Електронні системи та сигнали

УДК 621.314.58

Порівняння топологій інверторів за коефіцієнтом нелінійних спотворень вихідної напруги

Федін І.С.,ORCID 0000-0003-0264-5067
e-mail igorfedin2@gmail.com
Кафедра промислової електроніки www.kaf-pe.kpi.ua
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.ua
Київ, Україна

***Анотація*—Проведено огляд топологій інверторів напруги, що знаходять широке використання у системах електроживлення з альтернативними джерелами енергії, визначено переваги та недоліки кожної з топологій. Більш детально розглянуто будову та принцип функціонування інверторів з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі. Проведено порівняння багаторівневої каскадної топології, топології з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі (z-інверторів), топології з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі (квазі-z-інверторів), а також багаторівневих каскадних топологій з використанням z- та квазі-z-інверторів у якості топології силової частини окремого модуля за коефіцієнтом нелінійних спотворень вихідної напруги. За результатами отриманими в результаті досліджень наведено рекомендації щодо застосування досліджених топологій виходячи з вимог навантаження до якості вихідної напруги та типу використовуваного джерела альтернативної енергії.**

Бібл. 11, рис. 4.

Ключові слова — багаторівневий інвертор напруги; каскадна схема; схема з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі; схема з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі; багаторівневий z-інвертор; багаторівневий квазі-z-інвертор.

I. Вступ

Популяризація та широке розповсюдження альтернативних джерел енергії призвело до зростання попиту на сучасні енергоефективні перетворювачі електричної енергії, що, в свою чергу, обумовлює необхідність розробки нових топологій, здатних забезпечити високу якість вихідної напруги та максимальне використання енергії джерела. Найбільше поширення серед розроблених топологій знайшли багаторівнева каскадна топологія, топології з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі та їх поєднання [1-4]. Метою статті є порівняння на основі результатів симуляції та результатів досліджень, наведених у літературі, цих топологій за параметром коефіцієнта нелінійних спотворень вихідної напруги. Виходячи з результатів проведенного порівняння, наведено рекомендації щодо їх застосування.

II. Теоретичні відомості та огляд літератури

Механізм формування напруги навантаження схем каскадних багаторівневих інверторів заснований на підключенні модулів інвертора у відповідний момент часу таким чином, що вихідні напруги кожного з модулів, додаючись у навантаженні, формують напругу бажаної форми і амплітуди [1-4]. Що більшою є кількість інверторних комірок, то більш близькою є форма напруги до заданої [5-8].

Особливістю топології z-інвертора є імпедансний ланцюг, встановлений між джерелом сталого струму та мостовим інвертором (рис.1). Звичайний мостовий інвертор передбачає роботу у восьми станах силових ключів. Використання імпедансного ланцюга робить можливим роботу інвертора у дев'ятому, додатковому стані, що називається «пробивним» або «станом пробою» [9]. Можливість роботи у стані пробою дозволяє компенсувати зменшення вихідної напруги альтернативного джерела живлення внаслідок несприятливих зовнішніх умов роботи (низької освітленості сонячної панелі, відсутності взаємодії з вітровими потоками вітрогенераторів, тощо). Також використання стану пробою у точці відбору

Copyright (c) 2019 Федін І. С.

максимальної енергії сонячної батареї дозволяє найбільш ефективно використовувати площу сонячної панелі [9]. Недоліком топології з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі є ускладнена структура порівняно
з мостовим інвертором, підвищене навантаження на силові ключі за рахунок використання стану пробою, вищий коефіцієнт нелінійних спотворень без використання вихідного фільтра, зменшення вхідного сталого струму [10,11].

Топологію з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі (рис.2) було створено з метою зменшення напруги на конденсаторах та підтримки сталої вихідної напруги [11].

З метою об'єднання переваг багаторівневих та інверторів з імпедансним ланцюгом у вхідному колі було розроблено топологію багаторівневих інверторів з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі. Функціонування силової частини та системи керування даної топології наближене до функціонування схеми каскадного багаторівневого інвертора, проте з урахуванням стану пробою, який частково у часі заміщує нульовий стан.

Використання багаторівневої топології обумовлене перш за все необхідністю зменшення коефіцієнту нелінійних спотворень вихідної напруги.

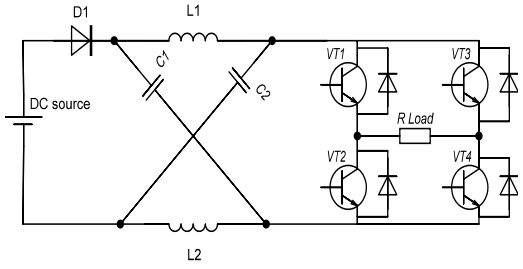


Рис.1 Інвертор з імеданским ланцюгом у вхідному колі (Z-інвертор)

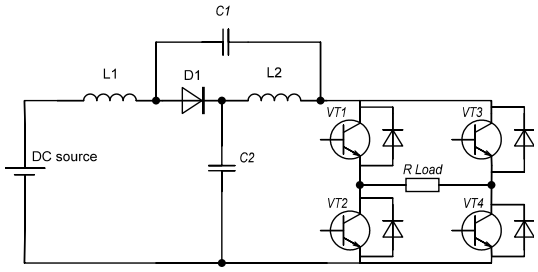
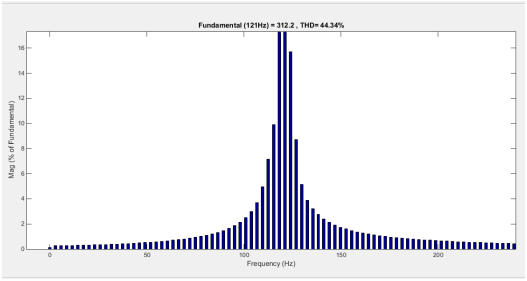


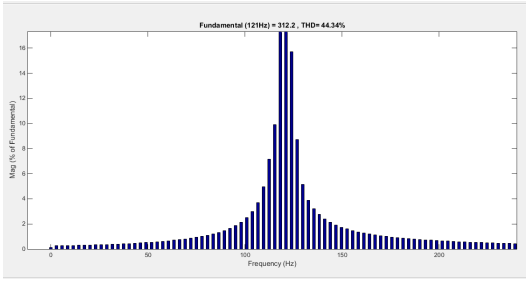
Рис.2 Інвертор з квазі-імеданским ланцюгом у вхідному колі (квазі-z-інвертор)

Таблиця 1

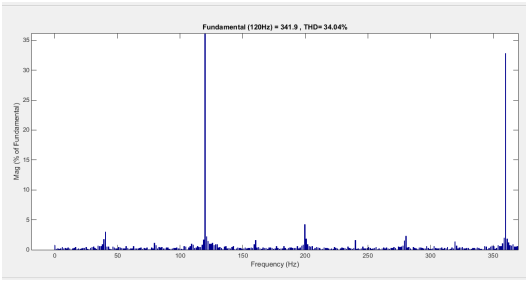
Топологія	THD
Багаторівневий каскадний інвертор	22.11%
Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі (z-інвертор)	44.34%
Інвертор з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі (квазі-z-інвертор)	44.34%
Багаторівневий інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному контурі	34.31%
Багаторівневий інвертор з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі	34.31%



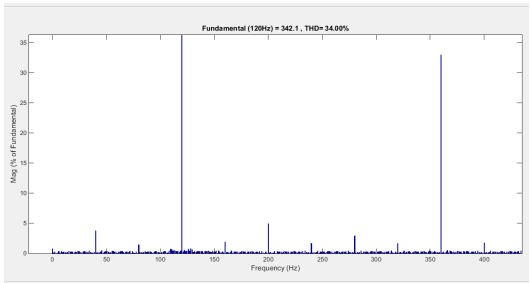
а)



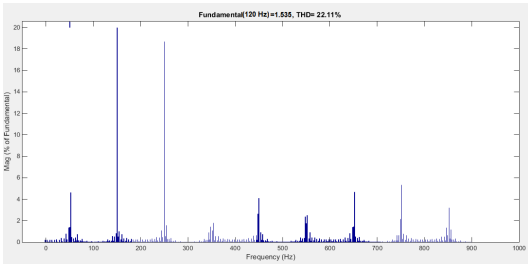
б)



в)



г)



д)

Рис.3 Спектр вихідної напруги інвертора: а - з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі; б - з імпедансним ланцюгом у вхідному колі; в - багаторівневого інвертора з імпедансним ланцюгом у вхідному колі; г - багаторівневого інвертора з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі; д - багаторівневого інвертора з відокремленими джерелами сталого струму

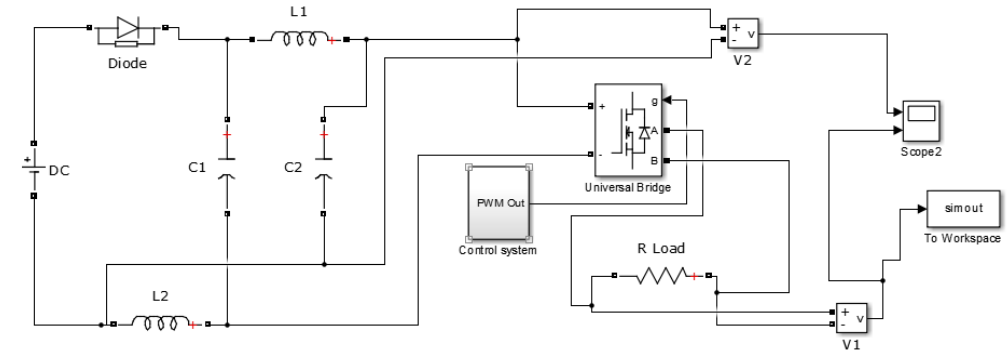
III. Визначення коефіцієнту нелінійних спотворень та аналіз результатів

Для визначення коефіцієнту нелінійних спотворень (THD – total harmonic distortion) було проведено симуляцію роботи означених вище топологій

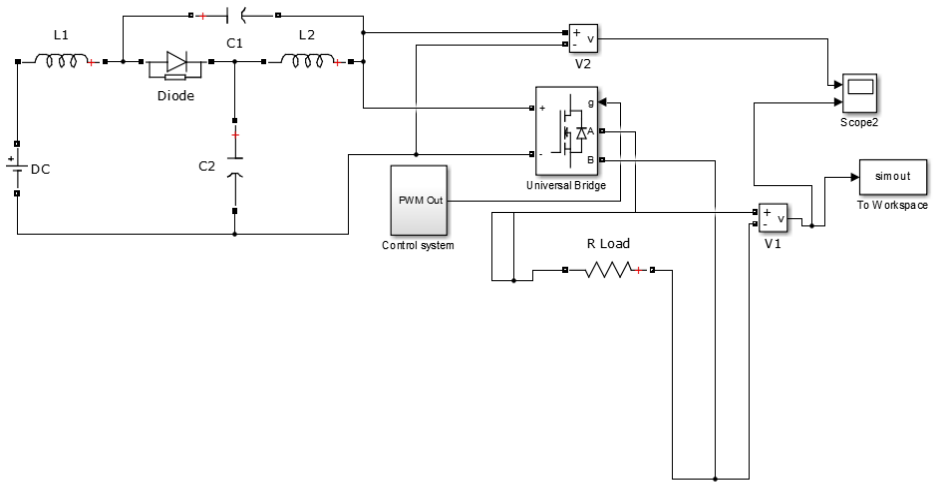
Copyright (c) 2019 Федін І. С.

в середовищі MATLAB. Вихідними параметрами було обрано синусоїдальну напругу амплітудою 260 В та частотою 120 Гц. У якості моделей для симуляції були обрані трьохкомірковий інвертор, трьохкоміркові багаторівневі інвертори з імпедансними та квазі-імпедансними комірками та інвертори з імпедансним та квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі.

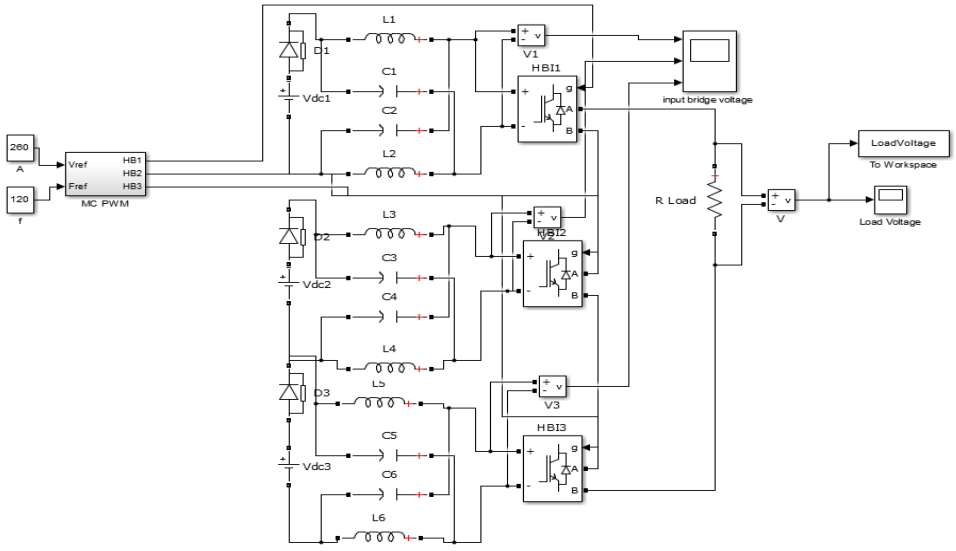
Значення THD для різних топологій зведено у табл. 1. Спектри вихідної напруги наведені на рис.3, а схеми MATLAB-моделей - на рис.4.



а)



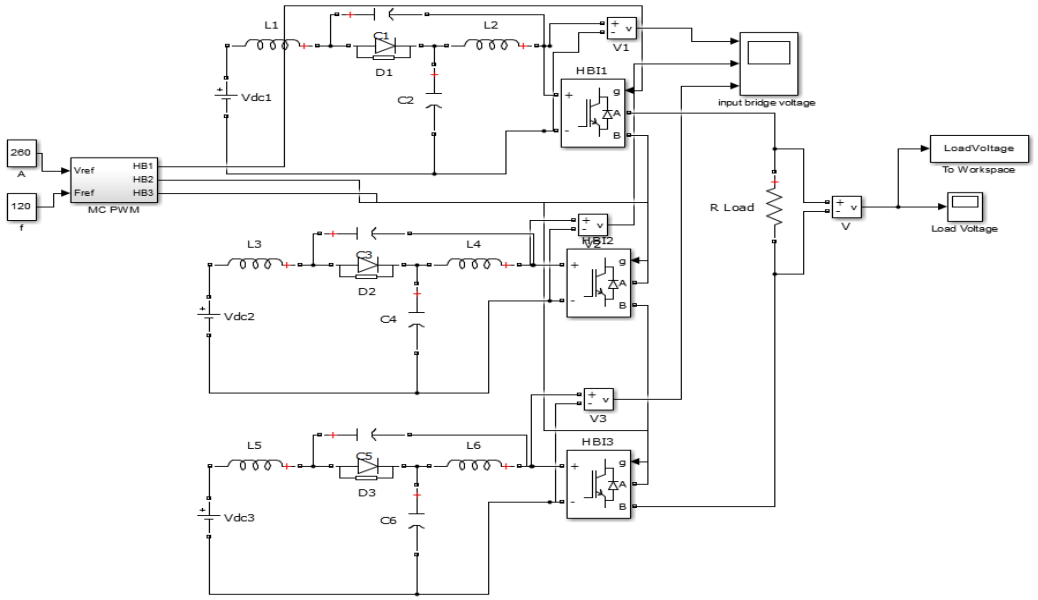
б)



в)

Copyright (c) 2019 Федін І. С.

г)



д)

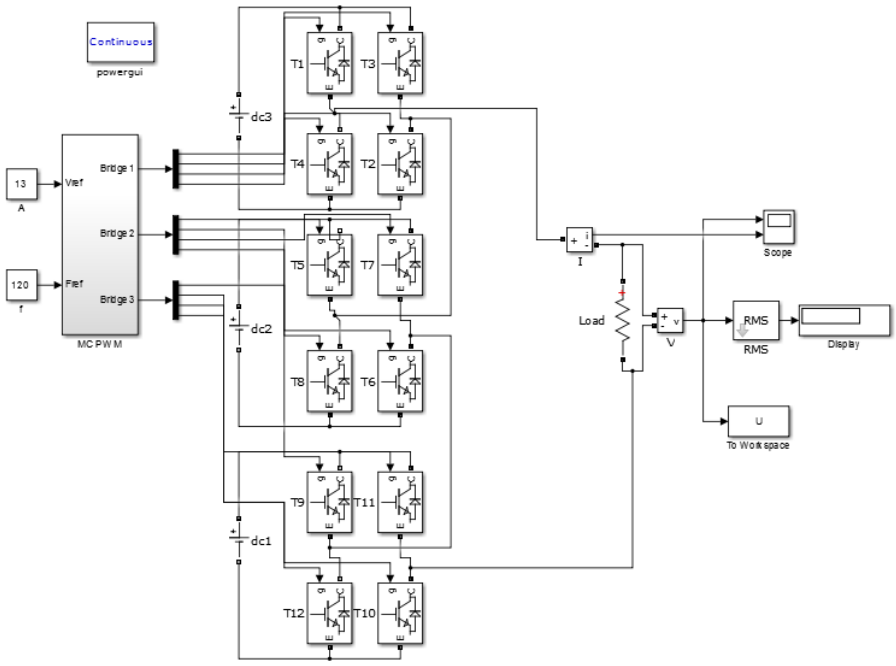


Рис.4 Моделі інверторів: а – з імпедансним ланцюгом у вхідному колі; б - з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі; в - багаторівневого інвертора з імпедансним ланцюгом у вхідному колі; г - багаторівневого інвертора з квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному колі; д - каскадного багаторівневого інвертора з відокремленими джерелами сталого струму

Виходячи з результатів проведених досліджень, можна визначити, що при живленні чутливого до форми вхідної напруги навантаження, такого як аналогові підсилювальні пристрої та радіоприймачі, незалежно від типу використовуваного альтернативного джерела енергії доцільнішим буде застосування багаторівневого інвертора з мостовою структурою комірки. При застосуванні сонячної панелі у якості вхідного джерела сталої напруги доречним є застосування багаторівневого інвертора з імпедансним або квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі, оскільки дане рішення дозволяє максимально повно використовувати площу сонячних панелей та компенсувати зменшення вхідної напруги за несприятливих зовнішніх умов. Використання топології з з імпедансним або квазі-імпедансним ланцюгом у вхідному контурі можливе за невисокої чутливості навантаження до форми вхідної напруги та необхідності компенсації зовнішніх умов. Оскільки в результаті симуляції схем з імпедансними та квазі-імпедансними ланцюгами у вхідному колі було отримано однакові значення коефіцієнту нелінійних спотворень, то ефективнішим є застосування топологій з квазі-імпедансним ланцюгом.

Висновки

В результаті порівняльного аналізу різних топологій інверторів, що застосовуються для перетворення

Copyright (c) 2019 Федін І. С.

сталої напруги альтернативних джерел електроенергії, визначено їх недоліки та переваги, розраховано коефіцієнт нелінійних спотворень MATLAB-моделей, наведено рекомендації щодо застосування кожної зі схем, виходячи з вимог навантаження, типу використовуваного альтернативного джерела електроенергії та складності практичної реалізації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

[1] M. N. Makarov, R. G. Haybrakhmanov, “Mnogourovnevie invertory napryazhenia. Obzor topologiy i preminenie [Multilevel voltage inverters. Topology overview and application],” *Vestnik tehnologicheskogo universiteta,* vol. 19, no. 22, pp. 134-138, 2016,
URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=27441520

[2] J. Lai, F. Peng, “Multilevel converters - a new breed of power converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.,* vol. 32, no. 3, pp. 509-517, May/Jun.1996, **DOI:** 10.1109/28.502161

[3] M. Glinka and R. Marquardt, “A new ac/ac multilevel converter family,” *IEEE Trans. Ind. Electron.,* vol. 52, no. 3, pp. 662-669, Jun. 2005,
DOI: 10.1109/TIE.2005.843973

[4] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Ponu, S. Kouro, “Multilevel voltage-source-converter topologies for industrial medium-voltage drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.,* vol. 54, no. 6, pp. 2930–2945, Dec. 2007,
DOI: 10.1109/TIE.2007.907044

[5] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou,, L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M.A. Perez, J.I. Leon, “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters”, *IEEE Trans.Ind.Electron.,* vol. 57, no.8, pp. 2553-2580, Aug. 2010,
DOI: 10.1109/TIE.2010.2049719

[6] P. V. Krishna, A. K. Singh and R. Gupta, "Grid connected solar PV fed cascaded multilevel inverter implementation using XSG platform," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, pp. 004678-004683, 2015,
DOI: 10.1109/IECON.2015.7392830

[7] P. Samuel, N. Chandrashekhar and R. Gupta, "Wind energy conversion based on seven-level cascaded H-bridge inverter using LabVIEW FPGA," *2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, Allahabad, pp. 1-6, 2010.
DOI: 10.1109/ICPCES.2010.5698653

[8] F. Peng, “Z-source inverter,” *IEEE Trans. Ind. Appl.,*vol. 39, no. 2, pp. 504-510, March/April 2003,
DOI: 10.1109/TIA.2003.808920

[9] M. Hanif, P.Basu, K.Gaughan, “Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic operation with a design example,” *IET Power Electron.,* vol.4, no.3, pp. 278-287, Feb. 2010, **DOI:** 10.1049/iet-pel.2009.0176

[10] K. Rajambal, P. Sanjeevikuar, A. Chinnaponnu, “Comparison of MLI and Z-source inverter for transformerless operation of Single-Phase photovoltaic systems,” *Thahammasat Int. J. Sc., Tech.,* vol. 15, no. 1, January/March 2010, **URL:** https://www.researchgate.net/publication/231522437_Comparison_of_MLI_and_Z-Source_Inverter_for_Transformerless_Operation_of_Single-Phase_Photovoltaic_Systems

[11] A. Abdelhakim, P. Davari, F. Blaabjerg and P. Mattavelli, "Analysis and Design of the Quasi-Z-Source Inverter for Wide Range of Operation," *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, Padua, 2018, pp. 1-6.
DOI: 10.1109/COMPEL.2018.8458486

Надійшла до редакції 10 квітня 2019 р.

УДК 621.314.58

Сравнение топологий инверторов по коэффициенту нелинейных искажений выходного напряжения

Федин И.С., ORCID 0000-0003-0264-5067
e-mail igorfedin2@gmail.com
Кафедра промышленной электроники www.kaf-pe.kpi.ua
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» www.kpi.ua
Киев, Украина

***Аннотация*—Проведен обзор топологий инверторов напряжения, широко использующихся в системах электропитания с альтернативными источниками электроэнергии, определены достоинства и недостатки каждой из топологий. Подробнее рассмотрены принципы построения и функционирования инверторов с импедансной и квази-импедансной цепью во входном контуре. Проведено сравнение многоуровневой каскадной топологии, топологии с импедансной цепью во входном контуре (z-инвертор), топологии с квази-импедансной цепью во входном контуре (квази-z-инвертор), многоуровневых каскадных топологий с использованием z- и квази-z-инверторов в качестве топологии силовой части отдельного модуля по коэффициенту нелинейных искажений выходного напряжения. На основании результатов полученных в ходе исследований приведены рекомендации по использованию**

Copyright (c) 2019 Федін І. С.

рассмотренных топологий исходя из требований нагрузки к качеству выходного напряжения и типа используемого альтернативного источника электроэнергии.

Библ. 11, рис. 4.

Ключевые слова — многоуровневый инвертор напряжения; каскадная схема; схема с импедансной цепью во входном контуре; схема с квази-импедансной цепью во входном контуре; многоуровневый z-инвертор, многоуровневый квази-z-инвертор.

UDC 621.314.58

Comparison of Inverter Topologies by Total Har-Monic Distortion of Output Voltage

I. S. Fedin, ORCID 0000-0003-0264-5067
e-mail igorfedin2@gmail.com
Department of Industrial Electronics www.kaf-pe.kpi.ua
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» www.kpi.ua
Kyiv, Ukraine

***Abstract*—This paper is devoted to comparison analysis of different topologies of the inverters that are used in the systems with alternative energy sources. A brief theoretical review of the most commonly used topologies for the power systems with alternative energy sources are given, their main advantages and disadvantages are determined. In close details were considered principles of construction and operation of the topology with impedance input circuit (z-inverter), and topology with quasi-impedance input circuit (quasi-z-inverter). A special feature of these topologies is ability to operate in special mode which is called "shoot-trough state". It means that one of the inverter's arms is short-circuited for a small period of time which substitutes a part of the zero state. Possibility to operate in such state allows to increase the input voltage of the inverter that can be very suitable in inverters that are included in photovoltaic power systems. Implementation of shoot-trough state allows tracking maximum power point of the photovoltaic array without implementation of additional converters for this. Implementation of quasi-z-topology allows to reduce the load on the passive components of the impedance circuit and to ensure continuous power take-off from the solar batteries array, which makes it easier to track the maximum power point. As an evolution of the cascade multilevel and z- / quasi-z-inverter topologies multilevel cascaded topologies with z- and quasi-z-inverters in separate blocks were considered. The main principles of this structure allows to unite all advantages of cascaded multilevel and z-/quasi-z topologies in one device but also bring few drawbacks such as complexity of the implementation and higher cost of the resulting device. These topologies were simulated in MATLAB Simulink, output voltage spectra and total harmonic distortion was obtained and analyzed. According to the obtained results of the simulation and review recommendations for proper selection of the topology of inverter depending on the type and sensitivity to the quality of the input voltage of the load and type of chosen alternative energy source are given. According to this results convenient cascaded multilevel topology could be recommended for the loads that are especially vulnerable to low quality of input supply voltage such as analog amplifiers and radio receivers as topology that have lowest THD (Total harmonic distortion) ratio. Z-/quasi-z-topologies are appropriate to consider as a converter of photovoltaic power system that will work on loads that are not demanding to the quality of supply voltage as topologies with highest level of THD of the output voltage. Cascaded topologies with z- and quasi-z-inverters in separate blocks could be considered as a compromise that could be used in photovoltaic power systems that works on vulnerable loads but such solution increases the cost of a whole power system and complication of the control system.**

Ref. 11, fig. 4.

Keywords — cascade multilevel voltage inverter; z-inverter; quasi-z-inverter; multilevel z-inverter; multilevel quasi-z-inverter.

Copyright (c) 2019 Федін І. С.