}$, $I_{2\beta}$), у такий спосіб гарантуючи індивідуальне відстеження точки максимальної потужності (МРРТ) для груп 1 і 2 секцій фотоелектричної установки.

На етапі балансування струму використовують два перемикачі ($S_{1\beta}$, $S_{2\beta}$), які працюють у режимі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для керування струмом $I_{L\beta}$

котушки індуктивності L_β . Поточний підхід балансування обробляє лише частину загальної зібраної потужності та потребує перетворювачів потужності з частковою номінальною потужністю. Ступінь балансування струму обробляє диференціальну потужність від двох сонячних установок.

Групи 3 і 4 також мають аналогічний перетворювач симетрування струму. Негативні вихідні клеми груп 1 і 2 і груп 3 і 4 з'єднані разом, щоб утворити загальну точку. Дві позитивні вихідні клеми α і β під'єднані до перетворювача балансування напруги. Функція каскаду вирівнювання напруги полягає в обробці диференціальної

потужності двох паралельних наборів: груп 1, 2 і груп 3, 4 за допомогою відповідного ШІМ-керування перемикачами S_1, S_2 . Конденсатор $C_{\alpha\beta}$ у стаціонарному стані утримує різницю напруги ($U_\alpha - U_\beta$).

Наведена концепція балансування струму і напруги гарантує, що кожна з груп фотоелектричних установок працюватиме в індивідуальному порядку, завдяки чому досягається загальний максимальний збір потужності в умовах часткового затінення та різниці температур.

До переваг запропонованого двоступеневого диференціального перетворювача потужності належить таке:

- каскади балансування струму і напруги обробляють часткову потужність для досягнення максимальної потужності в умовах часткового затінення;

- ступінь балансування струму використовує перемикачі з частково номінальною вищою напругою та нижчим струмом, тоді як ступінь балансування напруги використовує перемикачі з більшим струмом і нижчою напругою;

- високий ККД досягається за рахунок добової обробки потужності порівняно з іншими схемами;

- менша кількість блоків обробки перетворювача потужності;

- запропонований підхід можна масштабувати до кількох сонячних енергетичних систем номінальною потужністю декілька МВт, що складаються з багатьох груп фотоелектричних установок;

- підхід дає змогу створювати однорідні та гетерогенні фотоелектричні установки з використанням фотоелектричних панелей від різних виробників.

Робота каскадів балансування струму та вирівнювання напруги. Ступені балансування струму складаються з двох фотоелектричних електростанцій груп 1, 2 і груп 3, 4, з'єднаних послідовно з заземленням у центральній точці. Ступінь балансування струму для груп 1 і 2 складається з напівмостового інвертора з перемикачами ($S_{1\beta}, S_{2\beta}$), що працюють у

режимі ШІМ із робочим циклом. Коли перемикач $S_{1\beta}$ увімкнено,

$$U_{1\beta} = L_\beta \cdot \frac{di_{L\beta}}{dt}. \quad (1)$$

Індуктивність L_β можна виразити як

$$L_\beta = \frac{\delta_\beta \cdot U}{f_{sw} \cdot \Delta I_{L\beta}}, \quad (2)$$

де δ_β – робочий цикл ШІМ;

$\Delta I_{L\beta}$ – поточна пульсація;

f_{sw} – частота перемикачів.

Середнім струмом індуктивності $I_{L\beta}$ можна керувати, регулюючи час увімкнення та вимкнення, тобто робочий цикл δ_β перемикачів $S_{1\beta}$ і $S_{2\beta}$

$$L_{L\beta} = I_{1\beta} - I_{2\beta}. \quad (3)$$

За допомогою керування вихідним струмом $I_{L\beta}$ груп 1 і 2 фотоелектричної установки можна регулювати їхні окремі робочі точки МРРТ. Крім того, загальну вихідну потужність груп 1 і 2 можна подати як

$$U_\beta \cdot I_\beta = U_{1\beta} \cdot I_{1\beta} + U_{2\beta} \cdot I_{2\beta}. \quad (4)$$

Такі самі рівняння можна записати для груп 3 і 4.

Ступінь вирівнювання напруги забезпечує напругу МРР, досягнуту на кожному підключеному фотоелектричному колі, контролюючи напругу $U_{\alpha\beta}$ на конденсаторі $C_{\alpha\beta}$. Ступінь вирівнювання напруги діє як кероване джерело напруги для фіксації напруги між двома клемми PV (клеми α та β).

Ступінь балансування напруги витягує максимальну потужність, доступну в кожному колі, регулюючи коефіцієнт завантаження між S_1 і S_2 :

$$\delta_{S1} + \delta_{S2} = 1. \quad (5)$$

Коефіцієнт заповнення етапу балансування напруги можна розрахувати на підставі доступного струму, вилученого з кожного етапу балансування струму, заданого як

$$\delta_{S1} = \frac{I_{\beta}}{I_{\alpha} + I_{\beta}}. \quad (6)$$

Керування часом увімкнення та вимкнення на перемикачах S_1 і S_2 забезпечує реалізацію напруги MPP на кожній

під'єднаній фотоелектричній гілці за рахунок регулювання величини та полярності напруги. Напругу MPP можна досягти встановленням $U_{\alpha\beta}$, що дорівнює різниці напруг між максимальним колом напруг, доступним на U_{α} та U_{β} , і може бути виражена як

$$U_{\alpha\beta} = U_{\alpha \max} - U_{\beta \max}. \quad (7)$$

Загальне рівняння струму, що проходить через конденсатор $C_{\alpha\beta}$, має вигляд

$$i_{C_{\alpha\beta}} = C_{\alpha\beta} \cdot \frac{dU_{\alpha\beta}}{dt} = C_{\alpha\beta} \cdot \frac{\Delta U_{\alpha\beta}}{\delta_{S1} \cdot T} = I_{\alpha} - I_{\beta}. \quad (8)$$

Для розрахунку номіналу конденсатора, необхідного для каскаду балансування напруги, можна використати такий вираз:

$$C_{\alpha\beta} = I_{\alpha} \cdot \frac{\delta_{S1}}{f_{sw} \cdot \Delta U_{\alpha\beta}}, \quad (9)$$

де f_{sw} – частота перемикання перетворювача; $\Delta U_{\alpha\beta}$ – пульсація, необхідна для конденсатора.

Котушки індуктивності L_1 , L_2 визначають як

$$L_{1,2} = \left| -U_{вих} + U_{\beta} \right| \cdot \frac{(1 - \delta_{S1})}{f_{sw} \cdot \Delta I_{L\beta}}. \quad (10)$$

Так само для каскаду балансування струму каскад балансування напруги відокремив дві вхідні напруги від клем α та β . Кожен рядок працює незалежно від іншого.

Вихідну напругу $U_{вих}$ можна подати як

$$U_{вих} = \frac{P_{вих}}{I_{вих}} = \frac{P_{\alpha} + P_{\beta}}{I_{\alpha} + I_{\beta}}, \quad (11)$$

$$U_{вих} = \frac{(U_{1\alpha} \cdot I_{1\alpha} + U_{2\alpha} \cdot I_{2\alpha}) + (U_{1\beta} \cdot I_{1\beta} + U_{2\beta} \cdot I_{2\beta})}{I_{\alpha} + I_{\beta}}. \quad (12)$$

Наведена архітектура масштабується до кількох входів із ефективним локалізованим керуванням живлення для багаторядкових фотоелектричних установок, житлових і великомасштабних

фотоелектричних електростанцій. Масова потужність обробляється один раз із частковими втратами. Балансувальний конденсатор $C_{\alpha\beta}$ відіграє важливу роль у балансуванні напруг для досягнення MPP.

Такий підхід фактично усуває необхідність у перетворювачі DC-DC для відстеження МРРТ.

Розрахунок однорідної фотоелектричної установки. Однорідна фотоелектрична установка визначається як установка, що має однакову кількість послідовно / паралельно з'єднаних модулів на групу.

У табл. 1 наведено технічні характеристики однорідної фотоелектричної установки.

Відповідно до рис. 3 передбачено, що групи фотоелектричних установок 1, 2, 3, 4 знаходяться в різних робочих умовах через фактори навколишнього середовища. На рис. 4 наведено робочі характеристики кожної групи за різних температур і умов інсоляції.

Таблиця 1

Технічні характеристики однорідної фотоелектричної установки

Параметр	Значення
Фотоелектричний модуль	SPR-305-WHT
Конфігурація в чотирьох групах	24 послідовних / 40 паралельних модулів потужністю 293 кВт
Загальна потужність чотирьох груп P_{Σ} , МВт	1,1
Частота перемикання стану балансування f , кГц	20
Конденсатор $C_{\alpha\beta}$, мкФ	40
Індуктивності L_{α}, L_{β} , мГн	1,65
Індуктивності L_1, L_2 , мкГн	100

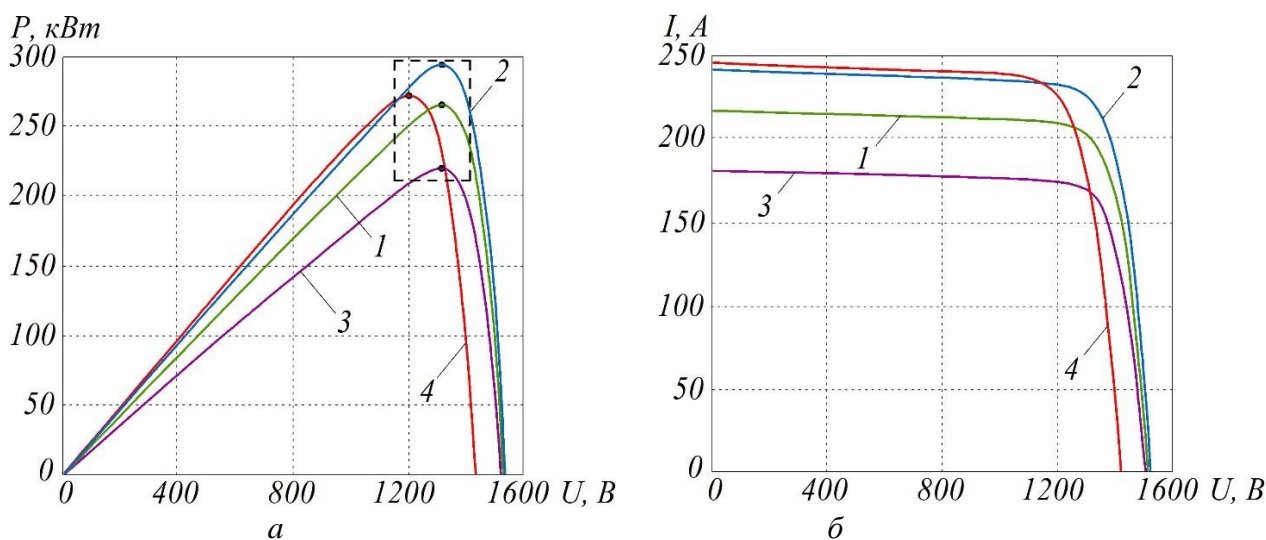


Рис. 4. Характеристики двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великих фотоелектричних установок:

- 1 – група 1 (25 °С, 0,9 кВт/м²); 2 – група 2 (25 °С, 1 кВт/м²);
- 3 – група 3 (25 °С, 0,75 кВт/м²); 4 – група 4 (50 °С, 1 кВт/м²)

З рис. 4 видно, що існує унікальна робоча умова, за якої значення напруги і струму для кожної групи відповідають максимальній потужності панелей.

Характеристики роботи каскадів балансування струму та вирівнювання напруги для розглянутої конструкції установки, при яких досягається

максимальна доступна потужність, наведено на рис. 5.

У табл. 2 наведено результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача потужності для великомасштабної фотоелектричної установки.

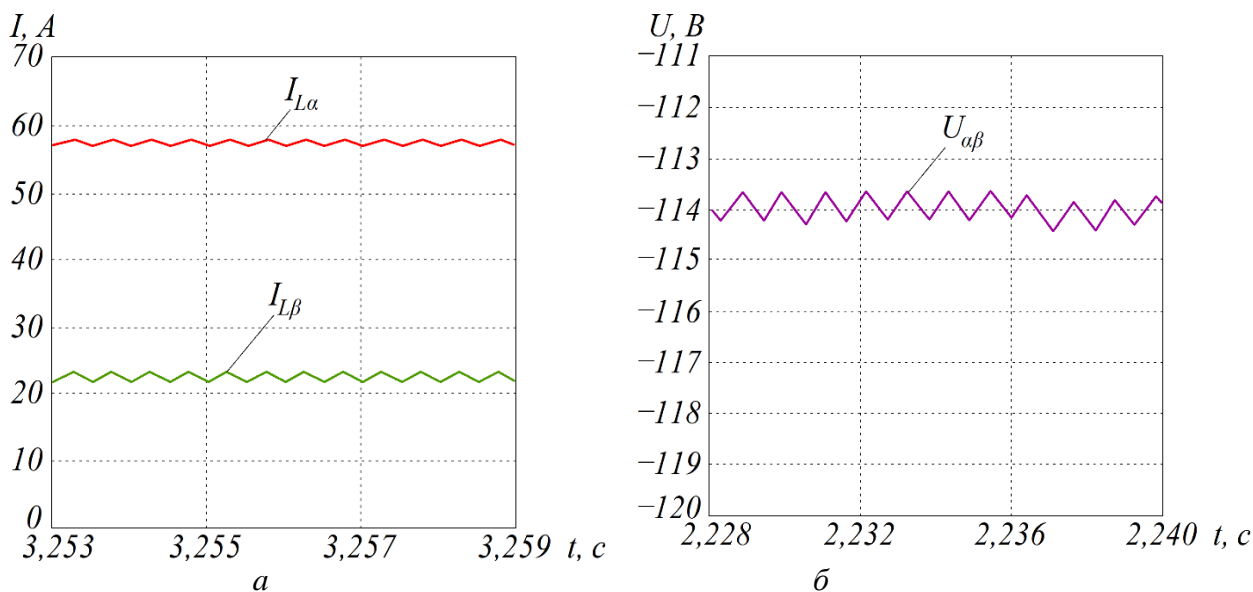


Рис. 5. Максимальні балансувальні струми індуктивностей L_α, L_β (а) і напруга конденсатора $C_{\alpha\beta}$ (б)

Таблиця 2

Результати розрахунку двоступеневого диференціального перетворювача

Група	Значення напруги	Балансування струму	Струм на клеммах	Напруга вирівнювання	Потужність наявної сонячної енергії	Втрати балансування	
	Значення струму	Балансування напруги				від струму	від напруги
1	$U_{1\beta} = 1323$ В	$I_{L\beta} = 22$ А	$I_\beta = 210$ А	$U_{\alpha\beta} = -144$ В	$P_\beta = 556$ кВт	29 кВт (5,24 %)	24 кВт (2,3 %)
	$I_{1\beta} = 199$ А						
2	$U_{2\beta} = 1325$ В	$U_\beta = 2648$ А					
	$I_{2\beta} = 221$ А						
3	$U_{1\alpha} = 1319$ В	$I_{L\alpha} = 57,3$ А	$I_\alpha = 193$ А				
	$I_{1\alpha} = 166$ А						
4	$U_{2\alpha} = 1215$ В	$U_\alpha = 2534$ А		$P_\alpha = 486$ кВт	76 кВт (15,5 %)		
	$I_{2\alpha} = 223$ А						

Обидва балансувальні перетворювачі струму / напруги, за рис. 3, працюють зі своїми спеціальними робочими циклами перемикання, щоб отримати доступну максимальну потужність. Ступінь балансування струму для клем β і α обробляє струми $I_{L\beta} = 22$ А і $I_{L\alpha} = 57,3$ А, що становить частку загального струму. Крім того, наведена схема вирівнювання напруги працює за напруги $U_{\alpha\beta} = -144$ В, що є набагато меншим значенням. Отже, кількість вольт-ампер, оброблених каскадами балансування струму / напруги невелика для роботи за різних температур і умов інсоляції.

Отже, запропонована топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності здатна працювати з великомасштабною сонячною електростанцією при різних точках максимальної потужності.

Висновки і рекомендації щодо подальшого використання. На підставі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

– для відомих типів архітектур збору енергії для великомасштабних сонячних електростанцій необхідні повноцінні

перетворювачі постійного струму та інвертори постійного і змінного струму для кожної секції фотоелектричних панелей, що збільшує капітальні витрати на установку;

– наведена архітектура масштабується до кількох входів із ефективним локалізованим керуванням живлення для багаторядкових фотоелектричних установок, житлових і великомасштабних фотоелектричних електростанцій. Масова потужність обробляється один раз із частковими втратами. Балансувальний конденсатор відіграє важливу роль у балансуванні напруг для досягнення МРР. Такий підхід фактично усуває необхідність у перетворювачі DC-DC для відстеження МРРТ;

– запропонована топологія двоступеневого диференціального перетворювача потужності здатна працювати з великомасштабною сонячною електростанцією при різних точках максимальної потужності, оскільки існує унікальна робоча умова, за якої значення напруги і струму для кожної групи відповідають максимальній потужності панелей. При цьому обидва балансувальні перетворювачі струму і напруги працюють зі своїми спеціальними робочими циклами перемикання.

Список використаних джерел

1. Alblooshi A., Masoud M. I. Design of a 1 MW Grid-tied photovoltaic system. *2021 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*. 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICEET53442.2021.9659704.
2. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Khoruzhevskyi H. A. Study of the energy parameters of the system «solar panels – solar inverter – electric network». *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012092. P. 1–12. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012092.
3. Rezaei J., Golshan M. H., Alhelou H. H. Impacts of integration of very large-scale photovoltaic power plants on rotor angle and frequency stability of power system. *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 16. P. 2384–2401. DOI: 10.1049/rpg2.12529.
4. Shair J., Li H., Hu J., Xie X. Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 145. P. 11111. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111111.
5. Khadka N., Bista A., Adhikari B., Shrestha A., Bista D. Smart solar photovoltaic panel cleaning system. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 463. P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012121.

6. Namjil E., Komoto K. Strategies for implementing of very large scale solar and wind power plants in the gobi desert for the Northeast Asia regional energy market. *2022 IEEE 49th Photovoltaics Specialists Conference (PVSC)*. 2022. P. 1179–1181. DOI: 10.1109/PVSC48317.2022.9938502.
7. Das P., Satpathy S., Bhattacharya S., Veliadis V. Design considerations of multi-phase multilevel inverters for high-power density traction drive applications. *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. 2022. P. 23–30. DOI: 10.1109/ITEC53557.2022.9813937.
8. Singh D., Sandeep N. Multiport multilevel inverter for high-frequency AC applications. *2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/PEDES56012.2022.10080506.
9. Ebrahimi M., Khajehoddin S. A power decoupling technique for high power-density single-phase inverters. *2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2022. P. 813–818. DOI: 10.1109/APEC43599.2022.9773483.
10. Khomenko I. V., Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A., Shelest D. A. Research and calculation of the levels of higher harmonics of rotary electric machines in active-adaptive networks. *4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF-2023)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254. 012040. P. 1–15. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012040.
11. Blaabjerg F., Yang Y., Kim K., Rodriguez J. Power electronics technology for large-scale renewable energy generation. *Proceedings of the IEEE*. 2023. Vol. 111, No. 4. P. 335–355. DOI: 10.1109/JPROC.2023.3253165.
12. Zidane T. E., Aziz A. S., Zahraoui Y., Kotb H., Aboras K. M. Grid-connected solar PV power plants optimization: a review. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 79588–79608. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3299815.
13. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Research of operating modes and features of integration of renewable energy sources into the electric power system. *2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*. 2022. P. 133–138. DOI: 10.1109/ESS57819.2022.9969337.
14. Nerubatskyi V., Hordiienko D. Analysis of the control system of a wind plant connected to the AC network. *Power engineering: economics, technique, ecology*. 2023. No. 1. P. 87–91. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.276028.
15. Sheela A., Logeswaran T., Revathi S., Rajalakshmi K. Distributed MPPT configuration for improving solar energy production. *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*. 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/INCET54531.2022.9824131.
16. Plakhtii O., Nerubatskyi V., Hordiienko D. Efficiency analysis of DC-DC converter with pulse-width and pulse-frequency modulation. *2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2022. P. 571–575. DOI: 10.1109/ELNANO54667.2022.9926762.
17. Zhang T., Jiang J., A review on differential power processing for PV submodule DMPPT. *2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS)*. 2020. P. 1012–1017. DOI: 10.1109/SCEMS48876.2020.9352300.
18. Barcellona S., Barresi M., Piegari L., MMC-based PV three-phase system with distributed MPPT. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2022. Vol. 37, No. 3. P. 1567–1578. DOI: 10.1109/TEC.2022.3167786.
19. Moghassemi A., Rahman S., Ozkan G., Edrington C., Zhang Z., Chamarthi P. Power converters coolant: past, present, future, and a path toward active thermal control in electrified ship

power systems. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 91620–91659. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3308523.

20. Cheng L., Wu W., Qiu L., Liu X., Ma J., Zhang J., Fang Y. An improved data-driven based model predictive control for zero-sequence circulating current suppression in paralleled converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 143. P. 108401. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108401.

21. Krstic N. N., Tasic D. S. Power and location of the maximum power points of photovoltaic array in the case of partial shading. *2023 58th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*. 2023. P. 171–174. DOI: 10.1109/ICEST58410.2023.10187251.

22. Hburi L., Fahad H., Assad A., Powerful maximum power point tracking for PV systems: an artificial intelligence paradigm. *2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*. 2022. P. 280–286. DOI: 10.1109/IICCIT55816.2022.10010688.

23. Muttaqin E. F., Maulana M. A., Fadlika I., Aripriharta A. Design and validation non-isolated boost converter for cascaded photovoltaic application. *2022 5th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*. 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICPERE56870.2022.10037506.

24. Zheng Y., Cheng Z., Liu C., Liu H., Amirabadi M., Lehman B. Modular wireless power transmission for photovoltaic subpanel system. *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. 2021. P. 546–553. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595115.

25. Hegazy E., Saad W., Shokair M. Studying the effect of using a low power PV and DC-DC boost converter on the performance of the solar energy PV system. *2020 15th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*. 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICCES51560.2020.9334581.

26. Kareem M., Kurnaz S. Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation using improved MPPT method. *2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA)*. 2020. P. 1–4. DOI: 10.1109/HORA49412.2020.9152882.

Нерубацький Володимир Павлович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Плахтій Олександр Андрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Гордієнко Денис Анатолійович, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Nerubatskyi Volodymyr Pavlovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (095) 045-78-01. E-mail: NVP9@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-4309-601X.

Plakhtii Olexandr Andriiovych, PhD (Tech.), Associate Professor, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (093) 917-60-20. E-mail: a.plakhtiy1989@gmail.com. ORCID iD: 0000-0002-1535-8991.

Hordiienko Denys Anatoliiovych, Postgraduate, Department of Electrical Energetics, Electrical Engineering and Electromechanics, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 (099) 612-02-12. E-mail: D.Hordiienko@i.ua. ORCID iD: 0000-0002-0347-5656.

Статтю прийнято 21.03.2024 р.