



УДК 681.537

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПОИСКА ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Б.Б. Мухамбедьяров^а, Д.В. Лукичев^а, Н.Л. Полюга^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
Адрес для переписки: ludimit@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 25.09.18, принята к печати 30.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Мухамбедьяров Б.Б., Лукичев Д.В., Полюга Н.Л. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1099–1107. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена имитационная модель электрогенерирующей установки на базе фотоэлектрических преобразователей. Поскольку фотоэлектрические модули имеют относительно низкую эффективность преобразования энергии, улучшение характеристик соответствующей энергосистемы может быть частично достигнуто при помощи управляемых промежуточных преобразователей. Цель работы – построение модели фотоэлектрической системы, а также сравнительный анализ алгоритмов управления силовым преобразователем для получения максимальной доступной мощности от солнечной фотоэлектрической панели. **Метод.** Исследуемые алгоритмы основаны на поиске экстремума на мощностной характеристике фотоэлектрического преобразователя. Рассмотрена реализация алгоритмов поиска точки максимальной мощности «Возмущение и наблюдение» и «Возрастающая проводимость». Для повышения эффективности фотоэлектрических преобразователей в качестве альтернативы традиционным алгоритмам предложено использовать алгоритм поиска на основе теории нечеткой логики. **Основные результаты.** Построена модель системы управления солнечной панелью в MATLAB/Simulink. Рассмотрены и реализованы три метода поиска точки максимальной мощности для этой фотоэлектрической системы. Проведен сравнительный анализ работы рассматриваемых алгоритмов при различной интенсивности солнечного света. **Практическая значимость.** Приведенные алгоритмы могут быть реализованы в реальных энергетических системах в целях повышения эффективности их работы.

Ключевые слова

фотоэлектрический преобразователь, солнечная панель, широтно-импульсный преобразователь, точка максимальной мощности, нечеткая логика, возмущение и наблюдение, возрастающая проводимость

STUDY OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING ALGORITHMS FOR EFFICIENCY GROWTH OF PHOTOVOLTAIC CELLS

B.B. Mukhambedyarov^a, D.V. Lukichev^a, N.L. Polyuga^a

^аITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: ludimit@yandex.ru

Article info

Received 25.09.18, accepted 30.10.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107

Article in Russian

For citation: Mukhambedyarov B.B., Lukichev D.V., Polyuga N.L. Study of maximum power point tracking algorithms for efficiency growth of photovoltaic cells. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 1099–1107 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-1099-1107

Abstract

Subject of Research. The paper considers simulation model of the electro generating installation based on photovoltaic converters. It is known that photovoltaic cells have rather low conversion efficiency of energy therefore performance improving of the designed energy system can be partially reached by means of controlled intermediate converters. The main goal of this paper is model implementation of a solar power system and also comparative analysis of the different maximum power point tracking algorithms which are used to control energy system with the purpose to increase power efficiency of all system. **Method.** All algorithms considered in the paper are based on the search for an extremum on the volt-power

characteristic of a photovoltaic converter. Implementation of the most popular methods of maximum power point tracking is considered: "Perturbation and observation" and "Increasing conductivity". An algorithm based on the theory of fuzzy logic is proposed for application aimed at the growth of photovoltaic cells efficiency as an alternative method for traditional algorithms. **Main Results.** The model of solar panel control system is implemented in MATLAB/Simulink. Three methods for maximum power point tracking within this photovoltaic system are considered and implemented. Comparative analysis of operation of different control algorithms is carried out for different levels of solar radiation intensity. **Practical Relevance.** The algorithms can be implemented in real power systems for improvement of their overall performance.

Keywords

photovoltaic cell, solar panel, pulse width converter, maximum power point, fuzzy logic, perturb and observe, incremental conductance

Введение

В наши дни активно огромное внимание уделяется производству энергии, особенно это касается электроэнергии. Очень важно иметь доступные, надежные и безопасные способы получения и потребления электроэнергии, при которых загрязнение окружающей среды сведено к минимуму. Все большую популярность приобретают возобновляемые источники энергии, которые, в частности, используются в солнечных электростанциях на базе фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и ветрогенераторах. Их главными достоинствами являются экологическая безопасность и модульность. Потребители, отрезанные от централизованного энергоснабжения, могут воспользоваться возобновляемыми источниками для удовлетворения собственных нужд, что актуально и для России, поскольку более 20 млн человек находится вне зоны централизованных энергосистем [1].

Существует несколько методов повышения энергетической эффективности ФЭП, среди которых можно выделить реализацию системы позиционирования ФЭП (так называемый «солнечный трекер»), предназначенную для слежения за солнцем [2] и внедрение в систему управления ФЭП алгоритмов поиска точки максимальной мощности (ТММ; maximum power point, MPP) [3]. Второй метод рассматривается в настоящей работе.

В основе работы ФЭП лежит фотоэлектрический эффект. Фотоэлемент преобразует энергию фотонов в электрическую. Солнечная панель состоит из множества фотоэлементов [4]. Для того чтобы определить зависимость между выходным током и напряжением солнечной панели, воспользуемся эквивалентной схемой замещения (рис. 1) [5].

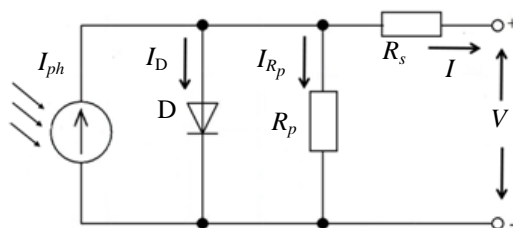


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения солнечной панели D

Связь выходного тока и напряжения, в соответствии с данной схемой, может быть представлена следующим образом [6]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{R_p} = I_{ph} - I_{sat} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{AkT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_p},$$

где I_{ph} – фототок; I_D – ток, протекающий через диод D; I_{R_p} – ток, протекающий через эквивалентное параллельное сопротивление; I_{sat} – ток насыщения диода; R_s – эквивалентное последовательное сопротивление; R_p – эквивалентное параллельное сопротивление; V – выходное напряжение; I – выходной ток; q – заряд электрона; A – коэффициент «идеальности»; k – коэффициент Больцмана; T – температура окружающей среды.

Известно, что фототок I_{ph} , а следовательно, и выходной ток, и напряжение зависят от температуры и солнечного излучения [7]. Зависимости между выходным током и напряжением (вольт-амперная характеристика), а также между мощностью и напряжением ФЭП приведены соответственно на рис. 2 и 3. В табл. 1 представлены параметры рассматриваемой солнечной панели.

Наименование	Значение
Напряжение при максимальной мощности, В	29,2
Ток при максимальной мощности, А	4,45
Напряжение холостого хода, В	36,3
Ток короткого замыкания, А	4,82

Таблица 1. Параметры солнечной панели

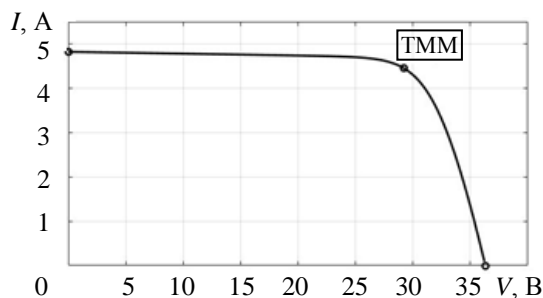


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика фотоэлектрического преобразователя

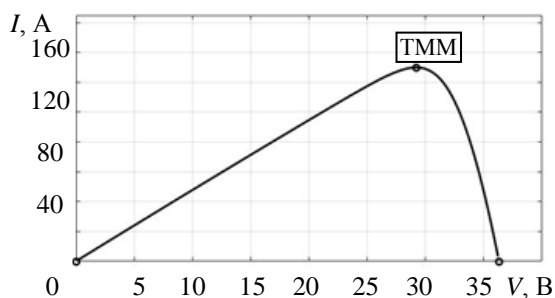


Рис. 3. Мощностная характеристика фотоэлектрического преобразователя

Из представленных характеристик (рис. 3) видно, что максимальная мощность (ТММ [8]) достигается при определенном напряжении. Для того чтобы ФЭП вырабатывал максимальную мощность, необходимо регулировать выходное напряжение и сопротивление нагрузки. Для этого между электроустановкой и нагрузкой необходимо установить силовой преобразователь [9].

Повышающий широтно-импульсный преобразователь

Для данной задачи подходят различные силовые преобразователи, и всем им присущи определенные достоинства и недостатки [10]. В работе будем использовать повышающий широтно-импульсный преобразователь (ШИП), с помощью которого возможно сопоставлять внутреннее сопротивление солнечной панели и выходное сопротивление, тем самым регулируя напряжение на выходе ФЭП, поэтому задача получения максимальной доступной мощности становится выполнимой [11]. Также повышающий ШИП (рис. 4) поддерживает необходимый диапазон регулирования напряжения при правильном подборе параметров [11]:

– минимальная индуктивность катушки

$$L_{\min} = \frac{(1-D)^2 DR_n}{2f},$$

– минимальная емкость конденсатора

$$C_{\min} = \frac{V_{\text{вых}} D}{R_n f \Delta V_{\text{вых}}},$$

где f – частота переключений; D – скважность; R_n – сопротивление нагрузки; $V_{\text{вых}}$ – выходное напряжение; $\Delta V_{\text{вых}}$ – пульсации выходного напряжения.

В табл. 2 приводятся параметры повышающего ШИП, рассчитанные с учетом приведенных выражений.

Наименование	Значение
Входная емкость $C_{\text{ин}}$, мФ	3
Индуктивность L , мкГн	80
Выходная емкость $C_{\text{оут}}$, мФ	0,5

Таблица 2. Параметры повышающего ШИП

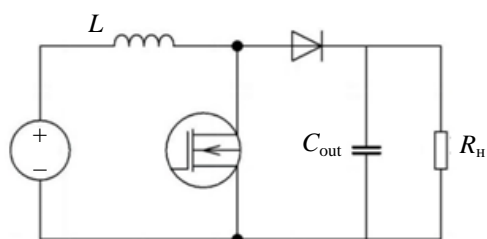


Рис. 4. Схема повышающего широтно-импульсного преобразователя

Алгоритмы поиска точки максимальной мощности

Существует большое количество алгоритмов поиска ТММ для управления силовым преобразователем [12–14]. Рассмотрим основанные на поиске экстремума на мощностной характеристике ФЭП алгоритмы «Возмущение и наблюдение», «Возрастающая проводимость» и алгоритм, основанный на нечеткой логике.

Работа алгоритма «Возмущение и наблюдение» (рис. 5, б) [15] заключается в изменении выходного напряжения [16]. Через определенный отрезок времени необходимо сканировать параметры системы, такие как выходные ток и напряжение ФЭП, на основе которых осуществляется слежение за мощностью. Если мощность увеличивается, необходимо повысить напряжение нагрузки с помощью изменения скважности. При уменьшении мощности напряжение нагрузки необходимо уменьшать. В устойчивом состоянии алгоритм будет описывать колебания вокруг ТММ. Модифицированная версия данного алгоритма описана в [17].

Алгоритм «Возрастающая проводимость» (рис. 5, а) основан на том, что значение мощностной характеристики в ТММ максимально, она имеет положительный наклон в левой части и отрицательный – в правой $P(V)$. Можно определить, где находится «рабочая точка», зная знак и величину производной dP/dV . Если $dP/dV > 0$, то рабочая точка находится слева от ТММ, и наоборот [18]. Если $dP/dV = 0$, то достигнута ТММ. Таким образом, как и в предыдущем случае, сканируя параметры системы, можно отследить ТММ.

На рис. 5: $V(t)$, $I(t)$ – соответственно текущие значения напряжения и тока на выходе солнечной панели; ΔV , dV – приращение по напряжению; dI – приращение по току; ΔP – приращение по мощности; t , Δt – текущий момент времени и приращение по времени соответственно; V_{ref} – напряжение задания.

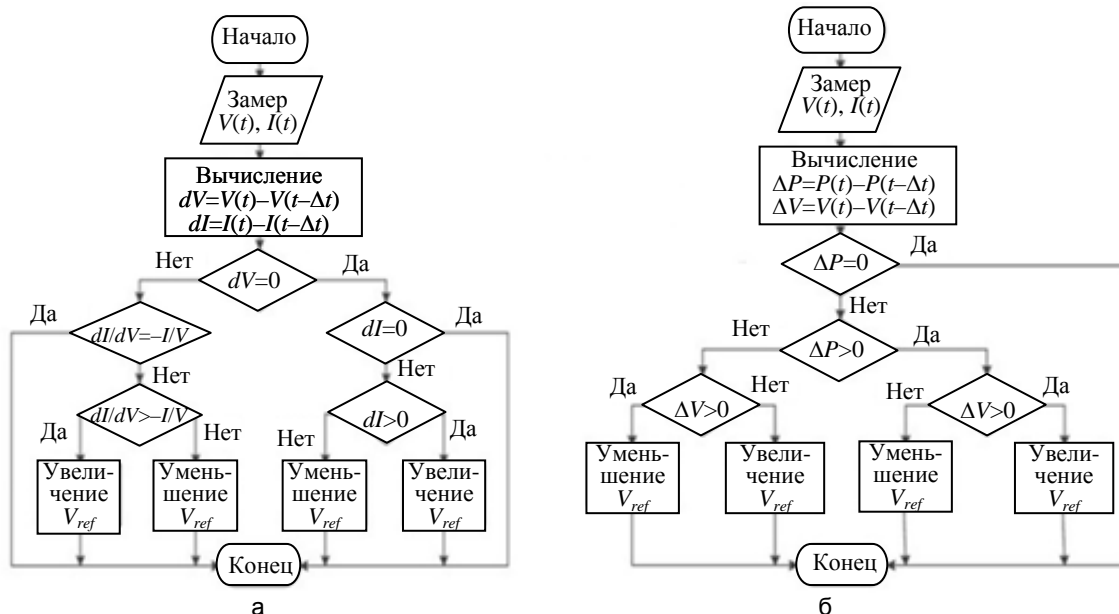


Рис. 5. Блок-схемы алгоритмов: «Возрастающая проводимость» (а), «Возмущение и наблюдение» (б)

Алгоритм поиска экстремума может быть реализован с помощью аппарата нечеткой логики [19]. Алгоритм работы вычислителя, построенного на базе нечеткой логики, состоит из фаззификации, нечеткого вывода и дефаззификации [20]. Для блока нечеткого регулятора зададим две входные переменные и одну выходную. В качестве входных переменных будем использовать ошибку $\Delta P/\Delta V$ и скорость ее изменения:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)},$$

$$\Delta E = E(k) - E(k-1),$$

где $P(k)$, $P(k-1)$ – текущая мощность ФЭП и на предыдущем такте соответственно, $V(k)$, $V(k-1)$ – выходное напряжение с ФЭП, текущее и на предыдущем такте соответственно, $E(k)$, $E(k-1)$ – ошибка текущая и на предыдущем такте соответственно.

Производная $\Delta P/\Delta V$ [21] позволяет определить, по какую сторону от ТММ на характеристике $P(V)$ в данный момент находится система. Нахождение в ТММ соответствует $\Delta P/\Delta V = 0$ [22]. Скорость нарастания ошибки позволяет определить, в какую сторону происходит смещение рабочей точки по кривой на рис. 3.

Выходной переменной является скважность. Каждой переменной необходимо присвоить функции принадлежности (рис. 6).

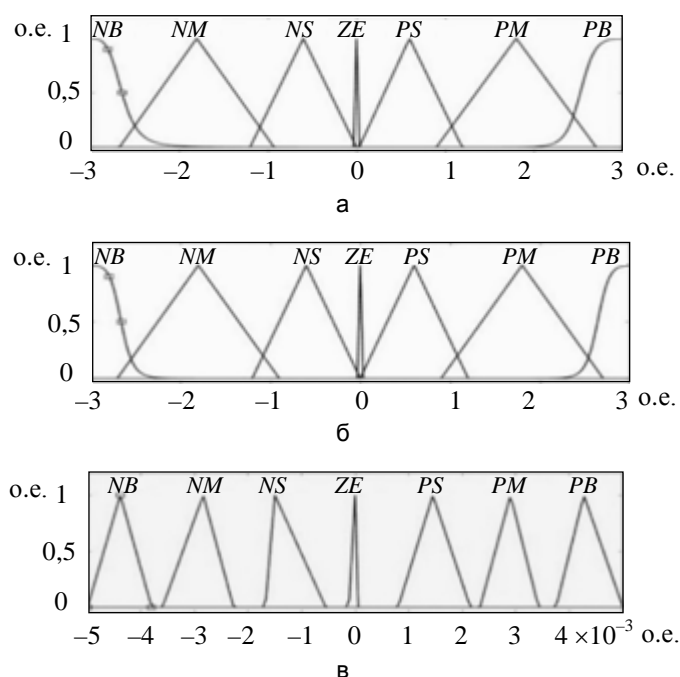


Рис. 6. Функции принадлежности: ошибка (входная переменная) (а), скорость нарастания ошибки (входная переменная) (б), скважность (выходная переменная) (в)

Чаще всего достаточно от 5 до 7 функций принадлежности: *NB* (большое отрицательное), *NM* (среднее отрицательное), *NS* (малое отрицательное), *ZE* (нуль), *PS* (малое положительное), *PM* (среднее положительное), *PB* (большое положительное) [23, 24]. Для описания связи между входными и выходными величинами можно воспользоваться базой продукционных правил [25]. В нашем случае одно из правил выглядит как: *if E = PB and ΔE = PB then D = PB*. Это значит: если мощность, получаемая с ФЭП, увеличивается, необходимо при помощи изменения скважности увеличить опорное напряжение, пока не будет достигнута ТММ. Продукционные правила (табл. 3) были получены эмпирически с учетом общих зависимостей [26].

$\Delta E \setminus E$	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>ZE</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	<i>PB</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>	<i>NB</i>
<i>NM</i>	<i>PM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NM</i>
<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>ZE</i>	<i>ZE</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>
<i>PS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>PM</i>	<i>NM</i>	<i>NM</i>	<i>NS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>
<i>PB</i>	<i>NB</i>	<i>NB</i>	<i>NM</i>	<i>PS</i>	<i>PS</i>	<i>PM</i>	<i>PB</i>

Таблица 3. Продукционные правила блока нечеткой логики

Моделирование и анализ системы

Разрабатываемая фотоэлектрическая система состоит из электроустановки, силового преобразователя и нагрузки. В нашем случае электроустановка – это солнечная панель, силовой преобразователь – это повышающий ШИП, а роль нагрузки в модели будет осуществлять элемент сопротивлением 12 Ом. Параметры ШИП и солнечной панели приведены выше. Для реализации модели системы использовался пакет MATLAB/Simulink (рис. 7). MPPT (Maximum Power Point Tracking) – это блок управления повышающим ШИП, в котором реализуется алгоритм поиска ТММ, его также называют контроллером MPPT или контроллером заряда.

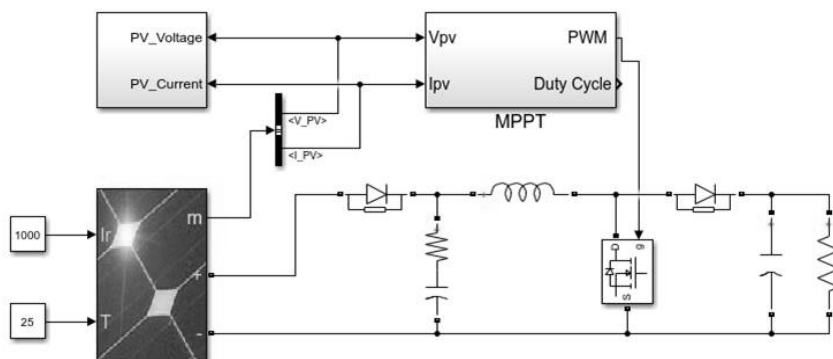


Рис. 7. Simulink-модель фотоэлектрической системы

Для изменения мощности солнечной панели необходимо, чтобы изменялись погодные условия. Чтобы посмотреть, насколько эффективны алгоритмы поиска, зададим переменную интенсивность солнечного излучения (рис. 8). Проанализируем получаемую выходную мощность солнечной панели при различных алгоритмах поиска ТММ (рис. 9; 1 – выходная мощность панели при реализации алгоритма «Возмущение и наблюдение», 2 – алгоритм «Возрастающая проводимость», 3 – алгоритм с использованием нечеткого регулятора).

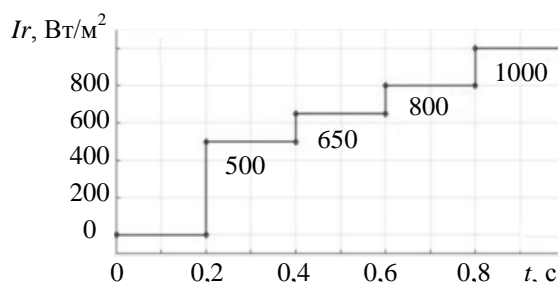


Рис. 8. Интенсивность солнечного излучения (I_r)

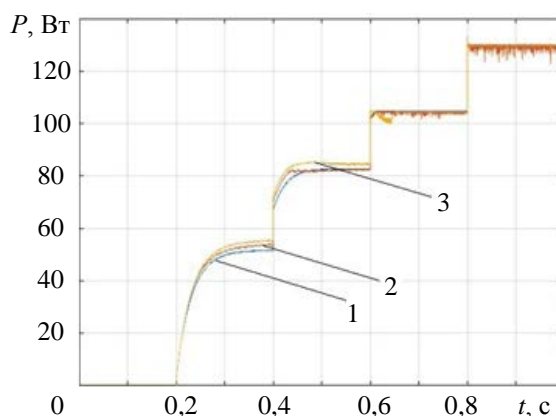


Рис. 9. Выходная мощность солнечной панели

Полученное с помощью алгоритма «Возмущение и наблюдение» время переходного процесса $\approx 0,2$ с. Наблюдаются пульсации мощности около 1–2 %. Данный алгоритм очень прост в реализации и не требует больших вычислительных затрат. При работе алгоритма «Возрастающая проводимость»

переходный процесс длится примерно 0,1 с, пульсации 5–10 %. Недостатком данных схем являются пульсации, являющиеся следствием работы самих алгоритмов, поскольку искомое значение всегда колеблется вокруг ТММ. Стоит также отметить, что при резком увеличении либо уменьшении излучения (при реализации режима слежения или при резком изменении погодных условий) данные алгоритмы могут терять ТММ, поэтому эффективность может упасть на 10–12 %. Регулятор на основе нечеткой логики не требует построения точных математических моделей объекта, а также позволяет работать с нелинейностями. При данной реализации алгоритм обеспечивает большую точность и быстродействие. Всегда достигается ТММ, пульсаций практически нет. Эффективность повышается до 15 % относительно предыдущих алгоритмов. Главным недостатком применения регулятора на основе нечеткой логики является нетривиальная настройка под определенный объект.

Заключение

Создана модель фотоэлектрической системы, включающая в себя электрическую установку в виде солнечной панели и силовой преобразователь с блоком управления. Произведена настройка повышающего широтно-импульсного преобразователя. Рассмотрены алгоритмы поиска точки максимальной мощности.

С точки зрения технической реализации самым простым является алгоритм «Возмущение и наблюдение», самым сложным – нечеткий регулятор. При работе алгоритма на основе нечеткой логики эффективность работы системы заметно увеличивается: в этом случае наблюдаются более низкие пульсации, повышается быстродействие по сравнению с традиционными алгоритмами. Также система с регулятором на основе нечеткой логики обладает устойчивостью даже при резком изменении интенсивности светового излучения.

Таким образом, можно сделать вывод, что регулятор на основе нечеткой логики является наилучшим решением для поиска точки максимальной мощности в электроэнергетической системе на базе фотоэлектрического преобразователя.

Литература

1. Мухамбедьяров Б. Управление автономной гибридной электростанцией: магистерская диссертация. СПб, 2017. 81 с.
2. Воротынцева Д.В., Ануфриев О.В., Теряев Р.Э., Стеценко К.П. Повышение эффективности работы солнечной панели при помощи солнечного трекера // Современные проблемы управления и регулирования: теория, методология, практика. Пенза, 2017. С. 39–43.
3. Возмилов А.Г., Малогинов С.А., Малогина А.А. Алгоритмы слежения за точкой максимальной мощности фотоэлектрических преобразователей // Вестник ЧГАА. 2014. Т. 70. С. 18–25.
4. Zbeeb A., Devabhaktuni V., Sebak A. Improved photovoltaic MPPT algorithm adapted for unstable atmospheric conditions and partial shading // Proc. Int. Conf. on Clean Electrical Power. 2009. P. 320–323. doi: 10.1109/ICCEP.2009.5212035
5. Wang C.-C., Wu M.-C., Lin K.-J., Lin C.-R. Analysis and research maximum power point tracking of photovoltaic array // Proc. Int. Symposium on Computer, Communication, Control and Automation (3CA). 2010. P. 196–200. doi: 10.1109/3CA.2010.5533854
6. Wang P., Zhao J., Li F. A new adaptive duty cycle perturbation algorithm for peak power tracking // Proc. 2nd Int. Asia Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2010. P. 298–301. doi: 10.1109/CAR.2010.5456543
7. Karanjlar D.S., Chatterji S., Kumar A. Development of linear quadratic regulator based PI controller for maximum power point tracking in solar photo-voltaic system // Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS). Chandigarh, India, 2014. doi: 10.1109/RAECS.2014.6799657
8. Vinifa R., Kavitha A. Maximum power point tracking of boost converter on a PV system using fuzzy logic // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017. V. 8. N 12. P. 584–593.
9. Hariharan S., Kumar V.N. Design of a DC-DC converter for a PV array // Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Robotics. Orissa, India, 2010. P. 79–84. doi: 10.1109/IECR.2010.5720154
10. Hart D.W. Power Electronics. McGraw-Hill Education, 2010. 477 p.
11. Chan W.-C., Masri S. DC-DC boost converter with constant

References

1. Mukhamed'yarov B. *Control of Autonomous Hybrid Power Station*. PhD Dis. St. Petersburg, 2017, 81 p. (in Russian)
2. Vorotyntsev D.V., Anufriev O.V., Teryaev R.E., Stetsenko K.P. Improving the efficiency of solar panels using solar tracker. *Proc. Modern Problems of Management and Regulation: Theory, Methodology, Practice*. Penza, 2017, pp. 39–43. (in Russian)
3. Vozmilov A.G., Malyugin S.A., Malyugina A.A. Maximum power point tracking algorithms of photoelectric converters. *Vestnik ChSAA*, 2014, vol. 70, pp. 18–25. (in Russian)
4. Zbeeb A., Devabhaktuni V., Sebak A. Improved photovoltaic MPPT algorithm adapted for unstable atmospheric conditions and partial shading. *Proc. Int. Conf. on Clean Electrical Power*, 2009, pp. 320–323. doi: 10.1109/ICCEP.2009.5212035
5. Wang C.-C., Wu M.-C., Lin K.-J., Lin C.-R. Analysis and research maximum power point tracking of photovoltaic array. *Proc. Int. Symposium on Computer, Communication, Control and Automation, 3CA*, 2010, pp. 196–200. doi: 10.1109/3CA.2010.5533854
6. Wang P., Zhao J., Li F. A new adaptive duty cycle perturbation algorithm for peak power tracking. *Proc. 2nd Int. Asia Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics*, 2010, pp. 298–301. doi: 10.1109/CAR.2010.5456543
7. Karanjlar D.S., Chatterji S., Kumar A. Development of linear quadratic regulator based PI controller for maximum power point tracking in solar photo-voltaic system. *Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RAECS*. Chandigarh, India, 2014. doi: 10.1109/RAECS.2014.6799657
8. Vinifa R., Kavitha A. Maximum power point tracking of boost converter on a PV system using fuzzy logic. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2017, vol. 8, no. 12, pp. 584–593.
9. Hariharan S., Kumar V.N. Design of a DC-DC converter for a PV array. *Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics, Control and Robotics*. Orissa, India, 2010, pp. 79–84. doi: 10.1109/IECR.2010.5720154
10. Hart D.W. *Power Electronics*. McGraw-Hill Education, 2010, 477 p.
11. Chan W.-C., Masri S. *DC-DC boost converter with constant output voltage for grid connected photovoltaic application system*, 2010, 5 p.

- output voltage for grid connected photovoltaic application system. 2010. 5 p.
12. Sankarganesh R., Thangavel S. Maximum power point tracking in PV system using intelligence based P&O technique and hybrid cuk converter // Proc. Int. Conf. on Emerging Trends in Science, Engineering and Technology (INCOSSET). Tiruchirappalli, India, 2012. P. 429–436. doi: 10.1109/INCOSSET.2012.6513945
 13. Panda B., Panda B., Hota P.K., Bhuyan S.K. A comparative analysis of maximum power point techniques for photovoltaic system // Proc. IEEE Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). Bhubaneswar, India, 2015. P. 732–737. doi: 10.1109/PCITC.2015.7438093
 14. Boukenoui R., Bradai R., Mellit A., Ghanes M., Salhi H. Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system // Proc. Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Palermo, Italy, 2015. P. 1095–1099. doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418579
 15. Martin A.D., Vazquez J.R. MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls // Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT). Seville, Spain, 2015. P. 2841–2847. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125517
 16. Blange R., Mahanta C., Gogoi A.K. MPPT of solar photovoltaic cell using perturb & observe and fuzzy logic controller algorithm for buck-boost DC-DC converter // Proc. Int. Conf. on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE). Shillong, India, 2015. doi: 10.1109/EPETSG.2015.7510125
 17. Abdelsalam A.K., Ahmed S. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids // IEEE Transactions on Power Electronics. 2011. V. 26. N 4. P. 1010–1021. doi: 10.1109/TPEL.2011.2106221
 18. Jain S., Vaibhav A., Goyal L. Comparative analysis of MPPT techniques for PV in domestic applications // Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf., PIICON. Delhi, India, 2014. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117636
 19. Nejila V.P., Selvakumar A.I. Fuzzy-logic based hill-climbing method for maximum power point tracking in PV systems // Proc. Int. Conf. on Power, Energy and Control (ICPEC). 2013. P. 8–13. doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527614
 20. Aranibar L.A.Q. Learning Fuzzy Logic from Examples. Master's Thesis. Athens, 1994. 198 p.
 21. Gupta A., Kumar P., Pachauri K.P., Chauhan Y.K. Performance analysis of neural network and fuzzy logic based MPPT techniques for solar PV systems // Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. (PIICON). Delhi, India, 2014. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117722
 22. Xiaoe Z., Jinmei W., Jinsong L. Simulation research on the MPPT of the PV cells based on fuzzy control // Proc. 4th Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Engineering Applications. Zhangjiajie, China, 2013. P. 561–564. doi: 10.1109/ISDEA.2013.533
 23. Sahin M.E., Okumus H.I. A fuzzy-logic controlled PV powered buck-boost DC-DC converter for battery-load system // Proc. Int. Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications. Trabzon, Turkey, 2012. doi: 10.1109/INISTA.2012.6246974
 24. Noman A.M., Addoweesh K.E., Mashaly H.M. An intelligent FLC method for tracking the maximum power of photovoltaic systems // Proc. IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE. Toronto, Canada, 2014. doi: 10.1109/CCECE.2014.6900926
 25. Chim C.S., Neelakantan P., Yoong H.P., Teo K.T.K. Fuzzy logic based MPPT for photovoltaic modules influenced by solar irradiation and cell temperature // Proc. UKSim 13th Int. Conf. on Computer Modelling and Simulation. Cambridge, 2011. P. 376–381. doi: 10.1109/UKSIM.2011.78
 26. Garg A., Nayak R.S., Gupta S. Comparison of P&O and fuzzy logic controller in MPPT for photo voltaic (PV) applications by using MATLAB/Simulink // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2015. V. 10. N 4. P. 53–62. doi: 10.9790/1676-10415362
 12. Sankarganesh R., Thangavel S. Maximum power point tracking in PV system using intelligence based P&O technique and hybrid cuk converter. *Proc. Int. Conf. on Emerging Trends in Science, Engineering and Technology, INCOSSET*. Tiruchirappalli, India, 2012, pp. 429–436. doi: 10.1109/INCOSSET.2012.6513945
 13. Panda B., Panda B., Hota P.K., Bhuyan S.K. A comparative analysis of maximum power point techniques for photovoltaic system. *Proc. IEEE Power, Communication and Information Technology Conference, PCITC*. Bhubaneswar, India, 2015, pp. 732–737. doi: 10.1109/PCITC.2015.7438093
 14. Boukenoui R., Bradai R., Mellit A., Ghanes M., Salhi H. Comparative analysis of P&O, modified hill climbing-FLC, and adaptive P&O-FLC MPPTs for microgrid standalone PV system. *Proc. Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA*. Palermo, Italy, 2015, pp. 1095–1099. doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418579
 15. Martin A.D., Vazquez J.R. MPPT algorithms comparison in PV systems: P&O, PI, neuro-fuzzy and backstepping controls. *Proc. IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, ICIT*. Seville, Spain, 2015, pp. 2841–2847. doi: 10.1109/ICIT.2015.7125517
 16. Blange R., Mahanta C., Gogoi A.K. MPPT of solar photovoltaic cell using perturb & observe and fuzzy logic controller algorithm for buck-boost DC-DC converter. *Proc. Int. Conf. on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth, ICEPE*. Shillong, India, 2015. doi: 10.1109/EPETSG.2015.7510125
 17. Abdelsalam A.K., Ahmed S. High-performance adaptive perturb and observe MPPT technique for photovoltaic-based microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, vol. 26, no. 4, pp. 1010–1021. doi: 10.1109/TPEL.2011.2106221
 18. Jain S., Vaibhav A., Goyal L. Comparative analysis of MPPT techniques for PV in domestic applications. *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf., PIICON*. Delhi, India, 2014. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117636
 19. Nejila V.P., Selvakumar A.I. Fuzzy-logic based hill-climbing method for maximum power point tracking in PV systems. *Proc. Int. Conf. on Power, Energy and Control, ICPEC*, 2013, pp. 8–13. doi: 10.1109/ICPEC.2013.6527614
 20. Aranibar L.A.Q. *Learning Fuzzy Logic from Examples*. Master's Thesis. Athens, 1994, 198 p.
 21. Gupta A., Kumar P., Pachauri K.P., Chauhan Y.K. Performance analysis of neural network and fuzzy logic based MPPT techniques for solar PV systems. *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf., PIICON*. Delhi, India, 2014. doi: 10.1109/POWERI.2014.7117722
 22. Xiaoe Z., Jinmei W., Jinsong L. Simulation research on the MPPT of the PV cells based on fuzzy control. *Proc. 4th Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Engineering Applications*. Zhangjiajie, China, 2013, pp. 561–564. doi: 10.1109/ISDEA.2013.533
 23. Sahin M.E., Okumus H.I. A fuzzy-logic controlled PV powered buck-boost DC-DC converter for battery-load system. *Proc. Int. Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*. Trabzon, Turkey, 2012. doi: 10.1109/INISTA.2012.6246974
 24. Noman A.M., Addoweesh K.E., Mashaly H.M. An intelligent FLC method for tracking the maximum power of photovoltaic systems. *Proc. IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, CCECE*. Toronto, Canada, 2014. doi: 10.1109/CCECE.2014.6900926
 25. Chim C.S., Neelakantan P., Yoong H.P., Teo K.T.K. Fuzzy logic based MPPT for photovoltaic modules influenced by solar irradiation and cell temperature. *Proc. UKSim 13th Int. Conf. on Computer Modelling and Simulation*. Cambridge, 2011, pp. 376–381. doi: 10.1109/UKSIM.2011.78
 26. Garg A., Nayak R.S., Gupta S. Comparison of P&O and fuzzy logic controller in MPPT for photo voltaic (PV) applications by using MATLAB/Simulink. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2015, vol. 10, no. 4, pp. 53–62. doi: 10.9790/1676-10415362

Авторы

Мухамбедьяров Бекбол Бокейханович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9055-7122, space_line93@mail.ru

Лукичев Дмитрий Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6507090891, ORCID ID: 0000-0003-2168-3755, ludimit@yandex.ru

Полюга Николай Любомирович – аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0626-6312, van-der-gan@mail.ru

Authors

Bekbol B. Mukhambedyarov – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9055-7122, space_line93@mail.ru

Dmitry V. Lukichev – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6507090891, ORCID ID: 0000-0003-2168-3755, ludimit@yandex.ru

Nikolay L. Polyuga – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0626-6312, van-der-gan@mail.ru