Электротехника



EKTPOTEL

А. М. Белов, Ноэль Нтавухоракомейе Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Проектирование повышающего преобразователя постоянного тока контроллера солнечного заряда МРРТ

Спроектирован повышающий преобразователь постоянного тока контроллера солнечного заряда с двумя конденсаторами, позволяющий, используя систему отслеживания точки максимальной мощности, определить максимальную мощность фотоэлектрической панели в любой момент времени. Проведены расчеты основных параметров преобразователя (рабочий цикл, индуктивность, максимальный ток, значения емкостей входного и выходного конденсаторов) и выбраны для него диод и МОП-транзистор, что улучшает конструкцию повышающего преобразователя. Проектируемый преобразователь был испытан на солнечной батарее SP75, результаты моделирования приведены в пакете программного обеспечения PSIM. Это позволило оптимизировать производство солнечной станции и выявить тот факт, что он может работать в своей точке максимальной мощности.

Моделирование, фотоэлектрический генератор, точка максимальной мощности, повышающий преобразователь, электрическая энергия

Электрическая энергия является важным фактором для развития и улучшения условий жизни общества. С учетом растущей стоимости традиционной энергии и ограниченности ее ресурсов фотоэлектрическая энергия становится все более подходящим решением среди многообещающих энергетических вариантов, имеющих такие преимущества, как отсутствие загрязнения атмосферы и доступность в любой точке мира. Следует отметить, однако, что производство такой энергии имеет определенные недостатки: высокую стоимость генератора и относительно низкий его КПД [1].

Преобразование солнечной энергии в электрическую осуществляется фотоэлектрическими элементами. Это явление основано на принципе фотоэлектрического эффекта. Последовательное/параллельное соединение фотоэлектрических элементов представляет собой фотоэлектрический генератор (солнечную батарею), вольтамперная характеристика которого нелинейна. Характеристика, которая имеет точку максимальной мощности (МРР – maximum power point), является функцией температуры и освещенности фотоэлектрического генератора [2]. Для того чтобы рабочая точка, которая зависит от нагрузки, питающейся от фотоэлектрического генератора, находилась вблизи МРР, между генератором и нагрузкой должна быть введена ступень адаптации. Эта ступень действует как интерфейс между двумя элементами, обеспечивая посредством управляющего воздействия передачу максимальной мощности, подаваемой генератором, так, чтобы она была как можно ближе к доступному значению P_{max} .

В фотоэлектрической системе чаще всего используются преобразователи постоянного тока (DC–DC) «понижающего», «повышающего» или «понижающего–повышающего» типов. Динамическое поведение таких преобразователей описывается нелинейной моделью [2], [3]. Для отслеживания точки максимальной мощности требуется использование определенного управления – отслеживания точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracker, MPPT). В последние годы с управлением МРРТ были связаны более надежные методы управления – инкрементная проводимость (Inc.-cond), возмущение и наблю-

.....

дение (perturb and observe-p&o), нечеткая логика и др. [4]. Среди них наиболее широко используется p&o из-за его простоты и легкости реализации. Для того чтобы солнечный модуль мог обеспечить максимальную доступную мощность, необходимо постоянно адаптировать нагрузку к фотоэлектрическому генератору (ФЭГ) с помощью установки преобразователя постоянного тока, управляемого механизмом MPPT [5]–[8].

Работа ФЭГ на максимальной мощности. Конструкция оптимизированных фотоэлектрических систем должна учитывать характер нагрузки и различные явления, которые могут влиять на источник. Необходимо согласовать их с характеристиками нагрузки, независимо от того, работает ли она на постоянном (например, батареи) или на переменном (например, электрическая сеть 240 В / 50 Гц) токе. Поэтому принцип состоит в том, чтобы эксплуатировать систему на максимальной мощности независимо от возможного возмущения (изменения освещения или температуры). На рис. 1, а показаны вольтамперные характеристики для данной освещенности и температуры ФЭГ, подключенного к резистивной нагрузке R_c, из которых следует, что ФЭГ работает на максимальной мощности (P_{max}), когда

$$U_{Pv} = U_{OIIT}$$
, $I_{Pv} = I_{OIIT}$, $R_{c} = R_{OIIT} = \frac{U_{Pv}}{I_{OIIT}}$, $P_{Pv} = U_{Pv}I_{Pv} = P_{max} = U_{OIIT}I_{OIIT}$, где U_{Pv} , I_{Pv} – напряжение и сила тока ФЭГ.

Для данной освещенности оптимальные условия работы фотоэлектрических генераторов характеризуются напряжением U_{опт} и током I_{опт}, произведение которых дает максимальную мощность, которую можно извлечь из фотоэлектрического модуля. Эта точка ($U_{\text{опт}}$ и $I_{\text{опт}}$) называется точкой максимальной мощности генератора для данных значений температуры и освещенности и характеризуется оптимальным внутренним сопротивлением $R_{\text{опт}}$ генератора.

Точки P_1 , P_2 и MPP – это рабочие точки системы (рис. 1, δ) при следующих условиях: $R_c < R_{ont}, R_c = R_{ont}$ и $R_c > R_{ont}$.

Когда значение нагрузки выше или ниже значения, соответствующего оптимальным условиям $R_{\text{опт}}$, мощность, генерируемая генератором, ниже, чем оптимальное значение P_{max} .

Для того чтобы ФЭГ работал в оптимальных условиях, необходимо специальное регулирование, которое обеспечивается МРРТ-контроллером. В таких регуляторах непрерывно измеряются напряжение и ток панели для получения энергии в МРР. Это гарантирует, что максимальная энергия будет восстановлена независимо от температуры и солнечного освещения [6]. Как правило, эти регуляторы работают посредством повышения или понижения напряжения. Контроллер МРРТ состоит из двух основных частей: управляющая часть (различные алгоритмы) регулирует требования к МРР всех панелей, а силовая (статический преобразователь) обеспечивает передачу энергии между солнечными и аккумуляторными батареями (АкБ). Цель такого контроллера заряда - обнаружение точки максимальной мощности, как показано на рис. 1.

Повышающий преобразователь напряжения (boost). Чтобы извлекать максимальную мощность, доступную на клеммах ФЭГ, в любое время и передавать ее на нагрузку, обычно используется ступень адаптации между ФЭГ и нагрузкой,



которая служит интерфейсом между двумя элементами, обеспечивая посредством управляющего воздействия передачу максимальной мощности, производимой генератором, так, чтобы она была как можно ближе к значению $P_{\rm max}$ [7]–[8]. В МРРТ используются несколько типов статических преобразователей – мы ограничимся преобразователем типа «Boost», в котором выходное напряжение (на клеммах аккумулятора) выше, чем на входе (на клеммах солнечной панели). Его принципиальная схема представлена на рис. 2 [9].

Для того чтобы синтезировать функции повышающего преобразователя (ПП) в установившемся режиме, необходимо представить эквивалентные схемы в каждом положении переключателя K. На рис. 3 представлены две эквивалентные схемы этого преобразователя для двух рабочих циклов: a - K замкнут, $\delta - K$ разомкнут.

На рисунке обозначены: i – входной ток; $U_i = U_{P_V} =$ входное напряжение; i_L и U_L – ток и напряжение индуктора L; $i_O = i_{Bbix}$ – выходной ток; i_K – ток, протекающий через ключ; i_D – ток, протекающий через ключ; i_D – ток, протекающий через диод; U_K – напряжение на зажимах ключа; i_{C_1} и i_{C_2} – токи, протекающие через конденсаторы C_1 и C_2 ; $U_O = U_{Bbix}$ – выходное напряжение.

Применяя закон Кирхгофа к этим двум эквивалентным цепям ПП рабочих фаз, получаем две следующие системы уравнений:

– для первого периода αT_{c} (переключатель замкнут):

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dU_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t); \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dU_O(t)}{dt} = -i_O(t); \\ U_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = -U_i(t); \end{cases}$$
(1)

– для второго периода (1 – α) T_c (переключатель разомкнут):

$$\begin{cases} i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dU_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t); \\ i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dU_O(t)}{dt} = i_L(t) - i_O(t); \\ U_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = U_i(t) - U_O(t), \end{cases}$$
(2)

где α – рабочий цикл переключателя *K*; T_c – период переключения (т. е. первый период + второй период).

Чтобы найти динамическое представление, действительное для всего периода T_c , обычно используется следующее выражение [3]–[7]:

$$\prec \frac{dx}{dt} \succ T_{\rm c} = \frac{dx}{dt \,\alpha T_{\rm c}} \alpha T_{\rm c} + \frac{dx}{dt \,(1-\alpha)T_{\rm c}} (1-\alpha)T_{\rm c} \,, \, (3)$$

где $\prec \frac{dx}{dt} \succ$ – среднее значение производной от xза период T_c . Это соотношение действительно, если $\frac{dx}{dt \alpha T_c}$ и $\frac{dx}{dt (1-\alpha)T_c}$ постоянны с интервалами αT_c и $(1-\alpha)T_c$ соответственно.



Применяя (3) к (1) и (2), находим приближенную модель повышающего преобразователя:

.....

$$\begin{cases} i_{L}(t) = i_{i}(t) - C_{1} \frac{dU_{in}(t)}{dt}; \\ i_{O}(t) = (1 - \alpha)i_{L} - C_{2} \frac{dU_{O}(t)}{dt}; \\ U_{i}(t) = L \frac{di_{L}}{dt} = (1 - \alpha)U_{O}. \end{cases}$$

Для исследования в непрерывном режиме исключаем производные динамических переменных и заменяем их средними значениями:

$$\begin{cases} i_O = (1 - \alpha)i_L; \\ i_i = i_L; \\ U_O(t) = (1 - \alpha)U_O. \end{cases}$$

Коэффициент преобразования определяется как отношение между выходным и входным напряже-

ниями следующим образом: $M = \frac{U_O}{U_i} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ (пре-

образователь - повышающий).

.....

На рис. 4, *а-г* представлены формы напряжения и тока.



Моделирование и синтез всей системы солнечной электростанции. Система состоит из трех отдельных элементов: солнечной панели, повышающего преобразователя (силовая часть) с его управлением (управляющая часть) и нагрузки (аккумулятор). Для каждой части была разработана модель.

Модель фотоэлектрической панели. На рис. 5, б показана электрическая модель солнечной панели (СП), а на рис. 5, *а* – ее модель с использованием программного обеспечения PSIM.

Для моделирования взяты параметры солнечной панели SP75: максимальная мощность $P_{\text{max}} = 75$ Вт, оптимальное максимальное напряжение $U_{\text{опт}} = 17.5$ В, оптимальный максимальный ток $I_{\text{опт}} = 4.41$ А, напряжение холостого хода $U_{\text{x.x}} = 21.7$ В, ток короткого замыкания $I_{\text{к.3}} = 4.8$ А, последовательное сопротивление $R_{\text{c}} = 12$ мОм.

Уравнение выходной характеристики солнечного элемента [10]–[11]:

$$I = I_{Pv} - I_0 \left(e^{\frac{U + IR_c}{nU_T}} - 1 \right).$$

где U_T – тепловое напряжение; I_0 – ток обратного насыщения; U – выходное напряжение; I – выходной ток; n – коэффициент идеальности диода (1~2).

Определение параметров и компонентов преобразователя. С солнечной панелью SP75 преобразователь должен соответствовать следующим условиям:

 преобразователь подает регулируемое напряжение (в нашем случае 24 В) с панели SP75 с остаточной пульсацией выходного напряжения, не превышающего 10 мВ, и входного, не превышающего 100 мВ;



– преобразователь работает в режиме непрерывной проводимости для тока нагрузки I_c , изменяющегося от 0.3 до 4.8 А (т. е. от 6 % до 100 % его максимального значения). Ниже тока 0.3 А использование преобразователя не выгодно, так как его эффективность слишком низка. Следовательно, максимально допустимая нагрузка составляет

$$R_{\rm c\,max} = \frac{100}{0.3} = 300 \,\,{\rm MOm};$$

 катушка: фактически, слишком низкая индуктивность не позволяет силовой цепи работать, а слишком высокая может вызвать значительные потери мощности. Значение индуктивности определяется как

$$L = \frac{\alpha U_{Pv}}{I_{\text{BbIX},\min}f},$$

где α – рабочий цикл; $I_{\text{вых. min}} = 0.3$ А; f – частота переключения.

Рабочий цикл, которого можно ожидать при номинальных условиях ($U_{BX} = 17.5$ В и $U_{Bbix} = 24$ В), определяется из формулы $\frac{U_{BX}}{U_{Bbix}} = \frac{1}{1-\alpha}$, т. е.

 $\alpha = 0.27$. Предположим, что статический преобразователь работает на частоте 10 кГц (частота переключения коммутатора) – $L \approx 2$ мГн;

– входной конденсатор $C_{\rm BX}$: расчетный критерий для входных конденсаторов заключается в том, что пульсирующее напряжение ($\Delta U_{\rm BX}$) на них должно быть около 1 %:

$$C_{\text{вх}} = \frac{I_{\text{опт}} \alpha}{\Delta U_{\text{вх}} f}$$
 при $\Delta U_{\text{вх}} = 10 \text{ мB}$
 $C_{\text{вх}} = 11.90 \text{ мк}\Phi;$



Puc. 5



– выходной конденсатор C_{вых}: цель выходного конденсатора состоит в том, чтобы фильтровать колебания напряжения на выходе повышающего преобразователя. Значение C_{вых} рассчитывается с использованием уравнения пульсации выходного напряжения [8]:

$$\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = \frac{1 - \alpha}{8LC_{\text{вых}}f^2} \text{ при } \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = 1\%,$$

$$C_{\text{вых}} = \frac{1 - \alpha}{8L\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}f^2} =$$

$$= \frac{1 - 0.27}{(8) \cdot (2 \cdot 10^{-3})(0.01)(10 \cdot 10^3)^2} = 58.12 \text{ мк}\Phi,$$

где U_{вых} – выходное напряжение;

– используемый диод должен быть быстрым и должен выдерживать максимальный ток, подаваемый на нагрузку. Его роль состоит в том, чтобы избежать возврата тока, поступающего от нагрузки, – поэтому выбран диод Шотки со средним током 5 А и обратным напряжением 100 В. – МОП-транзисторы (MOSFET – metal–oxide– semiconductor field-effect transistor) наиболее часто применяются в области малой и средней мощности (несколько киловатт). В данном случае используется транзистор IRF 540.

Модель окончательной схемы, для которой выбирались компоненты (панель-преобразователь-аккумулятор) в PSIM, представлена на рис. 6.

Преобразователь имеет широтно-импульсную модуляцию и работает следующим образом: в течение времени αT (α – рабочий цикл преобразования; T – период прерывания) транзистор является проводящим, диод блокируется, индуктивность намагничивается и ток, протекающий через него, увеличивается. В течение времени (α – 1)T транзистор блокируется, и диод становится проводящим. Индуктор разряжает энергию в батарею, и ее ток уменьшается.

Анализ работы преобразователя в среде PSIM. На рис. 7 и 8 приведены результаты по напряжению на входе и выходе моделируемого повышающего преобразователя в среде PSIM в зависимости от времени.





Puc. 9

Из рис. 7, 8 можно сделать вывод, что напряжение стабилизируется на значении 15 В на входе солнечной панели ($U_{\text{пан}}$) и 24 В на выходе ПП, и отметить повышающее поведение преобразователя.

Моделирование управления МРРТ командой «perturb and observe». Конечной целью является

зарядить аккумулятор максимальным током с помощью солнечной панели с максимальной мощностью. Моделирование было выполнено с помощью программного обеспечения PSIM, и схема системы регулирования представлена на рис. 9. Результаты и обсуждение моделирования. Рис. 10–13 показывают типичные результаты моделирования в среде PSIM электрических характеристик на выходе панели ($I_{пан}$, $U_{пан}$) и на выходе ПП, управляемого аналоговой командой МРРТ, при постоянном солнечном освещении 1000 Вт/м² и температуре 25 °С (см. рис. 9).

Исходя из проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

 после переходного режима управление МРРТ заставляет рабочую точку колебаться вокруг точки МРР; – различные напряжения и токи стабилизируются вокруг значений, установленных нашими данными: на выходе панели – около 17 В и 4.4 А; на нагрузке – около 24 В и 4.5 А соответственно.

Все полученные результаты показывают, что преобразователь DC–DC и управление МРРТ выполняют свои роли правильно: преобразователь обеспечивает в оптимальных условиях напряжение на его выходе больше, чем напряжение, генерируемое ФЭГ; управление МРРТ адаптирует ФЭГ к АкБ – передается максимальная мощность, генерируемая фотоэлектрическим генератором.





Спроектирован повышающий преобразователь, проанализировано в среде PSIM электрическое функционирование фотоэлектрической системы, адаптированной преобразователем постоянного тока и регулируемой аналоговым управлением MPPT. Полученные результаты показывают, что менее чем за 50 мс при автоматическом изменении коэффициента заполнения сигнала, который управляет переключателем преобразователя энергии, система приближается к оптимальным условиям, независимо от погодных условий и изменений нагрузки. Использование управления МРРТ позволяет значительно повысить эффективность фотоэлектрических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельхадж М. Анализ и проектирование автономной концентрирующей гибридной солнечной фотоэлектрической/тепловой системы сбора. Докторская диссертация Ун-та Тахри Мохаммеда, Бешар, Алжир 2017. URL: https://www.researchgate.net/profile/ Mohammed_Belhadj/publication/323547727_Analyse_et _Conception_d'un_Systeme_autonome_de_captage_solai re_hybride_photoUoltaiquethermique_a_Concentration/l inks/5a9c4c170f7e9be3796818ab/Analyse-et-Conceptiondun-Systeme-autonome-de-captage-solaire-hybride-photoUoltaique-thermique-a-Concentration.pdf.

2. Синго А. Т. Фотоэлектрическая система электропитания с гибридным накопителем для энергетически автономного жилья // дисс. ... д-ра техн. наук. Франция: Ун-т Анри Пуанкаре, Нанси-I, 2010.

 Кейхани А. Проектирование систем возобновляемой энергии Smart Power Grid // Моделирование преобразователей в системах распределенного поколения мощности. John Wiley & Sons, 2019. 3-е изд.

4. Исследование эффективных методов МРРТ для фотоэлектрических систем с использованием повышающего преобразователя. DE GRUYTER / Б. Эль Хассуни, М. Оурау, В. Айрир, А. Хадди, А. Г. Амрани // Междунар. журн. новых электроэнергетических систем. 2018. URL: ijeeps-2017-0180. https://www. degruyter.com (дата обращения 01.06.2020).

5. Шридхар Ш., Мохан К. Р., Нарсимхеговда Т. Р. Топология повышающего преобразователя для фотоэлектрической системы с алгоритмом возмущения и наблюдения MPPT // IOSR-JEEE. 2014. Т. 9, № 4. С. 50–56.

6. Мамун Ур Р., Ахсан Х., Мохаммад М. Х. Проектирование и создание системы солнечного фотовольтического моделирования с реализацией MPPT и boost-преобразователей с использованием MatLab/ Simulink // Азиатский журн. текущих исследований. 2018. № 3 (1). С. 27–36.

7. Капустин И. В., Лукашенков А. В. Математическое моделирование и анализ импульсного повышающего преобразователя напряжения // Изв. ТулГУ. Технические науки. Управление, вычислительная техника и информационные технологии. 2013. Вып. 2. С. 126–135.

8. Конструкция повышающего преобразователя постоянного тока в постоянный для быстрых и точных алгоритмов МРРТ в автономной фотоэлектрической системе / Х. Норазлан, С. Зайнал, Д. Далина, Ник Фасди Ник Исмаил // Междунар. журн. силовой электроники и приводной системы (IJPEDS). 2018. Т. 9, № 3. С. 1038–1050.

9. Повышающий преобразователь. URL: https:// fracademic.com/dic.nsf/frwiki/448456 (дата обращения 01.06.2020).

10. Тянь Сюэ, Чжэн Миньсинь, Ян Сунтао. Отслеживание максимальной мощности для фотоэлектрической мощности на основе улучшенного преобразователя с чередованием мощности // 11-я конф. по промышленной электронике и приложениям IEEE (ICIEA). Хэфэй, Китай, 2016. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Weighted-bilateral-filtering-for-nearedge-and-Thai-Deng/7eca3cdcefee0990f0cdc5d1f829525 2154c532e (дата обращения 05.06.2020).

11. Шарифов Б. Н., Терегулов Т. Р. Моделирование солнечной панели в программе MatLab/Simulink // Вестн. УГАТУ. 2018. Т. 19, № 4 (70). С. 77–83.

A. M. Belov, Noel Ntawuhorakomeye

Saint Petersburg Electrotechnical University

DESIGN OF A BOOST DC CONVERTER FOR MPPT SOLAR CHARGE CONTROLLER

In the presented article, a step-up converter with pulse-width modulation (PWM) with two capacitors was mathematically modeled and designed (unlike most converters found in the literature), which allows using the maximum power point tracking control (MPPT) to determine the maximum power of a photovoltaic panel in any moment of time.

The basic parameters of the converter were calculated, such as the duty cycle, inductance value, maximum current, capacitance values of the input and output capacitors, and a diode and a MOS transistor were chosen for it, representing a contribution to the better design of the boost converter. The designed converter was tested on the SP75 solar panel, the results of the simulation carried out with the PSIM software package made it possible to optimize the production of the solar module and find out the fact that it can operate at its maximum power point if it is connected to a converter that is constantly looking for maximum power

Modeling, photoelectric generator, maximum power point, boost converter, energy

УДК 621.3

С. А. Трембач Череповецкий государственный университет (ЧГУ)

Система генерации электрической энергии с электромагнитной стимуляцией движения физического маятника

Рассмотрен способ преобразования энергии маятниковых колебаний в электрическую, а также рассчитаны выработка и потребление системы генерации энергии через маятниковые колебания. Система для преобразования энергии гравитации в электрическую состоит из физического маятника, каркаса, на котором он закреплен на подшипниках, минимум одной ведомой и одной ведущей шестерен передаточного механизма, самого генератора, присоединяющегося к маятнику через этот передаточный механизм, аккумулятора, куда вся вырабатываемая энергия поступает и из которого черпается энергия на поддержание системы, двух электромагнитов, поддерживающих колебания маятника незатухающими, и двух реле времени, оптимизирующих энергопотребление электромагнитов и задающих им режим работы согласно периоду полного колебания маятника. По результатам расчетов было начато изготовление прототипа данного генератора электрической энергии, ввод в эксплуатацию которого может положительно повлиять на энергетическую обстановку во всем мире, так как он не имеет привязок к географическому положению, времени суток, времени года и другим факторам, затрудняющим работу известных источников возобновляемой энергии.

Возобновляемые источники энергии, энергия гравитации, физический маятник, генерация электрической энергии

Среди существующих возобновляемых видов энергии выделяют энергию ветра, гидроэнергию, энергию приливов и отливов, волн, температурного градиента морской воды, солнечного света, геотермальную энергию и биоэнергию. У всех вышеперечисленных видов энергии есть свои недостатки [1], основные из которых – зависимость генератора от его географического положения и от таких факторов, как наличие и скорость ветра, время суток и наличие волн, наличие геотермальных источников. Биоэнергетика же использует биотопливо, которое можно было бы использовать в других областях. Также в большинстве своем генераторы на возобновляемых источниках энергии в той или иной степени наносят ущерб окружающей среде.