ЭФФЕКТИВНОЕ НЕЧЕТКОЕ ЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Беларусси Уссама¹, В. Ф. Калинин¹, Амел Терки²

*Кафедра «Электроэнергетика», kalinin@tstu.ru;
ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), г. Тамбов, Россия;
Университет имени Мохамеда Хидера (2), г. Бискра,
Алжирская Народная Демократическая Республика*

Ключевые слова: метод «возмущения и наблюдения»; отслеживание точки максимальной мощности; регулятор с нечеткой логикой; фотоэлектрическая система.

Аннотация: Показана важность отслеживания точки максимальной мощности и способы ее достижения. Проанализированы методы «возмущения и наблюдения» и регулятора с нечеткой логикой (РНЛ). Проведено моделирование работы фотоэлектрической системы в различных условиях и рассмотрен принцип ее работы.

Введение

Фотоэлектрическая система состоит из преобразователя постоянного тока, солнечной батареи и аккумулятора постоянного тока. Фотоэлектрические модули (батареи) обладают нелинейными характеристиками по напряжению и току, что затрудняет обеспечение качественной электрической энергией потребителей. Для решения проблемы применяют преобразователи, которыми можно управлять, изменяя рабочий цикл с помощью алгоритма отслеживания точки максимальной мощности (ОТММ).

Метод ОТММ используется для получения максимальной эффективности солнечной батареи при варьировании значений температуры и солнечной радиации. Микроконтроллер, отслеживая точку максимальной мощности, меняет сопротивление, формирует рабочий цикл преобразователя до ее достижения. В последние годы разработано несколько методов, позволяющих эффективно отслеживать точку максимальной мощности [1].

Метод «возмущения и наблюдения» является наиболее часто используемым алгоритмом ОТММ в промышленных фотоэлектрических батареях. Контроллер фотоэлектрической батареи (панели) несколько увеличивает задание выходной мощности инвертора, определяя ее. Если выходная мощность действительно увеличилась, то она будет увеличиваться и дальше, до момента ее уменьшения, когда контроллер меняет задание, чтобы избежать резкого уменьшения мощности фотоэлектрической батареи [2]. Несмотря на то что алгоритм реализации метода «возмущения и наблюдения» прост в исполнении, ему присущ ряд проблем, в том числе продолжение работы в режиме колебаний даже при балансировке, что приводит к выходным колебаниям инвертора, и фотоэлектрическая система может не отследить точку максимальной мощности из-за внезапных изменений в поступлении солнечного света [3, 4].

В последнее время в системах ОТММ используется метод нечеткого управления. Преимущество данного метода управления состоит в его надежности, простоте разработки и отсутствии четких знаний законов регулирования [5, 6].

Оптимизация фотоэлектрической системы выполнялась двумя методами: «возмущения и наблюдения» и регулятора с нечеткой логикой (РНЛ). Рассмотрим принцип работы оптимальной фотоэлектрической системы. В работе приведены результаты, полученные в процессе моделирования с помощью пакета Simulink MATLAB-R2018a.

Фотоэлектрическая система

Схема системы управления ОТММ, используемая для фотоэлектрической системы, показана на рис. 1.

Фотоэлектрический элемент (ФЭ) – элемент солнечной батареи, который функционирует без выброса вредных веществ в атмосферу. Фотоэлектрический модуль состоит из нескольких ФЭ, соединенных последовательно для повышения напряжения или параллельно для увеличения тока.

Каждый ФЭ можно смоделировать с использованием источника тока, диода и двух резисторов, называемых последовательным сопротивлением и шунтирующим сопротивлением. Также можно использовать модели с двумя диодами. Далее рассмотрим эквивалентную модель ФЭ с одним диодом (рис. 2) [7].

Основным блоком фотоэлектрических батарей (панелей) является ФЭ, который представляет собой полупроводниковый (p-n)-переход.

Модель фотоэлектрической панели определяет уравнение

$$I = I_{sc} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{(V + R_s I)}{R_{sh}}, \tag{1}$$

где I , I_{sc} , I_0 – токи фотоэлектрической батареи соответственно выходной, короткого замыкания и обратный ток насыщения; R_s – последовательное сопротивление

Рис. 1. Схема системы управления ОТММ

Рис. 2. Эквивалентная модель фотоэлемента

фотоэлектрической батареи; V_{th} – напряжение фотоэлектрической матрицы; R_{sh} – эквивалентное сопротивление шунта фотоэлектрической батареи.

Напряжение V_{th} и ток обратного насыщения I_0 последовательно идентифицируются с помощью [8]:

$$V_{th} = \frac{(V_{mp} + R_s I_{mp} - V_{oc})}{\log\left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}}\right)}, \quad (2)$$

где V_{mp} – напряжение; I_{mp} – выходной ток;

$$I_0 = (I_{sc} - I_{mp}) \exp\left(\frac{(V_{mp} + R_s I_{mp})}{V_{tn}}\right). \quad (3)$$

Усилительный инвертор предпочтителен для работы фотоэлектрических панелей и обычно используется в системах ОТММ для достижения максимальной мощности солнечной батареи, несмотря на периодическое изменение солнечного освещения [9]. Инвертор тока спроектирован с использованием пакета Simulink MATLAB-R2018a (рис. 3).

Функция инвертора заключается в управлении выходным напряжением V_o инвертора. Если величина рабочего цикла D для получения импульсов широтно-импульсной модуляции находится в диапазоне менее 0,5, инвертор понижает входное напряжение V_{in} . В случае, когда величина рабочего цикла D лежит в диапазоне более 0,5, инвертор повышает V_{in} . Данный процесс подтверждает уравнение

$$V_o = -V_{in} \left(\frac{D}{1-D} \right). \quad (4)$$

Когда инвертор работает в непрерывном режиме, минимальное значение индуктивности можно определить для нагрузки R с помощью определенной частоты переключения f_s

$$L_{min} = \frac{R(1-D)^2}{2f_s}. \quad (5)$$

В схему инвертора входит конденсатор [10]

$$C = \frac{D}{Rf_s \Delta V_o}, \quad (6)$$

где ΔV_o – пульсация V_o .

Рис. 3. Инвертор тока, спроектированный в Simulink MATLAB-R2018a

Отслеживание точки максимальной мощности

Метод «возмущения и наблюдения». Блок-схема метода «возмущения и наблюдения» изображена на рис. 4.

Регулятор с нечеткой логикой. Управление с помощью РНЛ состоит из трех этапов (рис. 5):

- фазификация;
- считывание «база правил – таблицы истинности»;
- дефазификация.

Данные лингвистические высказывания сводят в табл. 1, где μ_e и $\mu_{\Delta e}$ – соответственно сигналы ошибки и ее изменения после нормализации [10].

Входными параметрами РНЛ являются E и ΔE :

$$E(n) = \frac{P(n) - P(n-1)}{V(n) - V(n-1)}; \tag{7}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1). \tag{8}$$

Рис. 4. Блок-схема метода «возмущения и наблюдения»

Рис. 5. Структурная схема регулятора с нечеткой логикой

Таблица 1

База правил регулятора с двумя входными сигналами

μ_e	$\mu_{\Delta e}$				
	BN	N	Z	P	BP
BN	BN	BN	N	N	Z
N	BN	N	N	Z	P
Z	N	N	Z	P	P
P	N	Z	P	P	BP
BP	Z	P	P	BP	BP

Результаты моделирования с использованием Simulink MATLAB-R2018a

На рисунке 6 представлена блок-схема системы для проведения исследований, показывающая все необходимые элементы – два входа, ввод температуры и переменного светового освещения (рис. 7), и позволяющая определить основные характеристики солнечной панели. Графики зависимости тока $I = f(V)$ и мощности $P = f(V)$ батареи от напряжения V представлены на рис. 8.

Моделирование выполняется с помощью фотоэлектрического модуля, максимальная мощность которого 213,15 Вт, ток короткого замыкания I_{sc} 7,84 А и напряжение холостого хода V 36,3 В. В стандартных условиях испытания освещенности ($G = 1000$ Вт/м²) температура (нормальная рабочая температура ячейки) 25 °С с импульсным прерывателем ($C1 = C2 = 2000$ мкФ; $L = 1$ мГн).

По результатам, полученным в процессе моделирования по методу «возмущения и наблюдения», обнаруживаются две основные проблемы: колебания точки максимальной мощности в установившемся режиме и плохое ее отслеживание при быстро меняющемся солнечном освещении (рис. 9 – 11).

Рис. 6. Блок-схема эксперимента в Simulink MATLAB-R2018a

Рис. 7. Инсоляция – освещенность

Рис. 8. Графики зависимости тока I (а) и мощности P (б) батареи от напряжения V

Рис. 9. Графики зависимости тока I (а), напряжения V (б) от времени солнечного освещения t , полученные по методу «возмущения и наблюдения» (начало)

Рис. 9. Окончание. График зависимости мощности $P(\epsilon)$

Рассмотрим синтезированный РНЛ (рис. 10), входными данными которого являются E и dE . Изменение D (рабочий цикл) является выходным параметром. На рисунке 11 показана база правил (нечеткие правила), созданная в работе на основе интуитивных рассуждений и опыта. Графики функций принадлежности входных переменных E и dE совпадают. Сокращения: big negative BN – большое отрицательное, negative N(NP) – отрицательное, zero Z(ZE) – ноль, positive P(PP) – положительное, big positive BP – большое положительное. При использовании РНЛ для фотоэлектрической системы, по результатам рис. 12 видно, что проблема колебания точки максимальной мощности отсутствует. Точка максимальной мощности хорошо отслеживается при меняющемся солнечном освещении.

Рис. 10. Поверхность синтезированного РНЛ

Рис. 11. Графики функций принадлежности:
а – входных переменных E и dE ; б – выходной переменной dU

Рис. 12. Графики зависимости тока I (а), напряжения V (б) и мощности P (в) от времени солнечного освещения t , полученные по методу РНЛ

Заключение

В результате моделирования фотоэлектрической системы в Simulink MATLAB-R2018a сделаны следующие выводы. При применении РНЛ наблюдается высокая производительность с незначительными колебаниями напряжения постоянного тока и быстрое достижение точки максимальной мощности. Работа, проверка и контроль режимов фотоэлектрической системы с РНЛ выполнены при фиксированной температуре с переменной освещенностью. Контроллер с ОТММ, работающий на основе РНЛ, обеспечивает более высокую среднюю мощность во всех условиях.

Алгоритм метода «возмущения и наблюдения» использует не точную мощность солнечной панели, а пропорциональную разницу в ее мощности. Эффективность метода «возмущения и наблюдения» состоит в том, что даже при низких уровнях светового облучения, он обнаруживает точку максимальной мощности.

Список литературы

1. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System by Using Fuzzy Neural Network / Waleed I. Hameed, Ameer L. Saleh, Baha A. Sawadi [et al.] // *Inventions*. – 2019. – Vol. 4. – P. 33.
2. Design and Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic Controller in Maximum Power Point Tracking System for PV System by Using Matlab/Simulink / Gülsüm Nazlı Arpacı, Haluk Gözde, M. Cengiz Taplamacıoğlu // *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*. – 2019. – Vol. 3, Issue 1. – P. 66 – 71.
3. Mohanad, H. M. Comparative Study of Perturb & Observe, Modified Perturb & Observe and Modified Incremental Conductance MPPT Techniques for PV Systems / H. M. Mohanad, I. A. Inaam, A. A. Oday // *Engineering and Technology Journal*. – 2020. – Vol. 38, No. 4, Part A. – P. 478 – 490.
4. Bennacer, El H. Critical Study of Several MPPT Techniques for Photovoltaic Systems / El H. Bennacer, A. Haddi, A. G. Amrani // *Journal of Mechatronics and Robotics*. – 2019. – Vol. 3, No. 1. – P. 269 – 279.
5. Reddy, J. Control and Analysis of MPPT Techniques for Standalone PV System with High Voltage Gain Interleaved Boost Converter / J. Reddy, S. Natarajan // *Gazi University Journal of Science*. – Vol. 31(2). – P. 515 – 530.
6. Venkatesan, P. Application of Fuzzy Logic Controller to Solar Energy Conversion System with Sepic Converter / P. Venkatesan, S. Kannan // *Compliance Engineering Journal*. – 2020. – Vol. 11, Issue 2. – P. 214 – 223.
7. Lagdani, O. An Optimization Of Perturb And Observe Mppt Algorithm Based On Fuzzy Logic For Pv System / O. Lagdani, M. Trihi, B. Bossoufi // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. – 2019. – Vol. 97, No. 19. – P. 5061 – 5069.
8. Terki, Amel. Design of ANFIS Estimator of Permanent Magnet Brushless DC Motor Position for PV Pumping System / Amel Terki, Ammar Moussi, Nadjiba Terki // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. – 2015. – Vol. 6, No. 10. – P. 136 – 142.
9. Hussain, A. A. High Performance PV System Based on Artificial Neural Network MPPT with PI Controller for Direct Current Water Pump Applications / A. A. Hussain // *International Journal of Power Electronics and Drive System*. – 2019. – Vol. 10, No. 3. – P. 1329 – 1338.
10. Демидова, Г. Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г. Л. Демидова, Д. В. Лукичев. – М. : Университет ИТМО, 2017. – 81 с.

Effective Fuzzy Logical Control for Photoelectric System Optimization

Belarussi Ussama¹, V. F. Kalinin¹, Amel Terki²

*Department of Power Engineering, kalinin@tstu.ru; TSTU (1), Tambov, Russia;
Mohamed Heder University (2), Biskra, Algerian People's Democratic Republic*

Keywords: “disturbance and observation” method; tracking the point of maximum power; fuzzy logic regulator; photoelectric system.

Abstract: The article shows the importance of tracking the point of maximum power and ways to achieve it. Methods of “perturbation and observation” and a fuzzy logic regulator (FLR) are analyzed. The modeling of the photovoltaic system operation in various conditions is carried out and the principle of its operation is considered.

References

1. Hameed Waleed I., Saleh Ameer L., Sawadi Baha A., Al-Yasir Yasir I.A., Abd-Alhameed Raed A. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System by Using Fuzzy Neural Network, *Inventions*, 2019, vol. 4, p. 33.
2. Arpaci Gülsüm Nazlı, Gözde Haluk, Taplamacioğlu M. Cengiz Design and Comparison of Perturb & Observe and Fuzzy Logic Controller in Maximum Power Point Tracking System for PV System by Using Matlab/Simulink, *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2019, vol. 3, issue 1, pp. 66-71.
3. Mohanad H.M., Inaam I.A., Oday A.A. Comparative Study of Perturb & Observe, Modified Perturb & Observe and Modified Incremental Conductance MPPT Techniques for PV Systems, *Engineering and Technology Journal*, 2020, vol. 38, no. 4, part A, pp. 478-490.
4. Bennacer El H., Haddi A., Amrani A.G. Critical Study of Several MPPT Techniques for Photovoltaic Systems, *Journal of Mechatronics and Robotics*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 269-279.
5. Reddy J., Natarajan S. Control and Analysis of MPPT Techniques for Standalone PV System with High Voltage Gain Interleaved Boost Converter, *Gazi University Journal of Science*, vol. 31(2), pp. 515-530.
6. Venkatesan P., Kannan S. Application of Fuzzy Logic Controller to Solar Energy Conversion System with Sepic Converter, *Compliance Engineering Journal*, 2020, vol. 11, issue 2, pp. 214-223.
7. Lagdani O., Trihi M., Bossoufi B. An Optimization Of Perturb And Observe Mpppt Algorithm Based On Fuzzy Logic For Pv System, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2019, vol. 97, no. 19, pp. 5061-5069.
8. Terki Amel, Moussi Ammar, Terki Nadjiba Design of ANFIS Estimator of Permanent Magnet Brushless DC Motor Position for PV Pumping System, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2015, vol. 6, no. 10, pp. 136-142.
9. Hussain A.A. High Performance PV System Based on Artificial Neural Network MPPT with PI Controller for Direct Current Water Pump Applications, *International Journal of Power Electronics and Drive System*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1329-1338.
10. Demidova G.L., Lukichev D.V. *Regulyatory na osnove nechetkoy logiki v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi ob'yektami* [Regulators based on fuzzy logic in control systems for technical objects], Moscow: Universitet ITMO, 2017, 81 p. (In Russ.)

Effektive Fuzzy-Logik-Steuerung zur Optimierung der Photovoltaikanlage

Zusammenfassung: Im Artikel wird gezeigt, wie es wichtig ist, den Punkt maximaler Leistung zu verfolgen und Wege zu finden, um dies zu erreichen. Methoden der “Störung und Beobachtung” und eine Fuzzy-Logik-Steuerung (FLS) sind analysiert. Die Modellierung des Betriebs der Photovoltaikanlage unter verschiedenen Bedingungen ist durchgeführt und das Funktionsprinzip ihrer Arbeit ist betrachtet.

Commande logique floue efficace pour optimiser le système photo-électrique

Résumé: Est montrée l'importance de suivre le point de la puissance maximale et les moyens de l'atteindre. Sont analysées les méthodes de “perturbation et observations” ainsi que du régulateur à logique floue (RLF). Est examiné le modélage du fonctionnement du système photo-électrique dans diverses conditions; est étudié le principe de son fonctionnement.

Авторы: *Уссама Беларусси* – аспирант кафедры «Электроэнергетика»; *Калинин Вячеслав Федорович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Электроэнергетика», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия; *Терки Амел* – доктор наук, научный консультант, Университет имени Мохамеда Хидера, г. Бискра, Алжирская Народная Демократическая Республика.

Рецензент: *Муромцев Дмитрий Юрьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», проректор по научно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия