

# Sterowanie silnikami elektrycznymi w przekształtnikowych układach fotowoltaicznych

Jerzy Bakalarczyk

## 1. Wstęp

W ostatnim czasie poświęca się sporo uwagi zastosowaniom instalacji fotowoltaicznych. Spotyka się je obecnie w różnych dziedzinach techniki i w publikacjach prognozuje się ich rozwój [3, 7]. Dość ciekawym rozwiązaniem jest np. wykorzystanie w transporcie miejskim [11]. Innym przykładem może być korzystanie z energii słonecznej do zasilania różnego rodzaju napędu pomp [8, 14]. Ogólnie rzecz biorąc na pierwszy rzut oka takie układy są niezbyt skomplikowane. Jednak głębsze spojrzenie na pracę tych systemów daje przekonanie, że jednak tak nie jest. Stawiane są im coraz trudniejsze do spełnienia wymagania funkcjonalne. Przykładowo wyposaża się autobusy z napędem elektrycznym w panele fotowoltaiczne umieszczone na dachu zapewniając samoczynne doładowanie pokładowej baterii akumulatorów z autonomicznych systemów fotowoltaicznych. Bardzo ważną rolę w tych systemach spełniają skomplikowane systemy sterowania i regulacji zapewniające przykładowo odzysk energii podczas hamowania pojazdów i wykorzystanie jej do doładowania akumulatorów z silników. Wymaga to nie tylko nakładów sprzętowych, ale także zaawansowanej techniki programistycznej. Nierzadko do rozwiązań wykorzystuje się teorię sztucznych sieci neuronowych ANN (ang. *Artificial Neural Networks*).

## 2. Układ przekształtnikowy

Układ fotowoltaiczny zasilający silniki zawiera przekształtniki półprzewodnikowe. Przykładowy system przedstawiono na Rys. 1. Zawiera on panele ogniw fotowoltaicznych, konwerter z kontrolą MPPT, baterię akumulatorów, dwa przekształtniki: przekształtnik 1 (falownik) zasilający silnik prądu przemiennego lub BLDC, a drugi przekształtnik 2 zasilający komutatorowy silnik prądu stałego. Baterii akumulatorów często towarzyszą superkondensatory. Obydwa przekształtniki są sterowane odpowiednio z Układu sterowania 1 i Układu sterowania 2.

Poza tym istnieje możliwość zasilania silników niskonapięciowych bezpośrednio z paneli fotowoltaicznych poprzez odpowiednie interfejsy, w których może znajdować się oddzielna kontrola MPPT [10]. Najczęściej są to silniki do różnego rodzaju pomp. Przekształtnik 1 (falownik) może zasilac zarówno silniki indukcyjne, jak i synchroniczne z magnesami trwałymi oraz silniki bezkomutatorowe. Przekształtnik 2 może zasilac komutatorowe silniki prądu stałego. Przekształtniki znajdujące zastosowanie w fotowoltaice szczegółowo opisane są w szeroko dostępnej literaturze [1].

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono zarówno rodzaje silników wykorzystywanych w przekształtnikowych układach fotowoltaicznych, jak i sposoby oraz możliwości ich sterowania. Podano ogólny schemat przykładowego przekształtnikowego systemu współpracującego z silnikami. Opisano poszczególne jego elementy. Dokonano zestawienia różnych rodzajów silników najczęściej stosowanych w układach fotowoltaicznych oraz wymieniono ich wady i zalety. Zestawiono również różne układy sterowania i regulacji wraz z podaniem ich zalet oraz wad. Opisano tendencje rozwojowe w zakresie wykorzystania inteligentnych systemów komunikacyjnych do kontroli i sterowania silnikami szczególnie w trackerach fotowoltaicznych. Pracę zakończono wnioskami nasuwającymi się podczas jej realizacji.

*Słowa kluczowe:* silniki elektryczne, układy fotowoltaiczne, sterowanie.

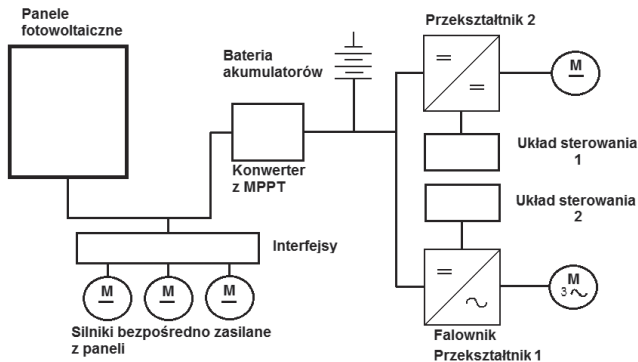
## CONTROL OF ELECTRIC MOTORS IN CONVERTER PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Summary:** The paper presents both the types of motors used in converter photovoltaic systems and the methods and possibilities of their control. A general diagram of an exemplary converter system cooperating with electric motors is given. Its individual elements are described. Various types of electric motors most commonly used in photovoltaic systems are compared and their advantages and disadvantages are listed. Various control systems are also listed together with their advantages and disadvantages. Development trends in the use of intelligent communication systems to control and control motors, especially in photovoltaic trackers, are described. The work was ended with conclusions that raised during this implementation.

*Keywords:* electric motors, photovoltaic systems, control.

## 3. Silniki elektryczne wykorzystywane w układach fotowoltaicznych

Silniki elektryczne w instalacjach fotowoltaicznych mogą mieć różne przeznaczenie. Jednym z nich jest orientowanie paneli w stronę słońca (trackery fotowoltaiczne). Tutaj można wyróżnić silniki indukcyjne prądu przemiennego [4 – 6], krokowe, silniki komutatorowe prądu stałego oraz silniki bezszczotkowe (bezkomutatorowe) prądu stałego BLDC. Silniki te pracują zazwyczaj w trudnych warunkach atmosferycznych stąd muszą być



Rys. 1. Przykładowy przekształtnikowy układ fotowoltaiczny

odporne zarówno na wysoką temperaturę jak i wilgoć, a konstrukcje ich muszą wytrzymywać działanie promieniowania UV. Przeważnie są to silniki z reduktorami z uwagi na ograniczenie prędkości przemieszczania paneli oraz konieczność pokonywania dużych sił działających na panele podczas wiatrów.

Inne zastosowanie to różnego rodzaju pompy śrubowe małej mocy zasilane napięciem 24 V, zaopatrzone w silniki bezszczotkowe prądu stałego małej mocy – zazwyczaj z możliwością bezpośredniego podłączenia do panelu słonecznego. Elektryczne silniki do pomp ciepła mogą być zarówno wysokonapięciowe jak i niskonapięciowe, silniki klatkowe prądu przemiennego chłodzone zarówno powietrzem jak i wodą. Na szczególną uwagę zasługują silniki bezszczotkowe BLDC. Znajdują szerokie zastosowanie i są coraz częściej wykorzystywane. Dużą uwagę przywiązuje się do zastosowania ich w środkach transportu kołowego [13]. W literaturze [1] opisano w obszerny sposób różnego typu silniki znajdujące zastosowanie w fotowoltaice oraz niektóre sposoby ich sterowania [9]. Wykaz najczęściej stosowanych silników podano w Tabeli 1.

#### 4. Sterowanie silnikami

Sterowanie silnikami przemiennymi z Przekształtnika 1 i Układu sterowania 2 odbywa się poprzez falownik. Proces sterowania przebiega w sposób zależny od danego silnika [2].

W Tabeli 2 zestawiono często stosowane metody sterowania.

Zarówno silniki indukcyjne jak i synchroniczne z magnesami trwałymi PMSM mogą być sterowane zgodnie z metodą orientacji wektora pola FOC (oraz pokrewnych). Obecnie można zauważyć rozwój podobnych technik. Z tego przekształtnika może być również silnik bezszczotkowy BLDC. Jego sterowanie opisuje szeroko literatura [12]. Silnik bezszczotkowy BLDC może być sterowany na wiele różnych sposobów. Układ sterowania może wykorzystywać sygnały z czujników położenia wirnika lub może być układem bezczujnikowym. Silnik zasilany jest najczęściej trójfazowym napięciem trapezoidalnym, jednak w celu poszerzenia zakresu regulacji prędkości obrotowej można wykorzystywać napięcia sinusoidalne. Silniki BLDC mogą być sterowane z wykorzystaniem uproszczonej metody wektorowej – metody orientacji wektora pola FOC bezczujnikowej lub z wykorzystaniem czujników położenia pola.

Sterowanie odbywa się poprzez programowane systemy mikrokontrolerów, procesorów sygnałowych DSP oraz

Tabela 1. Najczęściej stosowane silniki

Rodzaj silnika	Zalety	Wady
Komutatorowy silnik prądu stałego (bocznikowy)	Prosty układ sterowania i regulacji. Prędkość silnika zależna od napięcia twornika.	Obecność komutatora i obecność szczotek sprawia kłopoty eksploatacyjne.
Indukcyjny silnik klatkowy (prąd przemienny)	Zwarta konstrukcja. Brak obecności komutatora i szczotek.	Skomplikowany układ sterowania i regulacji. Najczęściej stosowane metody sterowania PWM, FOC (i podobne).
Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi PMSM (prąd przemienny)	Uzyskiwany stały moment w szerokim zakresie wartości obciążenia.	Skomplikowany układ sterowania i regulacji. Najczęściej stosowane metody sterowania FOC (i podobne).
Silnik krokowy	Prosta kontrola położenia wału silnika.	Możliwe rezonanse. Duży pobór prądu.
Silnik bezszczotkowy prądu stałego BLDC	Powszechne możliwe zastosowanie. Wysoka sprawność.	Potrzebna kontrola położenia wału silnika przy prostym układzie sterowania. Skomplikowany sposób bezczujnikowego sterowania silnika.

Tabela 2. Stosowane metody sterowania

Metoda sterowania i regulacji	Zalety	Wady
Metoda częstotliwościowa (silniki prądu przemiennego) i modulacja szerokości impulsów PWM + regulator PI	Niski stopień złożoności układu.	Niski zakres regulacji prędkości obrotowej. Opóźniona odpowiedź układu.
Metoda sterowania polowozrietowanego FOC (silniki prądu przemiennego).	Osiągalny znaczny zakres regulacji prędkości obrotowej. Dobra liniowość układu i szybka odpowiedź na wymuszenia.	Znaczny stopień złożoności układu sterowania z wykorzystaniem technik programistycznych, mikrokontrolerów, procesorów sygnałowych DSP i logicznych pól programowalnych FPGA.

bezpośrednio programowalne macierze bramek FPGA (Field Programmable Gate Array).

Tendencje rozwojowe zmierzają w kierunku wykorzystania wbudowanych obwodów inteligentnych w obudowy silników do pracy w rozbudowanych systemach komunikacyjnych takich jak Modbus, CANbus, co może mieć głównie zastosowanie w przypadku trackerów fotowoltaicznych.

#### 5. Podsumowanie i wnioski


Można spotkać zarówno napędy z silnikami zasilane bezpośrednio z paneli fotowoltaicznych (pompy małej mocy), jak i napędy zasilane z układów przekształtnikowych. We współczesnych

układach fotowoltaicznych można zaobserwować z jednej strony wzrost liczby zastosowań fotowoltaiki, z drugiej zaś wzrost zapotrzebowania na silniki bezszczotkowe BLDC (produkcja coraz większych mocy) w licznych gałęziach techniki. Układy sterowania z silnikami bezszczotkowymi BLDC są coraz bardziej skomplikowane, zawierają obwody sztucznej inteligencji i stają się układami niewymagającymi sygnałów z pomiarowych czujników zewnętrznych. Chętnie w układach przekształtnikowych wykorzystuje się silniki zawierające inteligentne interfejsy przystosowane do pracy w sieci z systemami komunikacyjnymi. ■

## Literatura

- [1] A. Narendra, N. Venkataramana, A. K. Panda, N. Tiwary: A Comprehensive Review of PV Driven Electrical Motors, *Solar Energy Journal*, Volume 2010, 195, s. 278 – 303.
- [2] M. Niechaj „The operation of power electronic converters in Photovoltaic Drive Systems”, 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, s. 1890 – 1895, 2008.
- [3] K. Piech, P. Dybowski, J. Kozik, E. Ciesielka, T. Siostrzonek, W. Milej, J. Wójcik, M. Rad, T. Lerch, T. Drabek: Fotowoltaika – tendencje i prognozy, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 2, 2019 (122), s. 57 – 62.
- [4] A. Sołbut „Diagnostyka układów napędowych z przekształtnikiem częstotliwości i silnikiem klatkowym w oparciu o sygnał mocy chwilowej” *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 2/2018 (118), s. 155 – 158.
- [5] T. Glinka: Model dynamiczny silnika indukcyjnego klatkowego, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 1, 2018 (117), s. 1 – 8.
- [6] J. Bernatt, S. Gawron, T. Glinka: Energooszczędne silniki indukcyjne, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 1, 2018 (117), s. 81 – 86.
- [7] M. Szczepaniak, S. Maleczek: Systemy fotowoltaiczne do zastosowania w aplikacjach militarnych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe* Nr 1/2017 (113), s. 73 – 79.
- [8] S.K. Hota, K.R. Nayak, C.N. Bhende: Photovoltaic – Based Water Pumping System using Brushless DC motor, 2019 IEEE Region 10 Conference (Tencon), s. 569 – 574.
- [9] A. Narendra, N.V. Naik, A.K. Panda, R.K. Lenka: Solar PV fed FSVSI based Variable Speed IM Drive using ASVM Technique, *Engineering Science and Technology, an International Journal* Volume 40, April 2023.
- [10] A.N. Jha, B. Kumar, A. Tyagi: Constant Voltage Controlled MPPT for PV Fed Water Pumping System, *Springer-Lecture Notes in Electrical Engineering* 974, Control Applications in Modern Power Systems – Select Proceedings of EPREC 2022, s. 105 – 118.
- [11] B. Mohanty, S. Padhi, S. Mishra: Intelligent Battery Interfaced Solar PV Powered BLDC Motor Using ANN in MPPT and Regenerative Braking Concept, *International Conference on Smart Systems for applications in Electrical Sciences (ICSSES)*, 2023.
- [12] R. Padhi, B. P. Behera, K. B. Mohanty, P. Daramukala: Integrated SPV-Battery BLDC Motor Drive Powered By Interleaved Boost Converter, *International Conference on Power 2023, Instrumentation, Energy and Control (PIECON)*.
- [13] D. Rimpas, S. D. Kaminaris, D. D. Piromalis, G. Vokas, K.G. Arvanitis, C.S. Karavas: Comparative Review of Motor Technologies for Electric Vehicles Powered by a Hybrid Energy Storage System Based on Multi-Criteria Analysis, *Energies* 2023, 16, 255, s. 1 – 24.
- [14] M. Elrefai, R.A. Hamdy, A. ElZawawi, M.S. Hamad: Design and Performance Evaluation of a Solar Water Pumping System: A Case Study Conference: 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), s. 1 – 10.

### artykuł recenzowany

 dr inż. Jerzy Bakalarczyk – Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, Instytut Techniki i Logistyki, ul. Okrzei 94A, 87-800 Włocławek