

УДК 621.352

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-82-94

Моделирование и управление гибридными системами электроснабжения фотоэлектрических топливных элементов-ультраконденсаторов

Х. А. Исса, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Л. М. Абдали, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

М. Н. Аль-Малики, аспирант, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Б. А. Якимович, доктор технических наук, профессор, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности

Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

В этом исследовании показан усовершенствованный метод управления питанием микросети постоянного тока. Ценность использования возобновляемых источников энергии уже давно вызывает споры, и в этой статье предлагается типичная микросеть постоянного тока из-за преимуществ, которые она имеет по сравнению с технологией переменного тока. Солнечная батарея (PV), топливный элемент (ТЭ) и компонент хранения – ультраконденсатор (УД) – составляют стандартную микросеть. Важнейшей целью статьи является оптимизация стратегии управления напряжением шины с организованным разделением мощности между этими типами возобновляемой энергии, которые здесь используются.

При переменном солнечном излучении и различных условиях нагрузки предлагаемое управление направлено на подачу высококачественной энергии на нагрузку с учетом состояния ТЭ. Ультраконденсатор был подготовлен для обеспечения переходного периода из-за медленной динамики ТЭ. Для поддержания стабильного напряжения на шине постоянного тока при колебаниях нагрузки применяется алгоритм управления. Чтобы сгенерировать ссылки, контроллер управления полагается на метод дифференциальной неравномерности. Электричество от ультраконденсатора управляет шиной постоянного тока. Более ранние исследования показали, что схема топливного элемента была интегрирована с автономной фотоэлектрической системой, и обнаружили, что топливный элемент не обладает такими же свойствами. В текущем исследовании были сделаны наблюдения за такими элементами качества электроэнергии, как напряжение, ток и мощность для систем накопления энергии. С несколькими элементами самоопределения фотоэлектрических, топливных элементов и ультраконденсаторов, наряду с их параметрами, моделирование используется в качестве среды метода исследования. Результат показывает, что, поскольку ультраконденсатор служит основным накопителем, интеграция топливных элементов мало на него влияет, и наблюдаются лишь небольшие изменения напряжения и тока. Из-за характеристики интеграции топливных элементов, создающей в системе большое возмущение, основное возмущение от системы поглощалось в ультраконденсаторе.

Ключевые слова: возобновляемая энергия, солнечная энергия, системы управления энергопотреблением, топливный элемент, ультраконденсатор, система хранения.

Введение

В результате огромной потребности в электроэнергии в современном мире многие исследователи, инвесторы и работники в области электроэнергетики концентрируют свои усилия на разработке методов интеграции различных источников энергии, таких как нефть, уголь, ядерная или возобновляемая энергия [1]. Из-за острой необходимости замедлить сокращение использования ископаемого топлива и сократить выбросы парниковых газов мир переключает свое внимание на более экологически безопасные и ресурсосберегающие формы производства энергии, такие как возобновляемые

(фотоэлектрические, ветряные, геотермальные, биомассы и т. д.) или технологии топливных элементов. Одним из возможных источников энергии будущего является топливный элемент (ТЭ), известный как источник энергии с высокой удельной мощностью [2–4]. ТЭ являются экологически устойчивым источником, который очень подходит для использования в микросетях благодаря своей эффективности, надежности и высокой удельной мощности. Микросети на топливных элементах становятся все более популярными, потому что технология топливных элементов и микросети хорошо работают вместе. В целом, он может удовлетворить теку-

щие потребности рынка в энергии по разумной цене, будучи при этом очень надежным, чистым, тихим, автономным, модульным и расширяемым. Ожидается, что к 2030 году количество установок на топливных элементах увеличится более чем в десять раз, достигнув мощности 3000 МВт [5–7]. Он имеет большое преимущество в интеграции с подключенными другими источниками в сети под управлением контроллера и направлен на снижение количества расхода топлива на основе более развитого менеджера. Согласно исследованиям, которые были проведены и опубликованы в академических журналах, на постоянную времени влияет как температура, так и метод впрыска (компрессор, клапаны и установка для риформинга водорода) [8]. Из-за этого внезапное изменение спроса приведет к кратковременному падению напряжения (это явление называется голоданием стека). Система должна содержать как минимум еще один дополнительный ресурс (накопитель), образующий гибридную энергосистему, чтобы предотвратить снижение напряжения и продолжать питать поезд в течение всего времени. Таким образом, при использовании ТЭ рекомендуется использовать контур управления током. Это предотвратит перегрузки и улучшит работу ТЭ, неуклонно растущее напряжение и неустойчивое поведение. Эти проблемы могут повредить определенные электрические нагрузки, которые очень чувствительны. Чтобы решить эти проблемы, необходимо внедрить надежный алгоритм управления, чтобы поддерживать постоянное напряжение на шине постоянного тока, несмотря на изменения в окружающей среде (требования или погодные условия) [9–11]. Что касается системы хранения энергии, то сравнение мощностных характеристик аккумуляторов и ультраконденсаторов показывает, что ультраконденсатор имеет большую эффективность заряда, чем аккумулятор (95 % для УД по сравнению с 50 % для аккумулятора). Кроме того, наиболее существенным недостатком аккумуляторов является длительное время, необходимое для подзарядки, которое ограничивается зарядным током. С другой стороны, в зависимости от величины зарядного тока (энергии), которую можно получить, ультраконденсаторы можно заряжать за короткое время. Ультраконденсаторы, в отличие от аккумуляторов, способны выдерживать чрезвычайно большое количество циклов заряда и разряда без какого-либо износа (или визуального неограниченного количества циклов) [12]. Это для нее существенное преимущество. Таким образом, ультраконденсато-

ры имеют более высокую удельную мощность, более длительный срок службы и более быстрый отклик, чем батареи. Это показывает, что ультраконденсаторы лучше батарей практически во всех отношениях. Кроме того, все больше внимания уделяется возобновляемым источникам энергии. Солнечная энергия является одним из этих экологически чистых видов энергии. Есть два способа извлечь выгоду из солнечной энергии: либо с помощью метода сфокусированной солнечной энергии, основанной на тепловой энергии солнца, либо с помощью солнечных элементов, способных производить прямое преобразование для производства электроэнергии [13–15]. Солнечные батареи, в дополнение к другим источникам энергии, таким как ветряные турбины и дизельные двигатели, могут быть включены в микросеть рядом друг с другом. Однако в результате их спорадической выработки они создают дисбаланс в спросе и предложении на электроэнергию, что может угрожать стабильности и надежности сети. В этой статье анализируется производительность гибридной энергосистемы, включающей в себя PV, ТЭ, ESS и УД. Эта гибридная система управляется алгоритмом, использующим подход PI-полноты к анализу данных.

Цель работы – максимизация мощности, вырабатываемой фотоэлектрическими массивами с использованием точка максимальной мощности (ТММ) и подача высококачественной энергии для переменной нагрузки и подключения других источников, таких как топливный элемент и ультраконденсатор, для повышения эффективности и надежности электрической сети для снабжения нагрузки электроэнергией в различных погодных условиях и в любое время.

Структура гибридной системы

Предлагаемая типичная структура состоит из солнечных панелей, топливного элемента и ультраконденсатора. В таблице 1 приведены характеристики элементов гибридной системы. Они подключены к шине постоянного тока с помощью преобразователей постоянного тока, что позволяет лучше контролировать распределение мощности, а также регулировать напряжение на шине постоянного тока. Эта микросеть была разработана для работы в изолированных средах (вне сети). Переменная нагрузка используется для оценки производительности. Вместе фотоэлектрический источник и блок ТЭ способны обеспечить мощность, достаточную для удовлетворения потребности в энергии. В переходные периоды ультраконденсатор обеспечивает необходимую мощность для поддержания по-

стоянного напряжения на шине постоянного тока, а также стабилизирует напряжение на шине постоянного тока в случае перебоев [16]. На рис.

1 представлена структура исследуемой системы, включающей в себя силовые электронные преобразователи.

Таблица 1. Электрические свойства гибридной системы

Table 1. Electrical properties of the hybrid system

| Фотоэлектрическая система | | Ультраконденсатор (УД) | |
|--|-----------------|-------------------------------|---------|
| Тип солнечной панели | ТРВ156×156-72-Р | Номинальное напряжение | 291,6 В |
| Струны | 6 | Номинальная емкость | 15,6 Ф |
| Панели серии в строку | 6 | Сопротивление | 0,15Ω |
| Максимальная мощность | 295Вт | Последовательные конденсаторы | 108 |
| Напряжение при ТММ | 35,3 В | | |
| Текущий при ТММ | 8,36А | | |
| Топливные элементы с протонообменной мембраной | | | |
| Клетки | | | 65 |
| Номинальное напряжение | | | 41,15 В |
| Номинальный ток | | | 250А |
| Рабочая температура | | | 45 °С |
| Эффективность | | | 50 % |

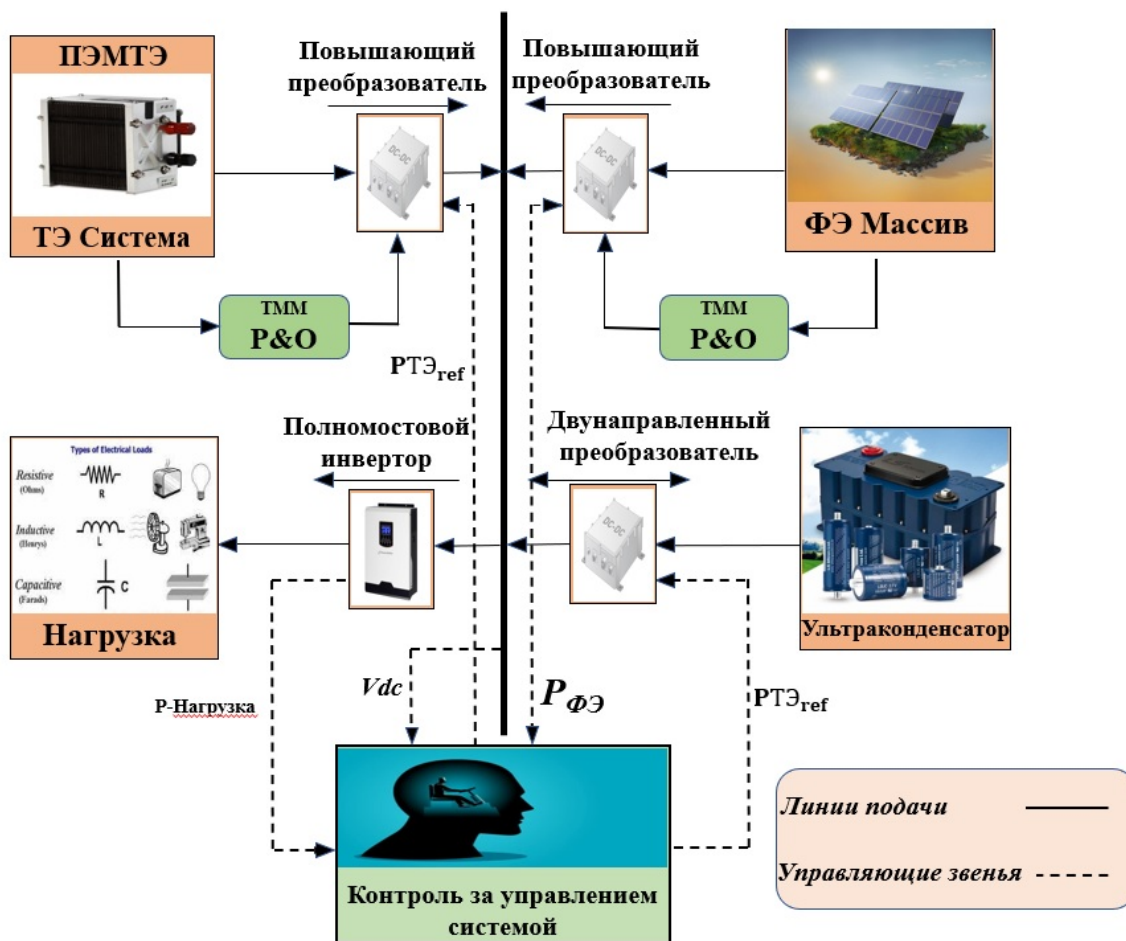


Рис. 1. Конфигурация гибридной системы

Fig. 1. Hybrid system configuration

В конфигурации PV подключается с помощью повышающего преобразователя, ТЭ подключается с помощью чередующегося двухфазного повышающего преобразователя, а УД подключается с помощью двунаправленного преобразователя постоянного тока. Все преобразователи соединены параллельно. Повышающий преобразователь постоянного тока используется для управления мощностью, поступающей от солнечной панели.

Для регулирования ТЭ используются повышающие преобразователи, работающие параллельно с двумя фазами. Ультраконденсаторы подключены к шине постоянного тока с помощью двунаправленного повышающего преобразователя; эта структура позволяет заряжать или разряжать систему хранения [17–19]. Текущий контур регулирования отвечает за управление преобразователями. Ожидается, что контур управления для системы хранения будет намного быстрее, чем другие.

Несколько опорных сигналов, в том числе I_{FCREF} и I_{UCREF} , вырабатываются системой управления энергопотреблением. Этот алгоритм отлично справляется с управлением энергией системных накопителей, а именно энергией шины постоянного тока и ESS, чтобы определить наилучший план действий для корректировки мощности ТЭ.

Математическое моделирование фотоэлектрических ячеек

В большей части литературы электрическая модель представлена одним диодом, как показано на рис. 2. Фототок, параллельный диоду, является компонентом электрической модели наряду с шунтирующим сопротивлением и последовательным сопротивлением.

Применяя закон Кирхгофа, уравнения, управляющие электрической цепью, получают следующим образом:

$$\begin{cases} I = I_L - I_D - I_{sh}, \\ I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I * R_s}{fV_{TH}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}}, \end{cases} \quad (1)$$

где I_L – фототок или энергия освещения, линейно изменяющаяся в зависимости от излучения при определенной температуре клетки; I_0 – ток насыщения; $V_{TH} = \frac{KT_c}{q}$ – тепловое напряжение;

q – заряд электрона; T_c – температура ячейки; K – постоянная Больцмана; f – фактор идеальности; R_{sh} и R_s представляют собой шунтирующие и последовательные сопротивления соответственно [20].

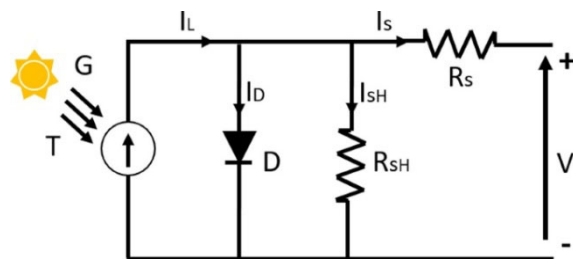


Рис. 2. Эквивалентная схема однодиодной фотоэлектрической батареи

Fig. 2. Equivalent circuit of a single-diode photovoltaic array

Принимая во внимание как последовательное, так и параллельное соединение фотоэлектрических панелей, можно использовать следующее уравнение, чтобы определить, какой ток вырабатывает фотоэлектрическая батарея:

$$I_{PV} = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + I * N_s * R_s}{N_s f V_{TH}}\right) - 1 \right] - \frac{V + I * N_s * R_s}{N_p R_{SH}}, \quad (2)$$

где I_{PV} – ток, вырабатываемый массивом PV; N_s – количество строк ячеек серии; N_p – количество параллельных строк ячеек [21].

Отслеживание точки максимальной мощности

Мониторинг точки максимальной мощности (ТММ) фотогальванического массива является важной частью фотоэлектрической системы. Были разработаны различные методы ТММ, и они различаются с точки зрения сложности их использования, скорости сходимости, качества работы, количества требуемых датчиков, стоимости, способа работы с аппаратным обеспечением и т. д.

ТММ-методы имеют проблемы с автоматическим определением, при каком напряжении V_{mp} или токе I_{mp} должна работать фотоэлектрическая батарея, чтобы производить наибольшую мощность P_{max} при заданной температуре и уровне солнечного излучения. Эта постоянная настройка фотоэлектрической системы гарантирует, что она всегда получает максимальную мощность от солнечной батареи, независимо от того, какая погода или сколько энергии ей нужно. Было создано множество различных алгоритмов и методов отслеживания.

Стратегии, которые используются чаще всего, включают метод возмущения и наблюдения (также известный как P&O), метод инкрементной проводимости (также известный как IC) и версии обоих этих методов. Подход P&O хорошо известен своим простым применением, но

он отклоняется от ТММ и колеблется вблизи него, потому что для определения МРР необходимо постоянно возмущать систему. Кроме того, метод Р&О колеблется близко к ТММ, когда погодные условия стабильны или меняются медленно; когда погода внезапно меняется,

подход Р&О не может успешно следовать МРР. Несмотря на эти недостатки, он считается одним из наиболее широко используемых типов коммерческих солнечных энергетических систем. На рис. 3 показана схема метода «возмущать и наблюдать» (Р&О) [22–24].

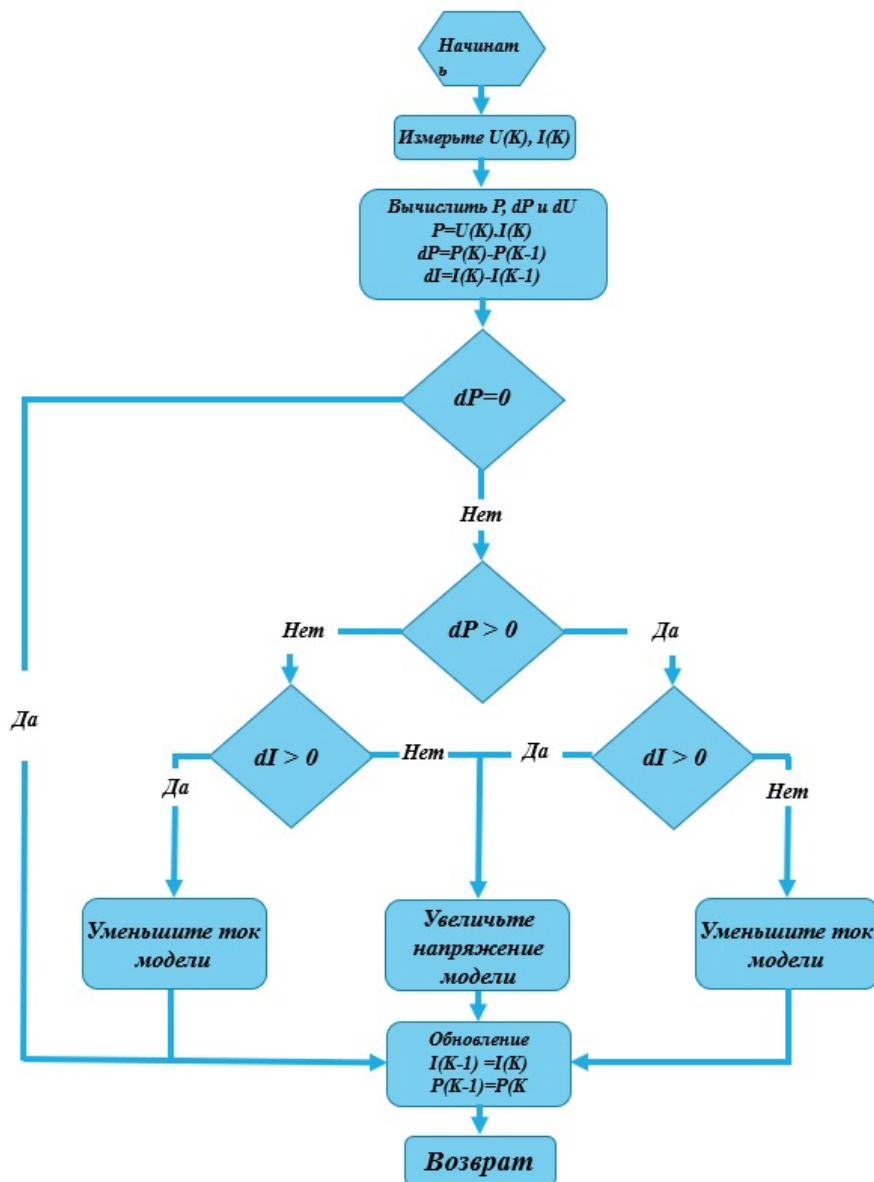


Рис. 3. Блок-схема технологии возмущения и наблюдения (Р&О)

Fig. 3. Block diagram of perturbation and surveillance technology (P&O)

Топливная ячейка

Топливный элемент – это тип генератора, который вырабатывает электричество посредством электрохимического процесса путем смешивания газов водорода (H_2) и кислорода (O_2). Топливный элемент – это форма возобновляемой энергии.

Существует пять видов топливных элементов:

- твердооксидные топливные элементы (ТОТЭ),
- щелочные топливные элементы (ЩТЭ),
- топливные элементы на фосфорной кислоте (PAFC),
- топливные элементы с полимерным электролитом (PEFC),
- жидкокарбонатные топливные элементы (ЖКТЭ).

Топливные элементы с прямым метанолом (DMFC – англ. Direct methanol fuel cells) (технические характеристики ячеек прямого метанола SDMC) дают возможность работать на метаноле в качестве источника энергии (технические характеристики полимерных электролитных элементов SPEC); дающие возможность работать на водороде называются топливными элементами с протонообменной мембраной (PEMFC – англ. Proton exchange membrane fuel cells).

Принцип работы топливного элемента заключается в том, что при взаимодействии водорода с кислородом их соединение приводит к высвобождению электрона, и в результате вырабатывается электрическая энергия (рис. 4).

В этом исследовании использовался топливный элемент PEMFC, поскольку он может ис-

пользовать как водород в качестве основного источника топлива, так и другой возобновляемый источник топлива, такой как электролизер [25].

Для работы топливного элемента необходимы анод, катод и электролит (см. рис. 4). Атом водорода расщепляется на составляющие его протоны и электроны платиновым катализатором, расположенным на аноде. Когда электроны заряжаются током, поступающим извне, протоны пробиваются к катоду, создавая выходное напряжение ТЭ. На катоде протоны и электроны снова соединяются с кислородом, что приводит к образованию тепла и воды, как показано в химической реакции ТЭ.

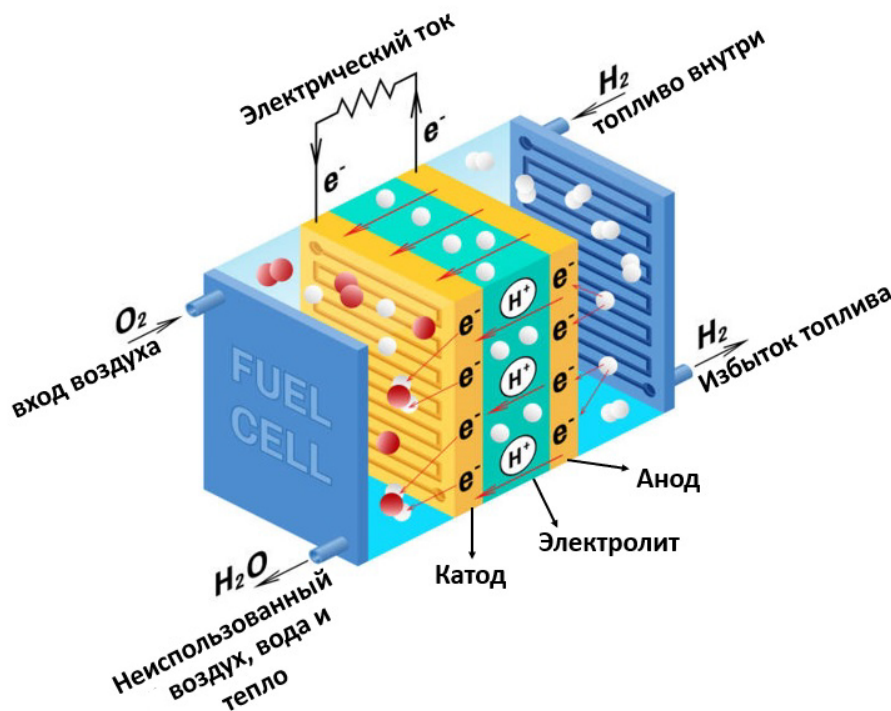
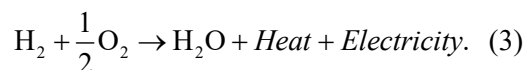


Рис. 4. Принципы работы топливного элемента

Fig. 4. Principles of fuel cell operation

Ультраконденсатор

Ультраконденсаторы, часто известные как УД, представляют собой тип накопителя электроэнергии, который отличается высокой плотностью мощности, быстрым временем зарядки, большим числом циклов и увеличенным сроком службы. Его основное использование – в приложениях, требующих быстрого накопления энергии, а именно в тех, которые нуждаются в быстрой динамической зарядке и больших

операциях разрядки. На рис. 5 показана модель ультраконденсатора.

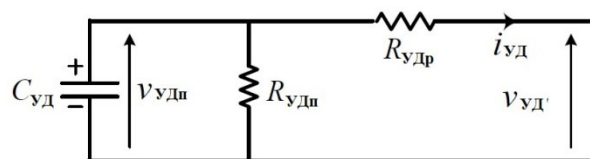


Рис. 5. Эквивалентная схема Ультра-конденсаторов

Fig. 5. Equivalent circuit of ultra-capacitors

Эта модель использует показания $i_{уд}$ в качестве входных данных и не позволяет ультраконденсаторам работать за пределами допустимого диапазона. То есть он поддерживает работу в безопасной зоне, которая находится между верхним и нижним пределами напряжения. Напряжение цепи рассчитывается по следующему уравнению:

$$V_{уд} = \frac{QT}{CT} - R_{уд}i_{уд}, \quad (5)$$

где CT обозначает сумму емкостей (F); QT представляет собой общее количество заряженной электроэнергии; $R_{уд}$ обозначает собственное сопротивление (Ом); $i_{уд}$ – ток УД (A) [26].

Результаты и обсуждение

В результате выполнения работы были получены результаты и произведена оценка производительности выходной мощности источника (по току и напряжению), мощности нагрузки, параметров ультраконденсатора, проведен анализ результатов.

Моделирование было выполнено в интервале 2 секунды из-за вычислительного ограничения и рассчитано в программе MATLAB/Simulink. Полученные результаты приведены на рисунках.

Для расчета производительности предлагаемой гибридной фотоэлектрической системы с топливными элементами и ультраконденсаторами (PV-ТЭ-УД) были проведены исследования в программе MATLAB. Температурный режим соответствовал $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при переменном из-

лучении. При данном режиме работы мощность нагрузки составляла 10 кВт, что позволяет реализовать модульность предлагаемой модели, также были учтены параметры, связанные с изменением инсоляции и нагрузки. Фотоэлектрическая система вырабатывает 6 кВт для 21 панели мощностью по 295 Вт каждая; ток, генерируемый массивом фотоэлектрических модулей, является прямой функцией освещенности, выходная мощность массива фотоэлектрических модулей уменьшается с уменьшением освещенности. Данные об освещенности собираются от восхода до заката в интервале солнечного дня. На рис. 6 показана потребляемая нагрузка, а соответствующее изменение выходной мощности фотоэлектрической системы показано на рис. 7.

Резкие изменения нагрузки учитываются в моменты времени 0,2 и 1,3 с, чтобы продемонстрировать влияние ультраконденсатора. Выходная мощность системы топливных элементов и изменения мощности нагрузки показаны на рис. 8. Она зависит от потребности системы в нагрузке, однако, когда производство солнечной энергии достаточно для удовлетворения спроса, ее выходная мощность равна нулю. Колебания мощности нагрузки и мощности суперкомпьютера показаны на рис. 9. Блок ультраконденсаторов реагирует на переходные процессы, как только происходит внезапное изменение нагрузки. Выходная мощность ультраконденсатора отрицательна в диапазоне от 0,5 до 1,2 секунды. Генерация фотоэлектрической системы превышает спрос в данный момент, заряжая блок ультраконденсаторов.

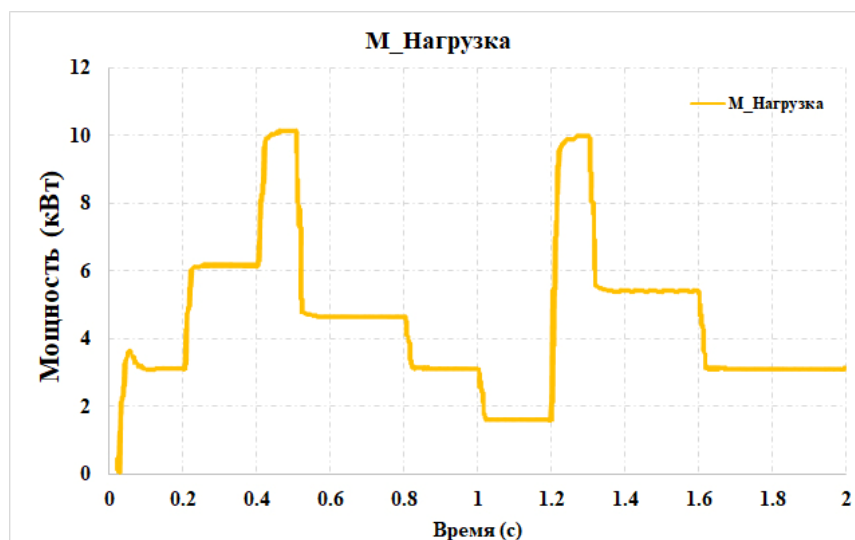


Рис. 6. Потребляемая нагрузка, связанная с системой

Fig. 6. The consumed load associated with the system

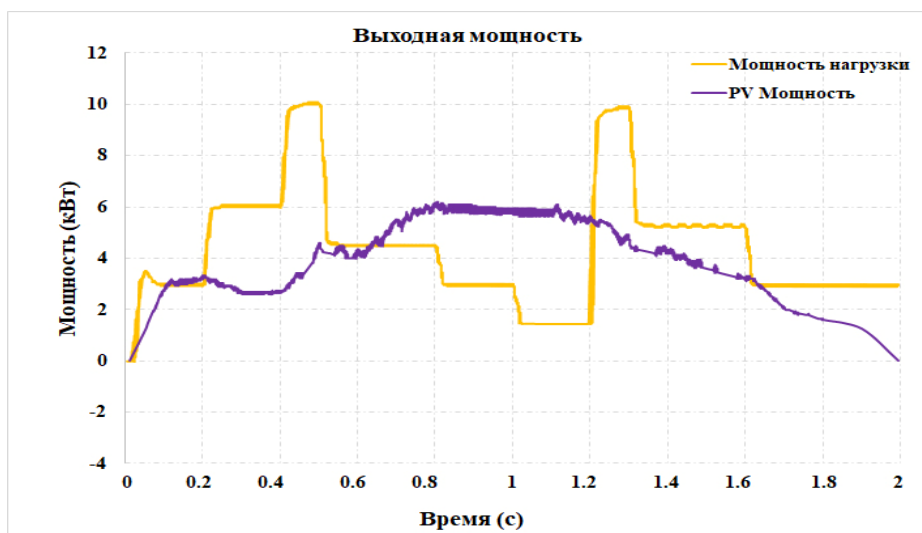


Рис. 7. Доля мощностей фотоэлектрических элементов в операционной системе

Fig. 7. Contribution of PV cell powers to the operating system

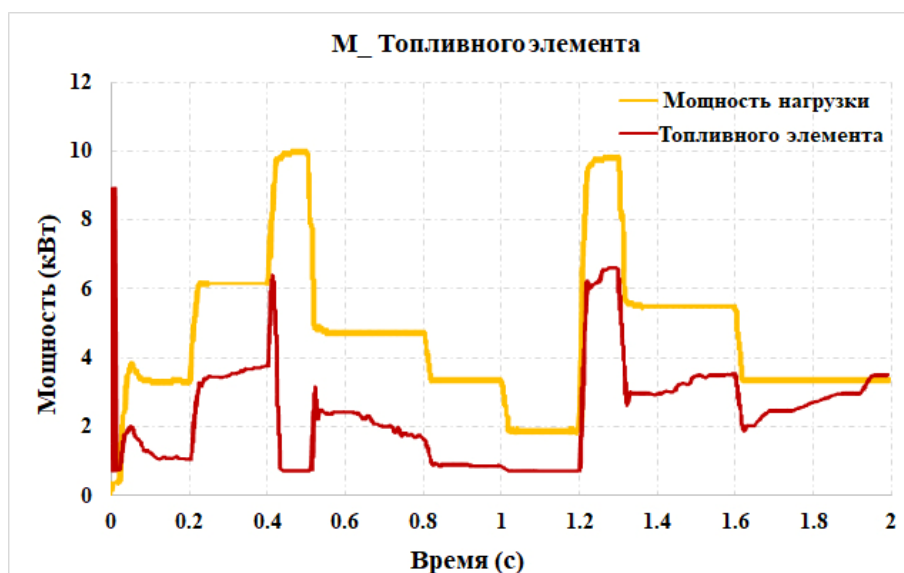


Рис. 8. Доля мощностей топливных элементов в операционной системе

Fig. 8. Contribution of fuel cell powers to the operating system

Рис. 10 иллюстрирует генерируемую мощность и мощность нагрузки. Можно заметить, что общая генерация удовлетворяет требованиям нагрузки гибридной системы. Определено, что изменения напряжения находятся в

допустимых пределах даже во время переходных процессов нагрузки. Вклад всех компонентов питания источника при различных нагрузках и условиях окружающей среды показан на рис. 11.

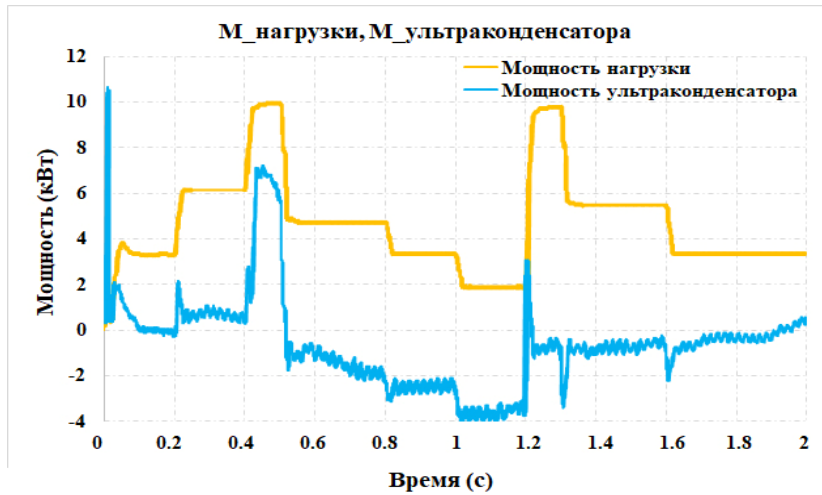


Рис. 9. Доля мощности ультраконденсатора в операционной системе

Fig. 9. Contribution of ultracapacitor powers to the operating system

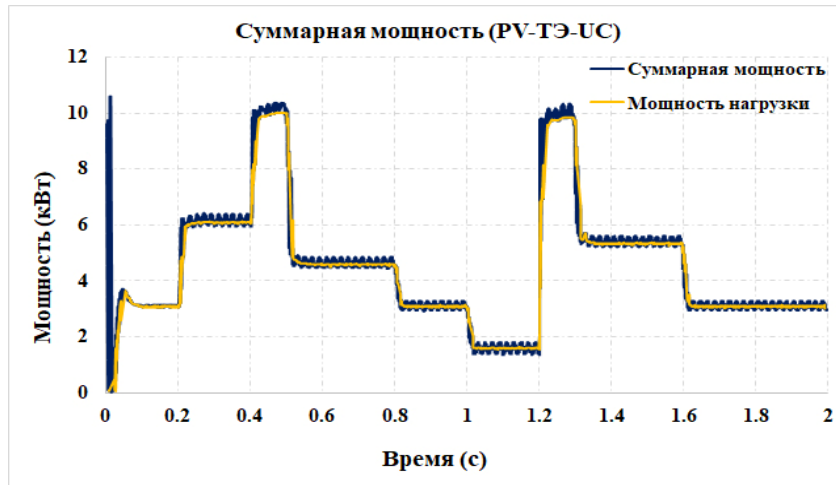


Рис. 10. Мощность, вырабатываемая для всех компонентов системы, и связанная с ней потребляемая нагрузка

Fig. 10. The power generated for all components of the system and the consumed load associated

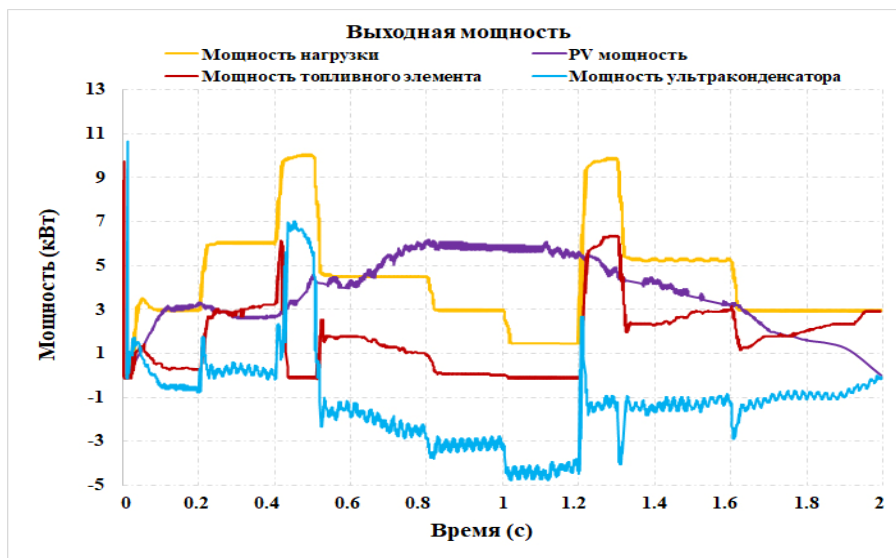


Рис. 11. Доля мощностей источника при различной нагрузке и условиях эксплуатации

Fig. 11. Contribution of source powers at various load and environmental conditions for operation

Заключение

В ходе выполнения работы было показано, что топливный элемент, интегрированный в автономную фотоэлектрическую систему (особенно на шине источника), как смоделировано в этом исследовании, способствовал увеличению возмущений с точки зрения напряжения, тока и мощности для гибридной системы накопления энергии, которая состоит из ультраконденсатора в качестве основного накопителя. Не влияя на выработку электроэнергии, воздействие на фотоэлектрическую систему и нагрузку является оптимальным. Во избежание негативного дополнительного эффекта рекомендуется выбирать в качестве вспомогательного накопителя либо ультраконденсатор, либо топливный элемент. Кроме того, основной целью этого исследования является обеспечение стабильного напряжения на шине постоянного тока путем создания эффективной системы микросети постоянного тока, питаемой от топливного элемента (ТЭ) и солнечной панели (PV), а также резервного накопителя с ультраконденсатором. Параллельное использование PV и ТЭ обеспечивает устойчивое питание нагрузки. Исследования были сосредоточены в основном на стабилизации напряжения на шине постоянного тока. При этом было проведено исследование системы управления энергопотреблением с учетом использования ТЭ, солнечной панели и ультраконденсатора и характеристик этих источников, таких как мощность, плотность энергии и динамика работы. Стратегия нелинейной дифференциальной неравномерности для микросети постоянного тока на основе возобновляемого источника с топливным элементом обеспечивает хорошую стабилизацию звеньев цепи постоянного тока. Ультраконденсатор может увеличить нагрузку относительно характеристик основных источников, обеспечивая более сильную реакцию мощности на нагрузку. Во время основных этапов работы на нагрузку ультраконденсатор обеспечивает энергетический баланс, необходимый при перераспределении нагрузки, кроме того, распределенные энергосистемы улучшают качество и эффективность передачи электроэнергии.

Надеемся, что представленные результаты будут способствовать проведению дальнейших исследований в области использования возобновляемых источников и систем накопления энергии.

Библиографические ссылки

1. Bhukya L., Annamraju A., & Nandiraju S. A novel maximum power point tracking technique based

on Rao 1 algorithm for solar PV system under partial shading conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31 (9), e13028.

2. Rahman M. W., Bathina C., Karthikeyan V., & Prasanth R. Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and perturb & observe (P&O) MPPT algorithm for photovoltaic applications. In 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO), 2016, pp. 1-6. IEEE.

3. Mehrjerdi H., Iqbal A., Rakhshani E., & Torres J. R. Daily-seasonal operation in net-zero energy building powered by hybrid renewable energies and hydrogen storage systems. *Energy conversion and management*, 2019, 201, 112156.

4. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак / Л. М. Абдали, М. Н. Аль-Малики, К. А. Али, Б. А. Якимович, Н. В. Коровкин, В. В. Кувшинов, С. И. Соломенникова // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. 2022. Т. 25, № 3. С. 82–91. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91.

5. Shaw R. N., Wald, P., & Ghosh A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In 2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON), 2020, pp. 1-4.

6. Abd Ali L. M., Al-Rufae F. M., Kuvshinov V. V. et al. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

7. Darwesh M. R., & Ghoname M. S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657-1671.

8. Оптимизация системы автоматического управления точкой максимальной мощности для ветро-солнечной генерирующей установки с накопителями энергии / Л. М. Абдали, Б. А. Якимович, В. В. Сяктерева, В. В. Кувшинов, Н. В. Морозова // *Труды МАИ*. 2023. № 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-24.

9. Kenji, T., Youichi, Y., & Kawaguchi, H. Maximum power control for a photovoltaic power generation system by adaptive hill-climbing method. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, 2021, 121(6), pp. 689-694.

10. Alik R., & Jusoh A. Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation. *Solar Energy*, 2017, 148, pp. 128-139.

11. Eltamaly A. M. An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions. *Energies*, 2021, 14 (4), 953.

12. Bhukya M. N., & Kota V. R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22 (3), pp. 869-884.

13. Kota V. R., & Bhukya M. N. A novel global MPP tracking scheme based on shading pattern identification

using artificial neural networks for photovoltaic power generation during partial shaded condition. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13 (10), pp. 1647-1659.

14. Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / Л. М. Абдали, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В. В. Кувшинов, Э. А. Бекиров // *Строительство и техногенная безопасность*. 2022. № 25 (77). С. 75–85.

15. Windarko, NovieAyub, EviNafiatusSholikhah, Muhammad Nizar Habibi, Eka Prasetyono, Bambang Sumantri, Moh Zaenal Efendi, and HazlieMokhlis. Hybrid photovoltaic maximum power point tracking of Seagull optimizer and modified perturb and observe for complex partial shading. In *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2022, 12, no. 5, pp. 4571-4581.

16. Dileep G., & Singh S. N. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking algorithm for PV system operating under partial shading conditions. *Solar Energy*, 2017, 158, pp. 1006-1015.

17. Анализ различных методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных фотоэлектрических систем / Л. М. А. Абдали, Х. А. И. Исса, М. Н. К. Аль-Малики, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2022. Т. 20, № 3. – С. 104–113. – DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.

18. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.

19. El-Khozondar H. J., El-Khozondar R. J., Matter K., & Suntio T. A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2016, 3, pp. 1-8.

20. Al-Maliki M. N., and L. Y. Yuferev. Today and tomorrow's renewable energy // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021*, pp. 12-19.

21. Gheisarnejad, Meysam, Hamed Farsizadeh, and Mohammad Hassan Khooban. A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC–DC power buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, no. 8 (2020): 6849-6858.

22. Gorji S. A., Mostaan A., Tran My H., & Ekte-sabi M. Non isolated buck–boost dc–dc converter with quadratic voltage gain ratio. *IET Power Electronics*, 2019, 12 (6), pp. 1425-1433.

23. Sundareswaran K., Sankar P., Nayak P. S. R., Simon S. P., & Palani S. Enhanced energy output from a PV system under partial shaded conditions through artificial bee colony. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2014, 6 (1), pp. 198-209.

24. Layth M. Abd Ali L. M., Ali Q. A., Kláčková I., Issa H. A., Yakimovich B. A. and Kuvshinov V. (2021) Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 26 (4), 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.

25. Mitrofanov S. V., Nemaltsev A. U., & Baykassenov D. K. Primary testing of automated dual-axis solar tracker in the climatic conditions of the Orenburg region as the prospects for the establishment of a hardware-software complex. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2018, (7-9), pp. 43-54.

26. El Mentaly, Lahcen, Abdellah Amghar, and Hassan Sahah. Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter. In *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.

References

1. Bhukya, L., Annamraju, A., & Nandiraju, S. A novel maximum power point tracking technique based on Rao 1 algorithm for solar PV system under partial shading conditions. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2021, 31 (9), e13028.

2. Rahman M.W., Bathina C., Karthikeyan V., & Prasanth R. (2016, January). Comparative analysis of developed incremental conductance (IC) and perturb & observe (P&O) MPPT algorithm for photovoltaic applications. In *2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)* (pp. 1-6). IEEE.

3. Mehrjerdi H., Iqbal A., Rakhshani E., & Torres J. R. Daily-seasonal operation in net-zero energy building powered by hybrid renewable energies and hydrogen storage systems. *Energy conversion and management*, 2019, 201, 112156.

4. Abdali L.M., Al-Maliki M.N., Ali K.A., Yakimovich B.A., Korovkin N.V., Kuvshinov V.V., Solomennikova S.I. [Use of hybrid wind-solar systems to power the city of Al-Najaf in the Republic of Iraq]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 3, pp. 82-91 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-3-82-91.

5. Shaw R.N., Walde P., & Ghosh A. IOT based MPPT for performance improvement of solar PV arrays operating under partial shade dispersion. In *2020 IEEE 9th Power India International Conference (PIICON)*, 2020, pp. 1-4.

6. Abd Ali L.M., Al-Rufae F.M., Kuvshinov V.V. et al. Study of Hybrid Wind-Solar Systems for the Iraq Energy Complex. *Appl. Sol. Energy*, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284-290. <https://doi.org/10.3103/S0003701X20040027>.

7. Darwesh M.R., & Ghoname M.S. Experimental studies on the contribution of solar energy as a source for heating biogas digestion units. *Energy Reports*, 2021, 7, pp. 1657-1671.

8. AbdAli L.M., Yakimovich B.A., Syaktereva V. V., Kuvshinov V.V., Morozova N.V. [Optimization of the automatic control system for the maximum power point for a wind-solar generating plant with energy storage]. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-24 (in Russ.).

9. Kenji T., Youichi Y., & Kawaguchi H. Maximum power control for a photovoltaic power generation system by adaptive hill-climbing method. *IEEJ Transactions on Industry Applications*, 2021, 121 (6), pp. 689-694.

10. Alik R., & Jusoh A. Modified Perturb and Observe (P&O) with checking algorithm under various solar irradiation. *Solar Energy*, 2017, 148, pp. 128-139.
11. Eltamaly A.M. An improved cuckoo search algorithm for maximum power point tracking of photovoltaic systems under partial shading conditions. *Energies*, 2021, 14 (4), 953.
12. Bhukya M.N., & Kota V.R. A quick and effective MPPT scheme for solar power generation during dynamic weather and partial shaded conditions. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019, 22(3), pp. 869-884.
13. Kota V.R., & Bhukya M.N. A novel global MPP tracking scheme based on shading pattern identification using artificial neural networks for photovoltaic power generation during partial shaded condition. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(10), pp. 1647-1659.
14. Abdali L.M., Issa H.A., Al-Maliki M.N., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. [Design and study of operating modes of combined solar-wind installations to provide street lighting]. *Construction and industrial safety*, 2022. No. 25. Pp. 75-85 (in Russ.).
15. Windarko, Novie Ayub, Evi Nafiatu Sholikhah, Muhammad Nizar Habibi, Eka Prasetyono, Bambang Sumantri, Moh Zaenal Efendi, and Hazlie Mokhlis. Hybrid photovoltaic maximum power point tracking of Seagull optimizer and modified perturb and observe for complex partial shading. *International Journal of Electrical and Computer Engineering* 2022, 12, no. 5, pp. 4571-4581.
16. Dileep G., & Singh S.N. An improved particle swarm optimization based maximum power point tracking algorithm for PV system operating under partial shading conditions. *Solar Energy*, 2017, 158, pp. 1006-1015.
17. Abdali L.M., Issa H. A., Al-Maliki M.N., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 104-113 (in Russ.). Doi: 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.
18. Khatib, Tamer, and Wilfried Elmenreich. Modeling of photovoltaic systems using Matlab: Simplified green codes. John Wiley & Sons, 2016.
19. El-Khozondar H.J., El-Khozondar R.J., Matter K., & Suntio T. A review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2016, 3, pp. 1-8.
20. Al-Maliki M.N., and L.Y. Yuferev. Today and tomorrow's renewable energy. In *Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost'-2021*, pp. 12-19.
21. Gheisarnejad, Meysam, Hamed Farsizadeh, and Mohammad Hassan Khooban. A novel nonlinear deep reinforcement learning controller for DC-DC power buck converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 68, no. 8 (2020): 6849-6858.
22. Gorji S.A., Mostaan A., Tran My H., & Ektesabi M. Non isolated buck-boost dc-dc converter with quadratic voltage gain ratio. *IET Power Electronics*, 2019, 12 (6), pp. 1425-1433.
23. Sundareswaran K., Sankar P., Nayak P.S.R., Simon S.P., & Palani S. Enhanced energy output from a PV system under partial shaded conditions through artificial bee colony. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2014, 6 (1), pp. 198-209.
24. Layth M. Abd Ali, L.M., Ali Q.A., Kláčková I., Issa H.A., Yakimovich B.A. and Kuvshinov V. Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment. *Acta Montanistica Slovaca*, 2021, Vol. 26 (4), 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.
25. Mitrofanov S.V., Nemaltsev A.U., & Baykasev D.K. Primary testing of automated dual-axis solar tracker in the climatic conditions of the Orenburg region as the prospects for the establishment of a hardware-software complex. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2018, (7-9), pp. 43-54.
26. El Mentaly, Lahcen, Abdellah Amghar, and Hassan Sahah. Comparison between HC, FOCV and TG MPPT algorithms for PV solar systems using buck converter. In *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, pp. 1-5. IEEE, 2017.

* * *

Modeling and Management of Hybrid System Photovoltaic-FC-Ultracapacitors Power Systems

H. A. Issa, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

L. M. Abdali, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

M. N. Al-Maliki, Post-graduate, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

B. A. Yakimovich, DSc. in Engineering, Professor, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

V. V. Kuvshinov, PhD in Engineering, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

This study shows an improved DC microgrid power management technique. The value of utilizing renewable energy has long been debatable, and this article suggests a typical DC microgrid because of the advantages it has over AC technology. A solar cell (PV), fuel cell (FC) and storage component— an ultracapacitor (UC)—make up the standard microgrid. The most important goal of the paper is to optimize the management strategy for the bus voltage with arranged power-sharing between these types of renewable energy that are used here.

For variable solar irradiance and various loading conditions, the proposed management seeks to deliver high-quality energy to the load while taking into consideration the FC state. The ultracapacitor was prepared to furnish the transient period due to the FC's slow dynamics. To maintain the DC bus voltage steady in the face of load variations, a management algorithm is put into practice. To generate the references, the management controller relies on a differential flatness method. The electricity from the ultracapacitor controls the DC bus. Earlier studies showed that the circuit of the fuel cell was integrated with a standalone photovoltaic system and discovered that the fuel cell doesn't have the same properties. In the current research, observations were made on power quality elements like voltage, current, and power for energy storage systems. With several self-definition elements of the photovoltaic, fuel cell, and ultracapacitor, along with their parameters, simulation is used as the study method medium. The outcome demonstrates that since the ultracapacitor serves as the primary storage, the fuel cell integration has little impact on it, and only small changes in voltage and current were observed. Due to the fuel cell integration characteristic of providing the system a major perturbation, most perturbation from the system had been absorbed while in an ultracapacitor.

Keywords: renewable energy, solar energy, energy management systems, fuel cell, ultracapacitor, storage system.

Получено: 19.05.23

Образец цитирования

Моделирование и управление гибридными системами электроснабжения фотоэлектрических топливных элементов-ультраконденсаторов / Х. А. Исса, Л. М. Абдали, М. Н. Аль-Малики, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 3. С. 82–94. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-82-94.

For Citation

Issa H.A., Abdali L.M., Al-Maliki M.N., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Modeling and management of hybrid system Photovoltaic-FC-Ultracapacitors Power Systems]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 82-94. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-3-82-94.