

Вибір топології інвертора для автономних систем електроживлення з використанням сонячних панелей

Федін І. С., ORCID [0000-0003-0264-5067](https://orcid.org/0000-0003-0264-5067)

Факультет електроніки

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» www.kpi.ua

Київ, Україна

Анотація—У матеріалах статті наведено рекомендації щодо вибору топології інвертора для систем електроживлення Microgrid з використанням сонячних панелей у якості відновних джерел енергії виходячи з параметру граничних значень коефіцієнту нелінійних спотворень напруги, зазначених у міжнародних стандартах щодо якості напруги побутової мережі, вимог викликаних специфікою будови систем та особливостей функціонування використовуваного типу джерел живлення.

Ключові слова — відновлювані джерела електроживлення; microgrid; коефіцієнт нелінійних спотворень; z-інвертор; багаторівневий інвертор; квазі-z-інвертор.

I. ВСТУП

Дослідження у сфері розробки енергоефективних перетворювачів для систем електроживлення з використанням відновних джерел електроенергії проводяться з моменту створення та широкого розповсюдження відновних джерел енергії, зазвичай у рамках реалізації певної державної або міжнародної програми зі збільшення відсотку енергії, отриманої відновлювальними енергоносіями [1]. Підвищення ціни палива для традиційних генераторів енергії та уваги до питань екологічної безпеки, досягнення в області створення силових напівпровідникових пристроїв та систем керування у 80-90-х роках минулого сторіччя призвели до створення нових топологій перетворювачів, основною задачею яких було забезпечення підвищення енергоефективності систем електроживлення з відновними джерелами. Серед них слід виділити топології, що враховували особливості роботи використовуваних відновних джерел енергії (z-інвертори) та топології, спрямовані на формування квазі-синусоїдальної напруги у навантаженні з метою зменшення втрат на фільтрацію як такі, що зробили значний внесок у одальший розвиток галузі. Недоліками розроблених топологій було часткове збільшення енергоефективності системи через неповне врахування факторів впливу на даний параметр.

Додатковий вплив на розвиток перетворювачів для систем електроживлення з використанням відновлюваних джерел електроенергії здійснило створення та поступова популяризація концепції microgrid. Сутність концепції полягає у формуванні повністю автономної мережі електроживлення повністю відокремленої від традиційної комунальної мережі, що

накладає додаткові вимоги до підвищення енергоефективності перетворювачів [2]. На даний момент технологія зазнає розповсюдження в технологічно розвинених країнах, що часто зазнають впливу стихійного лиха, мають пересічений ландшафт або острівне розташування, що ускладнює застосування традиційних рішень з енергопостачання.

На даний момент попит на системи електроживлення з використанням відновлюваних джерел електроенергії продовжує зростати [1]. Основними сьогоденними напрямками діяльності у галузі є модернізація силової частини перетворювачів та створення нових систем керування з метою синтезу певної компромісної моделі перетворювача зданої задовольнити більшість вимог, що висувуються до даних пристроїв як користувачами, так і міжнародним та місцевим законодавством з регулювання якості напруги користувацької мережі, особливостями роботи використовуваних джерел живлення, а також будовою систем електроживлення визначеною специфікою ландшафту, вимогами до максимальної вихідної потужності та економічної доцільності [1]-[2].

Тому задачею даної статті поставлено формулювання та аналіз основних вимог до топології та параметрів перетворювачів у системах електроживлення з сонячними панелями з позиції загальної будови системи та вимог щодо якості вихідної напруги, визначених міжнародним та європейським законодавством з метою визначення топології силової частини інвертора, що може стати базою для створення моделі перетворювача здатної забезпечити повну відповідність визначеним вимогам.



II. КЛАСИФІКАЦІЯ ВИМОГ ДО ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ. ФОРМУВАННЯ ЗАГАЛЬНОГО СПИСКУ ВИМОГ

Вимоги, що встановлюються до інверторів, що входять до складу систем з використанням сонячних модулів умовно можна поділити на чотири групи: загальні вимоги до перетворювачів у складі систем електроживлення з відновлювальними джерелами енергії, визначені мережею, визначені особливостями роботи сонячних модулів, визначені схемою організації системи електроживлення. Загальний список вимог з коротким змістом кожної групи наведено у Таблиці 1

Основною вимогою визначеною особливостями роботи модулів сонячних батарей є забезпечення неперервної роботи в точці максимальної потужності. Відстеження знаходження вихідної вольт-амперної характеристики у точці максимальної потужності має бути автоматизованим та зазвичай виконується зміною коефіцієнту заповнення імпульсу керування підвищуючого імпульсного перетворювача у вхідному колі інвертора [3]-[4]. Важливою умовою для підтримання режиму відбору максимальної потужності є мінімізація пульсацій вихідної напруги сонячної панелі та, відповідно, забезпечення неперервності вхідного струму конвертора. У літературних джерелах наведено розрахунки за якими для модуля сонячної батареї з вихідною напругою 35 В величина пульсацій вихідної напруги має бути нижчою за 8.5% для отримання коефіцієнту використання сонячних батарей у 98% [3]-[4].

Загальними вимогами до конверторів основною задачею яких є перетворення сталої вихідної Одним напруги можна назвати зменшення втрат енергії в процесі перетворення напруги та вимоги до надійності перетворювачів. із схемотехнічних рішень, що дозволяють водночас зменшити втрати енергії та підвищити загальну надійність перетворювача, є мінімізація кількості ключів, що беруть участь у процесі перетворення. Дана методика є особливо важливою для інверторів, задачею яких є перетворення вихідної енергії сонячних панелей, оскільки для забезпечення можливості роботи конвертора у точці відбору максимальної потужності сонячної батареї зазвичай до складу схеми конвертора включають підвищуючий перетворювач сталої напруги, що встановлюється у вхідне коло конвертора та вносить комутаційні та омичні втрати на власному силовому ключі та нелінійних елементах що входять до його складу до загальних втрат на складових елементах конвертора. Тому для уникнення додаткових втрат на даному елементі перетворювача доцільним є використання топологій інвертора з можливістю підвищення вхідної напруги без встановлення додаткового підвищуючого перетворювача, таких як топології з імпедансним ланцюгом у вхідному колі (Рис. 1) [5]-[6].

Вимоги визначені будовою систем базуються на особливостях організації підключення модулів до перетворювача та перетворювача до користувацької мережі.

Загальна структурна схема будь-якої системи електроживлення з використанням сонячних батарей наведена на Рис. 2, і включає в себе масив сонячних батарей, конвертор, що включає в себе конвертор, що складається з інвертора, вихідного пасивного фільтру, підвищуючого перетворювача сталої напруги, трансформатора та систему керування [7][8][9]. Проте поєднання даних елементів може проводитися за різними схемами серед яких можна виділити чотири основних варіанти схематично зображені на рис.3 та включають в себе топології з центральним інвертором (Рис. 3а), з лінійним підключенням інвертора (Рис. 3б), з багатолінійним підключенням інвертора (Рис. 3в), та з модульним підключенням інвертора (Рис. 3г). Вибір топології системи відбувається, перш за все, виходячи з необхідної вихідної потужності, економічних параметрів та особливостей ландшафту розташування системи [10]-[14]. Найбільш розповсюдженою з наведених є топологія з багатолінійним підключенням через широкі можливості зі зміни кількості підключених сонячних панелей та рівня вихідної потужності. Будова системи з такою структурою передбачає підключення декількох модулів з відокремленими перетворювачами сталої напруги паралельно до спільного інвертора, що дозволяє використання модульних каскадних багаторівневих топологій з відокремленими джерелами вхідної сталої напруги.

ТАБЛИЦЯ 1 Основні вимоги до конвертора

Вимоги до конвертора	Короткий зміст вимоги
Визначені мережею	Величина коефіцієнту нелінійних спотворень на рівні визначеному міжнародними та місцевими стандартами Дані
Визначені особливостями роботи сонячних модулів	Можливість забезпечення роботи сонячних панелей у точці відбору максимальної потужності, підвищення вхідної напруги перетворювача
Загальні вимоги до перетворювачів у системах з відновними джерелами енергії	Забезпечення мінімальних втрат при перетворенні енергії
Визначені схемою організації системи електроживлення	Врахування особливостей будови системи електроживлення

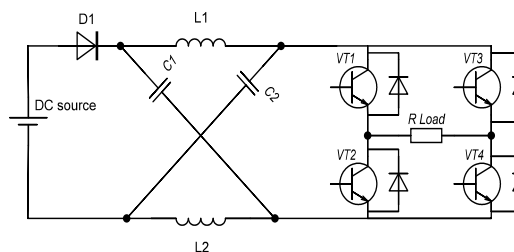


Рис. 1 Інвертор з імпедансним ланцюгом у вхідному колі

DOI: 10.20535/2617-0965.2020.3.2.199028



Рис. 2 Структура системи електроживлення з використанням сонячних батарей у якості первинного джерела енергії

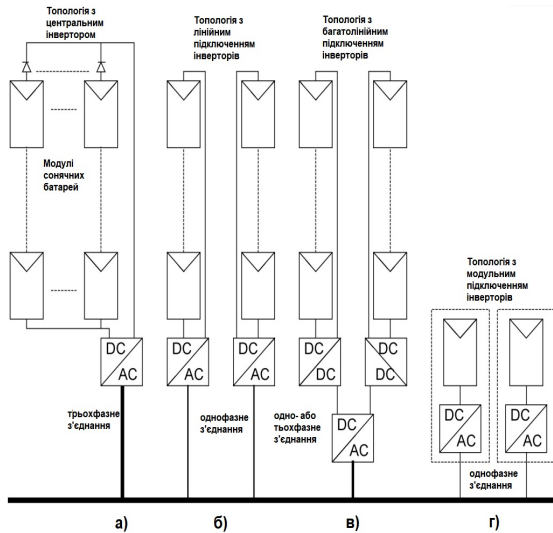


Рис. 3 Класифікація топологій систем електроживлення з використанням сонячних панелей

Таблиця 2 ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ НАПРУГИ ПОБУТОВОЇ МЕРЕЖІ

Назва стандарту	IEC 61727	IEEE 1547
Максимальне значення КНС	5%	5%
Амплітуда вихідної напруги	85-110% (196В-253В)	88-110%
Частота вихідної напруги	50±1 Гц	2,1 кГц

Підключення інвертора до загальної мережі змінного струму зобов'язує до виконання стандартів, що визначають параметри якості напруги мережі. Серед даних стандартів можна виділити європейські стандарти IEC 61727 «Characteristics of the Utility Interface for Photovoltaic (PV) Systems», EN 61000-3-2 «Limits for Harmonic Current Emission (Equipment Input Current < 16 A per Phase)», IEEE 1547 «Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems» та IEEE 519-1992 «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems» [15].

Основні параметри якості вихідної напруги інверторів систем електроживлення з сонячними панелями зведено до Таблиця 2.

З наведених параметрів можна визначити, що загальними вимогами є обмеження КНС вихідного струму на рівні 5%. Для досягнення визначених параметрів з КНС необхідне збільшення вихідного фільтра інвертора, проте його масогабаритні параметри можуть бути зменшені шляхом застосування

топології інвертора з якомога нижчим рівнем КНС, якими є топології каскадних багаторівневих інверторів.

Об'єднуючи визначені вимоги отримуємо, що рекомендованою до застосування може бути модульна каскадна багаторівнева топологія, що містить у своєму складі перетворювачі здатні підвищувати вхідну напругу без встановлення додаткового підвищувача.

Можливим схемотехнічним варіантом вирішення даної задачі може стати каскадний багаторівневий інвертор з використанням z- або квазі-z-інверторів у якості складових модулів. Використання квазі-z-інверторів дозволяє додатково зменшити навантаження на елементи імпедансного кола, що зменшує масогабаритні параметри результуючого пристрою. Фактично, даний інвертор являє собою комбінацію топології з імпедансним ланцюгом у вхідному колі з каскадною багаторівневою топологією, що дозволяє водночас досягти підвищення вхідної напруги та забезпечення роботи в точці відбору максимальної потужності за рахунок роботи кожного з модулів у режимі «пробою», що дозволяє накопичувати енергію в елементах імпедансного ланцюга з наступною її передачею до навантаження, та зменшити рівень коефіцієнту нелінійних спотворень завдяки можливості формування псевдо-синусоїдальної форми напруги у навантаженні шляхом додавання вихідних напруг модулів у навантаженні відповідно до принципів роботи каскадного багаторівневого інвертора [16]- [18].

Практична перевірка даної тези шляхом симуляції трирівневого каскадного інвертора з відокремленими джерелами вхідної напруги з використанням квазі-z-інверторів у якості складових модулів підтвердила можливість одночасного підвищення амплітуди вихідної напруги та зменшення рівня КНС порівняно з результатами однорівневих імпедансних інверторів. Вхідна напруга кожного з модулів складала +12 В, була підвищена до +20 В на виході кожного з модулів та синтезована додаванням напруги кожного з модулів у квазі-синусоїдальну змінну вихідну напругу навантаження амплітуда якої склала 60 В. Форма та спектр результуючої напруги на навантаженні наведені на Рис. 4 та Рис. 5 відповідно. Порівняльна таблиця значень КНС отриманого результату з результатами однорівневих топологій наведена у Таблиця 3. Додаткового зменшення рівня КНС для каскадного інвертора можливо домогтися застосуванням методу синтезу вихідної напруги інвертора шляхом розкладання спектру бажаної вихідної напруги інвертора з застосуванням ОБ-перетворення [19]-[20].

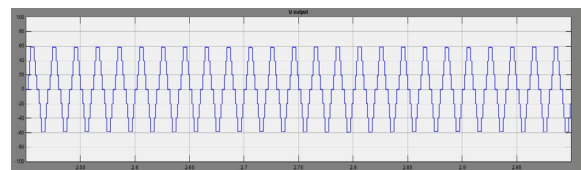


Рис. 4 Форма вихідної напруги трирівневого каскадного інвертора з використанням квазі-z-інверторів у якості складових модулів



ТАБЛИЦЯ 3 ЗНАЧЕННЯ КНС ВИХІДНОЇ НАПРУГИ

Топологія	Визначене значення КНС
Z-інвертор	29.19%
Квазі-z-інвертор	29%
Каскадний багаторівневий квазі-z-інвертор	19.69%

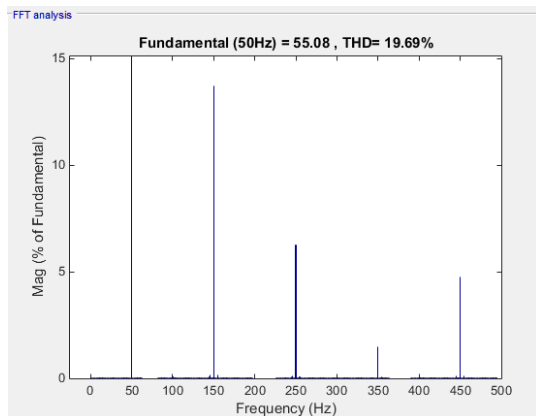


Рис. 5 Спектр вихідної напруги зі значенням КНС трирівневого каскадного інвертора з використанням квазі-z-інверторів у якості складових модулів

ВИСНОВКИ

На основі визначених та структурованих вимог до інверторів запропоновано застосування каскадного багаторівневого інвертора з відокремленими входними джерелами напруги з використанням квазі-z-інверторів у якості складових модулів у якості базової топології що задовольняє всім визначеним вимогам. Можливість зниження рівня КНС порівняно з іншими широко застосовними топологіями інверторів підтверджена результатами симуляції роботи моделі перетворювача в середовищі Simulink. Забезпечення величини КНС на рівні визначеному міжнародними стандартами можливе за застосування пасивного вихідного фільтра, що є складовою будь-якої існуючої схеми конвертора у складі автономних систем електроживлення, проте за застосування багаторівневої топології інвертора його масогабаритні параметри можуть бути зменшені. Можливості з додаткового зменшення КНС для даної топології без збільшення розмірів вихідного фільтра є додатковою перевагою що не може бути використана за застосування топологій іншого типу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] S. Zeng, Y. Liu, C. Liu, and X. Nan, "A review of renewable energy investment in the BRICS countries: History, models, problems and solutions," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, pp. 860–872, Jul. 2017, DOI: [10.1016/j.rser.2017.03.016](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.016).
- [2] B. K. Bose and F. (Fred) Wang, "ENERGY, ENVIRONMENT, POWER ELECTRONICS, RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, AND SMART GRID," in *Power Electronics in Renewable Energy Systems and Smart Grid*, Wiley, 2019, pp. 1–83, URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119515661.ch1>.
- [3] M. Calais, J. Myrzik, T. Spooner, and V. G. Agelidis, "Inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems-an overview," in *2002 IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Proceedings (Cat. No.02CH37289)*, 2002, vol. 4, pp. 1995–2000, DOI: [10.1109/PESC.2002.1023107](https://doi.org/10.1109/PESC.2002.1023107).

[4] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen, and F. Blaabjerg, "Power inverter topologies for photovoltaic modules-a review," in *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, 2002, vol. 2, pp. 782–788, DOI: [10.1109/IAS.2002.1042648](https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1042648).

[5] Fang Zheng Peng, "Z-source inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 2, pp. 504–510, Mar. 2003, DOI: [10.1109/TIA.2003.808920](https://doi.org/10.1109/TIA.2003.808920).

[6] M. Hanif, M. Basu, and K. Gaughan, "Understanding the operation of a Z-source inverter for photovoltaic application with a design example," *IET Power Electron.*, vol. 4, no. 3, p. 278, 2011, DOI: [10.1049/iet-pel.2009.0176](https://doi.org/10.1049/iet-pel.2009.0176).

[7] M. Shen, A. Joseph, J. Wang, F. Z. Peng, and D. J. Adams, "Comparison of Traditional Inverters and Z-Source Inverter," in *IEEE 36th Conference on Power Electronics Specialists.*, 2005, pp. 1692–1698, DOI: [10.1109/PESC.2005.1581858](https://doi.org/10.1109/PESC.2005.1581858).

[8] D. Evans and R. Cox, "Powerline communications strategy enabling fully decentralized control of AC-stacked PV inverters," in *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2017, pp. 2277–2284, DOI: [10.1109/ECCE.2017.8096443](https://doi.org/10.1109/ECCE.2017.8096443).

[9] A. Zahedi, "Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 5, pp. 711–718, Apr. 2006, DOI: [10.1016/j.renene.2005.08.007](https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.007).

[10] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004, DOI: [10.1109/TPEL.2004.833453](https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833453).

[11] K. Zeb *et al.*, "A Review on Recent Advances and Future Trends of Transformerless Inverter Structures for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 1968, Jul. 2018, DOI: [10.3390/en11081968](https://doi.org/10.3390/en11081968).

[12] J. M. A. Myrzik and M. Calais, "String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review," in *2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 2003, vol. 2, pp. 430–437, DOI: [10.1109/PTC.2003.1304589](https://doi.org/10.1109/PTC.2003.1304589).

[13] J. S. Kumari, C. S. Babu, D. Lenine, and J. Lakshman, "Improvement of Static Performance of Multilevel Inverter for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Modules," in *2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology*, 2009, pp. 691–697, DOI: [10.1109/ICETET.2009.128](https://doi.org/10.1109/ICETET.2009.128).

[14] J. Zhao, H. Zhou, and Y. Han, "Design of module-integrated converters for photovoltaic strings," in *2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2013, pp. 1947–1953, DOI: [10.1109/ECCE.2013.6646946](https://doi.org/10.1109/ECCE.2013.6646946).

[15] M. Meinhardt and G. Cramer, "Multi-string-converter: The next step in evolution of string-converter technology," in *Conference: 9th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2001.

[16] J. S. Kumari, C. S. Babu, and D. Lenine, "Evolutionary Computing Based Multilevel H-bridge Cascaded Inverter with Photovoltaic System," in *2010 International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing*, 2010, pp. 121–125, DOI: [10.1109/ARTCom.2010.17](https://doi.org/10.1109/ARTCom.2010.17).

[17] M. R. Banaei and A. R. Dehghanzadeh, "DVR based cascaded multilevel Z-source inverter," in *2010 IEEE International Conference on Power and Energy*, 2010, pp. 51–56, DOI: [10.1109/PECON.2010.5697556](https://doi.org/10.1109/PECON.2010.5697556).

[18] D. Sun, B. Ge, W. Liang, H. Abu-Rub, and F. Z. Peng, "An Energy Stored Quasi-Z-Source Cascade Multilevel Inverter-Based Photovoltaic Power Generation System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 9, pp. 5458–5467, Sep. 2015, DOI: [10.1109/TIE.2015.2407853](https://doi.org/10.1109/TIE.2015.2407853).

[19] T. O. Tereshchenko, Y. S. Yamnenko, D. V. Kuzin, and L. E. Klepach, "Formirovanie vihodnogo napryazhenia mnogourovnevo invertera na baze ortogonalnih preobrazovaniy[Multilevel inverter topology and control signals definition based on orthogonal spectral transformations]," *Tekhnichna Elektrodyamika*, vol. 2018, no. 4, pp. 57–60, May 2018, DOI: [10.15407/techned2018.04.057](https://doi.org/10.15407/techned2018.04.057).

[20] V. Y. Zhuikov *et al.*, *Pidvyshennia efektyvnosti system z vidnovlyuvanimi dzerelamy energii: monografija [Improvement of the renewable energy power sources efficiency. Monograph]*. 2018, ISBN: 978-617-7301-48-5.

UDC 621.314.58

Inverter Topology Selection for Photovoltaic Power Systems

I. S. Fedin, ORCID [0000-0003-0264-5067](https://orcid.org/0000-0003-0264-5067)National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kiev, UkraineDOI: [10.20535/2617-0965.2020.3.2.199028](https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.2.199028)

Abstract—This article is devoted to the task of selection of photovoltaic power system inverter that would comprehend to all of the demands that could be applied to it. The challenge of creating efficient and reliable converter for the renewable energy systems that implies solar panels as primary energy sources is well-known since the first day of their existence as a possible choice for the role of the only power source in the system. The great breakthrough in the field of photovoltaic power system converters design was achieved in late 80's-early 90's years of the 20th century due to the several positive circumstances that included rapid evolution of the semiconductor industry at whole which sums up in the development of a new generation of power switches that was capable to operate in higher voltage and current ranges which was unreachable for the prior generation switches and new microcontrollers that was able to maintain more complex control algorithms than ones that were used before which in general resulted in significant downsizing of the resulting device and made it possible to practically develop power inverters with complex topologies that was considered over sophisticated and unreliable before. These factors led to the development of numerous new topologies with the main goal of transformation losses reduction and power efficiency increase. The desired result was obtained either thru the fulfilling the demands invoked by the photovoltaic sources operation features (z-source topologies) or power system topology features and reduction of output voltage THD ratio (multilevel inverters). But consideration of only one type of factors has not allowed achieving the maximum result in power losses task. Thus solution of the determined task should be started from complete identification and broad consideration of the main factors that define set of demands that converter has to face. In this article parameters of THD ratio of the inverter's output voltage, photovoltaic source's operation features and power system topology specifics were considered as the most valuable parameters that affects the power conversion losses values and was discovered in details based on a survey of the existing publications in the field of the study, international and local standards of consumer voltage quality parameters and practical results of the most popular and widespread topologies simulation in order to obtain an output voltage THD ratio. The achieved results demonstrate that inverter topology that would be able to satisfy all of the requirements has to have modular structure to be able to maintain the proper THD ratio and connect to the most popular types of the photovoltaic power system topologies and be based on the z-source topologies to imply the photovoltaic sources operation features. Therefore as a conclusion a cascaded multilevel inverter with a separated input DC sources topology that is based on quasi-z-source modules was recommended as a solution that could also be used as a base for the further power converter development.

Keywords — *renewable energy sources; microgrid; total harmonic distortion ratio; z-source inverter; multilevel inverter; quasi-z-source inverter.*

