

С. П. Денисюк¹
Д. Г. Дерев'янку¹
Г. С. Белоха¹

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ У ENERGY SMART COMMUNITY З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Серед різних відновлюваних технологій енергія вітру і сонячна фотоелектрична енергія є комерційно найпривабливішою і широко застосовується. Стрімкий розвиток напрямку відновлюваної енергетики став передумовою майбутньої зміни базової стратегії функціонування енергосистем і енергоринку, створення нових форматів взаємодії в рамках «споживач – енергопостачальна компанія», які описані в понятті Energy Smart Community. Найкращим варіантом побудови Energy Smart Community є режим роботи приватних домогосподарств, в якому не тільки ефективно та економічно споживається електроенергія, а ще генерується у мережу. Вимоги підключення до мережі, зазначені стандартами, є основними настановами для проектування, управління та експлуатації сонячних фотоелектричних систем. Оскільки напруга (струм) фотоелектричних генераторів несумісні з навантаженням з погляду амплітуди та частоти, то потрібно використовувати силові перетворювачі. Система керування перетворювачем DC/AC повинна будуватися таким чином, щоби струм був синусоїдним з низьким THD. В роботі пропонується перетворювач на базі розробленої слідкувальної системи з релейним керуванням і примусовим формуванням споживаних і генерованих з мережі струмів синусоїдної форми за відсутності фазового зсуву між напругою й струмом. Релейне керування дозволяє реалізувати граничну швидкість під час відпрацювання завдання. Цифровим моделюванням досліджені режими роботи запропонованого перетворювача: живлення навантаження від мережі та сонячної фотоелектричної системи (СФЕС); живлення від СФЕС та генерування енергії в мережу; генерування енергії в мережу у разі відключеного навантаження; живлення від СФЕС. В усіх режимах роботи струм синусоїдний. Проаналізовано якість струму за допомогою гармонічного аналізу. THD 3,41 %, таке значення задовольняє вимоги стандарту якості споживаного струму. Окремі гармоніки не перевищують максимально допустимих значень.

Ключові слова. Energy Smart Community, розосереджена генерація, сонячна фотоелектрична система, якість струму, релейне керування.

Вступ

Дефіцит джерел енергії на основі традиційного палива, а також високий попит на енергію в сучасному суспільстві стали основними причинами пошуку і розробки екологічно чистих і відновлюваних альтернатив. Серед різних відновлюваних технологій енергія вітру і сонячна фотоелектрична енергія є комерційно найпривабливішою і широко застосовуваною в сьогodнішніх енергетичних парадигмах у всьому світі.

Основним економічним фактором, що сприяє впровадженню сонячних батарей (сонячні фотоелектричні системи (СФЕС)) в Україні є найбільша ставка «зеленого» тарифу [1]. Завдяки стрімкому розвитку цього напрямку відновлюваної енергетики, вартість обладнання відносно низька і сонячна енергетика має високі показники LCOE [2].

Все це є передумовою майбутньої зміни базової стратегії функціонування енергосистем і енергоринку, створення нових форматів взаємодії в рамках «споживач — енергопостачальна компанія», які описані в понятті Energy Smart Community [3].

Energy Smart Community це взаємодія між споживачем, розосередженими джерелами та енер-

гопостачальною компанією, що полягає в підвищенні рівня використання енергії з боку споживача та стабілізації роботи як малих, так і регіональних систем розподілу [3]—[8].

На рис. 1 показані три основні режими локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами для концепції Energy Smart Community [3], [4], [7]: режим роботи системи енергопостачання приватних господарств з живленням від електромережі; режим споживання енергії сонячної фотоелектричної системи разом зі споживанням її з мережі, при цьому має місце процес максимізації власного споживання електроенергії від сонячної станції та мінімізації споживання з мережі, такий режим споживання називають Prosumer (активний споживач); режим Prosumag в якому присутня генерація енергії від сонячної батареї в мережу для її продажу за зеленими тарифами.

Між усіма елементами схеми відбувається обмін інформацією про рівень споживання та генерації. Кожна з трьох моделей може використовуватися для побудови моделі функціонування Energy Smart Community.

В [8] проведено доцільність впровадження сонячних фотоелектричних систем для приватного домогосподарства, а також описано методологію побудови та функціонування систем Energy Smart Community. Визначено завдання оптимізації використання електроенергії з енергосистеми.

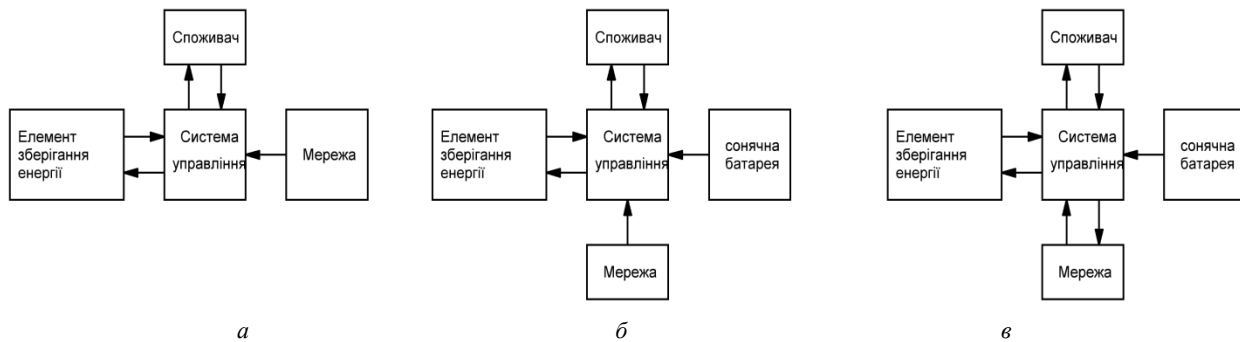


Рис. 1. Режими роботи приватних домогосподарств: *а* — споживання електроенергії з мережі; *б* — споживання від мережі та сонячної батареї; *в* — режим Prosumag

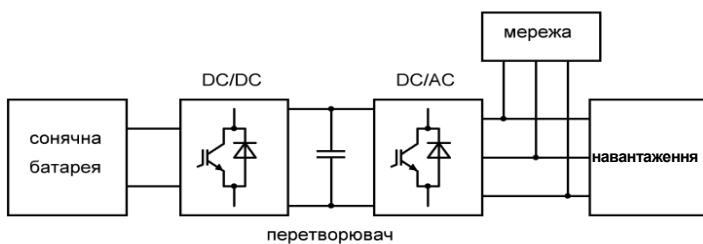


Рис. 2. Загальна схема перетворення енергії

Оскільки напруга (струм) фотоелектричних генераторів несумісна з навантаженням з погляду амплітуди та частоти потрібно використовувати силові перетворювачі. На рис. 2 показана схема підключення сонячної фотоелектричної системи до навантаження та мережі через перетворювач, який складається з двох перетворювачів DC/DC та DC/AC з ланкою постійного струму C [9]. Система

керування DC/AC перетворювача має будуватися таким чином щоби струм був синусоїдним з низьким THD, згідно зі стандартом.

Метою роботи є покращення якості електропостачання Energy Smart Community за допомогою розробки перетворювача на базі слідкувальної системи з релейним керуванням і примусовим формуванням споживаних і генерованих з мережі струмів синусоїдної форми за відсутності фазового зсуву між напругою і струмом.

Результати досліджень

Вимоги підключення до мережі є основними настановами щодо проектування, управління та експлуатації сонячних фотоелектричних систем, які слід безумовно виконувати під час введення в експлуатацію. Ці вимоги зазначені стандартами на якість електропостачання ДСТУ EN 50160-2014 [10]. Одна з вимог це якість струму. Загальний рівень гармонічних спотворень (THD) повинен бути меншим за 5%. Крім того, окремі гармоніки не можуть перевищувати значення, встановлені стандартом. Рис. 3 демонструє максимально допустимі рівні гармонік IEC 61727 [11].

Найкращим варіантом побудови Energy Smart Community є режим роботи приватних домогосподарств Prosumag, в якому не тільки ефективно та економічно споживається електроенергія, а ще генерується у мережу.



Рис. 3. Максимально допустимі рівні гармонік

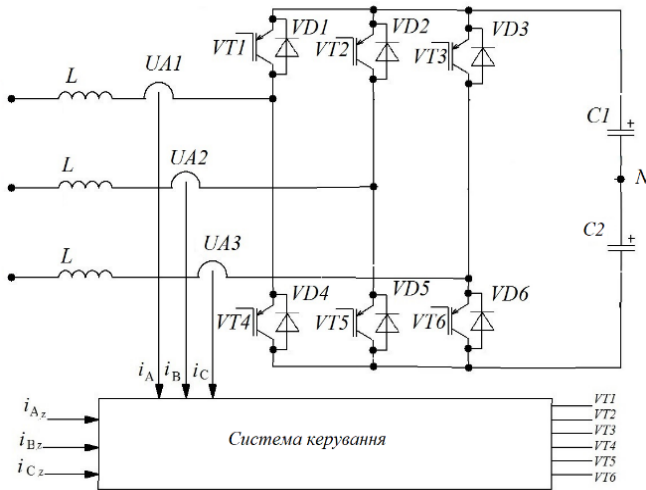


Рис. 4. Силова схема DC/AC перетворювача

Для системи, поданої на рис. 1в, як DC/AC-перетворювач пропонується інвертор на повністю керованих IGB-транзисторах зі зворотними діодами, який працює в режимі джерела струму [12]. Ланка постійного струму складається з конденсаторів C1 й C2, середня точка з'єднання яких підключена до нейтралі мережі. Така схема має таку перевагу від класичної схеми з одним конденсатором на вході (див. рис. 2), як виключення взаємовпливу фаз, що підвищує якість струму [13]. На виході інвертора обов'язково є індуктивності L , для формування синусоїдальних струмів. Силова схема показана на рис. 4.

Як систему керування запропоновано слідкувальну систему з релейним керуванням, такий принцип керування дозволяє реалізувати граничну швидкодію під час відпрацювання завдання, тобто режим, в якому вихідний струм інвертора з високою точністю повторює форму заданого сигналу [14], [15]. На відміну від перетворювачів з ШІМ керуванням, спрощується система керування, скорочується кількість регуляторів [9].

Розроблена система керування примусово формує струми i_A , i_B , i_C синусоїдної форми, величина яких розраховується з балансу потужності. Для задовільної роботи перетворювача постійна напруга U_C на конденсаторах

C1 та C2 підтримується за допомогою ПІ-регулятора.

Формування струмів описується виразами для фази А

$$i_{A3} - i_A = \Delta i_A;$$

$$L \frac{di_A}{dt} + i_A R_L = u_A + U_{C2}, \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \quad \left| \frac{di_A}{dt} \right| > 0, \quad i_{A3} > 0;$$

$$L \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - U_{C1}, \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \quad \left| \frac{di_A}{dt} \right| < 0, \quad i_{A3} > 0;$$

$$L \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A - U_{C1}, \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \quad \left| \frac{di_A}{dt} \right| > 0, \quad i_{A3} < 0;$$

$$L \frac{di_A}{dt} + i_A R_A = u_A + U_{C2}, \quad -a \leq \Delta i_A \leq a, \quad \left| \frac{di_A}{dt} \right| < 0, \quad i_{A3} < 0;$$

де U_{C1} , U_{C2} — напруга на конденсаторах; u_A — миттєве значення фазної напруги; i_{A3} і i_A — струм завдання і їх реальні значення у фазах; L — індуктивність фазного дроселя; R_L — активний опір фазного дроселя; $2a$ — ширина петлі гістерезису релейних регуляторів.

За релейного принципу керування частота перемикання вентилів змінна, близько 200 кГц. Така висока частота дозволяє формувати синусоїду з високою точністю.

Дослідження проводились в програмі Matlab. Параметри моделювання наведені у таблиці.

Параметри моделювання

P_{PV} , кВт	P_n , кВт	L , мГн	$C1 = C2$, мкФ	U_A , В	U_C , В	L_p , мГн	R_n , Ом
4—6	4,8	5	2000	220	700	2	30

На рис. 5а показані результати моделювання роботи системи, коли потужність P_{PV} СФЕС більша ніж потужність, яка необхідна навантаженню P_n .

У цьому режимі залишок енергії віддається в мережу $P_M = P_{PV} - P_n$. Струм навантаження синусоїдний, синфазний напрузі. Струм споживаний з мережі i_A синусоїдний в протифазі напрузі мережі u_A , що підтверджує режим генерування енергії до мережі.

В момент включення системи присутній незначний перехідний процес, зумовлений встановленням балансу потужності.

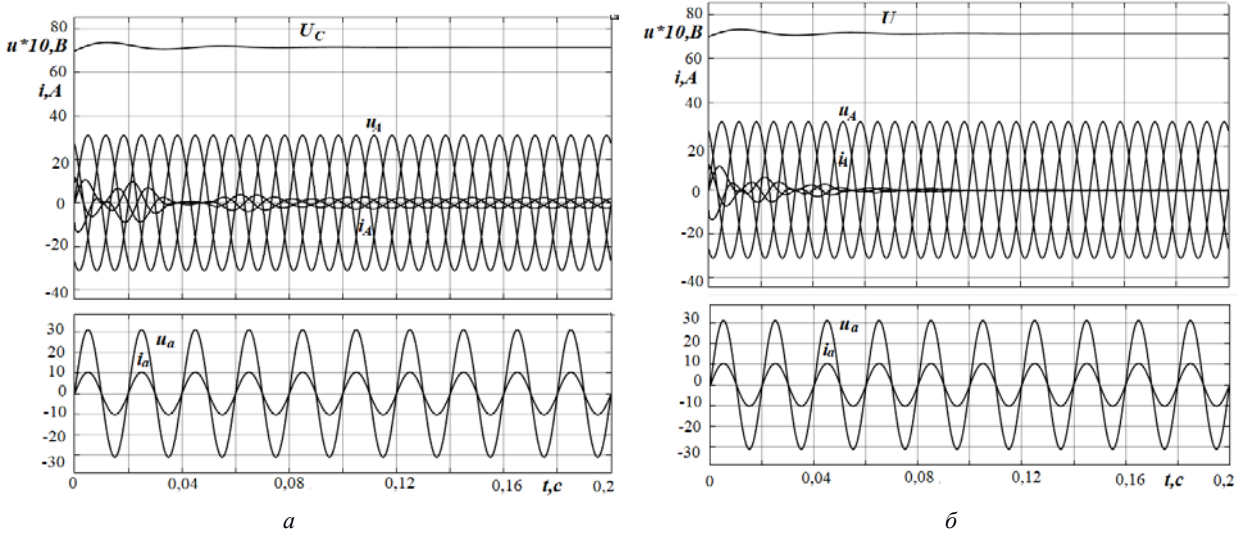


Рис. 5. Осцилограми режимів роботи, за умов: *a* — $P_{PV} > P_n$; *б* — $P_{PV} = P_n$

На рис. 5*б* показаний режим роботи, коли $P_{PV} = P_n$. При цьому режимі роботи струм, споживаний з мережі, відсутній. Навантаження живиться лише від СФЕС та генерування енергії у мережу відсутнє.

Третій режим роботи, це режим, коли $P_{PV} < P_n$ (рис. 6*а*). В цьому режимі потужність навантаження складається з потужності мережі та СФЕС. При цьому струм з мережі синфазний напрузі мережі.

Режим роботи, коли навантаження відсутнє $P_n = 0$, $P_M = P_{PV}$, показаний на рис. 6*б*. У цьому режимі також струм синусоїдний.

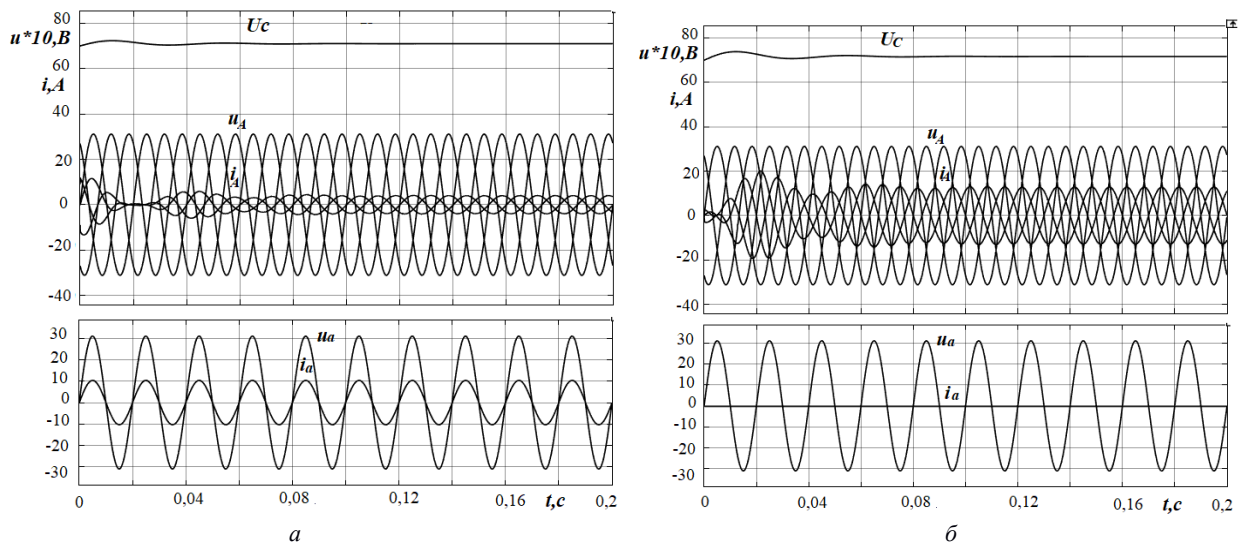


Рис. 6. Осцилограми режимів роботи: *a* — якщо $P_{PV} < P_n$; *б* — якщо $P_n = 0$

Проведено аналіз струму на склад гармонік, оскільки стандартами жорстко обмежується рівень гармонік та значення THD. Склад гармонік струму мережі в режимі $P_{PV} < P_n$ показаний на рис. 7*а*. THD 3,41 %, таке значення задовольняє стандартам якості споживаного струму. Окремі гармоніки не перевищують максимально допустимих значень. На рис. 7*б* подано склад гармонік у разі максимального струму в режимі $P_n = 0$. THD дорівнює 0,64 %.

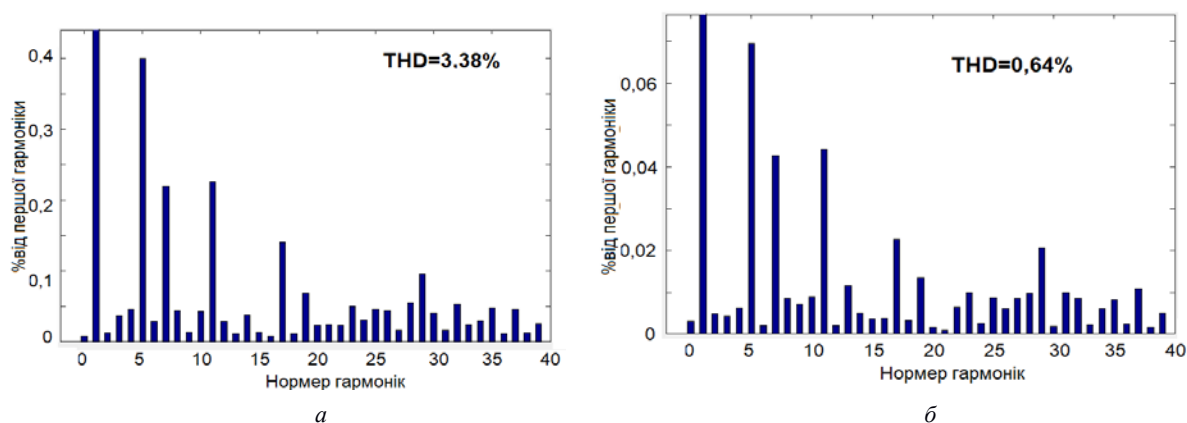


Рис. 7. Гармонічний склад струму

Висновки

Запропоновано систему керування DC/AC перетворювачем, що працює в режимі джерела струму, для покращення якості електропостачання Energy Smart Community. Така система керування забезпечує примусове формування синусоїдного струму синфазного з мережею, тим самим вирішується проблема електромагнітної сумісності та якості споживаного струму.

Цифровим моделюванням підтверджено працездатність перетворювача. Отримані осцилограми основних режимів роботи живлення навантаження від систем розосередженої генерації та проведено їх дослідження.

У результаті моделювання розглянуто чотири режими роботи: живлення навантаження від СФЕС; живлення навантаження від мережі та СФЕС; живлення від СФЕС та генерування енергії в мережу; генерування енергії в мережу.

В усіх режимах роботи струм синусоїдної форми. Проаналізовано якість струму за допомогою гармонічного аналізу. Розроблена система керування забезпечує формування синусоїдного струму з THD менше 5 %, що задовольняє стандарту якості електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП), «Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію та надбавки до "зелених" тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва для суб'єктів господарювання», *Постанова НКРЕКП, № 1991*. 2409. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.nerc.gov.ua/index.php?id=44630>.
- [2] *LCOE відновлюваних джерел енергії в УКРАЇНІ*, 2018. [Електронний ресурс] Режим доступу: <https://cel.com.ua/statics/media/doc23929>.
- [3] NYSEG: *About the Energy Smart Community – Tompkins county*, [Electronic resource]. Available: <https://www.nysegsmartsolutions.com>.
- [4] *Smart Community Aruba*. [Electronic resource]. Available: <http://www.smartcommunityaruba.aw/about/>.
- [5] A. A. Ozadowicz, "New Concept of Active Demand Side Management for Energy Efficient Prosumer, Microgrids with Smart Building Technologies. Energies," v. 10 (11), pp. 17-71, 2017.
- [6] S. Denysiuk, R. Strzelecki, and V. Opryshko, "The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations," *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 4 (46), с. 7-17, 2016. ISSN: 1813-5420.
- [7] С. П. Денисюк, Д. Г. Дерев'яно, і Д. С. Горенко, «Особливості оцінювання режимів функціонування локальних систем з джерелами розосередженої генерації та накопичувачами», *Енергетика: економіка, технології, екологія*, № 1, с. 7-20, 2020.
- [8] С. П. Денисюк, і П. В. Соколовський, «Оцінка та передумови для побудови інтелектуальних енергетичних середовищ на основі фотovoltaїчних систем генерації електроенергії», *Зб. наук. пр. НУК.*, № 2 (480), с. 58-67, 2020.
- [9] Yongheng Yang, Katherine Kim, F. Blaabjerg, and Ariya Sangwongwanich, *Advances in Grid-Connected Photovoltaic Power Conversion System*, 2018. [Electronic resource]. Available: https://www.researchgate.net/publication/326353412_Advances_in_Grid-Connected_Photovoltaic_Power_Conversion_Systems.
- [10] Держстандарт України, «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності», *ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT)*, чинний з 1.10.2014. Київ, Україна: Держстандарт України, 2014. 27 с.
- [11] "Characteristics of the utility interface for photovoltaic (PV) systems," *International Electrotechnical Commission (IEC)*, 61727, 2004.
- [12] Ю. П. Самчелев, и Г. С. Белоха, «Сравнительный анализ трехфазных и однофазных источников питания с релейным управлением», *Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика*, наукове видання. Кременчук: КрНУ, вип. 5/2018, с. 69-72, 2018.

[13] Ю. П. Самчелев, В. Г. Дрючин, Г. С. Белоха, и Н. И. Андреева, *Высокоэффективные источники электропитания*, моногр. Алчевск, Украина: ДонГТУ, 2013, 219 с.

[14] Reza Davoodnezhad, "Hysteresis current regulation of voltage source inverters with constant switching frequency." PhD Thesis. Australia, 2014.

[15] G. Bielokha, and Yu. Samchelev, "Electromagnetic compliant of voltage source with relay control," in *IEEE International Conference "Modern electrical and energy systems"*. Кременчуг: КрНУ, 2017, с. 32-36.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 25.10.2021

Денисюк Сергій Петрович — д-р техн. наук, професор, директор Інституту енергозбереження та енергоменджменту, e-mail: spdens@ukr.net ;

Дерев'янюк Денис Григорович — канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедрою електропостачання;

Белоха Галина Сергіївна — канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, e-mail: pointage13@gmail.com .

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

S. P. Denysiuk¹
D. H. Derevianko¹
H. S. Bielokha¹

Improving the Quality of Electricity Supply in the Energy Smart Community with Sources of Distributed Generation

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Solar photovoltaic energy is the most commercially attractive and widely used. The rapid development of the direction of renewable energy has become a prerequisite for the future change in the basic strategy for the functioning of energy systems and the energy market, the creation of new formats of interaction within the framework of "consumer — energy supply company", which are described in the concept of Energy Smart Community. The best option for building an Energy Smart Community is a mode of operation for private households, in which not only electricity is efficiently and economically consumed, but also generated into the grid. Grid connection requirements are fundamental principles in the design, management and operation of solar photovoltaic systems. These requirements are contained in the standards. The voltage (current) of photovoltaic generators is incompatible with the load in terms of amplitude and frequency, so power converters must be used. The control system of the DC/AC converter should be designed in such a way that the current is sinusoidal with low THD. The paper proposes a converter based on the developed tracking system with relay control and forced formation of sinusoidal currents consumed and generated from the network in the absence of a phase shift between voltage and current. Relay control allows you to realize the maximum speed. By digital modeling, the operating modes of the proposed converter were investigated: power supply of the load from the network and photovoltaic system (PV-system) power supply from the PV-system and power generation into the network; generating energy to the network, with the load disconnected; power supply from PV-system. In all modes of operation, the current is sinusoidal. The quality of the current is analyzed using harmonic analysis. THD is 3.41 %, which meets the current quality standard. Individual harmonics do not exceed the maximum permissible values.

Keywords: Energy Smart Community, distributed generation, solar photovoltaic system, current quality, relay control.

Denysiuk Serhii P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Energy Saving and Energy Management, e-mail: spdens@ukr.net ;

Derevianko Denys G. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Chair of Power Supply;

Bielokha Halyna S. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Power Supply, e-mail: pointage13@gmail.com

С. П. Денисюк¹
Д. Г. Деревянко¹
Г. С. Белоха¹

Повышение качества электроснабжения в Energy Smart Community с источниками рассредоточенной энергии

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Среди различных возобновляемых технологий энергия ветра и солнечная фотоэлектрическая энергия является коммерчески наиболее привлекательной и широко применимой. Стремительное развитие направления возобновляемой энергетики стало предпосылкой будущего изменения базовой стратегии функционирования энергосистем и энергорынка, создания новых форматов взаимодействия в рамках «потребитель — энерго-снабжающая компания», которые описаны в понятии Energy Smart Community. Лучшим вариантом построения Energy Smart Community является режим работы частных домохозяйств, в котором не только эффективно и экономично потребляется электроэнергия, но и генерируется в сеть. Требования подключения к сети, определенные стандартом, являются основными при проектировании, управлении и эксплуатации солнечных фотоэлектрических систем. Поскольку напряжение (ток) фотоэлектрических генераторов несовместимы с нагрузкой с точки зрения амплитуды и частоты нужно использовать силовые преобразователи. Система управления преобразователем DC/AC должна строиться таким образом, чтобы ток был синусоидальной с низким THD. В работе предлагается преобразователь на базе разработанной следящей системы с релейным управлением и принудительным формированием потребляемых и генерируемых из сети токов синусоидальной формы при отсутствии фазового сдвига между напряжением и током. Релейное управление позволяет реализовать предельное быстродействие во время отработки задания. Цифровым моделированием были исследованы режимы работы предложенного преобразователя: питание нагрузки от сети и солнечной фотоэлектрической системы (СФЭС) питания от СФЭС и генерирования энергии в сеть; генерирования энергии в сеть, при отключенной нагрузке; питания от СФЭС. Во всех режимах работы ток синусоидальный. Проанализировано качество тока с помощью гармонического анализа. THD составляет 3,41 %, такое значение удовлетворяет стандарту качества потребляемого тока. Отдельные гармоники не превышают максимально допустимых значений.

Ключевые слова. Energy Smart Community, рассредоточена генерация, солнечная фотоэлектрическая система, качество тока, релейное управление.

Денисюк Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, директор Института энергосбережения и энергоменджмента, e-mail: spdens@ukr.net ;

Деревянко Денис Григорович — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроснабжения;

Белоха Галина Сергеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения, e-mail: pointage13@gmail.com