АНОТАЦІЯ

Фесенко А.П. Інвертор з широким діапазоном регулювання вхідної напруги та покращеними масогабартними параметрами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття науково ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (14 – Електрична інженерія). – Національний університет «Чернігівська політехніка» МОН України, м. Чернігів, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливого та актуального наукового завдання – оптимізації масогабаритних параметрів перетворювача у складі систем електричного живлення на основі фотоелектричних перетворювачів (ФЕП), а саме імпульсного інвертора у складі автономних стаціонарних систем живлення шляхом огляду, аналізу, порівняння, розрахунків, обґрунтування вибору та впровадження комплексу науково-практичних технічних і програмних методів та засобів.

Частка джерел відновлюваної енергетики в загальносвітовій генерації зростає протягом останніх десятиліть. Системи на основі фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) забезпечують відносно невисокий відсоток навіть серед інших джерел «зеленої» енергетики. Проте саме сонячна генерація демонструє сталий та динамічний ріст протягом останніх десятиліть. Такі системи наділені рядом суттєвих переваг, таких як: можливість розміщення будь-де без прив’язки до географічних умов, відсутність шкідливих викидів в процесі генерації енергії, відсутність рухомих частин, можливість монтажу на будь-які тверді горизонтальні чи нахилені поверхні, включаючи дахи житлових будинків, можливість роботи як на централізовану електромережу, так і в автономному режимі.

Одним із ключових елементів системи сонячної енергетики окрім власне ФЕП є напівпровідниковий перетворювач, що забезпечує перетворення енергії постійного струму в звичний для побутових приладів змінний струм. Особливістю

роботи перетворювача з ФЕП в якості джерела напруги є коливання вхідної напруги в широкому діапазоні при зміни зовнішніх умов. Вартість, габаритні розміри, маса, металоємність таких перетворювачів пропорційні їх максимальній потужності.

В ході аналізу наявних комерційних рішень було визначено, що висока вартість та значні масогабаритні параметри подібних перетворювачів спричинені значною металоємністю пасивних елементів, стримують більш широке впровадження подібних систем.

Найбільш металоємними компонентами перетворювача є котушки індуктивності та радіатори. Їх розміри та маса пропорційні енергії, що протікає чи розсіюється даними елементами. В результаті аналізу було виявлено ряд підходів до зменшення масогабаритних параметрів котушок індуктивності шляхом зменшення енергії, що припадає на одну котушку. Серед таких способів найбільш перспективним було визначено зменшення струму через котушку індуктивності імпульсної частини перетворювача шляхом паралельного включення декількох ланок імпульсної частини. Сигнали керування транзисторами імпульсної ланки містять фазові зсуви, що забезпечує не одночасне відкриття ключів в паралельних ланках.

За результатами порівняльного аналізу та математичного моделювання ряду рішень було обрано як найбільш перспективну комбіновану топологію з високочастотною імпульсною частиною та низькочастотним ланцюжком розгортки. Функціонально запропонована імпульсна частина генерує струм що за формою відповідає модулю синусоїди, а ланцюжок розгортки забезпечує зміну знаку вихідної напруги. При цьому активні компоненти імпульсної частини працюють з високою частотою комутацію в десятки кілогерц, а ключі ланцюжка розгортки комутуються з частотою мережевої напруги. Такий розподіл дозволив оптимізувати параметри транзисторів відповідно до умов роботи в кожній з ланок, виходячи з очікуваного розподілу статичних та динамічних втрат, а також зменшити вартість компонентів ланцюжка розгортки.

Через фізичні особливості функціонування ФЕП як джерела напруги, виникає необхідність гнучкого керування режимом роботи перетворювача за умов динамічної зміни освітленості та часткового затінення. Сучасні системи керування передбачають алгоритми слідкування за точкою максимальної потужності (СТМП) ФЕП. Такі алгоритми дозволяють оптимізувати відбір потужності з сонячної панелі за умови часткового затінення шляхом підлаштування навантаження. Було запропоновано модифікований алгоритм слідкування за точкою глобального максимуму потужності (ГСТМП) що дозволяє підвищити до трьох разів швидкодію системи. Підвищення швидкодії дозволяє мінімізувати втрати енергії під час пере налаштування оптимальної робочої точки системи.

Було запропоновано замкнену систему керування перетворювачем з трирівневою широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Система керування (СК) реалізує постійний моніторинг струму та напруги ФЕП та вихідного струму перетворювача що дозволяє ефективно підтримувати форму вихідного струму та напруги в широкому діапазоні зміни вхідної напруги. СК формує декілька груп сигналів керування для різних частин перетворювача: високочастотні ШІМ-сигнали з фазовими зсувами для керування паралельними ланками імпульсної частини та низькочастотні сигнали для керування ключами ланцюжка розгортки.

Для порівняльного аналізу ефективності обраного підходу з чергуванням фаз та ланцюжком розгортки було розроблено математичну модель втрат в напівпровідникових елементах. Дана модель дозволяє оцінювати статичні та динамічні втрати в транзисторах з врахуванням кількості паралельних модулів, параметрів ключів, потужності перетворювача, вхідної напруги. Виходячи з отриманих за результатами математичного моделювання даних, оптимальним є застосування двох паралельних модулів. За умови застосування трьох модулів ККД та енергія в котушках індуктивності не зазнають суттєвих змін, за умови ускладнення системи керування та збільшення розмірів друкованої плати перетворювача.

За результатами аналітичного огляду, математичного та імітаційного моделювання для подальшої практичної реалізації та натурних експериментів було обрано топологію з двома паралельними ланцюжками імпульсної ланки та ланцюжком розгортки. Розроблено та реалізовано експериментальний макет перетворювача потужністю 1 кВт що дозволяє оцінити ефективність запропонованої топології в діапазоні потужності від 160 Вт до 1 кВт.

Максимальна експериментально досягнута ефективність в режимі підвищення напруги складає понад 96% при потужності понад 450 Вт, в режимі зниження напруги понад 97% за потужності понад 650 Вт. Експериментально отримані результати повністю підтверджують теоретично очікувані та отримані за результатами математичного моделювання.

Отримані в ході дослідження дані свідчать про ефективність запропонованої топології. Розроблена математична модель є універсальним інструментом оцінки ефективності обраного підходу для перетворювачів даного класу та сфери застосування, що відкриває шлях для подальших досліджень та модифікації інверторів з широким діапазоном регулювання вхідної потужності та оптимізованими масогабаритними параметрами.

Ключові слова: ланцюжок розгортки, інвертор з паралельною структурою чергування фаз, масогабаритні параметри, інвертор напруги, широтно-імпульсна модуляція, оптимальний регулятор, оптимізація, оптимальна швидкодія, енергоефективність, споживаний струм, розосереджена генерація, сонячна енергетика, математична модель, комутація, піковий струм, приватні домогосподарства, стійкість, потужність втрат, топології перетворювачів, підвищення ККД, стратегія керування.

Список публікацій здобувача

1. Фесенко А.П. Огляд масогабаритних та вартісних параметрів комерційних сонячних інверторів / А. Фесенко, О. Гусев, А. Чуб, Д. Вінніков, О. Матюшкін // Технічні науки та технології. – 2018. – № 4 (14). – С. 183-193. (Особистий

внесок – виконано аналітичний огляд актуальних рішень на ринку комерційних інверторів для систем живлення на основі ФЕП, запропоновано систему критеріїв для оцінки масогабаритних параметрів сонячних інверторів).

2. Фесенко А.П. Порівняльний аналіз інвертора на основі паралельної структури чергування фаз з підсилювальним каскадом і активним ланцюжком згладжування пульсацій вхідної потужності / А.П. Фесенко, О.О. Матюшкін, О.О. Гусев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2018. – № 26 (1302). – С. 68–74. (Особистий внесок – розроблено імітаційну та математичну моделі інвертора на основі паралельної структури чергування фаз з підсилювальним каскадом і активним ланцюжком згладжування пульсацій вхідної потужності, виконано імітаційне моделювання).
3. Artem Fesenko, Oleksandr Matiushkin, Oleksandr Husev, Oleksandr Velihorskyi, Kamal Khandakji "Feasibility Study of Interleaving Approach for Buck-Boost Inverter with Unfolding Circuit" 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 415-419. Збірник тез конференції входить до бази Scopus. (Особистий внесок – розроблено математичну модель імпульсного перетворювача з ланцюжком розгортки на основі паралельної структури з чергуванням фаз, виконано порівняльний аналіз запропонованого рішення та класичного).
4. O. Matiushkin, O. Husev, C. Roncero-Clemente, S. Ivanets, A. Fesenko; «Component Design Guidelines for New Single-Stage Buck-Boost Inverter with Unfolding Circuit», 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), pp 40 – 45. (Особистий внесок – виконано огляд існуючих рішень в сфері імпульсних перетворювачів).
5. Oleksandr Matiushkin, Oleksandr Husev, Ryszard Strzelecki, Sergey Ivanets, Artem Fesenko; «Novel single-stage buck-boost inverter with unfolding circuit», 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering

(UKRCON), pp 538-543. (Особистий внесок – виконано огляд інсуючих рішень в сфері імпульсних перетворювачів).

6. Serhii Stepenko, Oleksandr Husev, Dmitri Vinnikov, Artem Fesenko, Oleksandr Matiushkin "Feasibility Study of Interleaving Approach for Quasi-Z-Source Inverter" в *Electronics* (ISSN 2079-9292; CODEN: ELECGJ). (Особистий внесок – виконано аналітичний огляд існуючих рішень в сфері квазі імпедансних інверторів).
7. Oleksandr Matiushkin, Oleksandr Husev, Artem Fesenko and Dmitri Vinnikov "Global MPPT for Interleaved Buck-Boost DC-DC Converter" 2020 IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2020, Збірник тез конференції входить до бази Scopus. (Особистий внесок – виконано огляд актуальних алгоритмів СТМП та ГСТМП, запропоновано модифікований алгоритм ГСТМП).
8. Fesenko, A.; Matiushkin, O.; Husev, O.; Vinnikov, D.; Strzelecki, R.; Kołodziejek, P. Design and Experimental Validation of a Single-Stage PV String Inverter with Optimal Number of Interleaved Buck-Boost Cells. Energies 2021, 14, 2448. https://doi.org/10.3390/ en14092448 (Особистий внесок – розроблено методику визначення оптимальної кількості паралельних модулів імпульсних ланки перетворювача, розроблено експериментальний макет, виконано експериментальні дослідження).
9. Shahsavar T. H.; Rahimpour S.; Kurdkandi N. V.; Fesenko A.; Matiushkin O.; Husev O.; Vinnikov D. Comparative Evaluation of Common-Ground Converters for Dual-Purpose Application. Energies 2023, 16, 2977. https://doi.org/10.3390/en16072977 (Особистий внесок – проведено розрахунок імпульсного перетворювача з ланцюжком розгортки на основі паралельної структури з чергуванням фаз для подальшого порівняння з іншими рішеннями).

ANNOTATION

Fesenko A.P. Inverter with a wide range of input voltage adjustment and improved mass-size parameters. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of the Doctor of Philosophy in specialty 141 - " Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electromechanics ". - Chernihiv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine; Chernihiv, 2023.

The dissertation is devoted to the solution of an important and relevant scientific task – photovoltaic (PV) converter mass and size parameters optimization. Specifically, the inverter as part of autonomous stationary power supply systems by means of review, analysis, comparison, calculations, justification of the choice and implementation of complex scientific and practical technical and software methods and tools.

The expansion of renewable energy sources in a global generation has been growing over the past decades. Systems based on photovoltaic (PV) cells provide a relatively low percentage even among other sources of "green" energy. However, solar generation shows steady and dynamic growth over recent decades. Such systems are endowed with a number of significant advantages, such as placement possibility without reference to geographical conditions, the absence of harmful emissions in the process of energy generation, such systems don’t include any moving parts, installation possibility on any horizontal or inclined surface (including the roofs of residential buildings), the possibility of working both on the centralized power grid and in autonomous mode.

One of the key elements of the solar energy system, in addition to the PV, is a semiconductor converter, which provides the conversion of direct current energy into alternating current, which is commonly used for household appliances. A feature of the operation of the converter with PV as a voltage source is the fluctuation of the input voltage in a wide range when external conditions change. The cost, overall dimensions, weight, and metal capacity of such converters are proportional to their maximum power. It was determined that the metal-intensive passive components contribute a large part of

the high cost and the bulky size of such converters. Which, in turn, restrains the further expansion of this type of system.

The most metal-intensive components of the converter are inductors and radiators. Their size and mass are proportional to the energy flowing or dissipated by these elements. As a result of the analysis, a number of approaches to reducing the mass and size parameters of the inductor coils by reducing the energy per coil were revealed. Inductor current reduction for the DC/DC stage of the converter can be achieved by parallel connection of several DC/DC cells. Such an approach based on current dividing was determined as the most promising. The switch control signals contain phase shifts which provide some time gap between the transistors opening in different cells.

The results of comparative analysis and mathematical simulation indicate that the most promising topology includes a high-frequency DC/DC stage and low-frequency unfolding circuit. The proposed DC/DC stage generates a module of sinusoidal waveform and the unfolding circuit only reverses the direction of the output current. At the same time, the switches of the DC/DC stage work with a high switching frequency of 64 kHz, and the keys of the unfolding circuit are switched with the frequency of the mains voltage. Such functional division makes possible optimization of the transistor parameters according to the operating conditions in each converter stage, based on the expected allocation of static and dynamic losses, as well as to reduce the cost of unfolding circuit components.

Due to the features of PV cells as a voltage source, the converter control system requires some flexible algorithm to operate with the dynamic illumination changes and partial shading of the PV panel. Modern control systems provide algorithms for monitoring the maximum power point (MPP) of the PV. Such an algorithm makes it possible to optimize the power extraction from the solar panel under the condition of partial shading by load adjusting. A modified algorithm for tracking the global maximum power point (GMPP) was proposed, which allows for increasing the speed of the system up to three times. The speed increase allows for minimizing energy losses during the reconfiguration of the optimal operating point of the system.

A three-level pulse-width modulation (PWM) closed-loop converter control system was proposed. The control system (SC) implements constant monitoring of the current and voltage of the PV and the output current of the converter. These parameters monitoring allows to effective maintain the form of the output current and voltage in a wide range of the input voltage changes. The SC generates several groups of control signals for different parts of the converter: high-frequency PWM.

Keywords: unfolding circuit, interleaved inverter, mass-size parameter, voltage source inverter, pulse width modulation, optimal controller, optimization, optimal speed, energy efficiency, consumed current, distributed generation, solar energy, mathematical model, commutation, peak current, private households, stability, power losses, converter topologies, increasing efficiency, control strategy.