

УДК 621.31

Терещенко Т.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Федін І.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Овсієнко М.Ю.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лайкова Л.Г.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АВТОНОМНІ ІНВЕРТОРИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто особливості застосування автономних інверторів у системах електроживлення з відновлюваними джерелами енергії. Розглянуто топології та принципи роботи інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у входному колі. Досліджено каскадний багаторівневий інвертор із використанням квазі-Z-інверторів як комірков. Проведено моделювання вказаного типу інверторів. На основі проведеного моделювання та даних, вказаних у літературі, наведено коефіцієнти нелінійності вихідної напруги, визначено переваги і недоліки кожної зі схем інверторів та надано рекомендації щодо їх застосування.

Ключові слова: автономний інвертор, Z-інвертор, перетворювач із квазі-імпедансною ланкою.

Постановка проблеми. У результаті швидкого розвитку та поширення технологій Smart Grid та Місго Grid значно зріс попит на ринку перетворювальних пристроїв, що здатні перетворити сталу напругу від відновлюваного джерела енергії (ВДЕ) на змінну напругу побутової мережі із заданими параметрами якості електричної енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перетворення постійної напруги на змінну здійснюється за допомогою інверторів. Інвертори поділяються на інвертори з джерелом напруги VSI та інвертори з джерелом струму CSI [1]. В інверторі VSI джерело постійного струму має малий або незначний імпеданс. Внаслідок низького внутрішнього опору напруга на виході залишається практично постійною при зміні навантаження. Коротке замикання на виході інвертора викликає швидке зростання струму. В інверторі CSI джерело постійного струму має високий імпеданс. Через великий внутрішній опір напруга на виводах інвертора не залишається постійною у разі зміни навантаження, а змінюється зі зміною навантаження.

Крім того, як інвертор із джерелом напруги (VSI), так і інвертор із джерелом струму (CSI) мають спільний недолік: у них не передбачено регулювання входної напруги.

У разі застосування автономних інверторів у системах електроживлення з відновлюваними джерелами енергії для перетворення сталої вихідної напруги вітрогенератора або сонячної панелі можливе короточасне зменшення входної напруги перетворювача через несприятливі зовнішні умови роботи альтернативних джерел енергії (як-от недостатня освітленість для сонячних панелей та відсутність необхідного вітрового потоку для вітрогенератора) [2].

За таких умов доцільне використання інверторів за схемою з імпедансним (скорочено як Z-перетворювач) та квазі-імпедансним (скорочено як квазі-Z-перетворювач) ланцюгом у входному колі через можливість роботи у додатковому режимі, що має назву «режим пробою» і є аномальним для традиційних мостових схем інверторів. Застосування цього режиму дає змогу підвищувати амплітуду вихідної напруги перетворювача,

що може бути використано для зменшення впливу означених несприятливих зовнішніх умов [3].

З метою зменшення коефіцієнта нелінійності вихідної напруги (THD) застосовують схеми багаторівневих інверторів із використанням комірок, побудованих на основі топології Z- та квазі-Z-перетворювачів [4]. Отримані переваги призвели до подальшого розвитку цих топологій та їх широкого застосування у схемах статичних компенсаторів, перетворювачів частоти для електромагнітних двигунів та перетворювачів енергії для відновлюваних джерел електроенергії [5].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі та створення рекомендацій щодо їх застосування в системах електроживлення з відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ).

Виклад основного матеріалу дослідження.

Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (Z-інвертор). При побудові систем електроживлення з ВДЕ як джерела постійного струму особливої уваги заслуговують перетворювачі з імпедансним ланцюгом у вхідному колі [6]. Z-інвертор являє собою мостовий перетворювач напруги з ланкою постійного струму на вході, що складається зі з'єднаних у X-конфігурації двох конденсаторів і дроселів (рис. 1).

Джерелом постійного струму може бути сонячна панель, паливний елемент або інше джерело сталого струму; навантаження може мати індуктивний, ємнісний, резистивний характер або їх комбінацію. Топологія схеми включає чотири або шість силових ключів для однофазного та трифазного інверторів відповідно, якими можуть виступати комбінація IGBT-транзистора з антипаралельним діодом або MOSFET-транзистор. Для запобігання можливого розряду конденсаторів через джерело в схемі використано діод [5].

Використання імпедансного ланцюга дає змогу використовувати додатковий режим роботи силових ключів – режим «пробою».

Робота імпедансного ланцюга Z-інвертора відбувається у три етапи. На першому етапі інвертор працює в одному з двох стандартних режимів комутації ключів (табл. 1, п. 1). Енергія альтернативного джерела живлення передається до навантаження аналогічно до звичайного мостового інвертора та одночасно з цим відбувається заряд конденсаторів. На другому етапі інвертор працює у режимі «пробою», за якого комутуються ключі однієї або обох стійок інвертора (табл. 1, п. 2). Конденсатори розряджаються, в результаті

чого відбувається накопичення енергії дроселем. Навантаження та джерело живлення на цьому етапі від'єднані від перетворювача. На третьому етапі комутація ключів знову відбувається у стандартному режимі. Енергія, накопичена дроселями, додається до енергії, що передається джерелом і надходить до навантаження табл. 1, п. 3.

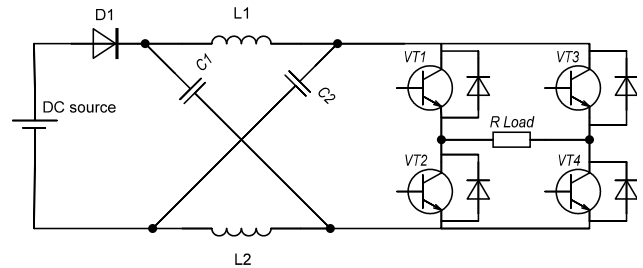


Рис. 1. Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (Z-інвертор)

Режим «пробою» дає змогу збільшити вхідні струм та напругу мостового інвертора, що відбираються від джерела сталого струму без встановлення додаткових перетворювачів на вхід схеми. Використання режиму «пробою» у точці відбору максимальної потужності дає змогу передати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що, своєю чергою, дає змогу максимально раціонально використовувати площу сонячної батареї.

Недоліками схеми є перевантаження силових ключів у режимі «пробою», оскільки струм через них за цього типу комутації може бути удвічі більшим за амплітудні значення, допустимі для звичайного режиму комутації.

За результатами симуляції коефіцієнт нелінійних спотворень для схеми Z-інвертора без встановлення вихідного фільтра становить 80,81% при роботі на активне навантаження. У разі встановлення вихідного фільтра це значення зменшується до 1,836%.

Інвертор з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі (QZ-інвертор). Квазі-імпедансні перетворювачі вперше були представлені в 2008 р. Метою створення цієї топології було підвищення амплітуди максимальної вихідної напруги за застосування режиму «пробою», зменшення навантаження на конденсатори та підтримка сталого струму джерела, зменшення кількості етапів перетворення та підвищення завадостійкості [2]. Квазі-Z-інвертори використовуються для інтеграції фотоелектричних перетворювачів із мережею MicroGrid і як інтерфейсні перетворювачі для паливних елементів [7].

На рис. 2 наведена загальна структура інвертора з квазі-імпедансним джерелом. Імпедансна мережа інвертора складається з двох індукторів L1 і L2 і двох конденсаторів C1 і C2. Індуктор L1, присутній в інверторі квазі-імпедансного джерела, зменшує вхідний струм. Напруга конденсатора C1 нижча, ніж у випадку Z-інвертора.

Принцип роботи інвертора з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі, аналогічно до Z-інвертора, можна описати в три етапи. На першому етапі за одного з двох стандартних режимів комутації ключів відбувається заряд конденсатора C1 за ланцюгом: джерело живлення – дросель L1 – діод D1 – конденсатор C1 – навантаження – джерело живлення (табл. 2, п. 1). Конденсатор C2 заряджається за ланцюгом: джерело живлення – дросель L1 – діод D1 – конденсатор C2 – джерело живлення. На другому етапі за комутації силових ключів у режимі «пробою» відбувається розряд конденсаторів та передача енергії до дроселів (табл. 2, п. 2). Джерело сталого струму при цьому

не відключається від індуктивного ланцюга. На третьому етапі за стандартної комутації ключів енергія, накопичена в дроселі, передається в навантаження (табл. 2, п. 3).

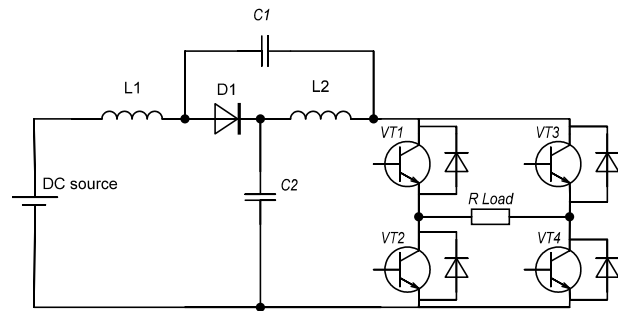


Рис. 2. Інвертор із квазі-імпедансним джерелом

З метою поєднання переваг властивих квазі-імпедансним та багаторівневим інверторам, а саме: можливості роботи у режимі «пробою» та низький коефіцієнт нелінійних спотворень відповідно,

Таблиця 1

Еквівалентні схеми станів Z-інвертора

N	Стан	Схема
1	Стандартний режим комутації ключів	
2	Режим «пробою»	
3	Стандартний режим комутації ключів після стану пробою	

Позначення : - струм джерела; - струм конденсаторів; - струм індуктивностей.

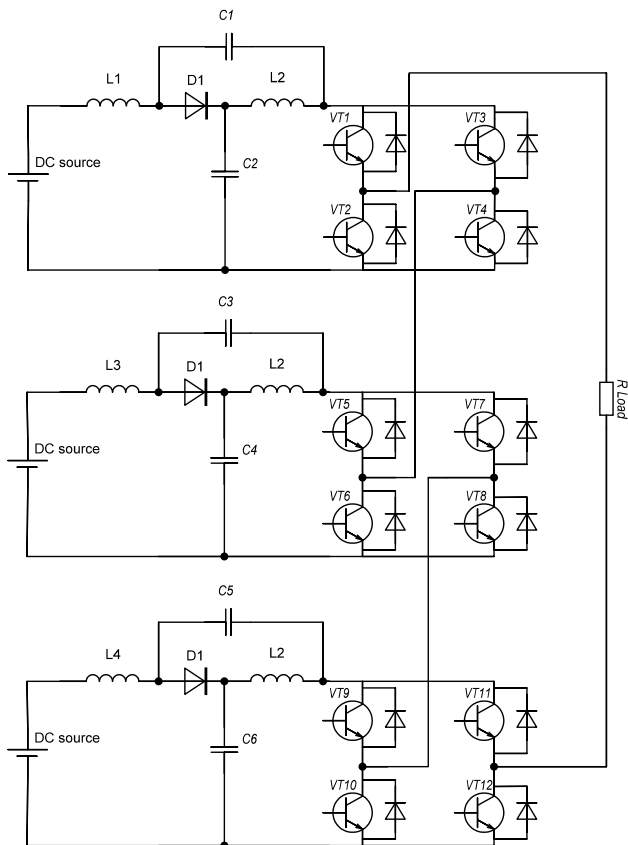


Рис. 3. Трирівневий квазі-мпедансний інвертор

було створено схему каскадного багаторівневого інвертора з комірками на основі квазі-імпедансної топології. Схема трирівневого QZMLI показана на рис. 3.

З метою визначення коефіцієнта нелінійних спотворень багаторівневого квазі-імпедансного інвертора було проведено моделювання трирівневого квазі-імпедансного інвертора в середовищі Matlab Simulink із заданою амплітудою вихідної напруги 260 В та частотою 60 Гц. Спектр вихідної напруги з отриманими результатами коефіцієнта нелінійних спотворень наведено на рис. 4.

Порівняльні характеристики інверторів розглянутих типів інверторів зведено в таблиці 3.

Висновки. Використання Z та QZ-інверторів у системах електроживлення з відновлювальними джерелами енергії дає змогу вирішити проблеми зменшення вихідної напруги вітрогенератора або сонячної панелі внаслідок несприятливих зовнішніх умов, оскільки ці типи інверторів можуть збільшувати вхідні струм та напругу інверторів без встановлення додаткових перетворювачів.

Використання режиму «пробою» у точці відбору максимальної потужності дає змогу передати максимальну потужність сонячної батареї до навантаження, що, своєю чергою, дозволяє максимально раціонально використовувати площу сонячної батареї.

Дослідження інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі показали, що топологія QZ-інвертора додатково дає змогу зменшити кількість елементів схеми, що призводить до зменшення масогабаритних параметрів схеми, нижчих навантажень на компоненти та спрощених методів керування. Так, напруга кон-

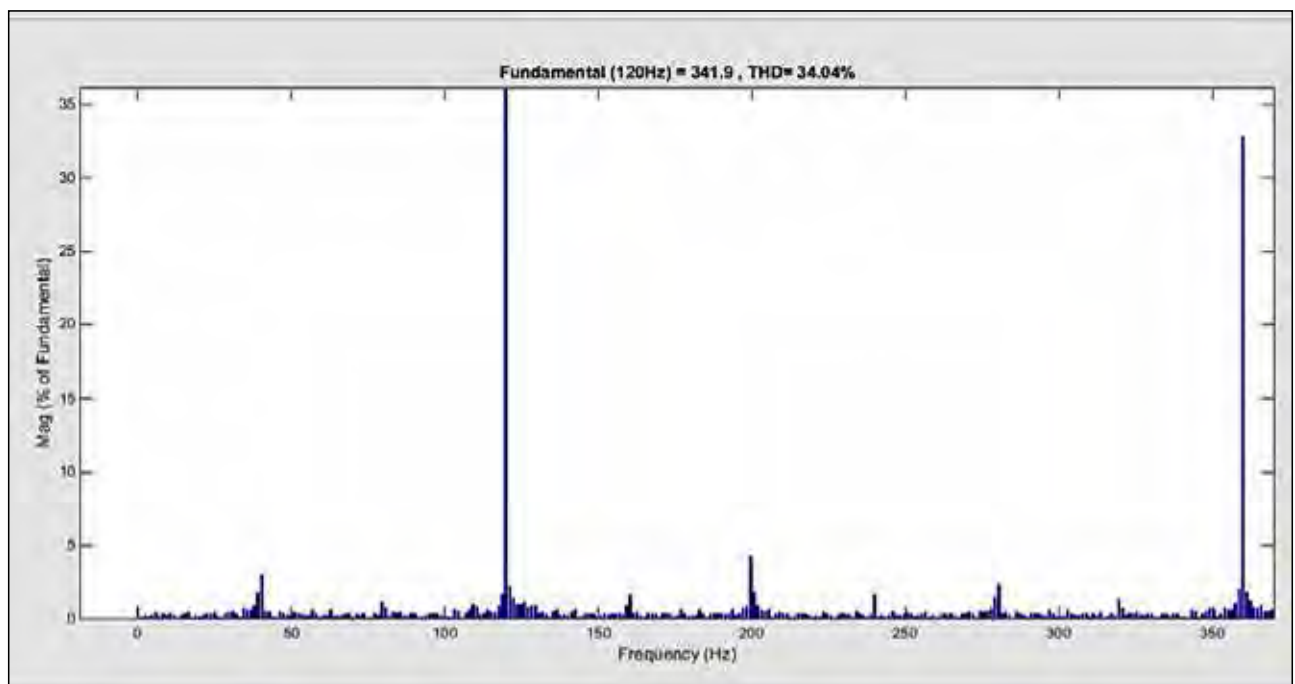


Рис. 4. Спектр вихідної напруги

Еквівалентні схеми станів QZ-інвертора

N	Стан	Схема
1	Стандартний режим комутації ключів	
2	Режим «пробою»	
3	Стандартний режим комутації ключів після стану пробою	

Позначення струмів аналогічно табл. 1.

Багаторівневий квазі-м'єданий інвертор (QZMLI – QZ Multilevel Inverter).

Таблиця 3

Переваги і недоліки схем інверторів

Топологія	Переваги	Недоліки	Сфери застосування	THD
Інвертор напруги Z-типу	Можливість використання «пробивного» стану, що дає змогу оптимізувати передачу потужності від сонячних батарей	Перевантаження ключів схеми за використання режиму «пробою»; необхідність відключення джерела сталого струму за використання режиму «пробою»	Електропривід, системи з фотогенераторами, вітроенергетика	80,81%
QZ-інвертор	Можливість використання «пробивного» стану; менше навантаження конденсаторів; менші габарити перетворювача; можливість неперервної передачі енергії від джерела сталого струму	При роботі на мале навантаження, перетворювачі переходять у режим переривчастого вхідного струму, що призводить до неконтрольованого наростання напруги в ланцюгу сталого струму	Перетворювачі для паливних елементів; сонячні панелі; вітрогенератори; перетворювачі з корекцією коефіцієнта потужності	44,34%
Каскадний QZMLI	Переваги QZ-інверторів; нижчий рівень THD вихідної напруги; можливість підвищення амплітуди вихідної напруги, що дозволяє використовувати джерела сталого струму з меншим значенням вихідного сигналу	Ускладнена будова системи керування відносно звичайного багаторівневого інвертора; високі масогабаритні параметри перетворювачів, створених за цією топологією	Вітрогенератори; сонячні панелі; перетворювачі для живлення асинхронних двигунів	34,04%

денсаторів квазі-імпедансного ланцюга нижча, ніж у випадку інвертора з Z-джерелом.

З метою зменшення значення THD запропоновано схему каскадного багаторівневого інвертора

на базі комірок мостових QZ-інверторів. Показано, що така структура забезпечує зменшення THD при зберіганні високих характеристик QZ-інвертора.

Список літератури:

1. Жуйков В.Я., Рогаль В.В., Будьоний О.В. та ін. Енергетична електроніка. Київ, 2008. URL: http://kaf-pe.kpi.ua/?page_id=675 (дата звернення: 05.02.2019).
2. Шонин О.Б., Салов Р.А. Динамические свойства Z-инвертора в составе частотно-регулируемого электропривода. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 6. С. 73–81.
3. Liivik L. Semiconductor Power Loss Reduction and Efficiency Improvement Techniques for the Galvanically Isolated Quasi-Z-Source DC-DC Converters. 2015. URL: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?2519> (дата звернення: 05.02.2019).
4. Umarani D., Seyezhai Dr.R. A comparative study of conventional and quasi Z-source multilevel inverter for photovoltaic applications. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)*. 2015. Vol. 4. № 2. P. 143–154.
5. Макаров В.Г., Хайбрахманов Р.Н. Многоуровневые инверторы напряжения. Обзор топологий и применение. *Вестник технологического университета*. 2016. Т. 19. № 22. С. 134–138. ISSN: 1998-7072.
6. Hanif M., Basu Malabika, Gaughan K. Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic application with a design example. *Power Electronics, IET*. 2011. Vol. 4. P. 278–287. URL: https://www.researchgate.net/publication/224234061_Understanding_the_operation_of_a_Z-source_inverter_for_photovoltaic_application_with_a_design_example (дата звернення: 05.02.2019).
7. Тюфанова А.А. Сравнительный анализ характеристик традиционного автономного инвертора напряжения с DC-DC преобразователем с квази-импедансным инвертором для системы электроснабжения службы управления движением судов. *Технические науки: традиции и инновации* : материалы III междунар. науч. конф., г. Казань, март 2018 г. Казань : Молодой ученый, 2018. С. 76–83. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/287/13788/> (дата обращения: 24.01.2019).

АВТОНОМНЫЕ ИНВЕРТОРЫ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Рассмотрены особенности применения автономных инверторов в системах электропитания с возобновляемыми источниками энергии. Рассмотрены топологии и принципы работы инверторов с импедансным и квази-импедансным звеньями во входной цепи. Исследован каскадный многоуровневый инвертор с использованием квази-Z инверторов в качестве ячеек. На основании проведенного моделирования и данных, указанных в литературе, приведены коэффициенты нелинейности выходного напряжения, определены преимущества и недостатки каждой из схем инверторов и даны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: автономный инвертор, Z-инвертор, преобразователь с квази-импедансным звеном.

AUTONOMOUS INVERTERS IN POWER SUPPLY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

The features of the use of autonomous inverters in power supply systems with renewable energy sources are considered. Topologies and principles of operation of inverters with impedance and quasi-impedance links in the input circuit are considered. A cascade multi-level inverter was investigated using quasi-Z inverters as cells. On the basis of the conducted modeling and the data indicated in the literature, the nonlinearity coefficients of the output voltage are given, the advantages and disadvantages of each of the inverter circuits are determined, and recommendations on their use are given.

Key words: autonomous inverter, Z-inverter, converter with quasi-impedance link.