

СІНЧУК Ігор

Криворізький національний університет

ORCID ID: [0000-0003-3938-0744](https://orcid.org/0000-0003-3938-0744)E-mail: lab.133.136@gmail.com

КОТЯКОВА Марина

Криворізький національний університет

ORCID ID: [0000-0001-5667-1354](https://orcid.org/0000-0001-5667-1354)E-mail: kotyakova@ukr.net

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ ТРИФАЗНИХ ЧОТИРИПРОВІДНИХ МЕРЕЖ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Використання джерел електричної енергії розосередженої генерації дозволяє ефективно використовувати енергоресурси, у тому числі наявні відновлювальні джерела енергії, сприяє зменшенню шкідливих викидів при традиційній генерації електричної енергії, покращує якість електричної енергії для споживачів та зменшує перевантаження ліній передачі. Між тим, якщо навантаження, що живиться від джерела розосередженої генерації, є несиметричним, то напруга на нульовій точці інверторного інтерфейсу, що живить нейтральний провідник, може досить помітно відхилятися від встановленого рівня. Це призведе до несиметрії вихідної напруги, тобто до зниження її якості, наявності в змінних напругах значних постійних складових, а також до протікання струму значної величини у нейтральному провіднику. У зв'язку з цим було запропоновано метод тривимірної просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для керування інвертором з чотирма плечима, що відрізняються від існуючих можливістю мінімізації складових напруг негативної та нульової послідовності в мережах з розподіленою генерацією з паралельним підключенням інверторів з трьома та чотирма плечима. Для розробки підходів щодо керування інверторами таких систем необхідно отримати аналітичні залежності, що описуватимуть перетік активної та реактивної потужності між інверторами в залежності від параметрів їх сформованих вихідних напруг.

Ключові слова: розосереджена генерація, несиметричні режими, чотири провідні мережі, електрична мережа, широтно-імпульсна модуляція.

SINCHUK Igor, KOTIAKOVA Maryna
Kryvyi Rih National University

STUDY OF NON-SYMMETRICAL MODES OF THREE-PHASE FOUR-WIRE NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

The use of distributed generation electric energy sources allows efficient use of energy resources, including available renewable energy sources, contributes to the reduction of harmful emissions during traditional electric energy generation, improves the quality of electric energy for consumers and reduces overloading of transmission lines. Meanwhile, if the load supplied by the source of distributed generation is asymmetrical, then the voltage at the zero point of the inverter interface feeding the neutral conductor can deviate quite noticeably from the set level. The easiest way to provide a neutral point for connecting the neutral conductor is to use two capacitors with balancing resistors connected in parallel to them, that is, to create a zero voltage by dividing the total voltage of the direct current link in half. Circuits with voltage separation in the direct current circuit are widely used in electric drives with three-level energy converters, since in this case there is no need to connect the zero point of the direction to the load, and the main purpose of this electrical circuit is to obtain equal halves of the total voltage in the direct current circuit. This will lead to asymmetry of the output voltage, that is, to a decrease in its quality, the presence of significant constant components in alternating voltages, as well as to the flow of a significant current in the neutral conductor. In this regard, a three-dimensional space-vector pulse-width modulation method was proposed for controlling a four-arm inverter, which differs from the existing ones by the possibility of minimizing the components of negative and zero-sequence voltages in networks with distributed generation with parallel connection of three- and four-arm inverters. To develop approaches to control the inverters of such systems, it is necessary to obtain analytical dependencies that describe the flow of active and reactive power between inverters depending on the parameters of their generated output voltages.

Keywords: distributed generation, asymmetric modes, four-wire networks, electrical network, pulse width modulation.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Використання джерел з розосередженою генерацією дозволяє ефективно використовувати наявні відновлювальні джерела енергії, сприяє зменшенню шкідливих викидів при традиційній генерації електричної енергії, покращує якість електричної енергії для споживачів та зменшує перевантаження ліній передачі. У низьковольтних мережах з розподіленою генерацією досить часто є необхідним забезпечення четвертого (нейтрального) провідника засобами джерел енергії та відповідних мережевих інтерфейсів для живлення однофазних та несиметричних трифазних навантажень. При цьому слід очікувати зменшення взаємовпливу фаз навантаження між собою у контексті забезпечення відповідності показникам якості електричної енергії, проте дане питання вимагає відповідного аналізу. Отже, нейтральний провідник необхідний для забезпечення проходження струму несиметричних навантажень, а тому традиційний інверторний інтерфейс таких мереж повинен бути переобладнаний для підключення нейтрального провідника. Загальна схема такої системи показана на рис. 1 [1].

Якщо навантаження, що живиться від джерела розосередженої генерації, є несиметричним, то напруга на нульовій точці інверторного інтерфейсу, що живить нейтральний провідник, може досить

помітно відхилятися від встановленого рівня. Це призведе до несиметрії вихідної напруги, тобто до зниження її якості, наявність в змінних напругах значних постійних складових, а також до протікання струму значної величини у нейтральному провіднику. Отже, задача розробки інверторних інтерфейсів для живлення чотирипровідних мереж змінного струму з забезпеченням відповідності показників якості електричної енергії щодо несиметрії напруг є актуальною і потребує наукового вирішення [2].

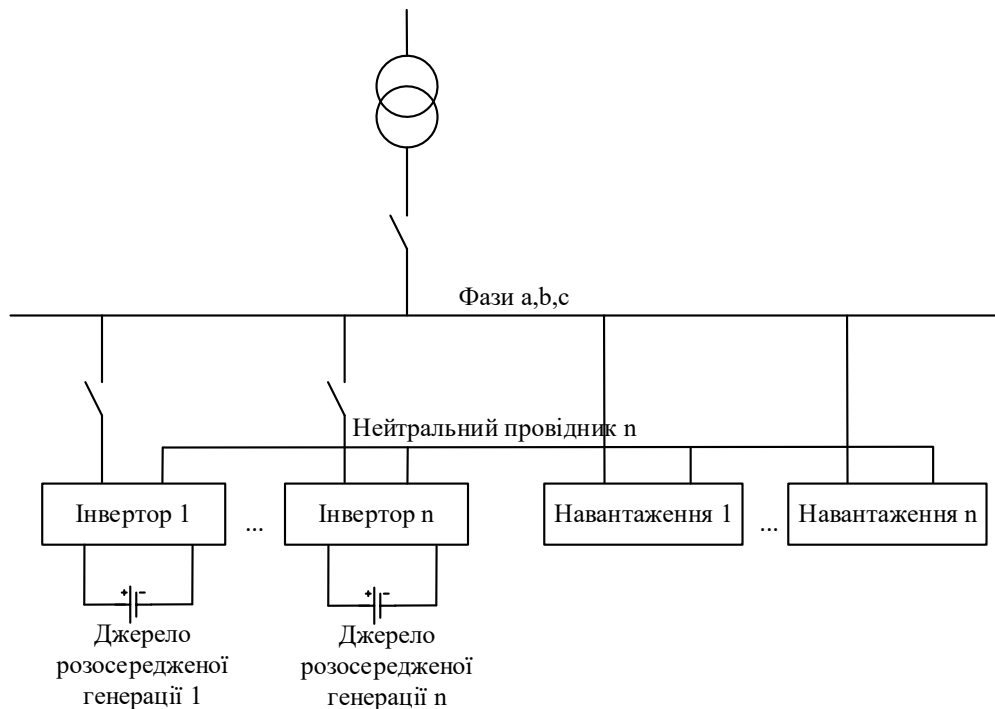


Рис. 1. Електрична мережа з розосередженою генерацією з підключенням нейтрального провідника

Формулювання цілей статті

Полягає у розробці підходу до побудови системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги.

Аналіз досліджень та публікацій

У [1], [2] розглянуто методи підвищення ефективності використання схем з розділенням ланцюга постійного струму шляхом використання надлишкових станів просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції. У [3] представлено метод балансування напруг на конденсаторах ланцюга постійного струму. Але у представлених рішеннях керування напругою нульової точки здійснюється на рівні широтно-імпульсного керування ключами інвертора, а вплив на даний показник з боку системи керування вищого рівня відсутній, що спричинить неможливість використання даних систем при паралельному підключенні декількох інверторів з необхідністю розділення величини струму у нейтральному провіднику між ними. Окрім того, така система не може використовуватися у випадку живлення несиметричних навантажень або при роботі з підключенням до мережі централізованого електропостачання.

Аспекти балансування напруги нульової точки є також актуальними для функціонування багаторівневих перетворювачів електричної енергії, що використовуються у електроенергетичних та електромеханічних системах та дозволяють зменшити рівень напруги, що прикладається до окремих силових напівпровідникових ключів та підвищити коефіцієнт загальних гармонічних викривлень у вихідній напрузі [4-10].

Виклад основного матеріалу

Традиційно мікромережі з чотирипровідними лініями можуть працювати або з підключенням до мережі централізованого електропостачання або в автономному (острівному) режимі. В той же час, слід врахувати той аспект, що не обов'язково усі інвертори у такій мережі повинні мати можливість підключення до чотирипровідної мережі, оскільки частина з них може при цьому працювати у симетричному трифазному режимі. У даній роботі розглянемо варіант, що живлення нейтрального провідника здійснюється від одного інвертора, а в подальшому необхідним є розробка системи керування, що дозволила б розділяти струм у нейтральному провіднику між декількома інверторами, що підключені паралельно [5].

Найпростішим шляхом забезпечення нейтральної точки для підключення нейтрального провідника є використання двох конденсаторів з паралельно підключеними до них балансуєчими резисторами (рис. 2), тобто створення нульової напруги шляхом ділення загальної напруги ланки постійного струму навпіл. Схеми з розділенням напруги в ланці постійного струму широко використовуються у електроприводах з

трирівневими перетворювачами енергії, оскільки в цьому випадку немає необхідності підключати нульову точку напругу до навантаження, а основною метою даного електричного ланцюга є отримання рівних половин загальної напруги в ланцюзі постійного струму. Також дане рішення знаходить своє використання у структурах силових активних фільтрів, оскільки в цьому випадку струм у нейтральному провіднику не містить постійної складової, а інші складові в даному провіднику є порівняно малими. Для таких інверторів є можливим розробити методи широтно-імпульсної модуляції, що придатні для балансування напруг на конденсаторах подільника напруги. Недоліком такого схемного рішення є те, що струм нульового провідника протікає через конденсаторний подільник. Якщо цей струм є значної величини, то необхідні конденсатори значної ємності для зменшення рівня пульсацій напруги на них, а тому напруга на нульовій точці відхиляється від встановленого рівня, що призводить до несиметрії вихідних напруг, яка є особливо помітною при наявності у струмі нейтрального провідника постійної складової [5].

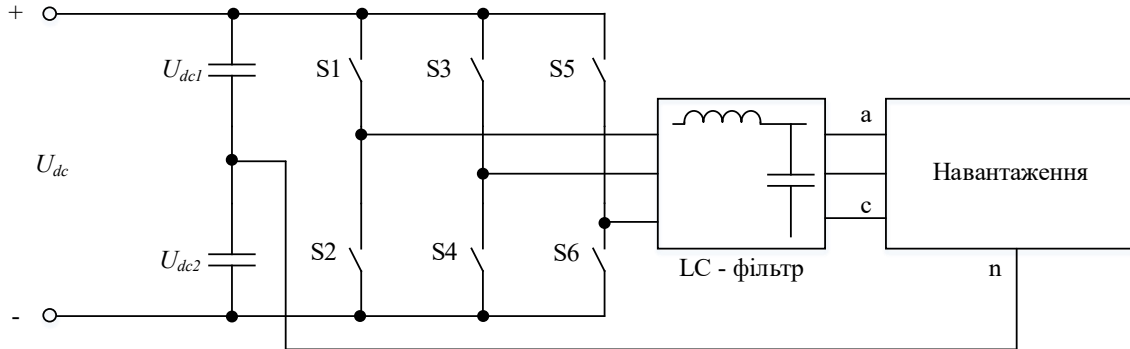


Рис. 2. Схема мережевого інверторного інтерфейсу для підключення нейтрального провідника до джерела розподіленої генерації з використанням розділення напруги ланцюга постійного струму

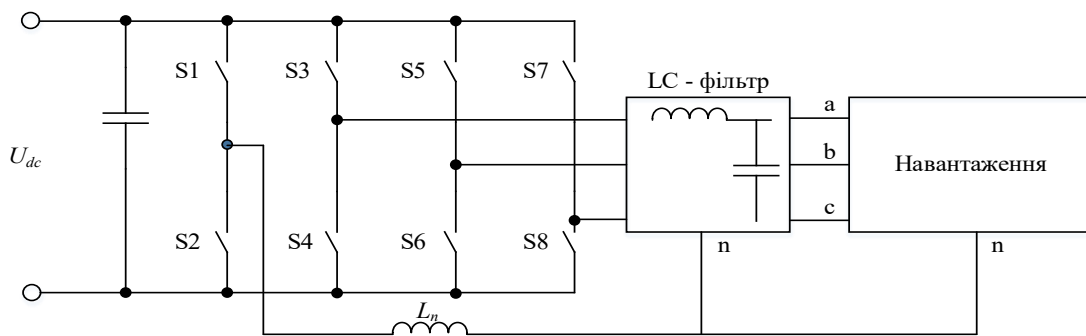


Рис. 3. Схема на базі інвертора з чотирма плечима.

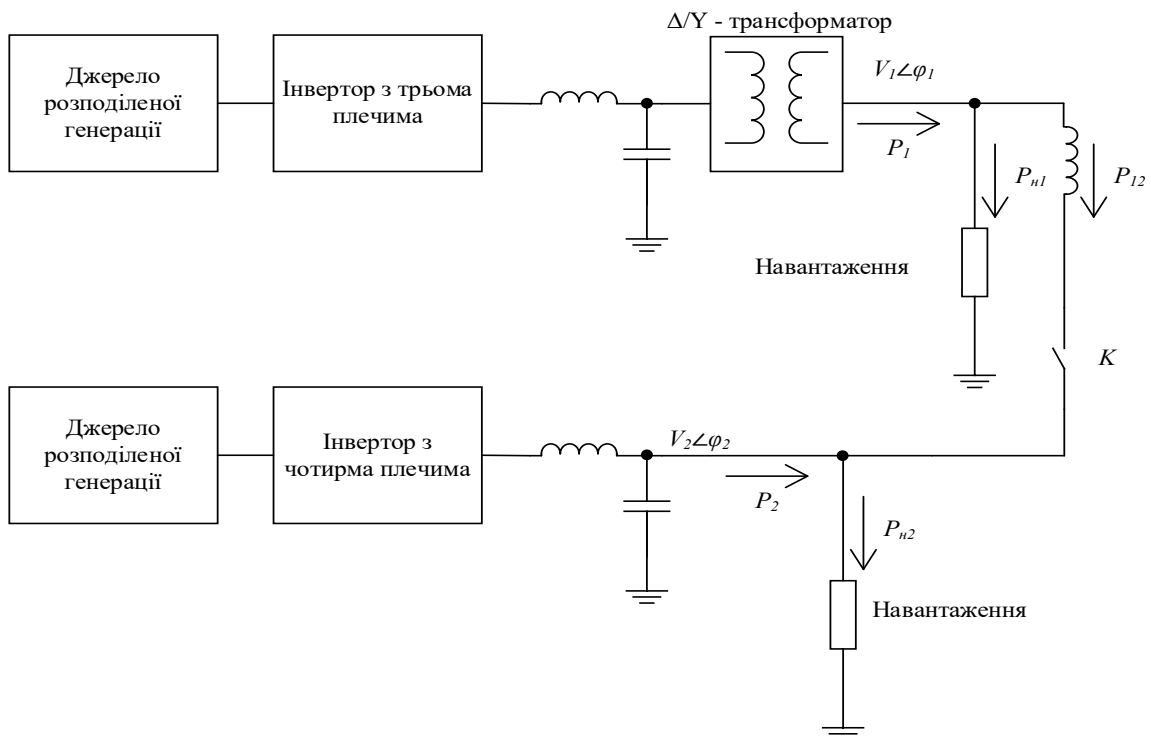


Рис. 4. Структура мікрорежі, що поєднує використання інверторів з трьома та чотирма плечима

Іншим варіантом живлення несиметричних навантажень у мережах з розосередженою генерацією є використання інверторів з чотирма плечима, схема якого показана на рис. 3. Керування таким інвертором може здійснюватися з використанням тривимірної широтно-імпульсної модуляції. Перевагою такої системи є більш ефективне використання напруги в ланцюзі постійного струму, проте керування четвертим плечем інвертора також здійснюється на рівні загальної широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги, а тому забезпечення можливості керування рівнем струму у нейтральному провіднику вимагає розробки складної системи керування. Недоліком цієї схеми є те, що формування нульової напруги здійснюється за рахунок широтно-імпульсної модуляції з використанням більш високих рівнів напруг імпульсів, а тому комутація високих напруг з високою частотою може призводити до виникнення проблем із відповідністю стандартам електромагнітної сумісності [6-8].

Оскільки жити всі навантаження мережі було б недоцільно, то запропоновано структуру мікромережі, що поєднує використання інверторів з трьома та чотирма плечима Рис. 4.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновано метод тривимірної просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції для керування інвертором з чотирма плечима, що відрізняються від існуючих можливістю мінімізації складових напруг негативної та нульової послідовності в мережах з розподіленою генерацією з паралельним підключенням інверторів з трьома та чотирма плечима. Для розробки підходів щодо керування інверторами таких систем необхідно отримати аналітичні залежності, що описуватимуть перетік активної та реактивної потужності між інверторами в залежності від параметрів їх сформованих вихідних напруг.

Література

1. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
2. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрмоєнко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.
7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

References

1. Kozakevych I.A. Systema enerhoefektyvnogo keruvannya dynamichnym kompensatorom vykryvlen napruhy / I.A. Kozakevych, A.A. Kondratenko // Hirnychiy visnyk. – 2019. – Vypusk 105. S. 154-159.
2. Kozakevych I.A. Keruvannya potokamy potuzhnosti hibrydnykh transportnykh zasobiv / I.A. Kozakevych, Yu.H. Osadchuk, R.A. Ilchenko // Hirnychiy visnyk. – 2017. – Vypusk 102. S. 124-129.
3. Kozakevych I.A. Doslidzhennia roboty synkhronnoho dvyhuna z postiinymy mahnitamy v hibrydnykh tiahovykh elektropryvodakh / I.A. Kozakevych, I.V. Kasatkina, L.V. Yeromenko // Hirnychiy visnyk. – 2018. – Vypusk 104. S. 106-110.
4. Kozakevych I.A. Systema keruvannya ventylnymy reaktivnymy dvyhunamy / I.A. Kozakevych, I.I. Shevchenko // Hirnychiy visnyk. – 2017. – Vypusk 102. S. 135-138.
5. Sinchuk I.O. Preventyvna otsinka i osnovni napriamy pidvyshchennia enerhoefektyvnosti pidzemnykh zalizorudnykh pidpriemstv / I.O. Sinchuk, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, T.M. Beridze, I.I. Peresunko // Visnyk Kryvorizkoho natsionalnogo universytetu. Zbiryk naukovykh prats. – Kryvyi Rih, 2020. – Vyp. 50. S. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.

-
7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
 8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
 9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
 10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

Надійшла/Paper received : 19.08.2022 р. Надрукована/Printed :23.11.2022 р.