
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2023_1_62

**РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МИКРОСЕТИ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
НА БАЗЕ ЭНЕРГОРОУТЕРОВ И НАКОПИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ****Ю.Н. Булатов**

ORCID: 0000-0002-3716-5357 e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Братский государственный университет

*Братск, Россия***А.В. Крюков**

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутский государственный университет путей сообщения

*Иркутск, Россия***К.В. Суслов**

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Иркутск, Россия

В статье приведено описание компьютерной модели объединения кластеров постоянного и переменного тока на базе энергороутеров с установками распределенной генерации и накопителями электроэнергии, реализованной в системе *MATLAB*. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать любые установки распределенной генерации и потребителей электроэнергии. Представлены результаты моделирования провалов напряжения в нормальных и аварийных режимах работы кластеров, а также исследования предлагаемых методов управления напряжением с помощью энергетических роутеров и накопителей электроэнергии. В режиме работы без накопителей электроэнергии использование энергетических роутеров с регулируемым инвертором дает возможность снизить глубину провала напряжения; при постоянно подключенных к сети накопителях электроэнергии обеспечивается стабильность напряжения в сети; последовательное подключение накопителей электроэнергии позволяет повысить напряжение в сети постоянного и переменного тока до номинального уровня.

Ключевые слова: моделирование, накопители электроэнергии, распределенная генерация, распределительные электрические сети, сети постоянного тока, энергетический роутер.

Для цитирования: Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В. Регулирование напряжения в микросети постоянного и переменного тока на базе энергороутеров и накопителей электроэнергии // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 62-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_62

VOLTAGE REGULATION IN DC AND AC MICROGRID BASED ON ENERGY ROUTERS AND ENERGY STORAGES

Yu.N. Bulatov

ORCID: 0000-0002-3716-5357 e-mail: bulatovyura@yandex.ru

Bratsk State University
Bratsk, Russia

A.V. Kryukov

ORCID: 0000-0001-6543-1790 e-mail: and_kryukov@mail.ru

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk State Transport University
Irkutsk, Russia

K.V. Suslov

ORCID: 0000-0003-0484-2857 e-mail: dr.suslov@yandex.ru

Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russia

Abstract. The development of the electric power industry in modern conditions involves the transition to a technological platform that promotes the introduction of smart grids. The smart grid may include separate clusters (microgrid) consisting of electricity consumers, electrical networks and distributed generation plants. To increase energy efficiency in a smart grid, one can integrate DC microgrids that provide power to consumers inside a building (or several buildings) and on the territory of enterprises. Combining direct and alternating current microgrids with distributed generation plants and energy storage devices is advisable to be performed on the basis of energy routers to connect networks with different voltage classes. The paper describes a computer model for combining DC and AC microgrids based on energy routers with distributed generation plants and power storage devices, developed in the MATLAB system. The model is flexible and allows you to additionally connect any distributed generation plants and electricity consumers. The results of simulation of voltage dips in normal and emergency modes of operation of DC and AC microgrids, as well as the study of the proposed methods of voltage control using energy routers and energy storage devices, are presented. The use of energy routers with a

regulated inverter makes it possible to reduce the depth of the voltage dip in the operation mode without energy storage devices; the stability of the voltage in the network is observed with energy storage devices permanently connected to the network; the series connection of energy storage devices allows to increase the voltage to the nominal level in the DC and AC networks.

Keywords: modeling, electric energy storage, distributed generation, electrical distribution networks, direct current networks, energy router.

For citation: Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and K.V. Suslov, “Voltage regulation in DC and AC microgrid based on energy routers and energy storages”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 62-84, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754_2023_1_62

I. Введение

Развитие электроэнергетики в современных условиях предполагает переход к технологической платформе, способствующей внедрению интеллектуальных сетей (*smart grid*) [1-3], использующих цифровые устройства для измерения, сбора и обработки данных, релейной защиты и автоматики, диагностики и мониторинга и др. Применение интеллектуальных технологий в *smart grid* позволяет решить целый ряд проблем, например: проблему интеграции возобновляемых источников энергии [4, 5], улучшения качества электроэнергии [6], управления напряжением [7], повышения энергоэффективности [8] и др.

В состав интеллектуальной сети могут входить отдельные кластеры (*microgrid*) [9, 10], состоящие из потребителей электроэнергии, электрических сетей и установок распределенной генерации (РГ) [11, 12], в том числе, использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ) [13, 14]. Для повышения энергоэффективности в интеллектуальную сеть можно интегрировать кластеры постоянного тока [15], обеспечивающие электроснабжение потребителей внутри здания (или нескольких зданий) [16, 17] и на территории предприятий [18]. Электрические сети постоянного тока имеют следующие преимущества [19]:

- отсутствуют реактивные сопротивления;
- не передается реактивная мощность;
- снижены электромагнитные влияния на смежные линии;
- упрощаются схемы преобразователей частоты, которыми оснащаются большинство современных электродвигателей;
- упрощаются вторичные источники электропитания электронных устройств и светодиодного освещения (не требуются выпрямители);
- облегчается подключение ВИЭ, являющихся, как правило, источниками постоянного напряжения (солнечные батареи, топливные элементы, аккумуляторы и др.), не требуются инверторы;

- отсутствуют проблемы устойчивости параллельной работы генераторов;
- упрощается реализация сетей для зарядки электромобилей;
- возможна привязка к сетям железной дороги постоянного тока.

Таким образом, объединение *microgrid* постоянного и переменного тока с установками РГ и накопителями электроэнергии (НЭ) можно считать неотъемлемой частью интеллектуальных сетей. Формирование таких объединений целесообразно выполнять на основе энергетических роутеров (ЭР) [20, 21] для связи сетей постоянного и переменного тока с различным классом напряжения. Проведенные исследования [21] показывают, что применение ЭР позволяет повысить качество электроэнергии в сетях 0,4 кВ, подключенных к районным обмоткам тяговых трансформаторов.

Целью данного исследования является разработка компьютерной модели объединения на базе энергороутеров *microgrid* постоянного и переменного тока с установками РГ и НЭ, а также исследование предлагаемых методов регулирования напряжения в нормальных и аварийных режимах работы. Ниже приведено описание компьютерной модели, разработанной в системе *MATLAB*. Представлены результаты моделирования провалов напряжения в нормальных и аварийных режимах работы распределительной сети постоянного и переменного тока, а также результаты исследования предлагаемых методов регулирования напряжения с помощью ЭР и НЭ.

II. Структура и описание компьютерной модели объединения кластеров постоянного и переменного тока

Использование объединения кластеров постоянного и переменного тока на базе ЭР позволит реализовать ряд функций:

- управление напряжением в точках подключения ЭР;
- регулирование перетоков мощности в распределительной сети;
- управление установками РГ на базе ВИЭ и НЭ с обеспечением демпфирования колебаний напряжения и мощности.

В основе ЭР лежит твердотельный трансформатор (*SST*), имеющий различные конфигурации [22, 23]:

- одноступенчатая с прямым преобразованием переменного напряжения;
- двухступенчатая с низковольтным звеном постоянного тока;
- двухступенчатая с высоковольтным звеном постоянного тока;
- трехступенчатая с высоковольтным и низковольтным звеньями постоянного тока.

Трехступенчатая топология ЭР, показанная на рис. 1, является одним из лучших решений для интеллектуальных сетей. Она позволяет предоставлять вспомогательные услуги как высоковольтным, так и низковольтным потребителям постоянного и переменного тока и подключать различные установки РГ с НЭ.

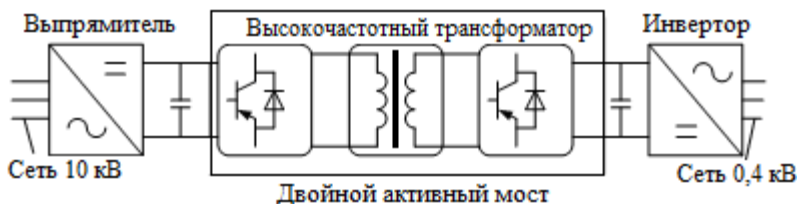


Рис. 1. Трехступенчатая топология ЭР

Fig. 1. Three-stage power router topology

В высокочастотном инверторе ЭР могут применяться биполярные транзисторы с изолированным затвором (*Insulated-gate bipolar transistor – IGBT*), позволяющие коммутировать токи выше 1 кА. Эффективное применение такого транзистора ограничено частотой переключений, при которой потери находятся в допустимых пределах, обеспечивающих КПД преобразования выше 90 %. Эта частота не должна превышать 5000 Гц.

Для объединения электрических сетей постоянного тока с различным классом напряжения может применяться ЭР на основе однофазного высокочастотного трансформатора с управляемым инвертором на стороне высокого напряжения (ВН) и выпрямителем на стороне низкого напряжения (НН). Модель такого ЭР была разработана в системе *MATLAB* с помощью пакетов имитационного моделирования *Simulink* и *SimPowerSystems*. Схема модели предлагаемого ЭР для объединения сетей постоянного тока с напряжением 10 кВ на стороне ВН и 0,22 кВ на стороне НН представлена на рис. 2.

Схема модели системы управления инвертором на стороне ВН ЭР показана на рис. 3. Система управления состоит из регулятора напряжения (блок *Voltage regulator* на рис. 3) с пропорционально-интегральным (ПИ) алгоритмом регулирования, на вход которого подается действующее значение напряжения на стороне ВН высокочастотного трансформатора и уставка по напряжению в относительных единицах. Для формирования синусоидального напряжения с заданной частотой 5000 Гц используется блок *Sine Wave*, выходной сигнал которого перемножается с выходным сигналом ПИ-регулятора, и поступает в качестве управляющего сигнала на вход генератора с широтно-импульсной модуляцией (блок *PWM Generator* на рис. 3) для формирования соответствующих импульсов управления инвертором. Таким образом выполняется регулирование уровня напряжения.

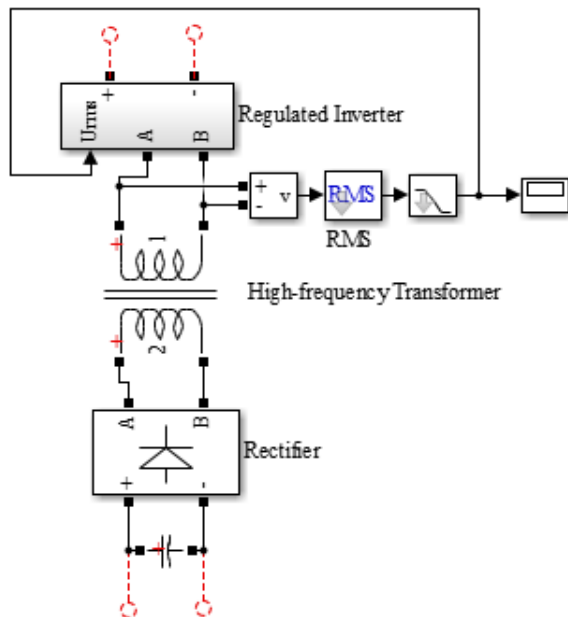


Рис. 2. Схема модели энергоинвертера для сетей постоянного тока в *MATLAB*

Fig. 2. Diagram of a power router model for DC networks in *MATLAB*

Для сглаживания пульсаций и подавления помех на выходе инвертора используется *LC*-фильтр. Регулирование уровня напряжения на сторонах ВН и НН высокочастотного трансформатора может осуществляться также при подаче на вход ПИ-регулятора действующего значения напряжения на стороне НН.

Схема исследуемой распределительной сети постоянного тока на базе ЭР с установками РГ и НЭ представлена на рис. 4.

ЭР с однофазными высокочастотными трансформаторами связывает сети постоянного тока высокого и низкого напряжения. Наличие НЭ на стороне НН позволяет эффективно управлять графиком нагрузки сети и сглаживать возможные колебания напряжения и мощности, в частности, из-за наличия установок РГ на базе ВИЭ. На стороне НН ЭР возможно подключение инвертора с регулятором напряжения для потребителей переменного тока. Аккумуляторная батарея большой мощности, подключенная на стороне ВН ЭР, позволяет повысить надежность электроснабжения и сгладить колебания напряжения и мощности в случае перехода рассматриваемого кластера в изолированный режим.

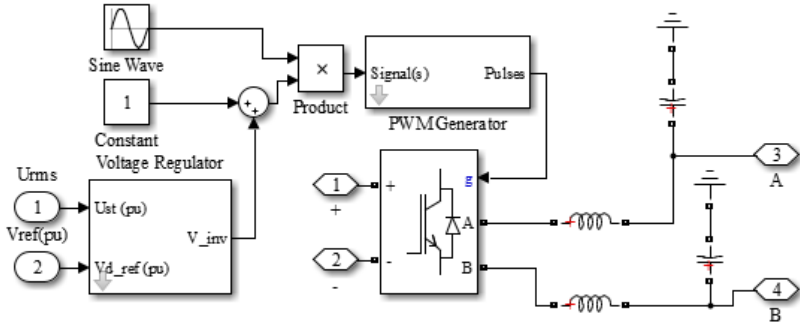


Рис. 3. Схема системы управления инвертором

Fig. 3. Diagram of inverter control system

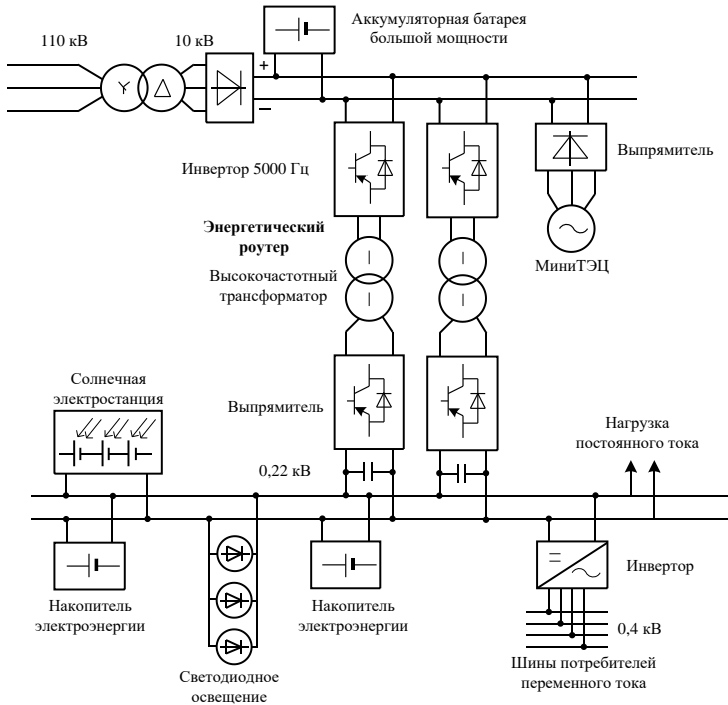


Рис. 4. Схема исследуемой сети постоянного тока на базе энергороутеров

Fig. 4. Scheme of the studied DC network based on energy routers

Электрическая сеть со стороны 10 кВ ЭР связана через трансформатор с питающей электроэнергетической системой (ЭЭС) 110 кВ. Для исследования нормальных и аварийных режимов работы описанной электрической сети была разработана компьютерная модель. НЭ на основе литий-ионных аккумуляторных батарей [24] моделировались блоками *Battery* пакета *SimPowerSystems* системы *MATLAB*. На стороне ВН ЭР использовалась аккумуляторная батарея емкостью 10000 А·ч, а на стороне НН – НЭ емкостью по 4000 А·ч.

В сети моделировались следующие установки РГ:

- мини-теплоэлектростанция (ТЭЦ) мощностью 2,5 МВ·А на стороне 10 кВ ЭР;
- солнечная электростанция (СЭС) на стороне 0,22 кВ.

Схема модели мини-ТЭЦ показана на рис. 5.

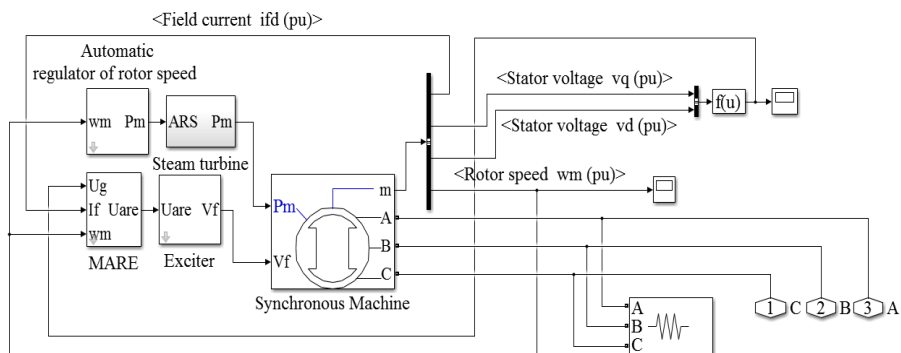


Рис. 5. Схема модели мини-ТЭЦ в *MATLAB*

Fig. 5. Scheme of the model of a mini heat and power plant in *MATLAB*

Турбогенератор мини-ТЭЦ моделировался стандартным блоком *Synchronous Machine pu Fundamental* библиотеки *SymPowerSystems* системы *MATLAB*. Структурная схема модели паровой турбины с промежуточным отбором пара (блок *Steam turbine* на рис. 5) представлена на рис. 6. Тиристорный возбудитель (блок *Exciter* на рис. 5) моделировался аperiodическим звеном первого порядка с коэффициентом $k_e = 1$, постоянной времени $T_e = 0,025$ с и блоком ограничения напряжения [25]. Регулирование скорости вращения ротора и напряжения турбогенератора выполнялось с помощью прогностического автоматического регулятора скорости (АРС) (блок *Automatic regulator of rotor speed*) и автоматического регулятора возбуждения (АРВ) (блок *MARE*), описание которых приведено в [26].

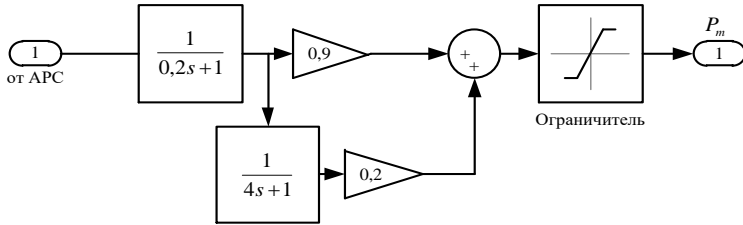


Рис. 6. Схема модели паровой турбины

Fig. 6. Steam turbine model diagram

Модель СЭС реализована с использованием блока *PV Array* системы *MATLAB*, построенного на основе 400 параллельных и 14 последовательных солнечных фотоэлектрических модулей, соединенных между собой, и позволяющих получить максимальную мощность 415 кВт. Применялись две модели СЭС, имеющих вольт-амперные и мощностные характеристики, показанные на рис. 7. Результаты компьютерного моделирования показали работоспособность и адекватность разработанной модели распределительной сети постоянного тока с ЭР. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать практически любые установки РГ и различных потребителей электроэнергии.

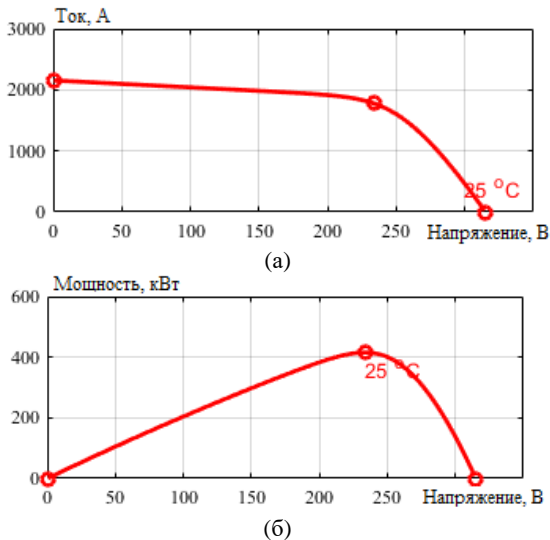


Рис. 7. Вольт-амперная (а) и мощностная (б) характеристики модели СЭС

Fig. 7. Volt-ampere (a) and power (b) characteristics of a solar power plant model

III. Результаты моделирования

Для исследования нормальных и аварийных режимов представленной электрической сети постоянного и переменного тока с ЭР рассматривались следующие возмущения:

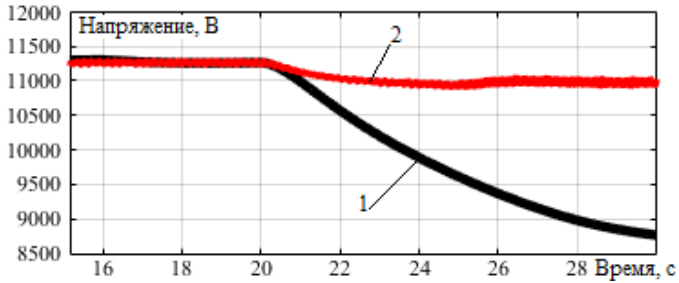
- внезапное отключение от питающей ЭЭС 110 кВ;
- подключение дополнительной мощной нагрузки в сети постоянного тока на стороне НН ЭР;
- значительное снижение интенсивности солнечного излучения.

Для регулирования напряжения в этих режимах использовались ЭР с регулируемыми инверторами на стороне ВН, а также постоянно включенные или подключаемые при снижении напряжения НЭ.

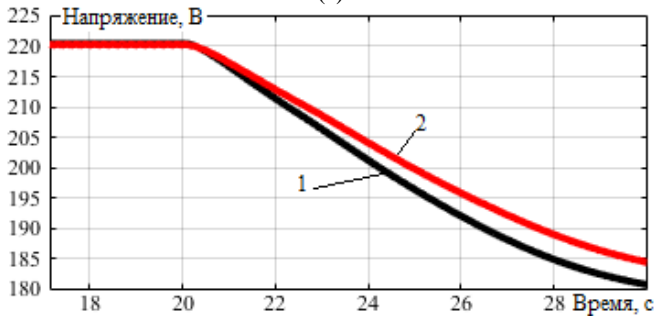
Отключение распределительной сети постоянного тока от питающей ЭЭС 110 кВ вызывает провал напряжения; при этом использование ЭР с регулируемым инвертором на стороне ВН дает возможность уменьшить глубину снижения напряжения в сетях постоянного и переменного тока, но большего эффекта удастся достичь на стороне 10 кВ ЭР – провал напряжения практически отсутствует. Если использовать ЭР с нерегулируемыми инверторами на стороне ВН, то глубина провала напряжения в сети 10 кВ достигает 22 %. Соответствующие временные зависимости напряжений в сети постоянного и переменного тока на сторонах ВН и НН ЭР представлены на рис. 8. Необходимо отметить, что в данном эксперименте все НЭ в сети были отключены.

При постоянно подключенных к сети НЭ и особенно аккумуляторной батарее большой мощности на стороне ВН ЭР наблюдается обеспечение стабильности напряжения в сети, даже после отключения связи с питающей ЭЭС 110 кВ. В этом случае поддержание напряжения на номинальном уровне достигается при регулируемых и нерегулируемых инверторах на стороне ВН ЭР.

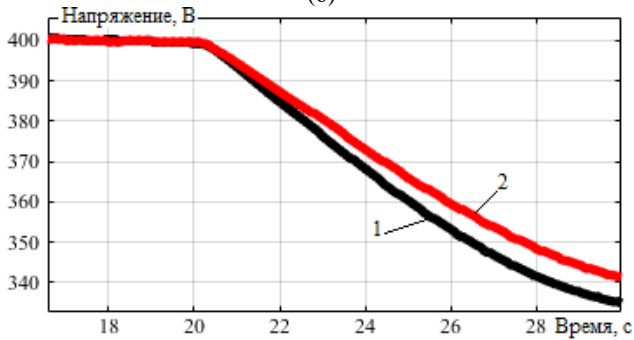
Другой эксперимент для определения возможности регулирования напряжения заключался в том, что на СЭС были постоянно включены НЭ, на стороне ВН ЭР аккумуляторная батарея большой мощности была отключена, а для повышения уровня напряжения использовалось дополнительное подключение двух НЭ в сети 220 В постоянного тока. Временные зависимости напряжений в сети при отключении питающей ЭЭС 110 кВ представлены на рис. 9.



(a)



(б)



(в)

Рис. 8. Временные зависимости напряжений:
на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (в);
1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 8. Time dependencies of voltages: on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER (DC network) (b); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC network) (c); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

Результаты эксперимента показывают, что при постоянно включенных НЭ на СЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне ВН ЭР на 4 % (характеристики 1 на рис. 8, а и рис. 9, а); на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 11 % (характеристики 1 на рис. 8, б и рис. 9, б); на стороне НН ЭР после инвертора на 10 % (характеристики 1 на рис. 8, в и рис. 9, в). Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить глубину провала напряжения и практически исключить его на стороне ВН, а при дополнительном подключении НЭ в сети 220 В постоянного тока удастся поддерживать напряжение на номинальном уровне на стороне НН ЭР после отключения питающей ЭЭС 110 кВ (характеристики 3 на рис. 9).

В табл. 1 приведены сводные результаты моделирования провала напряжения в исследуемой электрической сети при отключении питающей ЭЭС 110 кВ. Максимальная глубина провала напряжения определялась в % по выражению:

$$\delta U_{\text{II}}^{\text{max}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение, В; U_{min} – минимальное напряжение при провале, В.

Из табл. 1 видно, что использование регулируемых ЭР позволяет в среднем уменьшить на 2 % глубину провала напряжения на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока и на 19,5 % на стороне ВН. При постоянно подключенных НЭ на СЭС и использовании регулируемых ЭР удастся уменьшить максимальную глубину провала напряжения в среднем на 8,5 % на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока и на 1 % на стороне ВН.

Подключение дополнительной мощной нагрузки в сети постоянного тока на стороне НН ЭР также вызывает провал напряжения. При отключенных НЭ во всей сети использование ЭР с регулируемыми инверторами позволяет уменьшить глубину провала. Полученные временные зависимости напряжений для данного режима при отключенных НЭ приведены на рис. 10.

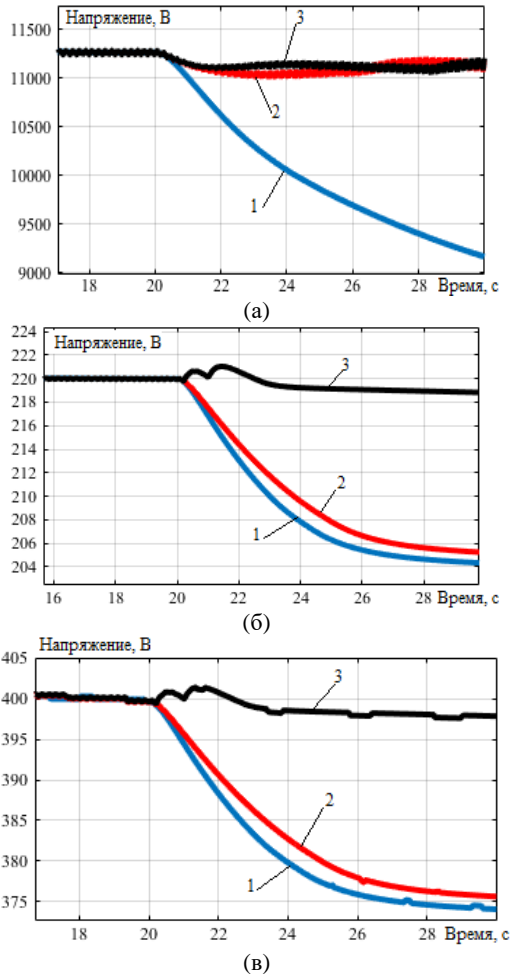


Рис. 9. Временные зависимости напряжений при отключении питающей ЭЭС:
 на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
 на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (в);
 1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР;
 3 – регулируемые ЭР при подключении дополнительных НЭ в сети 220 В

Fig. 9. Time dependences of voltages when the supply EPS is turned off:
 on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER
 (DC network) (b); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC net-
 work) (c); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER; 3 – regulated ER when connecting ad-
 ditional energy storage devices in the 220 V network

Таблица 1.
Глубина провала напряжения при отключении питающей ЭЭС

Table 1.
The depth of the voltage dip when the supply EPS is turned off

Режим работы сети	Максимальная глубина провала напряжения на стороне ВН ЭР δU_{II}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети постоянного тока δU_{II}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети переменного тока δU_{II}^{\max} , %
1. Нерегулируемые ЭР без использования НЭ	21,8	18,2	16,3
2. Регулируемые ЭР без использования НЭ	2,3	15,9	14,5
Снижение глубины провала напряжения в режиме 2 по сравнению с режимом 1, %	19,5	2,3	1,8
3. Регулируемые ЭР с постоянно подключенными на СЭС НЭ	1,4	6,4	7
Снижение глубины провала напряжения в режиме 3 по сравнению с режимом 2, %	0,9	9,5	7,5

Затем также был проведен эксперимент по подключению дополнительной мощной нагрузки в сети 220 В постоянного тока в режиме отключенной аккумуляторной батареи большой мощности и при постоянно включенных НЭ на СЭС. Для повышения уровня напряжения также использовалось подключение двух НЭ в сети 220 В постоянного тока. Временные зависимости напряжений в сети при подключении мощной нагрузки в момент времени $t = 20$ с представлены на рис. 11. Результаты эксперимента показывают, что при постоянно включенных НЭ на СЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 4 % (характеристики 1 на рис. 10, а и рис. 11, а); на стороне НН ЭР после инвертора на 4,5 % (характеристики 1 на рис. 10, б и рис. 11, б). Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить глубину провала напряжения, а при дополнительном последовательном подключении НЭ в сети 220 В постоянного тока удается поднять напряжение до номинального уровня (характеристики 3 на рис. 11).

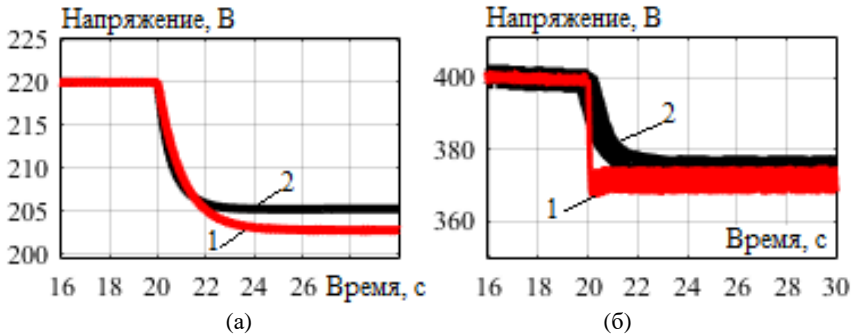


Рис. 10. Временные зависимости напряжений после подключения мощной нагрузки в сети 220 В: на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а); на стороне НН ЭР после инвертора (в сети переменного тока) (б); 1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 10. Time dependences of voltages after connecting a powerful load in the 220 V network: on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a); on the low voltage side of the ER after the inverter (in the AC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

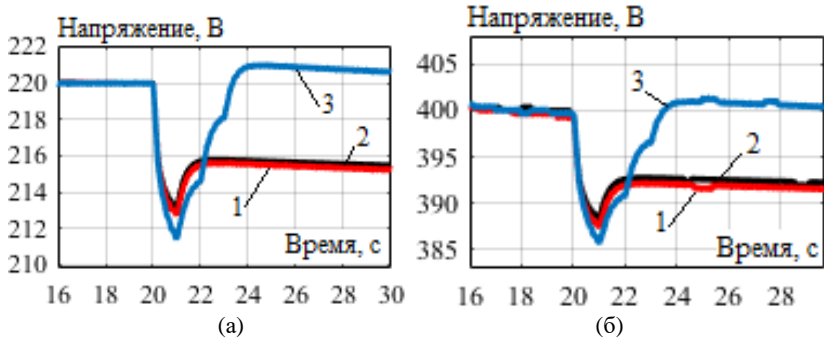


Рис. 11. Временные зависимости напряжений: на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а); на стороне НН ЭР (в сети переменного тока) (б); 1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР; 3 – регулируемые ЭР при последовательном подключении НЭ в сети 220 В

Fig. 11. Time dependences of voltages: on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a); on the low voltage side of the ER (in the AC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER; 3 – regulated ER with serial connection of electric power storage devices in the 220 V network

В табл. 2 приведены сводные результаты моделирования при подключении дополнительной мощной нагрузки. Использование регулируемых ЭР позволяет уменьшить на 1 % глубину провала напряжения на стороне НН в сети постоянного и переменного тока, а при постоянно подключенных НЭ на СЭС дает возможность уменьшить эту величину в среднем на 3 %.

Таблица 2.
Глубина провала напряжения при подключении мощной нагрузки

Table 2.
Depth of voltage dip when connecting a powerful load

Режим работы сети	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети постоянного тока δU_{Γ}^{\max} , %	Максимальная глубина провала напряжения на стороне НН ЭР в сети переменного тока δU_{Γ}^{\max} , %
1. Нерегулируемые ЭР без использования НЭ	7,7	7,5
2. Регулируемые ЭР без использования НЭ	6,8	6,3
Снижение глубины провала напряжения в режиме 2 по сравнению с режимом 1, %	0,9	1,2
3. Регулируемые ЭР с постоянно подключенными на СЭС НЭ	3,2	3
Снижение глубины провала напряжения в режиме 3 по сравнению с режимом 2, %	3,6	3,3

Провал напряжения в сети моделировался также при значительном снижении интенсивности солнечного излучения, что уменьшает выработку электроэнергии на СЭС. Для повышения уровня напряжения использовались регулируемые ЭР и НЭ на СЭС. При уменьшении мощности СЭС наблюдается незначительное снижение напряжения. Использование регулируемых ЭР дает возможность понизить глубину провала напряжения. Соответствующие временные зависимости напряжения представлены на рис. 12. Результаты регулирования напряжения с помощью НЭ при снижении интенсивности солнечного излучения показаны на рис. 13. При постоянно включенных на СЭС НЭ глубина провала напряжения в сети постоянного тока меньше в 1,6 раза по сравнению с режимом, когда НЭ не используются (характеристики 1 на рис. 12, б и рис. 13, а). Однако при постоянно включенных НЭ поднять напряжение до номинального уровня не получается. Решить

данную проблему удастся путем подключения дополнительных НЭ при понижении напряжения (характеристики 2 на рис. 13).

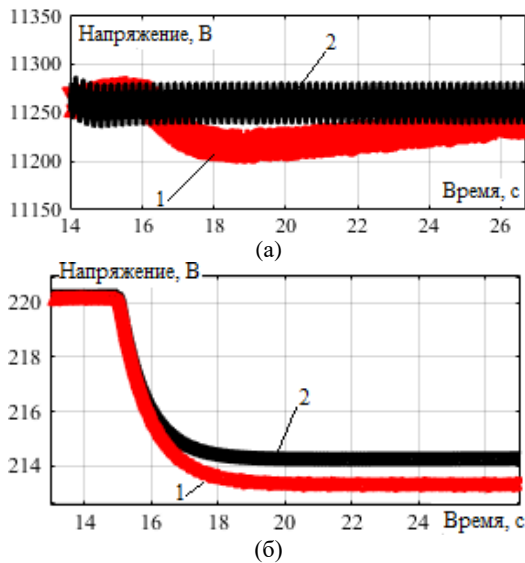


Рис. 12. Временные зависимости напряжений:
на стороне ВН ЭР (а); на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (б);
1 – нерегулируемые ЭР; 2 – регулируемые ЭР

Fig. 12. Time dependences of voltages:
on the high voltage side of the energy router (ER) (a); on the low voltage side of the ER
(DC network) (b); 1 – unregulated ER; 2 – regulated ER

IV. Заключение

Представлено описание компьютерной модели объединения *microgrid* постоянного и переменного тока на базе ЭР с установками РГ и НЭ. Модель является гибкой и позволяет дополнительно подключать любые установки РГ и различных потребителей электроэнергии. Результаты компьютерного моделирования позволяют сформулировать следующие выводы.

1. В режиме работы без НЭ использование ЭР с регулируемым инвертором на стороне ВН дает возможность при отключении питающей ЭЭС уменьшить на 2 % глубину провала напряжения на стороне НН в сетях постоянного и переменного тока, но большего эффекта удастся достичь на стороне 10 кВ ЭР – провал напряжения практически отсутствует. Если использовать ЭР с нерегулируемыми инверторами на стороне ВН, то глубина провала напряжения в сети 10 кВ достигает 22 %.

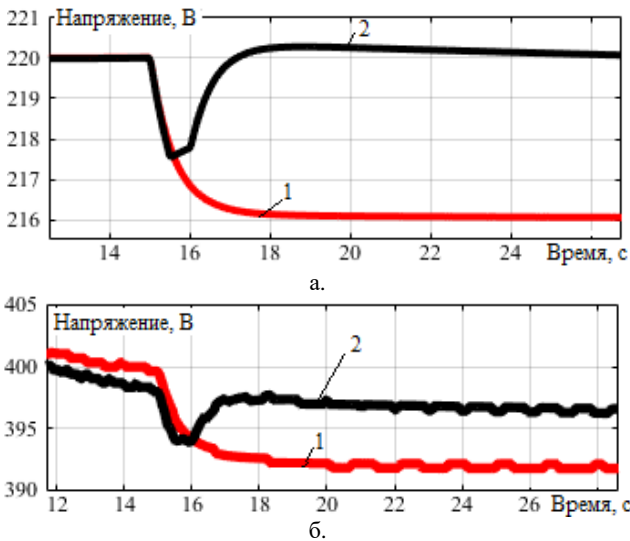


Рис. 13. Временные зависимости напряжений:
на стороне НН ЭР (сеть постоянного тока) (а);
на стороне НН ЭР (в сети переменного тока) (б); 1 – НЭ на СЭС постоянно
включены; 2 – НЭ на СЭС подключаются при снижении напряжения

Fig. 13. Time dependencies of voltages:
on the low voltage side of the energy router (ER) (DC network) (a);
on the low voltage side of the ER (in the AC network) (b);
1 – electricity storage devices at solar power plants are constantly on;
2 – electricity storage devices at solar power plants are connected when the voltage drops

2. При постоянно подключенных к сети НЭ и особенно аккумуляторной батарее большой мощности на стороне ВН ЭР обеспечивается стабильность напряжения в сети, даже после отключения связи с питающей ЭЭС 110 кВ. Поддержание напряжения на номинальном уровне достигается как при регулируемых, так и нерегулируемых инверторах на стороне ВН ЭР.

3. При постоянно включенных НЭ на СЭС и во время отключения питающей ЭЭС глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне ВН ЭР – на 4 %; на стороне НН ЭР в сети постоянного тока – на 11 %; на стороне НН ЭР после инвертора – на 10 %. Использование регулируемых ЭР позволяет дополнительно уменьшить глубину провала напряжения и практически исключить его на стороне ВН, а при подключении дополнительных НЭ в сети 220 В постоянного тока удастся поддерживать напряжение на номинальном уровне на стороне НН ЭР даже после отключения питающей ЭЭС

110 кВ.

4. При отключенных НЭ во всей сети в режиме подключения мощной нагрузки использование ЭР с регулируемыми инверторами позволяет уменьшить в среднем на 1 % глубину провала напряжения на стороне НН в сети постоянного и переменного тока, а при постоянно подключенных НЭ на СЭС дает возможность уменьшить эту величину в среднем на 3 %.

5. При постоянно включенных НЭ на СЭС во время подключения мощной нагрузки глубина провала напряжения в сети уменьшается: на стороне НН ЭР в сети постоянного тока на 4 %; на стороне НН ЭР после инвертора на 4,5 %. Использование регулируемых ЭР и дополнительно подключаемых НЭ в сети 220 В постоянного тока позволяет поднять напряжение до номинального уровня на стороне НН ЭР.

6. При значительном снижении интенсивности солнечного излучения, уменьшающем выработку электроэнергии на СЭС, в узлах сети может снизиться напряжение. Использование регулируемых ЭР дает возможность повысить его уровни. Увеличить напряжения до номинальных значений в сети постоянного и переменного тока можно на основе последовательного подключения НЭ на СЭС.

© Булатов Ю.Н., 2023

© Крюков А.В., 2023

© Суслов К.В., 2023

Поступила в редакцию 06.12.2022

Received 06.12.2022

Библиографический список

- [1] Bayindir R., Colak I., Fulli G., Demirtas K. Smart grid technologies and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. № 66. P. 499-516. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.002
- [2] Mohsen F.N., Amin M.S., Hashim H. Application of smart power grid in developing countries // proc. 2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), June 3-4, 2013, Langkawi, Malaysia: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564586
- [3] Buchholz B.M., Styczynski Z.A. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 396 p.
- [4] Bhalshankar S.S., Thorat C.S. Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study // proc. 2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs), Oct. 03-05, 2016, Paralakhemundi, India: IEEE, 2016. P. 1-5. DOI: 10.1109/SCOPEs.2016.7955498
- [5] Bulatov Yu., Kryukov A., Nguyen V.H., Tran D.H. Fuzzy controller of rotation angle of blades of horizontal-axial wind power generation plant // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 983. P. 892-901.

- [6] Suslov K., Solonina N., Stepanov V. A principle of power quality control in the intelligent distribution networks // proc. 2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), Sep. 08-11, 2015, Vienna, Austria: IEEE, 2015. P. 260-264. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315218
- [7] Antoniadou-Plytaria K.E., Kouveliotis-Lysikatos I.N., Georgilakis P.S. and Hatziar-gyriou N.D. Distributed and decentralized voltage control of smart distribution net-works: models, methods, and future research // IEEE Transactions on Smart Grid. 2017. № 8 (6). P. 2999-3008. DOI: 10.1109/TSG.2017.2679238
- [8] Colak I., Bayindir R., Sagiroglu S. The effects of the smart grid system on the national grids // proc. 2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Jun. 17-19, 2020, Paris, France: IEEE, 2020. P. 122-126. DOI: 10.1109/icSmart-Grid49881.2020.9144891
- [9] Olivares D. et al. Trends in microgrid control // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. № 5 (4). P. 1905-1919. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514
- [10] Katiraei F., Irvani M.R., Lehn P. Micro-grid autonomous operation during and sub-sequent to islanding process // IEEE Transactions on Power Delivery. 2005. № 20 (1). P. 248-257. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835051
- [11] Sikorski T., Rezmer J. Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks // Power Quality Issues in Distributed Generation, Luszcz J. London: InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172
- [12] Aderibigbe M.A., Adogbe A.U., Agbetuyi F., Aioboman A.E. Impact of distributed generations on power systems stability: A review // proc. 2022 IEEE Nigeria 4th In-ternational Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NI-GERCON), Apr. 05-07, 2022. P. 1-5. DOI: 10.1109/NIGERCON54645.2022.9803062
- [13] Венге К. и др. Возобновляемые Источники Энергии: Теоретические Основы, Технологии, Технические Характеристики, Экономика. Магдебург: Отто-фон-Герике Университет, 2010. – 211 с.
- [14] Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 39. P. 748-764. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113
- [15] Chen D., Xu Y., Huang A.Q. Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. № 64 (9). P. 7455-7466. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674621
- [16] Sechilariu M., Locment F., Wang B. Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid // Energies. 2015. № 8 (8). P. 7945-7967. DOI: 10.3390/en8087945
- [17] Dos Santos L.T., Sechilariu M., Locment F. Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints // Buildings. 2016. № 6 (4). Art. no. 50. DOI: 10.3390/buildings6040050
- [18] Sechilariu M., Locment F. Urban DC Microgrid: Intelligent Control and Power Flow Optimization. Butterworth-Heinemann, 2016. – 306 p.
- [19] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Distribution DC electrical network with power router // proc. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Oct. 01-04, 2019, Vladivostok, Russia: IEEE, 2019. P. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934898

- [20] Xu Y., Zhang J., Wang W., Juneja A., Bhattacharya S. Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet // proc. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Oct. 17-20, 2011, Brussels: IEEE, 2011. P. 31-36. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340
- [21] Bulatov Yu.N., Kryukov A.V., Arsentiev G.O. Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon), Oct., 2018, Chelyabinsk, Russia: IEEE, 2018. P. 143-148. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289
- [22] She X., Huang A.Q., Burgos R. "Review of solid state transformer technologies and their applications in power distribution system". IEEE J. Emerg. Sel. Topics in Power Electron., vol. 1, no. 3, pp. 186-198, 2013. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2277917
- [23] Bansode S.G., Joshi P.M. Solid state transformers: new approach and new opportunity // proc. 11th IRF International Conference, June 15, 2014, Pune, India, pp. 15-21.
- [24] Nishi Y. Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future // Journal of Power Sources. 2001. № 100 (1-2). P. 101-106. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00887-4
- [25] Anderson P.M., Fouad A.A. Power System Control and Stability. 2nd ed. IEEE Press, 2003. – 688 p.
- [26] Bulatov Y., Kryukov A., Suslov K. Using group predictive voltage and frequency regulators of distributed generation plants in cyber-physical power supply systems // Energies. 2022. № 15 (4). DOI: 10.3390/en15041253

References

- [1] R. Bayindir, I. Colak, G. Fulli and K. Demirtas, "Smart grid technologies and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 66, pp. 499-516, Dec. 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.08.002
- [2] F.N. Mohsen, M.S. Amin and H. Hashim, "Application of smart power grid in developing countries", in proc. *2013 IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, June 3-4, 2013, Langkawi, Malaysia. DOI: 10.1109/PEOCO.2013.6564586
- [3] B.M. Buchholz and Z.A. Styczynski, *Smart Grids – fundamentals and technologies in electricity networks*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [4] S.S. Bhalshankar and C.S. Thorat, "Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study", in proc. *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, Oct. 03-05, 2016, Paralakhemundi, India, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SCOPES.2016.7955498
- [5] Yu. Bulatov, A. Kryukov, V.H. Nguyen, D.H. Tran, "Fuzzy controller of rotation angle of blades of horizontal-axial wind power generation plant", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 983, pp. 892-901, May 2019.
- [6] K. Suslov, N. Solonina and V. Stepanov, "A principle of power quality control in the intelligent distribution networks", in proc. *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, Sep. 08-11, 2015, Vienna, Austria, pp. 260-264. DOI: 10.1109/SEDST.2015.7315218

- [7] K.E. Antoniadou-Plytaria, I.N. Kouveliotis-Lysikatos, P.S. Georgilakis and N.D. Hatziargyriou, “Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: models, methods, and future research”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999-3008, Nov. 2017. DOI: 10.1109/TSG.2017.2679238
- [8] I. Colak, R. Bayindir and S. Sagiroglu, “The effects of the smart grid system on the national grids”, in proc. *2020 8th International Conference on Smart Grid (icSmart-Grid)*, Jun. 17-19, 2020, Paris, France, pp. 122-126. DOI: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144891.
- [9] D. Olivares et al., “Trends in microgrid control”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905-1919, Jun. 2014. DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514
- [10] F. Katiraei, M.R. Iravani and P. Lehn, “Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 248-257, Jan. 2005. DOI: 10.1109/TPWRD.2004.835051
- [11] T. Sikorski and J. Rezmer, “Distributed generation and its impact on power quality in low-voltage distribution networks”, *Power Quality Issues in Distributed Generation*, J. Luszcz, London: InTech, 2015. DOI: 10.5772/61172
- [12] M.A. Aderibigbe, A.U. Adoghe, F. Agbetuyi and A.E. Aioboman, “Impact of distributed generations on power systems stability: A review”, in proc. *2022 IEEE Nigeria 4th International Conference on Disruptive Technologies for Sustainable Development (NIGERCON)*, Apr. 05-07, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/NIGERCON54645.2022.9803062
- [13] K. Venge et al., *Renewable Energy Sources: Theoretical Foundations, Technologies, Technical Characteristics, Economics*. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, 2010.
- [14] O. Ellabban, H. Abu-Rub and F. Blaabjerg, “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 748-764, Aug. 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.113
- [15] D. Chen, Y. Xu and A. Q. Huang, “Integration of DC microgrids as virtual synchronous machines into the AC grid”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7455-7466, Sept. 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2674621
- [16] M. Sechilariu, F. Locment and B. Wang, “Photovoltaic electricity for sustainable building. Efficiency and energy cost reduction for isolated DC microgrid”, *Energies*, vol. 8, no. 8, pp. 7945-7967, Jul. 2015. DOI: 10.3390/en8087945
- [17] L.T. dos Santos, M. Sechilariu and F. Locment, “Optimized load shedding approach for grid-connected DC microgrid systems under realistic constraints”, *Buildings*, vol. 6, no.4, art. no. 50, Dec. 2016. DOI: 10.3390/buildings6040050
- [18] M. Sechilariu and F. Locment, *Urban DC Microgrid: Intelligent Control and Power Flow Optimization*. Butterworth-Heinemann, 2016.
- [19] Yu.N. Bulatov and A.V. Kryukov, “Distribution DC electrical network with power router”, in proc. *2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*, Oct. 01-04, 2019, Vladivostok, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934898
- [20] Y. Xu, J. Zhang, W. Wang, A. Juneja and S. Bhattacharya, “Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet”, in proc. *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Oct. 01-04, 2011, Brussels, pp. 31-36. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2011.6102340

- [21] Yu.N. Bulatov, A.V. Kryukov and G.O. Arsentiev, "Use of power routers and renewable energy resources in smart power supply systems", in proc. *2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon)*, Oct. 17-20, 2018, Chelyabinsk, Russia, pp. 143-148. DOI: 10.1109/URALCON.2018.8544289
- [22] X. She, A.Q. Huang and R. Burgos, "Review of solid state transformer technologies and their applications in power distribution system", *IEEE J. Emerg. Sel. Topics in Power Electron*, vol. 1, no. 3, pp. 186-198, Sept. 2013. DOI: 10.1109/JESTPE.2013.2277917
- [23] S.G. Bansode and P.M. Joshi, "Solid state transformers: new approach and new opportunity", in proc. *11th IRF International Conference*, June 15, 2014, Pune, India, pp. 15-21.
- [24] Y. Nishi, "Lithium ion secondary batteries; past 10 years and the future", *Journal of Power Sources*, vol. 100 (1-2), pp. 101-106, Nov. 2001. DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00887-4
- [25] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*. 2nd ed. IEEE Press, 2003.
- [26] Y. Bulatov, A. Kryukov and K. Suslov, "Using group predictive voltage and frequency regulators of distributed generation plants in cyber-physical power supply systems", *Energies*, vol. 15, no. 4, Feb. 2022. DOI: 10.3390/en15041253

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Булатов Юрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета, Братск, Российская Федерация.

Yuri N. Bulatov, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation.

Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного университета путей сообщения; профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, Российская Федерация.

Andrey V. Kryukov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk State Transport University; professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.

Суслов Константин Витальевич, доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, Иркутск, Российская Федерация.

Konstantin V. Suslov, D. Sci. (Eng.), professor of the Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation.