

АНОТАЦІЯ

Клепач Л.Є. Керування електроспоживанням за вартісним критерієм в MicroGrid. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Розвиток відновлюваної електроенергетики є одним з пріоритетів енергетичної політики України - це передбачає "Національний план дій з відновлюваної енергетики до 2020 року". Переорієнтація принципів в енергетиці локальних об'єктів стала основою появи нової концепції MicroGrid. Це концепція повністю інтегрованої, саморегулюючої і самовідновлювальної електроенергетичної системи, що має мережеву топологію і включає в себе генеруючі джерела, розподільні мережі і споживачів електричної енергії, що керуються єдиною інформаційною системою в режимі реального часу.

Концепція енергетичної системи, побудованої на принципах MicroGrid, полягає у тому, що вона передає не тільки енергію, але й інформацію. У цьому випадку споживач, крім енергії, отримує ряд можливостей про взаємодію з енергосистемою, зокрема може більш гнучко вибрати тарифи, планувати енергоспоживання і, як наслідок, знижувати витрати на електроенергію. Тому MicroGrid є зручною платформою для відпрацювання та реалізації передачі електроенергії. Електрична енергія від відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) генерується, споживається і має власну вартість в залежності від типу джерела, якості енергії і особливості потоків енергії циркуляції в електротехнічних системах і комплексів - від приватного домогосподарства до MicroGrid, Smart Grid, енергетичної установки і великої генеруючої станції. Таким чином, електрична енергія може розглядатися як товар на ринку. І, як для будь-якого виду товару, необхідно розглянути три аспекти товару: законодавчу

базу, економічну доцільність та технічну реалізацію передачі електроенергії. Саме тому розгляд різних взаємопов'язаних аспектів передачі електроенергії є досить актуальним завданням.

Систему електроживлення мережі MicroGrid можна розглядати як ринковий майданчик, в межах якого здійснюється перерозподіл потоків електроенергії. По відношенню до зовнішньої мережі живлення MicroGrid виступає єдиним блоком, що споживає електроенергію, а за наявності ВДЕ – генерує надлишок електроенергії у мережу, якщо така можливість передбачена технічно та організаційно. Як і інший товар електроенергія характеризується економічними, правовими та технічними аспектами свого функціонування. Правові аспекти описують регулювання ринку енергетики в Україні нормативними документами. Економічні аспекти містять економічні моделі навантажень та генераторів, а також методи ціноутворення електроенергії. Технічні аспекти регламентують схемну реалізацію здійснення можливості під'єднання альтернативних джерел до загальної мережі із забезпеченням заданої якості електроенергії та надійності постачання.

Впровадження принципів MicroGrid неможливе без використання пристроїв силової електроніки. Застосування даних пристроїв в інтелектуальних мережах є досить широким і охоплює системи розподіленої генерації, що об'єднують мережевою структурою генеруючі установки з відновлюваними джерелами електроенергії, накопичувачі енергії та споживачів. Однією з основних вимог при локальному впровадженні перетворювальних систем в інтелектуальні мережі є підвищення енергоефективності системи електропостачання.

Розглянуто два варіанта MicroGrid: з мережею та без мережі. «Island» MicroGrid являють собою автономні системи електроживлення, між собою традиційною комунальною мережею. Згідно з нещодавно опублікованими результатами досліджень за програмою Microgrid Deployment Tracker 2Q19,

проведеними компанією Navigant Research, в цю категорію потрапляє близько 41% всього світового ринку Microgrid. Системи типу айленд широко розповсюджені в промислово розвинених країнах, що часто зазнають впливу стихійного лиха, мають пересічений ландшафт або острівне розташування, що ускладнює застосування традиційних рішень з енергопостачання. Для таких систем MicroGrid з альтернативними та відновлювальними джерелами енергії особливо актуальним є пошук шляхів підвищення вартісної та економічної ефективності використання енергоресурсів із одночасним збереженням необхідних параметрів якості електричної енергії.

Керування складовими елементами MicroGrid – генераторами та навантаженнями – має здійснюватися відповідно до поставленої екстремальної задачі із заданим вартісним критерієм ефективності з урахуванням обмежень. При цьому попередньо необхідно вирішити задачі прогнозування споживання та генерації енергії та визначити локальні «умовні» тарифи на електроенергію від ВДЕ (сонячних панелей, вітрогенераторів, тощо) для забезпечення внутрішнього балансу вартісних показників айленд-систем. Вихідними даними для алгоритмів керування MicroGrid, крім кількості генераторів, навантажень та характеристик їх режимів, є прогноз споживання/генерації на певний період (наприклад, добу) та вартість електроенергії (статична або динамічна). Зазначимо, що прогнозні дані постійно коригуються у відповідності з виміряними у реальному часі значеннями.

При побудові алгоритмів керування режимами навантажень та генераторів, які забезпечують максимізацію однієї з заданих величин (наприклад, потужності чи прибутку) або мінімізацію (наприклад, витрат) з урахуванням обмежень, використовуються математичні методи знаходження умовного локального екстремуму. Найпопулярнішими з них є: метод золотого перерізу, метод Ньютона (надалі розвинутий у метод хорд), метод невизначених коефіцієнтів Лагранжа, симплекс-метод. Для вирішення задачі максимізації обрано метод

невизначених коефіцієнтів Лагранжа, який дає точний розв'язок та працює з виразами будь-якого порядку. Він дозволяє звести задачу на відшукування умовного екстремуму (екстремуму при заданих умовах) до задачі на знаходження безумовного екстремуму.

Системи керування в MicroGrid являють собою інформаційно-управляючі системи, що забезпечують координоване управління розподіленими енергоресурсами, засобами управління режимом і конфігурацією мережі, а також локальними комплексами управління навантаженням. Такі системи можуть встановлюватись як централізовано (на сервері з можливістю резервування) і в диспетчерському пункті та забезпечує централізований варіант керування), так і локально (локальний контролер встановлюється на одному або декількох контролерах, близько до місць установки силового обладнання, із забезпеченням можливості дистанційного моніторингу).

Оскільки елементи системи MicroGrid як правило рознесені у просторі, має сенс використовувати для їх зв'язку бездротові технології. Обрано ZigBee технологію.

У загальному випадку система керування MicroGrid за має вигляд ієрархічної структури, де кожен рівень описує стан системи на певному абстрактному рівні обробки даних. Дані рівні доповнюють один одного, чим забезпечується їх несуперечливість. Формалізація даних дає можливість мінімізувати обсяг обчислень, необхідних для формування керуючих впливів, і здійснити декомпозицію керування по різних рівнях ієрархії.

Ефективність роботи систем керування є вартісним критерієм залежить від якості вихідної напруги, тому актуальною є задача підтримки її параметрів у заданому діапазоні та забезпечення роботи перетворювачів у відповідності до вимог щодо вихідного спектра напруги та обмеження рівня гармонік.

Отже, системи з ВДЕ потребують розробки методів підвищення ефективності витрат енергоресурсів із збереженням необхідних параметрів

якості електричної енергії. Тому актуальною є задача розробки методів керування елементами MicroGrid (генераторами та навантаженнями).

І тому, розробка способів та систем керування електроспоживання за вартісним критерієм в MicroGrid, які забезпечують ефективне використання наявної енергії та мінімізують ціну на дану електроенергію, є актуальною науково-прикладною проблемою, яка визначила напрям дисертаційного дослідження.

Дисертація присвячена розробці системи керування електроспоживанням в MicroGrid, а саме прогнозуванню споживання та генерації електроенергії, визначення умов локального балансу вартісних показників та оптимізації Лагранжа для сформованих математичних рівнянь максимізації прибутку системи в MicroGrid, а також оптимізації за критеріями мінімізації витрат на дану електроенергію. Це дозволяє використовувати енергію більш ефективно, а також зменшити витрати на електроенергію для споживача.

Ключові слова: MicroGrid, керування електроспоживанням, вартісний критерій, прогнозування споживання та генерації електроенергії, THD, багаторівневий інвертор.

Список публікацій:

За результатами досліджень опубліковано 17 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях, 1 патент України, 5 статей у виданнях, які включені до міжнародних наукових баз (Scopus), 1 стаття у міжнародному виданні, 3 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

1. Tereshchenko T. Multilevel inverter topology and control signals definition based on orthogonal spectral transformations // Tereshchenko T., Yamnenko Y., Kuzin D., Klerach L. // Tekhnichna elektrodynamika No 4, 2018 – P. 57-60. *(Здобувачем наведено узагальнений порядок синтезу напруги з амплітудно-імпульсною модуляцією і обґрунтований вибір кількості інверторних модулів).*

2. Терещенко Т.О. Аспекти передачі електроенергії в MicroGrid/ Т. О. Терещенко, Ю.С. Ямненко, Л.Є.Клепач // Електроніка та зв'язок. – 2016/ - т.21– №6. – С.61–66. *(Здобувачем розроблений економічний аспект віртуального ринку електроенергії)*

3. Ямненко Ю.С. Статична та динамічна тарифікація електроенергії автономних MicroGrid / Ямненко Ю. С., Жуйков В. Я., Бойко І. Ю., Клепач Л.Є. // Вісник ЖДТУ, №3 (78). – 2016. *(Здобувачем запропоновано статичні та динамічні моделі для розрахунку ціни на електроенергію в MicroGrid)*

4. Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Кузін Д.В., Клепач Л.Є. Формування вихідної напруги багаторівневого каскадного інвертора із застосуванням функцій в полях галуа, Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського Серія Технічні науки Том 29(68) №1 2018 с. 21-26. *(Здобувачем розраховано THD для різної кількості комірок при використанні перетворення ОБ та узагальненого ОБ)*

5. Ямненко Ю.С., Терещенко Т.О., Хохлов Ю.В., Бучек П. І., Клепач Л.Є. Узагальнене перетворення дискретних функцій в обертовій системі координат для застосування в системах зв'язку з CDMA Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського Серія Технічні науки Том 29(68) №2 2018 с. 98-102. *(Здобувачем запропоновано вибір вейвлет-перетворення на орієнтованій основі з метою збільшення швидкості обробки даних і рівня стиснення в порівнянні з іншими вейвлетами)*

6. Ямненко Ю.С., Терещенко Т.О., Клепач Л.Є., Лайкова Л.Г., Палій Д.М. Огляд основних моделей прогнозування енергоспоживання в MicroGrid, Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського Серія Технічні науки Том 29(68) №4 2018 с. 98-102. *(Здобувачем розроблена класифікацію методів та моделей прогнозування електроспоживання)*

7. Т.О.Терещенко, Ю.С.Ямненко, Л.Є.Клепач, П.І.Бучек Прогнозування електроспоживання в SMART GRIDS, Збірник Наукових праць Донецького

національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Покровськ, 2018. – Випуск 1 (31). *(Здобувачем запропоновано структурну схему процесу прогнозного керування)*

8. Спосіб формування багаторівневої напруги у вторинній обмотці трансформатора: пат. 126117 Україна: МПК (2006) H02M 7/00 № u201712401; заявл. 14.12.2017; опубл. 11.06.2018, бюл. № 11. *(Здобувачем розраховано THD для різної кількості комірок при використанні перетворення ОБ та узагальненого ОБ)*

9. Tereschenko T. Aspects of Virtual Market of Electrical Energy / Tereschenko T., Yamnenko J., Peterheria V., Klepach L. // 6th International Conference on Modern Electric Power Systems. – 2015. *(Здобувачем розроблений економічний аспект віртуального ринку електроенергії)*

10. Tereschenko T. Technical Realization of energy transferring in MicroGrid / Tereschenko T., Yamnenko J., Klepach L. // 2nd IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems.- К., 2016 – pp.90-93. *(Здобувачем розглянуто переваги та недоліки різних схем реалізації (DC, AC або гібридними) та розроблені рекомендації в залежності від особливостей споживання та архітектури системи)*

11. Tereschenko T., Yamnenko J., Larin D., Klepach L. Express Diagnostics of Cardiovascular System by Spectral Methods - 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017). PROCEEDINGS. – 2017. – P. 445–447. *(Здобувачем запропоновано використання ОБ-перетворення для експрес – діагностики серцево – судинної системи)*

12. Yamnenko J., Tereshchenko T., Klepach L., Palii D. Forecasting of electricity consumption in SmartGrid - International Conference Modern Electrical and Energy Systems MEES`17 Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University November 15-17 – 2017. *(Здобувачем запропоновано вибір вейвлет-перетворення*

на орієнтованій основі з метою збільшення швидкості обробки даних і рівня стиснення в порівнянні з іншими вейвлетами)

13. Static and Dynamic Tariffing Electric Power Autonomous Microgrid / V. Zhuikov, J.Yamnenko, T. Tereschenko, L. Klepach, I. Boiko// Journal of Present Problems of Power System Control, Scientific Papers of the Department of Electrical Power Engineering of Wroclaw University of Technology, ISSN 2084-2201, No. 7, 2016, p. 29-41. *(Здобувачем запропоновано статичні та динамічні моделі для розрахунку ціни на електроенергію в MicroGrid)*

14. Клепач Л.Є. Техніко-економічні показники вироблення та споживання електроенергії в системі Мікрогрід/ Клепач Л.Є. // VII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2014», Збірник статей. –К., 2015. – С. 227-231.

15. Клепач Л.Є. Керування електроспоживанням за техніко-економічними показниками/ Клепач Л.Є. // VIII Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2015», Збірник статей. – К., 2015. – С. 227–231.

16. Клепач Л.Є. Соціальне значення проблеми тарифікації електроенергії в microgrid XX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Дні Науки» «Людина у вимірах сучасних суспільних трансформацій». ЗБІРНИК МАТЕРІАЛІВ. – К., 2017. – С.19-20.

17. Ларін Д. А., Клепач Л.Є. Спектральні методи обробки біомедичних сигналів стану серцево судинної системи/ Ларін Д. А., Клепач Л.Є. // X Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2017», Збірник статей. – К., 2017. – С.108-111. *(Здобувачем запропоновано використання ОБ-перетворення для експрес – діагностики серцево – судинної системи)*

SUMMARY

Klepach L. Managing power consumption on cost criteria in MicroGrid. - Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 17 Electronics and Telecommunications in specialty 171 Electronics. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The development of renewable electricity is one of the priorities of Ukraine's energy policy - it is envisaged by the "National Renewable Energy Action Plan for 2020". The reorientation of local energy principles has become the basis for the emergence of the new MicroGrid concept. It is a concept of a fully integrated, self-regulating and self-renewing electricity system that has a network topology and includes generating sources, distribution networks, and consumers of electricity managed by a single, real-time information system.

The concept of an energy system based on the principles of MicroGrid is that it transmits not only energy but also information. In this case, the consumer, in addition to energy, gets a number of opportunities to interact with the energy system, in particular, can more flexibly choose tariffs, plan energy consumption and, consequently, reduce electricity costs. Therefore, MicroGrid is a convenient platform for testing and implementation of electricity transmission. Electricity from renewable energy sources (RES) is generated, consumed and has its own cost depending on the type of source, energy quality and features of circulating energy flows in electrical systems and complexes - from private household to MicroGrid, Smart Grid, power plant and large generating plant . Thus, electricity can be considered as a commodity in the market. And, as for any type of product, it is necessary to consider three aspects of the product: the legal framework, economic feasibility and technical implementation of electricity transmission. That is why consideration of various interrelated aspects of electricity transmission is a very important task.

The MicroGrid power supply system can be considered as a marketplace within which the redistribution of electricity flows is carried out. In relation to the external power supply, MicroGrid is the only unit that consumes electricity, and in the presence of RES - generates excess electricity to the grid, if such a possibility is provided

technically and organizationally. Like other goods, electricity is characterized by economic, legal and technical aspects of its operation. Legal aspects describe the regulation of the energy market in Ukraine by regulations. Economic aspects include economic models of loads and generators, as well as methods of electricity pricing. The technical aspects regulate the circuit implementation of the possibility of connecting alternative sources to the general network with the provision of a given quality of electricity and security of supply.

It is impossible to implement MicroGrid without the use of power electronics devices. The use of these devices in smart grids is quite wide and covers distributed generation systems that integrate grid structures with renewable energy sources, energy stores and consumers. One of the main requirements for the local implementation of conversion systems in smart grids is to increase the energy efficiency of the electricity supply system.

Two variants of MicroGrid are considered: with a network and without a network. "Island" MicroGrid are autonomous power supply systems, among themselves a traditional utility network. According to a recent study by Microgrid Deployment Tracker 2Q19 conducted by Navigant Research, this category includes about 41% of the global Microgrid market. Island-type systems are widespread in industrialized countries, which are often affected by natural disasters, have a rugged landscape or island location, which complicates the application of traditional energy solutions. For such MicroGrid systems with alternative and renewable energy sources, it is especially important to find ways to increase the cost and cost-effectiveness of energy use while maintaining the necessary parameters of electricity quality.

Management of MicroGrid components - generators and loads - must be carried out in accordance with the set extreme task with a given cost criterion of efficiency, taking into account the limitations. At the same time, it is necessary to solve the problems of forecasting energy consumption and generation and determine local "conditional" tariffs for electricity from RES (solar panels, wind turbines, etc.) to ensure

the internal balance of cost indicators of island systems. The initial data for MicroGrid control algorithms, in addition to the number of generators, loads and characteristics of their modes, are the forecast of consumption / generation for a certain period (eg, day) and the cost of electricity (static or dynamic). Note that the forecast data is constantly adjusted in accordance with the values measured in real time.

When constructing load control modes and generators that maximize one of the specified values (eg, power or profit) or minimize (eg, costs) subject to constraints, mathematical methods are used to find the conditional local extremum. The most popular of them are: the golden section method, Newton's method (further developed into the chord method), the method of indeterminate Lagrange coefficients, the simplex method. To solve the maximization problem, the method of indefinite Lagrange coefficients is chosen, which gives an exact solution and works with expressions of any order. It allows you to reduce the problem of finding a conditional extremum (extremum under given conditions) to the problem of finding an unconditional extremum.

Control systems in MicroGrid are information and control systems that provide coordinated management of distributed energy resources, means of controlling the mode and configuration of the network, as well as local load management systems. Such systems can be installed both centrally (on a server with the possibility of redundancy) and in the control room and provides a centralized control option) and locally (local controller is installed on one or more controllers, close to the installation of power equipment, with remote monitoring) .

Because the elements of the MicroGrid system are usually spaced apart, it makes sense to use wireless technology to connect them. ZigBee technology selected.

In the general case, the MicroGrid control system has the form of a hierarchical structure, where each level describes the state of the system at a certain abstract level of data processing. These levels complement each other, which ensures their consistency. Formalization of data makes it possible to minimize the amount of

computation required for the formation of control effects, and to carry out the decomposition of control at different levels of the hierarchy.

The efficiency of control systems with a cost criterion depends on the quality of the output voltage, so it is important to maintain its parameters in a given range and ensure the operation of the converters in accordance with the requirements for the output voltage spectrum and limit the level of harmonics.

Therefore, RES systems require the development of methods to increase energy efficiency while maintaining the necessary parameters of electricity quality. Therefore, the task of developing methods for managing MicroGrid elements (generators and loads) is urgent.

Therefore, the development of methods and control systems for electricity consumption according to the cost criterion in MicroGrid, which ensure efficient use of available energy and minimize the price of this electricity, is an urgent scientific and applied problem that has determined the direction of the dissertation research.

The dissertation is devoted to the development of power management system in MicroGrid, namely forecasting of consumption and generation of electricity, determination of conditions of local balance of cost indicators and Lagrange optimization for formed mathematical equations of maximization of system profit in MicroGrid, and also optimization on criteria of minimization of expenses for this electricity. This allows you to use energy more efficiently, as well as reduce energy costs for the consumer.

Key words: MicroGrid, managing power, cost criteria, power consumption forecasting and generation, THD, multi-level inverter.

List of main publications of the applicant:

According to the results of research, 17 scientific works were published, including 7 articles in scientific professional publications, 1 patent of Ukraine, 5 articles in publications included in international scientific bases (Scopus), 1 article in international publication, 3 abstracts in conference proceedings.