

Aleksander ZAREMBA¹, Tadeusz RODZIEWICZ² i Maria WACŁAWEK²

ALGORYTMY ŚLEDZENIA PUNKTU MOCY MAKSYMALNEJ (MPPT) W SYSTEMACH FOTOWOLTAICZNYCH

ALGORITHMS OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstrakt: Przedstawiono przegląd podstawowych metod śledzenia punktu mocy maksymalnej w systemach fotowoltaicznych, tj.: metody pośrednie oraz bezpośrednie. Zagadnienie to jest bardzo ważne w nowoczesnych systemach fotowoltaicznych, ponieważ pozwala ono na zoptymalizowanie uzysku energii przy danych parametrach wejściowych (napromieniowanie, warunki pogodowe, temperatura itp.). Pokazano sposób działania poszczególnych algorytmów, a dla wybranych podano wzory opisujące ich działanie. Przeanalizowano słabe i silne strony wybranych metod oraz możliwości ich zastosowania w nowoczesnych systemach fotowoltaicznych.

Słowa kluczowe: metody śledzenia, punkt mocy maksymalnej, systemy fotowoltaiczne

Bardzo ważnym zagadnieniem w pracy falownika jest znalezienie miejsca na charakterystyce prądowo-napięciowej modułu (modułów), w którym generuje on największą moc [1]. Ten punkt jest nazywany punktem mocy maksymalnej MPP (*Maximum Power Point*). Jego położenie jest zależne od wielu zmiennych parametrów: natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia, płaszczyzny położenia modułu itp. Często są to parametry trudne do zmierzenia, np. wzmagaający się wiatr powoduje zmniejszenie temperatury modułu, ale nie ma wpływu na jego oświetlenie. Dlatego też powstało wiele metod, które pozwalają znaleźć punkt mocy maksymalnej, gdy do dyspozycji jest tylko zmieniająca się charakterystyka I-V lub P-V. Zagadnienie to często określane jest skrótem MPPT (*Maximum Power Point Tracking*).

Do tego typu poszukiwań nie wystarczają tradycyjne falowniki, muszą one zostać ulepszone poprzez instalację aparatury pomiarowej oraz kontrolera pozwalającego manipulować charakterystyką prądowo-napięciową lub położeniem punktu pracy modułu na niej. Jako metoda symulacji zmiennej impedancji jest często używana modulacja szerokości impulsu przy wysokiej częstotliwości PWM (*Pulse Width Modulation*), połączona z kontrolą sygnału przez mikroprocesor.

Metody MPPT dzielimy na metody pośrednie, bezpośrednie oraz metody wykorzystujące sztuczną inteligencję [2, 3].

Metody pośrednie

Do metod pośrednich należą:

Metoda wykorzystująca pomiary napięcia obwodu otwartego generatora fotowoltaicznego (*Open-circuit voltage photovoltaic generator method*) - algorytm ten

¹ Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Wydział Elektryczny, Politechnika Częstochowska, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, email: zaremba@el.pcz.czyst.pl

² Zakład Badań Fizykochemicznych, Wydział Przyrodniczo-Techniczny, Uniwersytet Opolski, ul. kard. B. Kominka 6, 45-032 Opole, tel. 77 453 89 76, fax 77 455 91 49, email: trodziewicz@wp.pl, maria.waclawek@uni.opole.pl

korzysta z liniowej (w przybliżeniu) zależności między wartością napięcia w punkcie mocy maksymalnej i napięciem obwodu otwartego. Współczynnik proporcjonalności zależy od materiału i technologii, w jakiej wykonano moduł, oraz od warunków klimatycznych:

$$\frac{V_{MPP}}{V_{OC}} = \text{const} \quad (1)$$

Metoda ta polega na chwilowym przerwaniu pracy generatora PV, pomiarze V_{OC} , obliczeniu V_{MPP} z ww. zależności oraz dostosowaniu napięcia pracy do obliczonego V_{MPP} . Wadami tej metody są: potrzeba przerywania pracy generatora na czas pomiaru (i towarzyszące temu straty energii) oraz związane ze starzeniem się zmiany wpływu temperatury i napromieniowania na charakterystykę modułów. Z drugiej strony jest to metoda prosta (wykorzystuje tylko jedną pętlę sprzężenia zwrotnego) i tania.

Metoda wykorzystująca pomiary prądu zwarcia generatora fotowoltaicznego (*Short-circuit photovoltaic generator method*) - ta metoda wykorzystuje podobną zależność jak wcześniejsza, tylko odnosząc się do prądu w punkcie mocy maksymalnej i prądu zwarcia. Zalety, wady oraz ograniczenia tych metod są bardzo podobne.

Istnieją również sposoby na ominięcie ograniczeń dwóch poprzednich metod, np. zastosowanie do pomiarów napięcia obwodu otwartego dodatkowego ogniwa wykonanego w tej samej technologii i z tych samych materiałów co generator PV. W związku z tym nie istnieje potrzeba wyłączania całego generatora na czas pomiaru. Jednak metoda ta powoduje dodatkowe trudności w przypadku „rozregulowania” charakterystyki ogniwa testowego lub choćby minimalnie innych warunków napromieniowania (spowodowane to może być złym zamocowaniem lub nawet zabrudzeniem).

Metoda dopasowania krzywej (*Curve-fitting method*) - korzysta z zależności mocy modułu P_{PV} od napięcia modułu V_{PV} :

$$P_{PV} = aV_{PV}^3 + bV_{PV}^2 + cV_{PV} + d \quad (2)$$

gdzie: a, b, c, d - parametry uzyskane eksperymentalnie.

Wtedy napięcie w punkcie mocy maksymalnej wynosi:

$$V_{MPP} = \frac{-b\sqrt{b^2 - 3ac}}{3a} \quad (3)$$

Dokładność tej metody zależy od jak najczęściej dokonywanych pomiarów parametrów generatora PV (nawet co kilka milisekund), co może być problematyczne. Wadami tej metody są: potrzeba dokładnej znajomości parametrów opisujących ogniwo (zarówno związanych z materiałem, jak i z technologią wykonania ogniwa) oraz to, że nie można jej stosować do dowolnych warunków klimatycznych. Poza tym metoda wymaga zarchiwizowania dużej ilości pamięci na wykonywanie operacji matematycznych.

Metoda porównywania z tabelą (*Lookup table*) - metoda ta polega na pomiarze prądu oraz napięcia ogniwa i porównaniu ich z wartościami zapisanymi wcześniej w tabeli (a odpowiadającymi pracy w MPP dla danych warunków klimatycznych). Wadą tej metody jest konieczność przechowywania dużej bazy danych dla konkretnego modułu (modułów). Dodatkowo nie da się przewidzieć wszystkich warunków klimatycznych.

Metody pośrednie wykorzystują wcześniej zdefiniowane wartości, co powoduje, że nie są odporne ani na zmiany warunków klimatycznych (należy pamiętać, że czas życia systemu fotowoltaicznego to około 25 lat), ani na zmiany zachodzące w samych generatorach PV (procesy starzenia, potrzeba wymiany uszkodzonych modułów itp.). Jest to podstawowa wada tych metod, jednak są one stosunkowo proste w implementacji i tanie.

Metody bezpośrednie

Metody bezpośrednie polegają na pomiarach parametrów generatora oraz ich zmianach w ten sposób, aby znaleźć optymalny punkt pracy. Mają one przewagę nad metodami pośrednimi, ponieważ nie wymagają wcześniejszej znajomości charakterystyk generatora. Działają one w danych warunkach na danej charakterystyce, a ich założenia są zazwyczaj niezależne od warunków klimatycznych oraz zmian zachodzących w generatorze. Do metod tych można zaliczyć:

Metodę różnicową (*Differentiation method*) - znalezienie punktu mocy maksymalnej w tej metodzie polega na rozwiązaniu dwóch równań:

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = V_{PV} \quad (4)$$

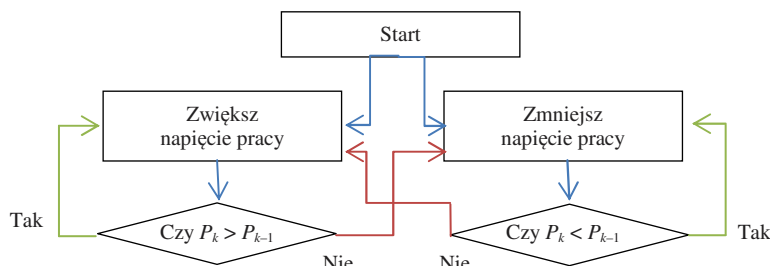
$$\frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dt} = 0 \quad (5)$$

W metodzie tej, jeśli wynikiem drugiego równania nie jest zero, sprawdzamy znak tego rozwiązania i w zależności od niego zmieniamy punkt pracy generatora (jeśli dodatni, to należy zwiększyć napięcie pracy, jeśli ujemny, to zmniejszyć). W metodzie tej wymagane jest jak najszybsze znalezienie rozwiązania równań, co może być problematyczne ze względu na ich komplikację oraz to, że muszą zostać wykonane najpierw pomiary prądu, napięcia, mocy generatora, ich zmiany w czasie i samego czasu.

Metodę zaburzania i obserwacji - P&O (*Perturbation and observe method*) - polega ona na wymuszonych zmianach napięcia pracy generatora fotowoltaicznego i obserwacji odpowiadających im zmian mocy tego generatora. Jeżeli moc wzrasta, to zmiany napięcia należy kontynuować w tym samym kierunku (zwiększać lub zmniejszać), natomiast jeżeli moc maleje, należy zmienić kierunek zmian napięcia pracy (jeżeli zwiększaliśmy napięcie, należy zacząć je zmniejszać i analogicznie dla drugiego przypadku) (rys. 1). Problemem tej metody [4] jest bardzo szybka zmiana wartości napromieniowania (w stosunku do czasu pomiaru), która może powodować, że generator będzie działał na nieaktualnych danych. Z drugiej strony skrócenie okresu zmian i obserwacji wymagać będzie użycia bardziej skomplikowanych metod obliczeniowych oraz urządzeń pomiarowych. Dodatkową trudnością jest to, że przy stałym napromieniowaniu moc generatora oscyluje wokół punktu MPP. Mimo tych zastrzeżeń metoda ta jest szeroko stosowana, ponieważ można ją implementować zarówno w rozwiązaniach z falownikami, jak i w systemach stałoprądowych. Wydaje się, że jest to metoda najbardziej rozpowszechniona w systemach obecnie projektowanych i budowanych.

Metoda ta doczekała się wielu poprawek i ulepszeń, np. zaproponowana przez Junga, So i in. [6] (*Improved perturbation and observation method (IP&O)*), polegająca na

zastosowaniu algorytmu adaptacyjnego, który dostosowuje wielkość zmian do szerokości pasma histerezy badanej mocy. Zastosowano procesor sygnałowy, który kontroluje konwerter DC/DC w systemie. Zastosowanie tej metody spowodowało wzrost mocy o 0,5% i lepsze dostosowanie do zmiennych warunków klimatycznych.



Rys. 1. Schemat działania metody P&O (P_k - moc w danej chwili, P_{k-1} - moc w chwili poprzedniej) [5]

Fig. 1. Diagram of operation of P&O method (P_k - power at a given moment, P_{k-1} - power at a previous moment) [5]

Innym ulepszeniem tej metody jest zaproponowana przez Hohna i in. [7] tzw. zmodyfikowana metoda (*Modified P&O (MP&O)*). Modyfikacja polega na wprowadzeniu, w co drugim kroku sprawdzenia, zmiany mocy przy poprzedniej zmianie napięcia i warunków atmosferycznych (w tym kroku napięcie nie jest zmieniane). Wadą tej metody jest dwukrotne spowolnienie pracy (co drugi krok tylko sprawdza moc), jednak ta metoda lepiej działa przy szybko zmieniającym się napromieniowaniu. W celu przyspieszenia można sprawdzania dokonywać w co trzecim kroku [8].

Metoda przyrostów przewodności - C.I. (*Conductance incremental method*) [2, 9] - w metodzie tej wychodząc z równania na moc jako funkcji napięcia i przyrównując jej różniczkę do zera (charakterystyka ta ma maksimum):

$$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} \frac{dV_{PV}}{dV_{PV}} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = I_{PV} + V_{PV} \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} = 0 \quad (6)$$

otrzymuje się równanie

$$-\frac{I_{PV}}{V_{PV}} = \frac{dI_{PV}}{dV_{PV}} \quad (7)$$

Lewa strona równania jest chwilową konduktancją, a prawa „powiększoną” konduktancją. Zastępując wyrażenia różniczkowe dV , dI różnicowymi $\Delta V = V(t_2) - V(t_1)$, $\Delta I = I(t_2) - I(t_1)$, uzyskujemy wyniki działania zapisane w tabeli 1.

Metoda ta w porównaniu z metodą P&O znacznie lepiej radzi sobie z szybkimi zmianami napromieniowania oraz ma o wiele mniejsze oscylacje wokół punktu MPP przy stałych warunkach klimatycznych. Jednak jej wadą jest potrzeba kompleksowych pomiarów systemu, co związane jest z dużymi kosztami. Istnieją również ulepszenia tej metody zwiększające jej dokładność, jak np. metoda pojemności pasożytniczej, która, jak nazwa wskazuje, bierze jeszcze pod uwagę pojemność pasożytniczą ogniwa.

Sposób działania metody C.I.

Tabela 1

Principle of operation of C.I. method

Table 1

Wartość różniczki mocy	Napięcie pracy
$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} < 0$	$V_{PV} > V_{MPP}$
$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} = 0$	$V_{PV} = V_{MPP}$
$\frac{dP_{PV}}{dV_{PV}} > 0$	$V_{PV} < V_{MPP}$

Metoda tzw. wymuszonych oscylacji (*Forced oscillations methods*) - polega ona na dodaniu do sygnału z generatora PV napięcia o małej amplitudzie oraz częstotliwości (np. 100 Hz [10]) i obserwacji odpowiedzi na charakterystyce mocy w funkcji napięcia. Jeżeli zmiany w charakterystyce mocy są w fazie z dodanym sygnałem, to należy zwiększyć napięcie pracy, jeżeli są przesunięte o 180°, to napięcie należy zmniejszyć. Natomiast w punkcie mocy maksymalnej częstotliwość zmian jest dwa razy większa niż zadanego sygnału. Wpływ na szybkość przesuwania się do punktu MPP ma też amplituda zmian charakterystyki P-V (im bliżej MPP, tym zmiany są mniejsze, przy stałym sygnale zadanym). Zaletą tej metody jest to, że analiza fazy i amplitudy daje nam informację o położeniu MPP oraz to, że pozwala zbliżyć się do punktu bardzo powoli. Ponadto nie występują oscylacje wokół MPP, które mają miejsce przy poprzednich metodach. Wadą są trudności pracy przy niskiej mocy generatora (słabe napromieniowanie) oraz komplikacja układu generującego i mierzącego oscylacje.

Metody wykorzystujące sztuczną inteligencję - metody te pozwalają na nieużywanie dokładnych modeli matematycznych, ale poprzez wcześniej zaimplementowane wagi starają się dopasować do zmieniających warunków pracy systemu. Metody te, wykorzystując różne zmierzone parametry (napięcie, prąd, moc itp.) oraz dzięki możliwości adaptacji, dążą do znalezienia jak najszybszej drogi do osiągnięcia MPP. Dzięki zastosowaniu sieci neuronowych oraz logiki rozmytej kontrolery wykorzystujące te algorytmy osiągają o wiele dokładniejsze odwzorowanie punktu mocy maksymalnej niż konwencjonalne metody (tak pośrednie, jak i bezpośrednie).

Podsumowanie

Metody śledzenia MPP są cały czas ulepszone, jednak dwie grupy: pośrednie i bezpośrednie świetnie się uzupełniają (metody pośrednie, których zaletą jest niski koszt implementacji, a wadą niezbyt dokładne znajdowanie punktu mocy maksymalnej oraz bezpośrednio, droższe, natomiast zdecydowanie lepiej radzące sobie z lokalizacją tego punktu). Jednak zawsze zastosowanie tych metod przynosi wymierne efekty w postaci zwiększenia uzysku energii z generatora PV. Ciągłe zmniejszanie cen urządzeń do kontroli i śledzenia MPP tylko polepsza ich wyniki. Oczywiście w zależności od spodziewanej produkcji energii fotowoltaicznej należy zastosować odpowiednią metodę (koszty muszą się zwrócić, a zysk jest zawsze procentem od zainstalowanej mocy). Dlatego też stosowanie

tych metod jest opłacalne nie tylko ze względów technologicznych, ale przy odpowiednim dobraniu metody także finansowych.

Literatura

- [1] Grzesiak W, Radziemska E. Technika MPPT sposobem maksymalizacji wykorzystania energii elektrycznej generowanej przez moduły fotowoltaiczne. *Elektronika - konstrukcje, technologie, zastosowania*. 2010;51(5):42-49.
- [2] Salas V, Olías E, Barrado A, Lázaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems. *Solar Energy Mater and Solar Cells*. 2006;90(11):1555-1578. DOI: 10.1016/j.solmat.2005.10.023.
- [3] Chao KH, Li CJ. An intelligent maximum power point tracking method based on extension theory for PV systems. *Expert Systems with Applications*. 2010;37(2):1050-1055. DOI: 10.1016/j.bbr.2011.03.031.
- [4] Hussein KH, Muta I, Hoshino T, Osakada M. Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions. *IEE Proc. Generation Transmission Distrib*. 1995;142(1):59-64. DOI: 10.1049/ip-gtd:19951577.
- [5] <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8106>.
- [6] Jung Y, So J, Yu G, Choi J. Improved perturbation and observation method (IP&O) of MPPT control for photovoltaic power systems. *Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Thirty-first IEEE*. 2005;1788-1791.
- [7] Hohm DP, Ropp ME. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. *Progress in Photovoltaics: Res and Applicat*. 2003;11:47-62. DOI: 10.1002/pip.459.
- [8] Liu C, Wu B, Cheung R. Advanced algorithm for MPPT control of photovoltaic systems. *Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, August 20-24, 2004*.
- [9] Hua C, Shen C. Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage systems. *Proc IEEE Applied Power Electronics Conf. and Expo. (APEC'98)* 1998;697-685.
- [10] Tse KK, Chung HSH, Hui SYR, Ho MT. A novel maximum power point tracking technique for PV panels. *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC 2001 IEEE*. 2001;4:1970-1975. DOI: 10.1109/PESC.2001.954410.

ALGORITHMS OF MAXIMUM POWER POINT TRACKING IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

¹Institute of Industrial Electrotechnics, Faculty of Electrical Engineering, Czestochowa University of Technology

²Division of Physicochemical Research, Faculty of Natural and Technical Sciences, Opole University

Abstract: Paper shows an overview of the basic algorithms of maximum power point tracking (MPPT) in the photovoltaic systems, *ie* the direct and indirect methods. This issue is very important in modern photovoltaic systems because it allows to optimize the energy yield for given input parameters (irradiation, weather conditions, temperature, etc.). Paper shows how the different algorithms work, and for selected models gives equations describing their results. Also examines the strengths and weaknesses of selected methods and their applicability in modern photovoltaic systems.

Keywords: tracking algorithms, maximal power point, photovoltaic systems