

УДК 621.314.1:621.311.243(045)

DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-125-137

Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода

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

А. Г. Аль Баирмани, 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. Сяктерева, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Кувшинов, кандидат технических наук, Институт ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета, Севастополь, Россия

Солнечная энергия является одним из наиболее перспективных источников энергии, способных удовлетворить постоянно растущий спрос на электроэнергию в мире. Но из-за низкой эффективности солнечных фотоэлектрических (PV) элементов и зависимости их производительности от условий окружающей среды необходимо отслеживать точку максимальной мощности (ТММ) фотоэлектрической системы. Следовательно, различные методы отслеживания точки максимальной мощности реализуются с фотоэлектрическими системами. Но одной из основных проблем, связанных с методами отслеживания точки максимальной мощности, является проектирование преобразователя постоянного тока.

В этой статье проводится сравнение двух различных преобразователей постоянного тока для преобразования солнечной энергии. Два преобразователя – это понижающий преобразователь и повышающе-понижающий преобразователь. Алгоритм отслеживания точки максимальной мощности (MPPT) предназначен для расчета напряжения батареи, тока массива фотоэлектрических элементов (PV), напряжения массива PV, мощности массива PV и выходной мощности. В ходе работы было установлено, что повышающе-понижающий преобразователь является более эффективным преобразователем солнечной энергии. Схемы для обоих преобразователей моделировались в программной среде в MATLAB/Simulink R2021a. При помощи предложенных методов управления происходит значительное повышение генерации электрической энергии фотоэлектрическими панелями. В представленной работе исследуется информационно-управляющая система солнечной электростанции малой мощности. Большое количество преобразованной электрической энергии не может быть использовано потребителем из-за различных потерь в фотоэлектрической системе. Для повышения эффективности использования выработанной электроэнергии был разработан перспективный алгоритм, отвечающий за работу блока управления станцией. В результате было значительно повышено качество работы солнечной установки и увеличена выработка энергии для электроснабжения потребителя. Результаты моделирования дадут будущим исследователям четкую концепцию прогнозирования поведения упомянутых преобразователей и разработки наиболее эффективного преобразователя соответственно для солнечного ТММ.

Ключевые слова: фотоэлектрическая ячейка, отслеживание точки максимальной мощности (ТММ), управление коэффициентом заполнения, понижающий преобразователь, понижающе-повышающий преобразователь, MATLAB/Simulink, алгоритм ТММ.

Введение

Негативное влияние промышленных выбросов предприятий стало серьезной проблемой современного общества из-за неблагоприятного воздействия на экологию. В такой ситуации для производства энергии можно использовать нетрадиционные источники энергии, поскольку они не наносят ущерба окружающей среде [1].

Распространенными нетрадиционными источниками энергии являются солнечные фотоэлектрические (PV) панели, ветряные турбины и геотермальные электростанции [2]. Поскольку солнечная энергия свободно и в изобилии доступна в природе и не наносит вреда климату, она используется для повседневных потребностей в энергии в домах, для ирригации и т. д.

Помимо вышеперечисленных преимуществ, она также имеет недостатки, такие как низкая конверсия [3], низкая эффективность и большие затраты на установку. Поскольку в фотоэлектрических панелях используется постоянный ток для систем преобразования, также требуются батареи для хранения энергии; эти факторы увеличивают стоимость установки [4–6]. Эффективность преобразования системы также можно повысить, используя такие методы, как ТММ, которые максимизируют извлечение мощности в любых условиях путем выбора наилучшей или подходящей нагрузки [7].

В период периодических колебаний солнечной инсоляции, температуры и подключенной нагрузки алгоритм управления МРРТ управляет коэффициентом заполнения интерфейса силовой электроники, т. е. преобразователем постоянного тока, подключенным между фотоэлектрической панелью и нагрузкой, так что рабочая точка преобразователя и точка максимальной мощности фотоэлектрической панели совпадают при работе панели на нагрузку. Внимание большинства исследователей сосредоточено на расширении и реализации алгоритмов отслеживания, относящихся к функциональности ТММ [8]. Тем не менее индивидуальные характеристики преобразователей постоянного тока, взаимодействующих с силовой электроникой, в отношении изменения коэффициента заполнения при реализации МРРТ еще предстоит тщательно изучить. Изменение коэффициента заполнения оказывает последующее различное влияние на рабочие параметры преобразователя постоянного тока, что может привести к нарушению конструктивных ограничений топологии преобразователя [9–11], как приращение содержания пульсаций в токе индуктора и в выходном напряжении.

Чтобы создать надежную фотоэлектрическую систему с соответствующей топологией преобразователя, которая может отслеживать функциональность ТММ, необходимо провести оценку работы преобразователей постоянного тока, используемых для этой операции. В представленной исследовательской работе проводится анализ производительности фотоэлектрической системы, в которой используется алгоритм ТММ, настроенный для работы в схемах с прерывистой солнечной инсоляцией и температурой, с использованием двух популярных топологий преобразователей постоянного тока. Каждая топология преобразователя была проанализирована на предмет ее эффективности отслеживания для определенного набора рези-

стивных нагрузок, была представлена относительная оценка поведения представленных преобразователей (Лю и др.) [12–14]. Исследования показывают, что метод НС может широко использоваться в установках PV из-за меньшего количества контролируемых параметров, необходимых в алгоритме отслеживания, и его упрощенной архитектуры. Чтобы сделать операцию нечеткой, а выполнение ясным, алгоритм отслеживания для представленного исследования выбран в качестве алгоритма управления прямым коэффициентом заполнения НС [15].

Целью этой работы является сравнение и оценка эффективности работы преобразователей и методов управления фотоэлектрической системой, выбор оптимального метода управления точкой максимальной мощности (ТММ) для представленной электрической схемы.

Анализ проекта

Фотоэлектрический модуль

Эквивалентная схема фотоэлектрической (ФЭ) ячейки представлена на рис. 1. Фотонный ток реализуется включением источника тока I_{ph} . Собственные шунтирующие и последовательные сопротивления представлены R_{sh} и R_s соответственно, причем R_{sh} в целом очень велико и может быть проигнорировано при расчетах. Каждый фотогальванический блок, собранный вместе в группу параллельных и последовательных ячеек, образует массив фотоэлектрической панели. Схема фотоэлектрической панели Delta BST 260-24 P была математически смоделирована в уравнениях от (1) до (4) [16].

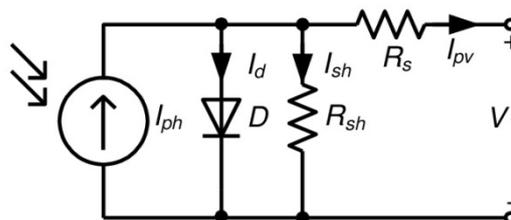


Рис. 1. Схематическое изображение фотоэлектрической ячейки

Fig. 1. Schematic representation of a photovoltaic cell

Фотонный ток фотоэлектрической панели I_{ph} :

$$I_{ph} = [I_{scr} + K_i (T - 298)] \cdot \frac{\lambda}{1000}. \quad (1)$$

Обратный ток насыщения модуля I_{rs} :

$$I_{rs} = \frac{I_{scr}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{oc}}{N_s KAT}\right) - 1 \right]}. \quad (2)$$

Ток насыщения фотоэлектрической панели, т. е. I_o , изменяется при изменении температуры ячейки и моделируется следующим образом:

$$I_o = I_{rs} \left[\frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left(\frac{qE_{go}}{AK} \right) \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right]. \quad (3)$$

Выходной ток фотогальванической панели определяется выражением

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_o \times \left[\exp \left\{ \frac{q^* (V_{pv} + I_{pv} R_s)}{N_s AKT} \right\} - 1 \right], \quad (4)$$

где I_{scr} – ток короткого замыкания фотогальванического элемента при солнечной инсоляции 1 кВт/м^2 и температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$; K_i – температурный коэффициент тока короткого замыкания при I_{scr} ($0,0017 \text{ А/}^\circ\text{C}$); T – выраженная в Кельвинах (К) рабочая температура солнечной панели, λ выражается в (кВт/м^2), что представляет собой освещенность солнечной панели; I_{rs} – обратный ток насыщения; q – заряд электрона, который в числовом выражении равен ($1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$); V_{oc} – напряжение холостого хода солнечной панели; N_s – количество ячеек, соединенных последовательно; k – константа Больцмана имеет значение $1,3805 \times 10^{-23} \text{ Дж/К}$; A – коэффициент идеальности, равный 1,2; T_r – эталонная температура, измеренная по шкале Кельвина как (298 К); E_{go} – ширина запрещенной зоны для кремния, которая составляет 1,1 эВ; I_{pv} – выходной ток для PV-модуля; V_{pv} – выходное напряжение для PV-модуля, количество ячеек, соединенных параллельно и последовательно, выра-

жается как N_p и N_s со значениями для приведенной выше панели PV, как $N_s = 36$ и $N_p = 1$ [17].

Преобразователи постоянного тока

При управлении функциональной последовательностью переключателей при преобразовании постоянного тока (переключаемый режим) его выходное напряжение может быть изменено или изменено только путем манипулирования функциональной продолжительностью, которая представляет собой время включения (t_{on}) и время выключения (t_{off}) или переключения. Этого можно добиться с помощью широтно-импульсной модуляции (PWM).

Функционал понижающего преобразователя

Понижающий преобразователь действует как понижающий элемент в схеме на рис. 2, поскольку он создает значения выходного напряжения постоянного тока, которые ниже, чем на его входе. Понижающий преобразователь можно рассматривать как трансформатор с изменением коэффициента трансформации за счет изменения рабочего цикла.

Математическая взаимозависимость может быть реализована с учетом критерия равенства подводимой и отдаваемой мощности таким образом, что

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D, \quad (5)$$

где входное напряжение преобразователя (В) обозначается как V_{in} , выходное напряжение преобразователя (В) представлено как V_o , преобразователь входного тока (А) представлен как I_{in} , а выходной ток преобразователя (А) представлен как I_o [18].

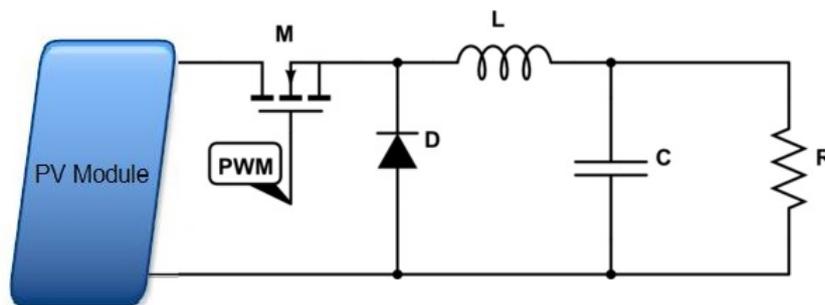


Рис. 2. Принципиальная схема понижающего преобразователя

Fig. 2. The circuit diagram of the buck converter

Функционал повышающе-понижающего преобразователя

Для управления источником постоянного тока понижающий/повышающий преобразователь может быть встроен в качестве силового элек-

тронного интерфейса с фотоэлектрическими панелями, где может потребоваться выход, имеющий отрицательную полярность по отношению к общему входному напряжению терминала, и в соответствии с потребностями приложения

выходное напряжение может быть ниже или выше, чем входное напряжение. Реализация повышающе-понижающего преобразователя осуществляется через каскадную связь понижающего (понижающие) повышающего (повышающие) преобразователя. Коэффициент преобразования, определенный как отношение выходного напряжения к входному для установившегося режима, может быть задан как умножение коэффициентов преобразования двух каскадно-соединенных преобразователей [19]:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{-D}{1-D}. \quad (6)$$

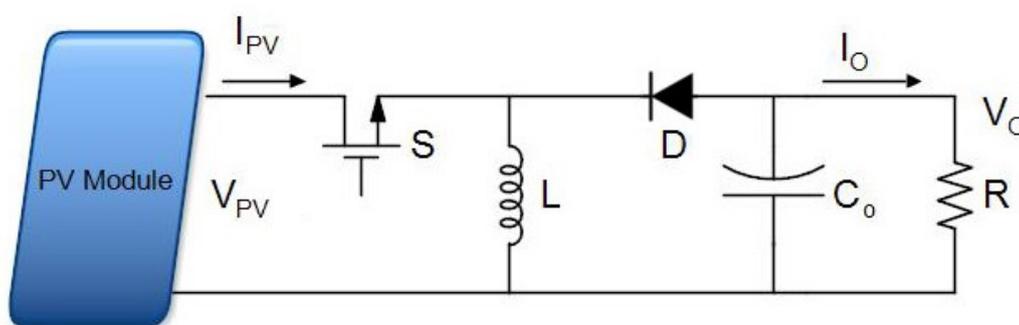


Рис. 3. Принципиальная схема повышающе-понижающего преобразователя

Fig. 3. The circuit diagram of the buck-boost converter

Эксплуатационные характеристики преобразователей

Performance characteristics converters

Параметр	Buck	Buck-boost
Gain in Voltage (A_v)	D	$-D/(1-D)$
Gain in Current (A_i)	$1/D$	$-(1-D)/D$
Impedance Input (R_i)	RL/D^2	$RL(1-D)^2/D^2$

Алгоритм ТММ

Алгоритм возмущения и наблюдения (P&O)

Этот метод включает изменение рабочего напряжения в звене постоянного тока между фотоэлектрическими панелями и преобразователем. Знак предыдущего возмущения и преды-

дущего приращения мощности используется для определения следующего возмущения. На левой стороне ТММ при увеличении напряжения мощность увеличивается, а на правой стороне ТММ при увеличении напряжения мощность уменьшается. Если мощность увеличивается, то напряжение будет увеличиваться в том же направлении, а если мощность уменьшается, то напряжение уменьшается в противоположном направлении. На основе вышеизложенной логики написан алгоритм. Блок-схема алгоритма отслеживания точки максимальной мощности P&O показана на рис. 4 [21–23].

дущего приращения мощности используется для определения следующего возмущения.

На левой стороне ТММ при увеличении напряжения мощность увеличивается, а на правой стороне ТММ при увеличении напряжения мощность уменьшается. Если мощность увеличивается, то напряжение будет увеличиваться в том же направлении, а если мощность уменьшается, то напряжение уменьшается в противоположном направлении. На основе вышеизложенной логики написан алгоритм.

Блок-схема алгоритма отслеживания точки максимальной мощности P&O показана на рис. 4 [21–23].

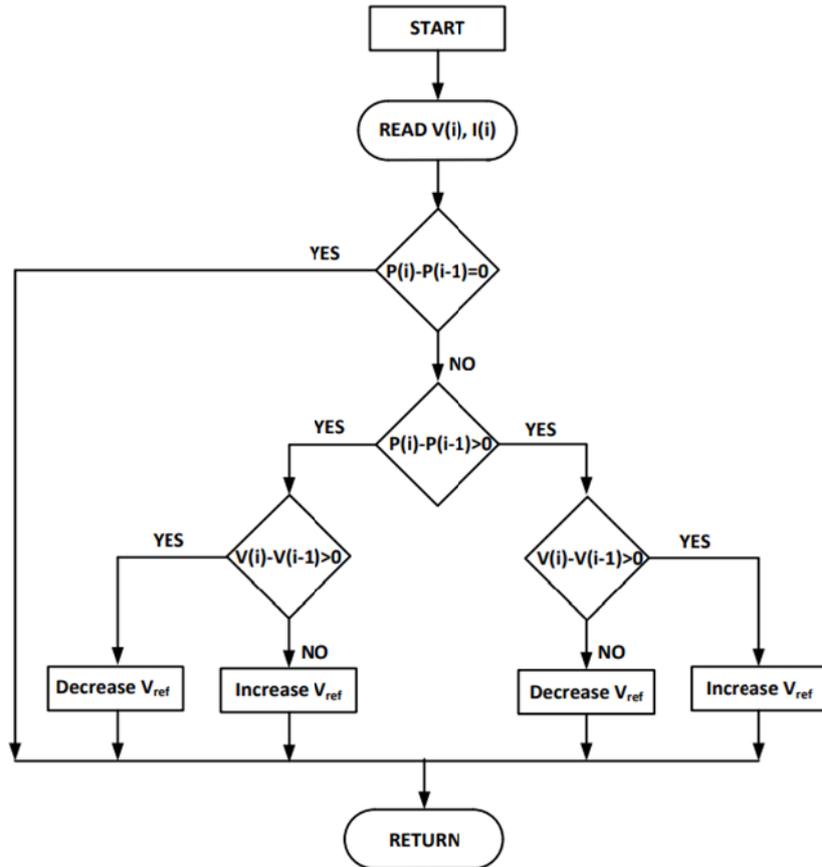


Рис. 4. Блок-схема для отслеживания максимальной мощности P&O

Fig. 4. Block diagram for Tracking Maximum P&O Power

Метод инкрементной проводимости (IC)

Метод добавочной проводимости (IC) считается онлайн-методом или прямым методом, поскольку измерения параметров фотоэлектрических ячеек должны быть получены в режиме реального времени. Более того, наряду с методами P&O или HS является одним из наиболее известных и расширенных алгоритмов ТММ. Этот метод называется алгоритмом инкрементной проводимости (IC), так как для оценки положения рабочей точки по отношению к ТММ используется производная проводимости фотоэлектрической системы, то есть dI_{pv}/dV_{pv} . Он также основан на том факте, что наклон кривой $P_{pv} - V_{pv}$ в ТММ равен нулю, положителен в левой области ТММ и отрицателен в правой, как это дается уравнениями (а), (б) и (в) и как это показано на рис. 5 [24].

$$dP_{pv}/dV_{pv} = 0, \quad \text{в ТММ,} \quad (a)$$

$$dP_{pv}/dV_{pv} > 0, \quad \text{слева в ТММ,} \quad (б)$$

$$dP_{pv}/dV_{pv} < 0, \quad \text{справа на ТММ.} \quad (в)$$

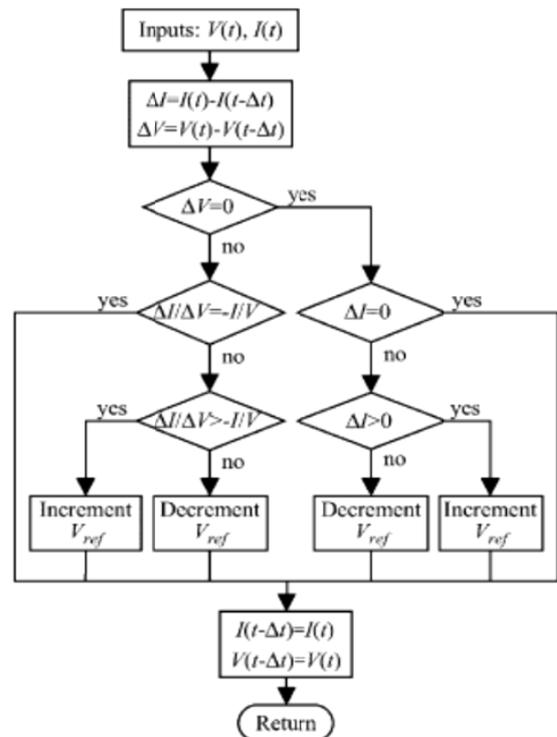


Рис. 5. Блок-схема метода инкрементальной проводимости

Fig. 5. Block diagram of the incremental conduction method

Результаты

Схема понижающего преобразователя была смоделирована в MATLAB/Simulink и пред-

ставлена на рис. 6, а результаты при различном облучении были получены, как показано на рис. 7 и 8 соответственно.

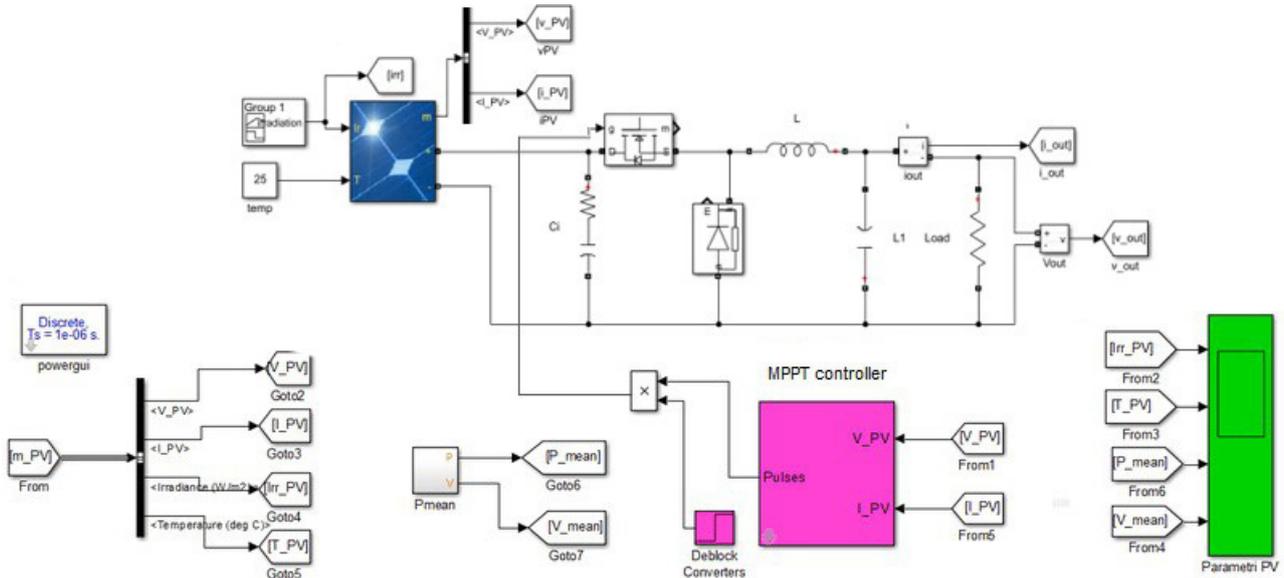


Рис. 6. Понижающий преобразователь постоянного тока Simulink в MATLAB

Fig. 6. Simulink DC Buck Converter in MATLAB

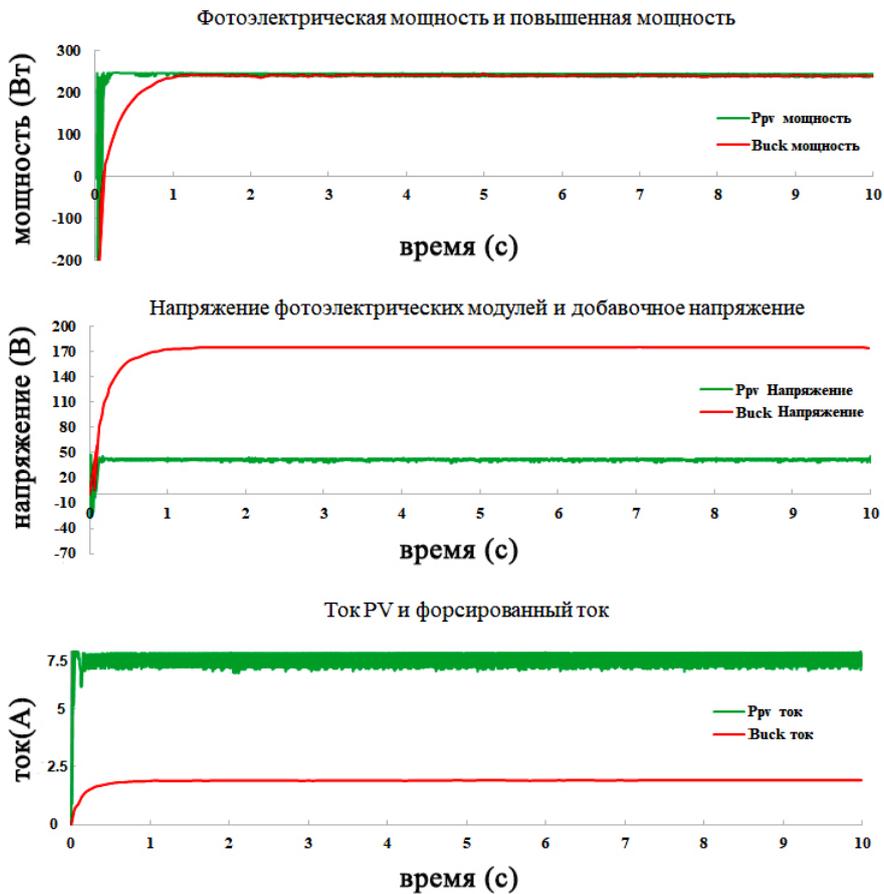


Рис. 7. Сравнение мощности, напряжения и тока преобразователя PV и понижающего преобразователя для стандартных условий

Fig. 7. The comparison between PV and buck converter power, voltage and current for standard condition

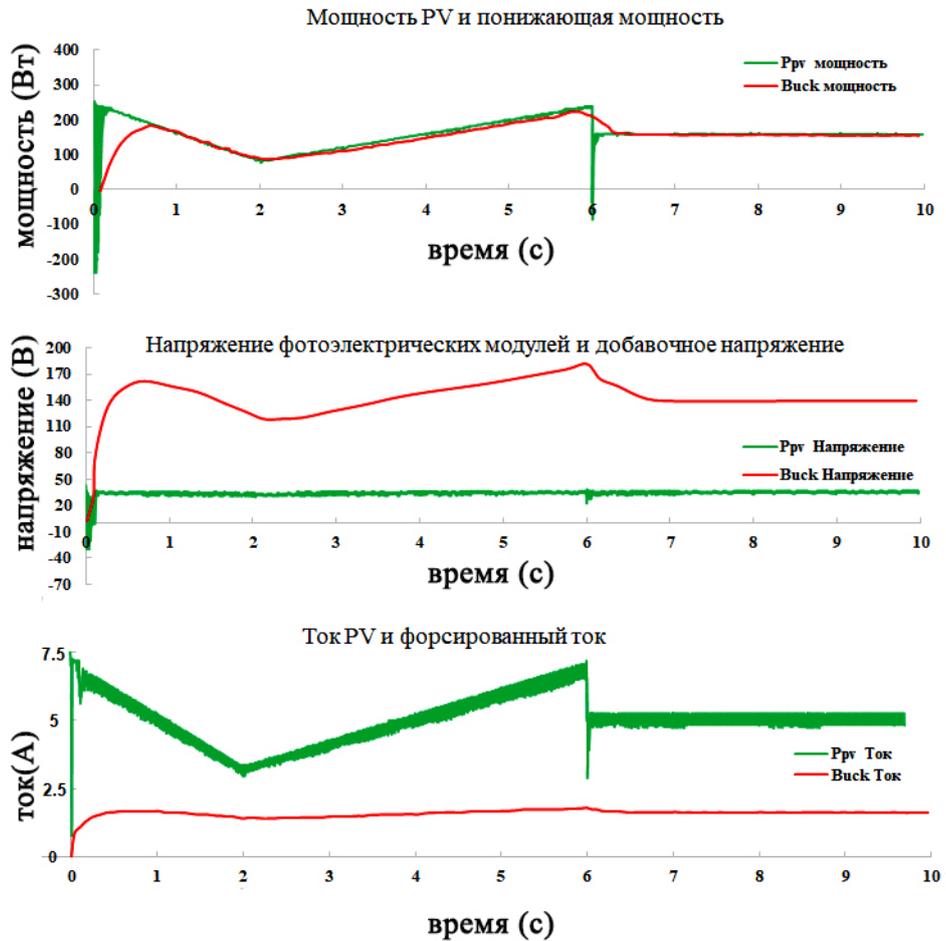


Рис. 8. Сравнение между мощностью, напряжением и током преобразователя PV для переменных условий (различная освещенность)

Fig. 8. The comparison between PV and buck converter power, voltage and current for variable condition (different irradiance)

Кроме того, повышающе-понижающий преобразователь был смоделирован в MATLAB/Simulink

(рис. 9), и результаты при различных облучениях были получены, как показано на рис. 10.

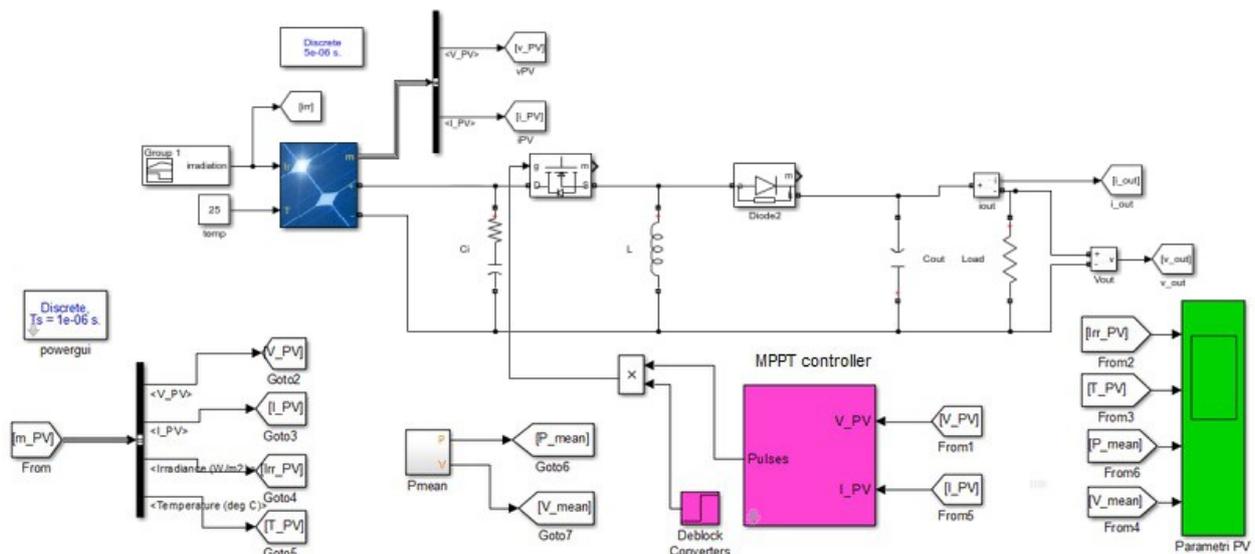


Рис. 9. Преобразователь Simulink DC Buck-boost в MATLAB

Fig. 9. Simulink DC Buck-boost Converter in MATLAB

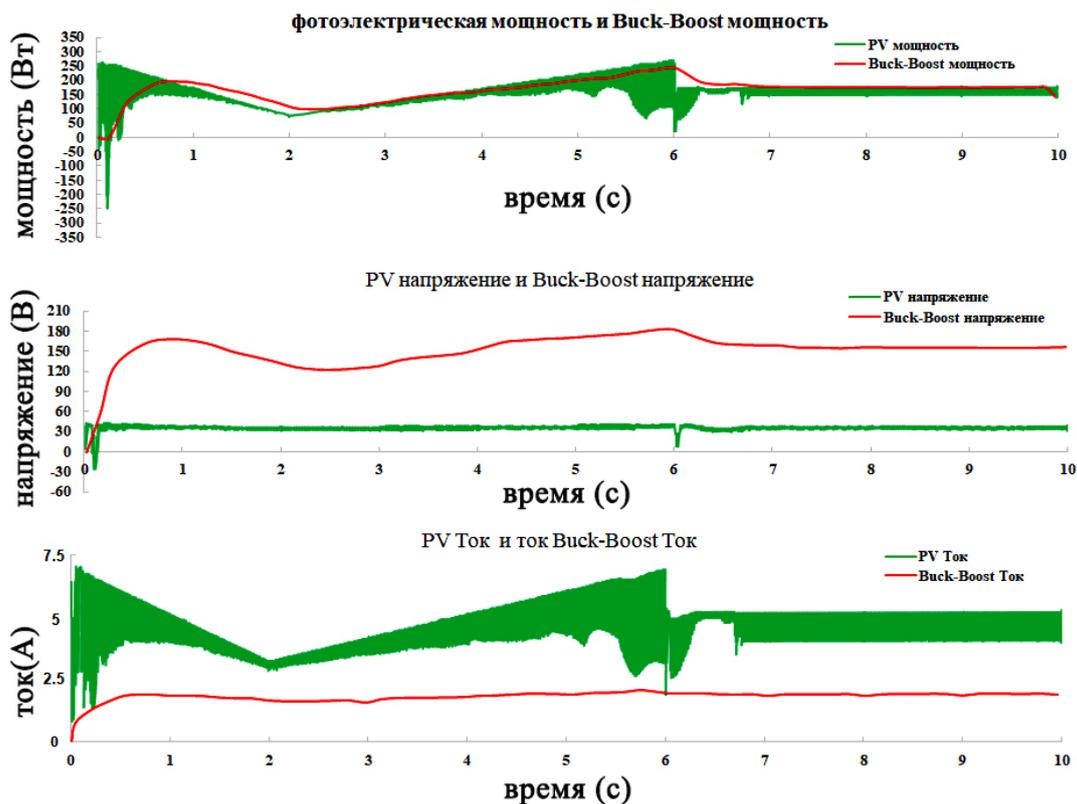


Рис. 10. Сравнение мощности, напряжения и тока преобразователя PV для переменных условий (разная освещенность)

Fig. 10. The comparison between PV and buck-boost converter power, voltage and current for variable condition (different irradiance)

Результаты моделирования напряжения, тока и мощности для входной и выходной стороны понижающего и повышающе-понижающего преобразователя представлены на рис. 11 и 12. Результаты подтверждают, что, если отвлечься от эффективности и рассмотреть колебания напряжения при переменном облучении, можно видеть, что фазовое напряжение, создаваемое понижающим преобразователем, содержит гораздо меньше колебаний, чем фазовое напряжение, создаваемое повышающе-понижающим преобразователем. Таким образом, необходимо установить приоритеты для выбора между любым из этих преобразователей.

Методы ICeP&O, работающие как с понижающим преобразователем, так и с повышающим, могут адекватно регулировать рабочий цикл привода для всех испытанных климатических условий; как показано на рис. 11, 12, V_{PV} всегда колеблется вокруг $V_{ТММ}$. В целом размер колебаний напряжения, генерируемых IC, всегда немного меньше по сравнению с P&O, что объясняет небольшую разницу в средней эффективности в пользу метода IC по сравнению

с P&O. Как и следовало ожидать, ни один из методов не может устранить колебания мощности. Однако эти колебания малы, что гарантирует минимальные потери мощности, обеспечиваемой фотоэлектрической панелью. В случае метода CV наблюдается, что климатические изменения температуры существенно влияют на работу фотоэлектрической системы. Этот метод представляет колебания напряжения в целом того же порядка величины, что и методы IC и P&O. Однако проблема заключается в том, что эти колебания происходят вокруг уровня, который в зависимости от климатических условий может давать значительные отклонения МРТТ, снижая эффективность методики.

На рис. 11 и 12 показана работа системы при использовании методов МРРТ с понижающим преобразователем и повышающе-понижающим преобразователем, в которых наблюдается, что метод IC обеспечивает самую быструю переходную характеристику, но IC имеет более стабильный и более эффективный результат, за ним следует метод P&O и метод IC.

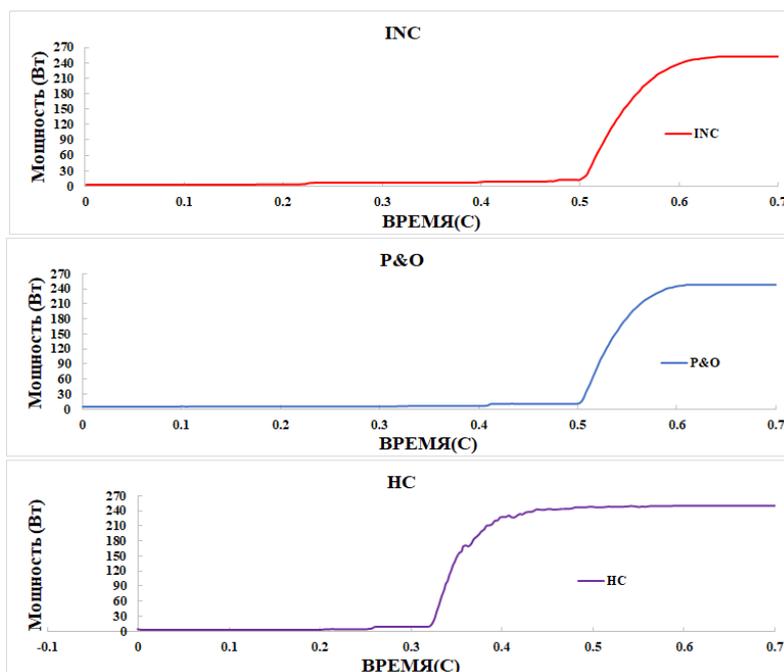


Рис. 11. Понижающий преобразователь, работающий с алгоритмами точки максимальной мощности
 Fig. 11. The Buck converter functioning with the maximum power point algorithms

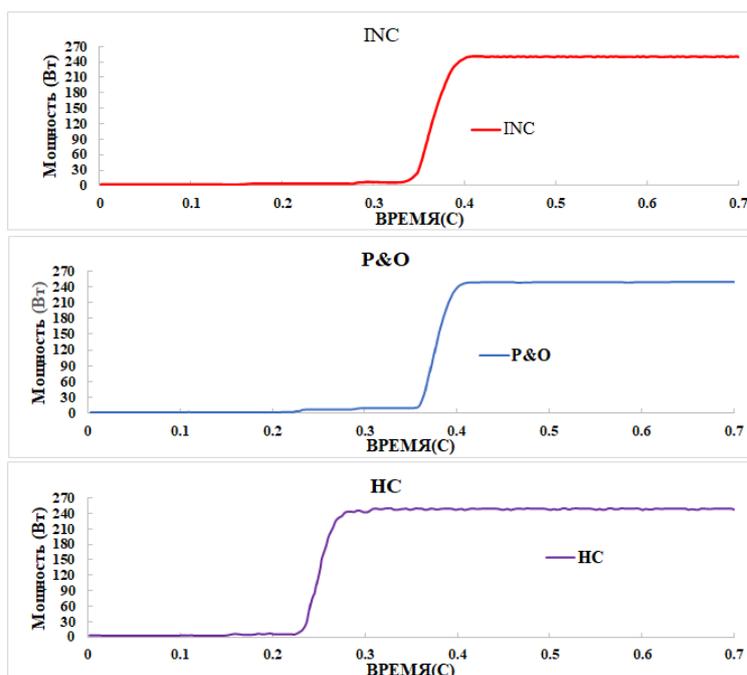


Рис. 12. Преобразователь Buck-Boost, работающий с алгоритмами точки максимальной мощности
 Fig. 12. The Buck-Boost converter functioning with the maximum power point algorithms

Эта установившаяся ошибка связана с самой природой пропорционального управления, используемого в способе регулирования рабочего цикла привода; кроме того, опорное напряжение $V_{ref} = k \cdot V_{oc} = 0,8 \cdot 37,5 \text{ В} = 30 \text{ В}$, используемое системой управления, является лишь приближением к ТМРР, поскольку коэффициент k фотоэлектрической панели не является постоянным,

поскольку он изменяется при изменении излучения и температуры. С другой стороны, в этой работе мы решили отказаться от периодической коррекции V_{ref} , чтобы избежать потери мощности из-за необходимого отключения PV-модуля в момент измерения V_{oc} . Тем не менее это также способствует добавлению ошибки в установившемся режиме при определенных атмосферных

условиях. Таким образом, в этих климатических условиях топология НС, работающая с понижающим преобразователем, достигла эффективности 94,20 %, в то время как эффективность ИС и Р&О составила 95,88 и 95,20 % соответственно, а топология НС работала с повышающим понижающим преобразователем, равным 93,47 %. Эффективность ИС и Р&О составила 95 и 94,60 % соответственно.

Заключение

В этой работе проведено исследование эффективности работы автономной фотоэлектрической системы при использовании двух преобразователей. Все схемы были спроектированы в MATLAB/Simulink, а результаты моделирования были получены при различной освещенности фотоэлектрических панелей. В ходе проведения экспериментов были получены графики работы фотоэлектрической системы и оценена ее эффективность при различных условиях. Сравнительные результаты экспериментов подтверждают, что когда при переменной освещенности панелей происходят колебания напряжения, то фазовое напряжение, создаваемое понижающим преобразователем, содержит гораздо меньше колебаний, чем фазовое напряжение, создаваемое повышающе-понижающим преобразователем.

Также в работе представлено сравнительное исследование производительности трех классических логарифмов ТММ, действующих на две разные топологии преобразователей мощности постоянного тока, используемых в качестве интерфейсов для максимизации преобразования солнечной энергии при переменных условиях работы в типичной маломощной конфигурации, изолированной от сети. Моделирование в Matlab/Simulink показывает, что метод ИС эффективнее, чем метод Р&О во всех случаях. С другой стороны, методы управления ТММ обычно достигают большей эффективности при работе с понижающим преобразователем, чем с повышающе-понижающим преобразователем, поэтому комбинация ИС/Buck имеет лучшую производительность. Наихудшая производительность имеет система НС, а комбинация НС/Buck-Boost имеет самую низкую эффективность.

Использованные высокоэффективные методы управления фотоэлектрическими системами позволяют значительно поднять конечную выработку электрической энергии и позволяют обеспечить надежную работу солнечных батарей для обеспечения автономных потребителей.

Библиографические ссылки

1. Javed K.; Ashfaq H.; Singh R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.
2. Pathak P. K., Padmanaban S., Yadav A. K., Alvi P. A., & Khan B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(4), pp. 776-791.
3. Mehrjerdi H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192.
4. 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.
5. 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>.
6. 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.
7. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок / Л. М. Абдали, М. Н. Аль-Малики, Х. А. Исса, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 4. С. 106–116. DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.
8. Zhang Q., Ning Xu., Ye Z. MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method. *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.
9. 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.
10. Belkaid A.; Colak I.; Kayisli K. Implementation of a modified P&O-MPPT algorithm adapted for varying solar radiation conditions. *Electr. Eng.* 2017, 99, pp. 839–846.
11. Abo-Elyousr F.K.; Abdelshafy A.M.; Abdelaziz A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.
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. Aouchiche N.; Aitcheikh M.S.; Becherif M.; Ebrahim M.A. AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.

14. Pathy S.; Subramani C.; Sridhar R.; Thentral T.; Padmanaban S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518-537.

15. Li H., Yang D., and Su W., "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 265–275.

16. 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.

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

18. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp.826-847.

19. 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.

20. Banaei, Mohamad Reza, and Hossein AjjardFaeghiBonab. "A high efficiency nonisolated buck–boost converter based on ZETA converter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67, no. 3, pp.1991-1998.

21. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. "An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions." *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37-47.

22. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Klačková, I., Issa, H. A., Yakimovich, B. A. and Kuvshimov, 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

23. Mitrofanov S. V., Baykasenov D. K., & Suleev M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In 2018 International Ural Conference on Green Energy, 2018, (pp. 90-96). IEEE

24. 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. Javed, K.; Ashfaq, H.; Singh, R. A new simple MPPT algorithm to track MPP under partial shading for solar photovoltaic systems. *Int. J. Green Energy* 2020, 17, 48–61.

2. Pathak, P. K., Padmanaban, S., Yadav, A. K., Alvi, P. A., & Khan, B. Modified incremental conductance MPPT algorithm for SPV-based grid-tied and stand-alone systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2022, 16(4), pp.776-791.

3. Mehrjerdi, H. Peer-to-peer home energy management incorporating hydrogen storage system and solar generating units. *Renewable Energy*, 2020, 156, 183-192.

4. 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.

5. 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>.

6. 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.

7. Abdali L.M., Al-Maliki M.N., Issa Kh.A., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Using the Maximum Power Point Tracking Method to Increase the Efficiency of Photovoltaic Installations]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2022, vol. 20, no. 4, pp. 106-116 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2022-4-106-116.

8. Q. Zhang, Xu. Ning, and Z. Ye, "MMPT control method for photovoltaic power supply based on improved variable-step hill-climbing method," *Electric Engineering*, vol. 2, pp. 55–57, 2018.

9. 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.).

10. Yin, O.W. and B.C. Babu, Simple and easy approach for mathematical analysis of photovoltaic (PV) module under normal and partial shading conditions. *Optik*, 2018. 169: p. 48-61.

11. Abo-Elyousr, F.K.; Abdelshafy, A.M.; Abdelaziz, A.Y. MPPT-Based Particle Swarm and Cuckoo Search Algorithms for PV Systems. In *Modern Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Energy Systems*; Springer: Cham, Switzerland, 2020; pp. 379–400.

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. Aouchiche, N.; Aitcheikh, M.S.; Becherif, M.; Ebrahim, M.A. AI-based global MPPT for partial shaded

grid connected PV plant via MFO approach. *Sol. Energy* 2018, 171, 593–603.

14. Pathy, S.; Subramani, C.; Sridhar, R.; Thentral, T.; Padmanaban, S. Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: A comparative study. *Energies* 2019, 12, 1451. Senol M., Abbasoglu S., Kukrer O., Babatunde A. A guide in installing large-scale PV power plant for self-consumption mechanism. *Sol. Energy*, 2019, 132, pp. 518-537.

15. H. Li, D. Yang, and W. Su, "An overall distribution particle swarm optimization mppt algorithm for photovoltaic system under partial shading," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 1, no. 1, pp. 265–275, 2018.

16. Abdali L.M., Issa H. A., Аль-Малики М. Н., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. [Analysis Study and Comparison of Different Maximum Power Point Techniques for Solar Photovoltaic Systems] *Интеллектуальные системы в производстве*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 104-113 (in Russ.). Doi: 10.22213/2410-9304-2022-3-104-113.

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

18. Ram, J. Prasanth, T. Sudhakar Babu, and N. Rajasekar. "A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 2017, pp.826-847.

19. 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.

20. Banaei, Mohamad Reza, and Hossein AjarFaeghiBonab. "A high efficiency nonisolated buck–boost converter based on ZETA converter." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67, no. 3, pp.1991-1998.

21. Pilakkat, Deepthi, and S. Kanthalakshmi. "An improved P&O algorithm integrated with artificial bee colony for photovoltaic systems under partial shading conditions." *Solar Energy* 178, 2019, pp. 37-47.

22. Layth M. Abd Ali, L M., Ali, Q. A., Klačková, 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, Volume 26 (4), 773-783 DOI: <https://doi.org/10.46544/AMS.v26i4.14>.

23. Mitrofanov, S. V., Baykasenov, D. K., & Suleev, M. A. Simulation model of autonomous solar power plant with dual-axis solar tracker. In 2018 International Ural Conference on Green Energy, 2018, (pp. 90-96). IEEE

24. El Mentaly, Lahcen, Abdellah Amghar, and Hassan Sahseh. "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.

Analysis and Selection of the Optimal Performance Control Method for Solar Cell Dc Converters

L. M. Abdali, Postgraduate Student, Institute of Nuclear Energy and Industry of Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

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

A. G. Al Bairmani, Postgraduate Student, 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. Syaktereva, PhD in Engineering, Assoc.Prof., Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

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

Solar energy is one of the most promising sources of energy to meet the ever-increasing demand for electricity in the world. But due to the low efficiency of solar photovoltaic (PV) cells and the dependence of their performance on environmental conditions, it is necessary to monitor the maximum power point (MPP) of the photovoltaic system. Hence, various maximum power point tracking methods are implemented with photovoltaic systems, but the design of the DC/DC converter is one of the main problems with maximum power point tracking methods.

This article compares two different DC/DC converters for solar power conversion. The two converters are a buck converter and a buck-boost converter. The maximum power point tracking algorithm is designed to calculate battery voltage, PV array current, PV array voltage, PV array power, and output power. It has been observed that the buck-boost converter is the best converter for converting solar energy. The two circuits are modeled in MATLAB/Simulink R2021a. By means of the proposed control methods, there is a significant increase in the generation of electrical energy by photovoltaic panels. In the presented work, the information and control system of a low-power solar power plant is investigated. A large amount of converted electrical energy cannot be used by the consumer due to various losses in the photovoltaic system. To improve the efficiency of using the generated electricity, a promising algorithm was developed that is responsible for the operation of the station control unit. As a result, the quality of the solar in-

stallation was significantly improved and energy production for the consumer's power supply was increased. The simulation results will give future researchers a clear concept for predicting the behavior of the mentioned converters and designing the most efficient converter specified for solar MPPT.

Keywords: PV Cell, maximum power point tracking (MPPT), duty ratio control, buck converter, buck-boost converter, MATLAB/Simulink, MPPT algorithm.

Получено: 12.01.22

Образец цитирования

Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода / Л. М. Абдали, М. Н. Аль-Малики, А. Г. Аль Баирмани, Б. А. Якимович, В. В. Сяктерева, В. В. Кувшинов // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 125–137. DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-125-137.

For Citation

Abdali L.M., Al'-Maliki M.N., Al' Bairmani A.G., Yakimovich B.A., Syaktereva V.V., Kuvshinov V.V. [Analysis and selection of the optimal performance control method for solar cell dc converters]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve*. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 125-137 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2023-1-125-137.