

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СЕТИ МИКРОГРИДОВ

И. Шауки, В. Ф. Калинин, Б. Уссама, А. Лешелах

*Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: возобновляемая энергия; микрогрид; отслеживание точки максимальной мощности; преобразователь источника напряжения; регулятор с нечеткой логикой; широтно-импульсная модуляция.

Аннотация: Рассмотрены метод повышения эффективности преобразования энергии с помощью преобразователя источника напряжения (VSC) в сети микрогридов и вопросы управления мощностью энергетического оборудования на современном этапе развития технологий. Проведено моделирование различных энергетических систем с помощью данного метода.

Введение

Управление преобразователями энергии является актуальной проблемой из-за быстрого развития интеллектуальных сетей, гибких систем передачи переменного и постоянного тока от таких альтернативных источников, как ветряная энергия и солнечная энергетика. Важность применения преобразователей энергии состоит в обеспечении энергетической устойчивости и эффективности при производстве электроэнергии из возобновляемых источников.

Совершенствование технологий производства оборудования в области силовой электроники потребовало проведения исследований методов передачи тока с помощью использования преобразователей напряжения (VSC) с созданием микросетей (микрогридов) на постоянном токе низкого напряжения. Стоит отметить, что такие системы все чаще применяют в различных приложениях, например, регулирование, компенсация, фильтрация мощности и т.д. [1].

Микрогрид с большим количеством возобновляемых источников энергии, соединенных с силовыми электронными устройствами, имеет множество проблем, таких как потеря инерции, низкий коэффициент короткого замыкания, трудности с разделением мощности, проблемы хранения энергии [2].

Системная динамика определяется VSC и контроллерами регулирования мощности, а также параметрами сетевой переменной [3]. В приложениях для микрогрида VSC используется для интеграции распределенных источников энергии и обеспечения системных функций (регулирование активной и реактивной мощностей, поддержка напряжения и частоты во время автономного состояния системы и смягчение аномальных состояний функционирования) [4]. Такая схема микрогрида на базе преобразователя источника напряжения VSC с различными источниками и нагрузками представлена на рис. 1.

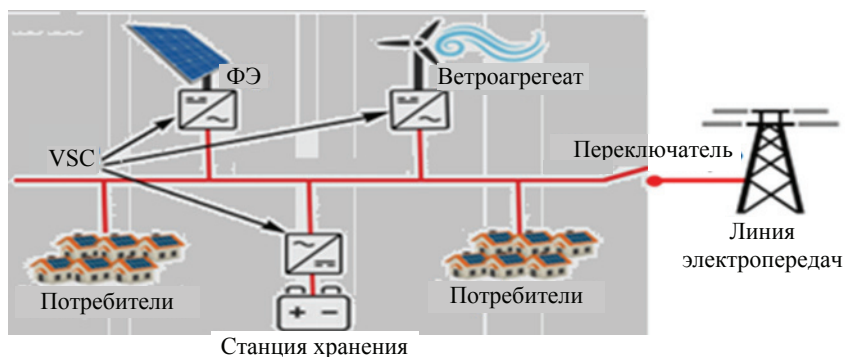


Рис. 1. Схема микрогрида на базе преобразователя источника напряжения VSC с различными источниками и нагрузками [5]

Преобразователь источника напряжения сопряжен с последовательно соединенными вентилями, управляемыми широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Управление реактивной мощностью может использоваться для динамического регулирования напряжения, чтобы поддерживать присоединенную систему переменного тока в случае возникновения непредвиденных обстоятельств [6].

Рассмотрим результаты, полученные в процессе моделирования с помощью пакета Simulink MATLAB-2018a.

Моделирование и симуляция ветроэнергетической системы

Математическое моделирование ветроэнергетической системы. Извлечение механической энергии из ветра можно выразить следующим соотношением:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_P(\gamma, \beta) V^3, \quad (1)$$

где P – уловленная мощность ветра, Вт; ρ – воздушная плотность, кг/м^3 (в основном 1,225); A – площадь, охватываемая лопастями ротора, м^2 ; C_P – коэффициент мощности; γ – передаточное отношение конечной скорости; β – угол наклона лопастей, град; V – скорость ветра, м/с, [6].

Передаточное отношение конечной скорости определяем по формуле

$$\gamma = \omega_m \frac{R}{V}, \quad (2)$$

где ω_m – угловая скорость ротора, рад/с; R – радиус ротора, м. Выходной механический крутящий момент ветряной турбины T_m определяется по формуле

$$T_m = \frac{1}{2} \rho A C_P(\gamma, \beta) V^3 \frac{1}{\omega_m}; \quad (3)$$

Выходная мощность турбины

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A C_{P_{\max}} V^3. \quad (4)$$

Симуляция и отслеживание точки максимальной мощности (ОТММ) на ветряной турбине регулятором нечеткой логики в Simulink MATLAB-2018a. Для моделирования генераторов ветряных турбин в приложениях, подключенных к сети, повышающие преобразователи постоянного тока использовались для изменения электрической нагрузки в целях максимального увеличения выработки

Выбор точек принадлежности

e	\hat{e}				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

энергии. Для реализации методов ОТММ в системе управления ветряной турбиной используется контроллер нечеткой логики.

Нечеткие множества, включенные в таблицу правил, определяются как: NB – отрицательное большое; NS – отрицательное маленькое; Z – ноль; PS – положительное маленькое; PB – положительное большое. В этих наборах четко определены функции принадлежности как для входных, так и выходных переменных. Знание выбора угловых точек данных функций приходит вместе с практикой и знанием системы. Выбор точек принадлежности представлен в таблице нечетких правил (табл. 1).

Моделирование и имитация алгоритма возмущения и наблюдения фотоэлектрической системы

Математическое моделирование алгоритма возмущения и наблюдения. Наиболее распространенная математическая модель, используемая для определения вольтамперных характеристик фотоэлемента (ФЭ) (прямого и обратного), основана на эквивалентной схеме и использует дополнительное сопротивление шунта параллельно идеальной модели диода (рис. 2). Характеристики фотоэлектрического элемента, используя одну модель диода, можно получить как:

$$I = I_{ph} - I_D,$$

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_S)}{NkT}\right) - 1 \right] - \frac{(U + IR_S)}{R_{sh}}, \quad (5)$$

где I_{ph} – ток короткого замыкания из-за солнечного света (фотоны), А; I_{sc} – ток короткого замыкания, А; I_0 – ток, проходящий через диод, А; N – количество фотоэлементов, соединенных последовательно; k – постоянная Больцмана, Дж/К, $k = 1,381 \times 10^{-23}$; q – заряд электрона, Кл, $q = 1,6 \times 10^{-19}$; U – напряжение ячейки, В; R_S – последовательные сопротивления, Ом; R_{sh} – параллельное (шунтирующее) сопротивление, Ом; T – температура ячейки, °С.

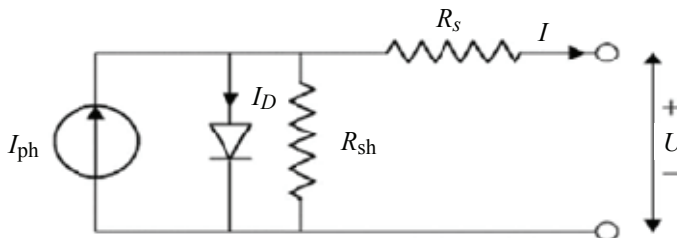


Рис. 2. Эквивалентная схема ФЭ

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{NkT}\right) - 1 \right]. \quad (6)$$

В случае разомкнутой цепи ток равен нулю, а напряжение $U = U_0$. Следовательно, формула, описывающая напряжение холостого хода, выглядит следующим образом:

$$U_0 = N \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_0} + 1\right). \quad (7)$$

Выходная мощность может быть выражена уравнением

$$P = \left[I_{sc} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{NkT}\right) - 1 \right] \right] U. \quad (8)$$

Согласно характеристикам фотоэлемента, ток при коротком замыкании ячейки I_{sc} будет максимальным. В этом случае напряжение будет нулевым.

Отслеживание ОТММ на фотоэлектрической системе алгоритма возмущения и наблюдения в Simulink MATLAB-2018a. Разработан алгоритм возмущения и наблюдения, который будет использован для сравнения его эффективности с другими методами.

Точки максимальной мощности используются для реализации методов отслеживания повышающим преобразователем постоянного тока с использованием алгоритма возмущения и наблюдения для резистивной нагрузки. Повышающий преобразователь увеличивает входное напряжение до большего значения выходного в соответствии с рабочим циклом, приложенным к его входу. Выходной сигнал алгоритма возмущения и наблюдения подается на вход повышающего преобразователя, каждый раз, при изменении освещенности или температуры.

Моделирование преобразователя источника напряжения

Преобразователь источника напряжения рассматривается как генератор переменного напряжения, преобразующий его из источника постоянного напряжения. Обмен мощностью между сторонами переменного и постоянного тока зависит от типа источника постоянного напряжения. Последний может быть конденсатором, генератором постоянного тока, альтернативным источником питания и т.д. Когда конденсатор используется на стороне постоянного тока, устройство обычно работает как компенсатор реактивной мощности, поскольку обмен активной мощностью невозможен. С другой стороны, активная мощность передается в случае использования источников постоянного напряжения, например, солнечных батарей.

Математическая модель системы. Математическая модель системы разработана на основе VSC, представленного на рис. 3 как интерфейсный модуль преобразования постоянного тока в переменный.

К системе подключается трехфазный VSC с фильтром C_f и реактором связи R_f, L_f . Следующие уравнения записаны в системе отсчета фаз a, b, c .

$$U_0 = U_{inv} - iR_f - L_f \frac{di}{dt}. \quad (9)$$

Матрица преобразования Парка используется для преобразования кадра отправки фаз с помощью уравнения (9).

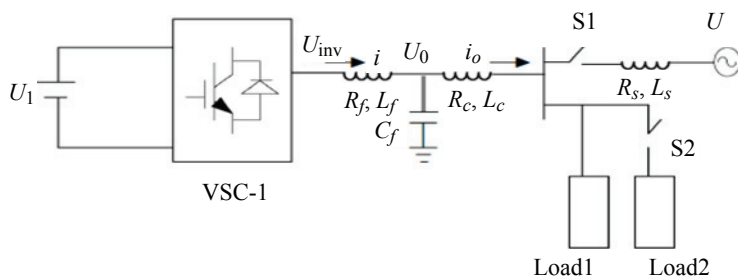


Рис. 3. Распределение нагрузки между одним VSC и источником сети [7]

Используя теорию двух осей, вводимые компоненты активной и реактивной мощности p , q записываются соответственно:

$$p = U_{od}i_{od} + U_{oq}i_{oq}; \quad (10)$$

$$q = U_{od}i_{oq} + U_{oq}i_{od}. \quad (11)$$

Средняя активная P и реактивная Q мощности, соответствующие основным компонентам, получаются в результате фильтрации нижних частот (LPF) с частотой среза W_c с помощью уравнений [7]:

$$P = \frac{W}{(S + W_c)} p; \quad (12)$$

$$Q = \frac{W}{(S + W_c)} q. \quad (13)$$

Симуляция системы микрогрида с использованием контроллера (VSC). Моделирование системы управления VSC с распределенными фотоэлектрическими и ветроэнергетическими комплексами, соединенными микрогридом, с помощью пакета Simulink MATLAB-2018a, показано на рис. 4 – 7.

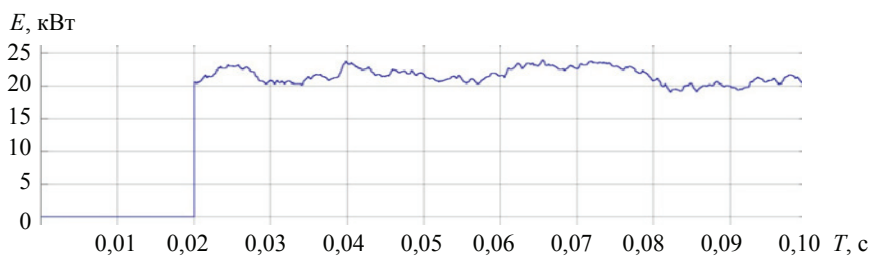


Рис. 4. Производство ветряной энергии с НЛР

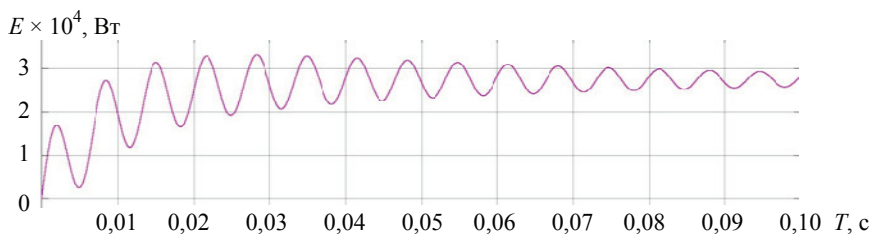
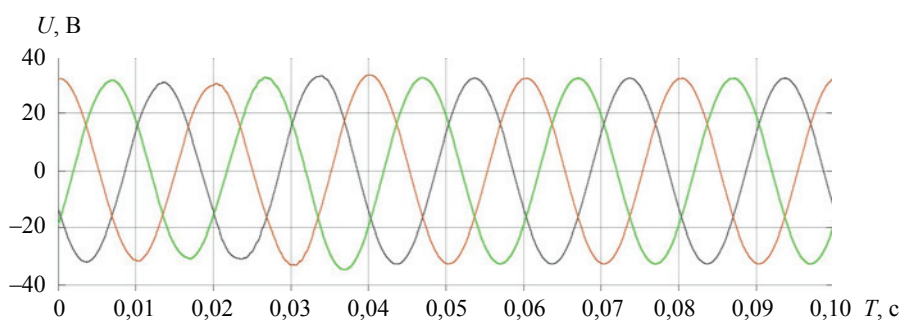
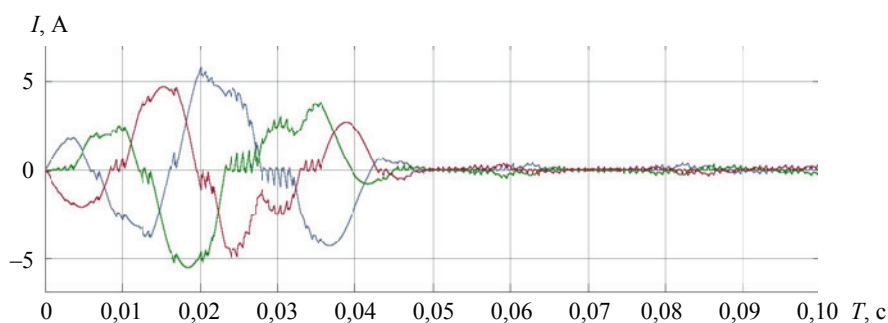


Рис. 5. Генерация фотоэлектрической энергии с использованием алгоритма возмущения и наблюдения



a)



б)

Рис. 6. Регулировка напряжения (а) и тока (б) гибридного источника энергии

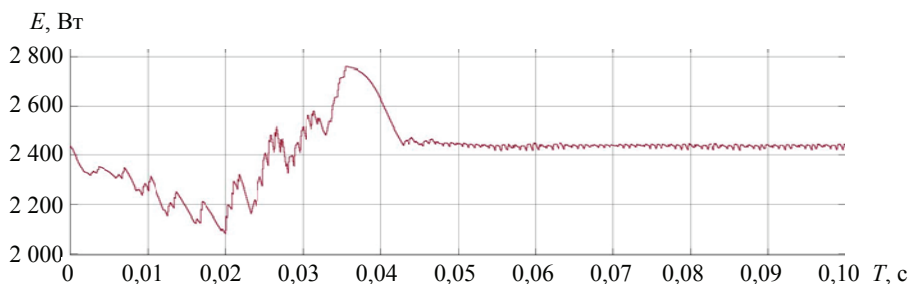


Рис. 7. Реальная мощность нагрузки

Результаты симуляции

На рисунке 4 представлены результаты моделирования. В период времени $0 \dots 0,02$ с мощность равнялась 0, так как сила ветра была незначительна и ветряная турбина еще не запустилась, а затем стабилизировалась, что связано с корректным поведением нечеткой логики по сравнению с традиционным подходом. В данной модели симуляция метода возмущения и наблюдения используется для ОТММ.

На рисунке 5 показаны результаты после ОТММ с изменяющейся солнечной инсоляцией. В фотоэлектрической панели выходное напряжение является функцией тока нагрузки, температуры окружающей среды и солнечного излучения, температура поддерживается постоянной, а инсоляция варьируется от $1\,000$ до 200 Вт/м^2 . Максимальная отслеживаемая мощность составляет $3\,500\text{ Вт}$, напряжение – 400 В при инсоляции $1\,000\text{ Вт/м}^2$.

На рисунке 6 изображены результаты моделирования для напряжения нагрузки переменного и постоянного тока. Переходный режим для достижения стабильного напряжения постоянного тока непродолжителен, а качественные показатели постоянного напряжения стабильны на все время функционирования сети переменного тока. Кратковременные отключения электроэнергии отрицательно сказываются на эксплуатации сложной бытовой техники. В целях исследования реакции силовых преобразователей на внезапные изменения напряжения в сети, энергосистемой было отключено питание на 0,05 с, во время которого напряжение в сети переменного тока упало до нуля (см. рис. 6, б). В этот временной интервал напряжение нагрузок постоянного тока немного проседало из-за уменьшения энергии в конденсаторах и катушках индуктивности преобразователя переменного тока. Моделирование позволяет выявить переходные характеристики кратковременных отказов системы, которые необходимы для ее исследования и проектирования.

На рисунке 7 представлена осциллограмма активной мощности сети для $0 < t \leq 0,1$ с. Реальная мощность, отдаваемая сетью, составляет около 30 % (26 кВт) от общей потребности в нагрузке в периоды пиковой нагрузки.

Заключение

Работа преобразователя источника напряжения VSC протестирована при различных значениях параметров рабочих точек. Результаты показали, что VSC, обладая более высоким коэффициентом полезного действия, имеет низкий коэффициент гармонических искажений тока при работе в заданном интервале номинальной мощности, а солнечные батареи и ветряные турбины в большинстве случаев вырабатывают энергетическую мощность ниже номинальной, что требует осуществлять контроль параметров на весь период интеграции возобновляемых источников энергии в распределительную сеть.

Система с использованием преобразователя напряжения VSC по результатам моделирования и симуляции с помощью пакета Simulink MATLAB-2018a позволит управлять вырабатываемой активной и реактивной мощностью в сети. Результаты получены при включении нагрузки, как от внешней сети, так и от VSC. Активная и реактивная мощности вводятся преобразователем VSC с использованием измерения переменных в точке подключения. Применение представленного метода позволит реализовать распределенное управление гибридной сетью микрогридов.

Список литературы

1. Improved Direct Power Control for Grid-Connected Voltage Source Converters / Y. Gui, Ch. Kim, Ch. Ch. Chung [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Vol. 65, Issue 10. – P. 8041 – 8051. doi: 10.1109/tie.2018.2801835
2. Chetry, B. Voltage Source Converter in A Microgrid / B. Chetry, A. Carvalho, R. Brito // International Journal of System Assurance Engineering and Management. – 2018. – Vol. 9. – P. 1206 – 1216. doi: 10.1007/s13198-018-0741-x
3. Xu, L. Modeling, Analysis and Control of Voltage-Source Converter in Microgrids and HVDC / L. Xu. – University of South Florida Scholar Commons, 2013. – 172 p.
4. Decentralized Control of Voltage Source Converters in Microgrids based on the Application of Instantaneous Power Theory / A. Ovalle, G. Ramos, S. Bacha [et al.] // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 62, Issue 2. – P. 1152 – 1162. doi: 10.1109/TIE.2014.2336638

5. Heydari, R. High-bandwidth Secondary Voltage and Frequency Control of VSC-based AC Microgrid / R. Heydari, T. Dragicevic, F. Blaabjerg // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2019. – Vol. 34, Issue 11. – P. 11320 – 11331. doi: 10.1109/TPEL.2019.2896955

6. Hybrid ANFIS-GA-Based Control Scheme for Performance Enhancement of a Grid Connected Wind Generator / M. A. Soliman, H. M. Hasanien, H. Z. Azazi [et al.] // *Journal IET The Institution of Engineering and Technology*. – 2018. – Vol. 12, Issue 7. – P. 832 – 843. doi: 10.1049/IET-RPG.2017.0576

7. Singh, A. Modeling and Control of Grid Connected Voltage Source Converter for Power Sharing / A. Singh, B. Singh // *IECON 2012 : Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 25 – 28 October 2012, Montreal, QC, Canada. – IEEE, 2012. – P. 2. doi: 10.1109/iecon.2012.6389347*

Raising Efficiency of Voltage Converter and Power Control of Microgrid Network Power Equipment

I. Shauki, V. F. Kalinin, B. Ussama, A. Leshelakh

Department of Power Engineering, kalinin@tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia

Keywords: renewable energy; microgrid; maximum power point tracking; voltage source converter; fuzzy logic regulator; pulse width modulation.

Abstract: The paper considers a method for increasing the efficiency of energy conversion using a voltage source converter (VSC) in a microgrid network and issues of power control of power equipment at the present stage of technology development. Modeling of various energy systems using this method has been carried out.

References

1. Gui Y., Kim Ch., Chung Ch.Ch. [et al.] Improved Direct Power Control for Grid-Connected Voltage Source Converters, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, issue 10, pp. 8041-8051, doi: 10.1109/tie.2018.2801835

2. Chetry B., Carvalho A., Brito R. Voltage Source Converter in A Microgrid, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 2018, vol. 9, pp. 1206-1216, doi: 10.1007/s13198-018-0741-x

3. Xu L. *Modeling, Analysis and Control of Voltage-Source Converter in Microgrids and HVDC*, University of South Florida Scholar Commons, 2013, 172 p.

4. Ovalle A., Ramos G., Bacha S., Hably A., Rumeau A. Decentralized Control of Voltage Source Converters in Microgrids based on the Application of Instantaneous Power Theory, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, issue 2, pp. 1152-1162, doi: 10.1109/TIE.2014.2336638

5. Heydari R., Dragicevic T., Blaabjerg F. High-bandwidth Secondary Voltage and Frequency Control of VSC-based AC Microgrid, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, vol. 34, issue 11, pp. 11320-11331, doi: 10.1109/TPEL.2019.2896955

4. Navpreet T., Tarun M., Amit B. [et al.] Voltage Source Converters as the building block of HVDC and FACTS Technology in Power Transmission System: A Simulation based Approach, *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3, issue 5, pp. 3263-3278.

6. Soliman M.A., Hasanien H.M., Azazi H.Z., El-kholy E.E., Mahmoud S.A. Hybrid ANFIS-GA-Based Control Scheme for Performance Enhancement of a Grid Connected Wind Generator, *Journal IET The Institution of Engineering and Technology*, 2018, vol. 12, issue7, pp. 832-843, doi: 10.1049/IET-RPG.2017.0576

7. Singh A., Singh B. Modeling and Control of Grid Connected Voltage Source Converter for Power Sharing, *IECON 2012*, Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 25 - 28 October, 2012, Montreal, QC, Canada, IEEE, 2012, p. 2, doi: 10.1109/iecon.2012.6389347

Verbesserung der Effizienz des Spannungswandlers und Steuerung der Leistung von Microgrid-Netzwerkanlagen

Zusammenfassung: Es sind die Methode zur Effizienzsteigerung der Energieumwandlung mit einem Spannungsquellenwandler (VSC) im Microgrid-Netz und die Fragen der Leistungsregelung von Energieanlagen im gegenwärtigen Stand der Technologieentwicklung betrachtet. Mit dieser Methode ist die Modellierung verschiedener Energiesysteme durchgeführt.

Élévation de l'efficacité du convertisseur de la source de tension et gestion de la puissance de l'équipement de puissance du réseau microgrid

Résumé: Sont examinées les méthodes d'élévation de l'efficacité de la conversion de l'énergie avec le convertisseur de la source de tension (VSC) dans le réseau de microgrid et les questions de la gestion de la puissance des équipements électriques à l'étape actuelle du développement technologique. Sont modélisés les différents systèmes énergétiques à l'aide de la méthode donnée.

Авторы: *Шауки Илиес* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика»; *Уссама Беларусси* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Лешелак Ахмед* – аспирант кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научной работе, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.