



**DARIUSZ SOBCZYŃSKI<sup>1</sup>, JACEK BARTMAN<sup>2</sup>**

## **Śledzenie punktu mocy maksymalnej w wiatrowych i solarnych autonomicznych systemach przekształcania energii**

---

### **Maximum Power Point Tracking Methods in Wind and Solar Conversion Systems for Standalone Generation**

<sup>1</sup> Doktor inżynier, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Polska

<sup>2</sup> Doktor inżynier, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Katedra Inżynierii Komputerowej, Polska

#### **Streszczenie**

W kształceniu inżynierów na kierunku energetyka realizowanym na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej szczególną wagę przykładają się do znajomości odnawialnych nośników energii. W niniejszym artykule przeanalizowano różne techniki MPPT omawiane w ramach przedmiotu „niekonwencjonalne źródła energii”. Wykorzystanie OZE wymaga zastosowania przekształtników energoelektronicznych. Moc generowana przez moduły fotowoltaiczne czy też generatory wiatrowe jest zależna od tego, w jakim punkcie charakterystyki prądowo-napięciowej pracują. Za kontrolę optymalnych wartości napięcia i natężenia prądu, dla których moc generowana przez moduł PV jest najwyższa, odpowiada algorytm śledzenia punktu mocy maksymalnej (MPPT).

**Słowa kluczowe:** metody MPPT, energia wiatru, energia słoneczna, przekształtniki energoelektroniczne

#### **Abstract**

In education in the majoring of Energetics at the Faculty of Electrical and Computer Engineering of Rzeszow University of Technology, special attention is paid to the knowledge of renewable energy carriers. This article explores various MPPT techniques lectured in “Unconventional energy sources”. The use of renewable energy resources requires the use of energy converters. The power generated by photovoltaic modules or wind generators is dependent on the point at which the current-voltage characteristics work. For control of the optimum voltage and current values for which the power produced by the PV module is highest, the MPPT algorithm is the equivalent of the maximum power point tracking (MPPT) algorithm.

**Keywords:** MPPT methods, wind energy, solar energy, power electronics converters

## Wstęp

Studenci kierunku energetyka na drugim roku studiów na semestrze trzecim wybierają przedmiot „niekonwencjonalne źródła energii”. Zagadnienia prezentowane w artykule dotyczą istotnych treści prezentowanych w ramach wymienionego przedmiotu. Przytoczone wiadomości odgrywają kluczową rolę w praktycznym wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii.

Istnieje kilka typów technik MPPT odpowiednich dla systemów fotowoltaicznych i generatorów wiatrowych. Dla systemów fotowoltaicznych można wyróżnić metody pośrednie, bezpośrednie oraz metody ze sztuczną inteligencją (Salas, Olías, Barrado, Lázaro, 2006, s. 1555–1578). Podobny podział stosowany jest w przypadku technik MPPT przeznaczonych dla generatorów wiatrowych (tutaj stosowany jest również podział na metody o stałej i zmiennej prędkości (Vijayalakshmi, Ganapathy, Vijayakumar, Dash, 2015, s. 357–372).

## System fotowoltaiczny – MPPT metody pośrednie

### *Metoda dopasowania krzywej P-U*

Nieliniową charakterystykę  $P-U$  ogniwa PV można modelować, wykorzystując równania matematyczne lub przybliżenia liczbowe (Takashima, Tanaka, Amano, Ando, 2000):

$$P_{PV} = aU_{PV}^3 + bU_{PV}^2 + cU_{PV} + d,$$

gdzie  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  są współczynnikami określonymi przez próbkowanie wartości napięcia, prądu i mocy ogniwa PV. Napięcie, przy którym maksymalna moc przesyłana do obciążenia jest maksymalna, dane jest wzorem:

$$U_{MPP} = -b\sqrt{b^2 - 3ac}/3a.$$

Wadą tej metody jest to, że wymaga ona dokładnej znajomości fizycznych parametrów związanych z właściwościami fizycznymi fotoogniwa.

### *Metoda porównywania z tabelą*

Mierzone wartości napięcia i prądu generatora PV są porównywane z wartościami przechowywanymi w pamięci sterownika, które odpowiadają pracy w punkcie o mocy maksymalnej w określonych warunkach klimatycznych. Wadą algorytmu jest konieczność przechowywania danych wymagających dużej pojemności pamięci (Ibrahim i in., 1999).

### *Metoda wykorzystująca pomiary napięcia obwodu otwartego generatora fotowoltaicznego*

Opisywany algorytm zaprezentowano w pracy (Masoum, Dehbonei, 1999). Opiera się on na założeniu, że napięcie generatora PV w punkcie mocy maksymalnej jest w przybliżeniu proporcjonalne do napięcia obwodu otwartego  $U_{oc}$ .

$$k_1 = \frac{U_{MPP}}{U_{OC}} = const.$$

Stała proporcjonalna zależy od technologii wykonania ogniw słonecznych, materiałów oraz warunków meteorologicznych. Napięcie obwodu generatora PV jest mierzone w momencie wymuszonej krótkiej przerwy działania systemu. Na podstawie zmierzonej wartości  $U_{OC}$  obliczana jest wartość  $U_{MPP}$ . Wadą metody jest trudność wyboru optymalnej wartości stałej  $k_1$ .

### ***Metoda wykorzystująca pomiary prądu zwarcia generatora fotowoltaicznego***

Metoda ta zaprezentowana została przez (Noguchi i in., 2002). W tym przypadku opiera się na wykorzystaniu empirycznej zależności między prądem w punkcie MPP a prądem zwarciovym, opisanej równaniem:

$$k_2 = \frac{I_{PMP}}{I_{SC}} = const.$$

W przypadku omawianej metody wykonuje się próbkowanie co kilka minut w celu obliczenia współczynnika  $k_2$ . Po wyliczeniu  $k_2$  system pracuje, aż do następnego obliczenia kolejnej wartości  $k_2$ . Schemat sterowania jest wtedy podobny do sterowania w metodzie pomiaru napięcia obwodu otwartego.

## **System fotowoltaiczny – MPPT metody bezpośrednie**

### ***Metoda różnicowa***

Ta technika została opisana przez (Bavaro, 1988) i jest oparta na zależności opisanej równaniami:

$$\frac{dP_{PV}}{dt} = U_{PV},$$

$$\frac{dI_{PV}}{dt} + I_{PV} \frac{dU_{PV}}{dt} = 0.$$

Konieczność dokonywania wyliczeń punktu pracy w czasie rzeczywistym powoduje, że prezentowane równanie musi być rozwiązane szybko: odczytanie bieżącej wartości napięcia  $U_{PV}$ ; prądu  $I_{PV}$ ; obliczenia zmiany napięcia  $dU_{PV}$ ; zmiany prądu  $dI_{PV}$ ; obliczanie iloczynu  $dU_{PV}$  oraz  $I_{PV}$ ; obliczenie sumy  $dI_{PV} + I_{PV} dU_{PV}$ . Gdy równanie się nie zeruje, sprawdzany jest znak wyniku i jeśli jest dodatni, to napięcie jest zwiększane, w przeciwnym wypadku jest zmniejszane.

### ***Metoda zaburzania i obserwacji***

Metoda „P&O” jest najczęściej używana w praktyce (Al-Atrash, Batarseh, Rustom, 2005, s. 1773–1777). W metodzie tej napięcie robocze generatora PV jest zakłócone przez mały przyrost  $dU_{PV}$ , w konsekwencji następuje zmiana mocy

$dP_{PV}$ . Jeśli następuje wzrost mocy, należy kontynuować zmiany przyrostu napięcia roboczego w tym samym kierunku. W przeciwnym wypadku należy zmienić kierunek przyrostów napięcia. Zalety to: nie jest wymagana znajomość charakterystyk generatora PV; stosunkowo prosta implementacja, zaś wadą jest to, że punkt roboczy oscyluje wokół MPP, powodując straty dostępnej mocy. Ponadto jest to metoda nieodporna na szybkie zmiany warunków atmosferycznych, co można poprawić przez wprowadzenie modyfikacji (Femia, Petrone, Spagnuolo, Vitelli, 2005, s. 963–973).

### **Metoda przyrostów przewodności**

Alternatywę dla metody „P&O” zaproponowano w (Hussein, Muta, Hoshino, Osakada, 1995, s. 59–64), opracowując metodę przyrostów przewodności „C. I.”. Metoda opiera się na równaniu:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{fv}}{dU_{fv}} &= I_{fv} \frac{dU_{fv}}{dU_{fv}} + U_{fv} \frac{dI_{fv}}{dU_{fv}} = I_{fv} + U_{fv} \frac{dI_{fv}}{dU_{fv}} = 0 \\ -\frac{I_{fv}}{U_{fv}} &= \frac{dI_{fv}}{dU_{fv}}. \end{aligned}$$

Różnice przyrostowe,  $dU_{PV}$  i  $dI_{PV}$  mogą być przybliżone przyrostami  $\Delta U_{PV}$ , jak i  $\Delta I_{PV}$ . Zalety: odporność na zmieniające się warunki atmosferyczne i niewielkie oscylacje wokół punktu MPP. Wada: wymaga złożonego układu sterowania.

### **Metoda wymuszonych oscylacji**

W metodzie tej wprowadza się napięcie o małej amplitudzie i częstotliwości 100 Hz, które dodawane jest do napięcia roboczego generatora PV. W wyniku tego powstają oscylacje na charakterystyce mocy, których faza i amplituda zależą od względnego położenia punktu roboczego względem MPP. 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. Zaletą tej metody jest to, że nie występują oscylacje wokół MPP. Wadą są trudności pracy przy słabym nasłonecznieniu oraz złożoność układu sterowania.

## **System fotowoltaiczny – MPPT metody z wykorzystaniem sztucznej inteligencji**

Kontrolery logiki rozmytej (FLC) i sztuczne sieci neuronowe są implementowane w systemach śledzenia maksymalnego punktu mocy. Metody te nie wymagają dokładnych modeli matematycznych. Mogą pracować przy zmieniających się parametrach systemu i mogą być stosowane w układach nieliniowych. Systemy wykorzystujące sztuczną inteligencję są również odporne na zmiany wartości napięcia i obciążenia.

## **System z generatorem wiatrowym – MPPT metody pośrednie**

### ***Metoda porównania krzywej obciążenia z wykorzystaniem anemometru***

Metoda ta wykorzystuje tablicę wzorcową lub z góry ustalone równanie, które opisuje zależność między prędkością wiatru a optymalnym obciążeniem wymaganym dla danej prędkości wiatru. Prędkość wiatru jest mierzona za pomocą anemometru, dla odczytanej za pomocą anemometru aktualnej prędkości wiatru oblicza się obciążenie tak aby uzyskać maksymalny transfer energii.

### ***Metoda porównania krzywej obciążenia z odczytem prędkości wału***

Charakterystyki opisujące wartość mocy produkowanej turbiny wiatrowej w zależności od prędkości wiatru są udostępniane przez producentów. Mierząc częstotliwość napięcia wyjściowego generatora, która jest proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika i mocy wytwarzanej przez turbinę wiatrową, można obliczyć prędkość wiatru. Gdy prędkość wiatru jest znana, można użyć opisaną wcześniej metodę porównywania krzywej obciążenia. Omawiana metoda skutecznie eliminuje potrzebę stosowania anemometru, co ma duże znaczenie (zwłaszcza ekonomiczne) w systemach małej mocy.

### ***Metoda TSR***

Metoda ta polega na utrzymaniu stałej wartości współczynnika TSR niezależnie od prędkości wiatru. Spełnienie tego warunku zapewnia to, że wytwarzana w generatorze wiatrowym energia osiąga wartości maksymalne dla danego punktu pracy. Optymalną wartość TSR można określić doświadczalnie lub analitycznie i zapisać jako wartości wzorcowe. Opisana metoda jest prosta wymaga jednak pomiaru prędkości wiatru w sposób dokładny, co ogranicza jej zastosowanie w praktyce, a także zwiększa koszt systemu.

## **System z generatorem wiatrowym – MPPT metody bezpośrednie**

### ***Metoda kontroli momentu***

W celu określenia momentu turbiny posługujemy się równaniem postaci:

$$T_{m-max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \left( \frac{C_{Pmax}}{\lambda_{max}^3} \omega_m^2 \right)$$

Znając optymalne wartości współczynników  $C_{Pmax}$  oraz  $\lambda_{max}$ , można w łatwy sposób kontrolować system. Efektywność tej metody jest niska, ponieważ zmiany prędkości wiatru nie są odzwierciedlane natychmiastowo, co znacząco wpływa na jakość sygnału odniesienia.

### ***Metoda stałych przyrostów przewodności***

Metoda przyrostów przewodności polega na stałej rewizji mocy wytwarzanej przez turbinę wiatrową. Moc wyjściowa wytworzona w czasie  $t$  jest porównywana z mocą wyjściową wyprodukowaną w kolejnym kroku pomiarowym,

$t+1$ . Jeśli zmierzona moc jest większa niż wartość poprzednia, oznacza to, że konduktancja obciążenia zmienia się we właściwym kierunku, a dalsze zmiany wartości obciążenia są kontynuowane w tym kierunku. Jeśli ostatnia zmierzona wartość mocy jest mniejsza niż poprzednio mierzona moc wyjściowa, zmiana konduktancji obciążenia jest w niewłaściwym kierunku, a system sterujący zmienia konduktancję z malejącej wartości na rosnącą lub odwrotnie. Wadą tego rozwiązania jest to, iż system nie jest stabilny, a ciągle zmiana prędkości wiatru prowadzi do powstawania opóźnień w algorytmie MPPT.

### **Zmodyfikowana metoda przyrostów przewodności**

Zmodyfikowana metoda przyrostów przewodności polega na zmianie długości kroku próbkowania, aby umożliwić algorytmowi śledzącemu szybsze reagowanie na zmiany prędkości wiatru. Jeśli szybkość zmiany mocy wyjściowej jest duża, to przyrosty zmian konduktancji są większe, w odwrotnej sytuacji przyrosty są mniejsze.

### **System z generatorem wiatrowym – MPPT metody z wykorzystaniem sztucznej inteligencji**

Metody sterowania rozmytego są szybkie, niewrażliwe na zmiany parametrów i akceptują zaszumienie i niedokładność sygnałów pomiarowych. Problemy związane z pomiarem prędkości wiatru na podstawie wartości momentu obrotowego czy też prędkości wału zostały rozwiązane przy użyciu technik wykorzystujących sztuczne sieci neuronowe. Metody hybrydowe są z kolei połączeniem dwóch metod bezpośrednich lub pośrednich z metodami wykorzystującymi sztuczną inteligencję. Metody te łączą zalety, jednocześnie eliminując wady opisanych technik.

### **Podsumowanie**

W artykule omówiono istotne z punktu widzenia dydaktyki przedmiotu „niekonwencjonalne źródła energii” algorytmy MPPT przeznaczone zarówno do systemów solarnych, jak i systemów z generatorami wiatrowymi. Wymieniono metody bezpośrednie i pośrednie oraz metody wykorzystujące sztuczną inteligencję. Pokazano, iż znalezienie algorytmu adaptacyjnego oraz łączenie dwóch lub więcej z dostępnych metod poprawia skuteczność i wydajność metod śledzenia maksymalnego punktu mocy ogniw PV i generatorów wiatrowych. Zaprezentowane zagadnienia mają na celu umożliwienie absolwentom kierunku energetyka swobodnego operowania na rynku pracy poprzez podejmowanie samodzielnych decyzji w zakresie efektywnego wykorzystania źródeł OZE.

### **Literatura**

Al-Atrash, H., Batareseh, I., Rustom, K. (2005). Statistical Modelling of DSP-based Hill-climbing MPPT Algorithms in Noisy Environments. W: *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005, Twentieth Annual IEEE*, vol. 3, 6–10 March 2005 (s. 1773–1777). Austin: IEEE, DOI: 10.1109/APEC.2005.1453286.

- Bavaro, L. (1988). Power Regulation Utilizing Only Battery Current Monitoring. United States Patent. Patent number 4794272. Date of patent: 27 December 1988.
- Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M. (2005). Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method. *IEEE Trans. Power Electron.*, 20 (4), 963–973.
- Hussein, K., Muta, I., Hoshino, T., Osakada, M. (1995). Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions. *IEEE Proc. Generation Transmission Distrib.*, 142 (1), 59–64.
- Ibrahim, H.E.-S.A. i in. (1999). Microcomputer Controlled Buck Regulator for Maximum Power Point Tracker for DC Pumping System Operates From Photovoltaic System. W: *Fuzzy Systems Conference Proceedings, FUZZIEEE '99, 1999 IEEE International* (s. 406–411). Seoul: IEEE, DOI: 10.1109/FUZZY.1999.793274.
- Masoum, M., Dehbonei, H. (1999). Design, Construction and Testing of a Voltage-based Maximum Power Point Tracker (VMPPPT) for Small Satellite Power Supply. *13th Annual AIAA/USU Conference, Small Satellite*, 1–12. Pobrane z: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/1999/all1999/88/> (1.09.2017).
- Noguchi, T. i in. (2002). Short-current Pulse-based Adaptive Maximum Power Point Tracking for a Photovoltaic Power. *Elect. Eng. Japan*, 139 (1), 65–72.
- Salas, V., Olias, E., Barrado, A., Lázaro, A. (2006). Review of the Maximum Power Point Tracking Algorithms for Standalone Photovoltaic Systems. *Solar Energy Mater and Solar Cells*, 90 (11), 1555–1578.
- Takashima, T., Tanaka, T., Amano, M., Ando, Y. (2000). Maximum Output Control of Photovoltaic (PV) Array. W: *Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit, 35th, July 24–28, 2000* (s. 380–383). Las Vegas: IEEE, DOI: 10.1109/IECEC.2000.870713.
- Vijayalakshmi, S., Ganapathy, V., Vijayakumar, K., Dash, S. (2015). Maximum Power Point Tracking for Wind Power Generation System at Variable Wind Speed using a Hybrid Technique. *International Journal of Control and Automation*, 7/8, 357–372.