

Jerzy Bakalarczyk
Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, Włocławek

ZASILANIE NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH Z MAGAZYNÓW ENERGII ELEKTRYCZNEJ I UKŁADÓW FOTOWOLTAICZNYCH

ELECTRIC FEEDING OF DRIVES USING ENERGY STORAGE AND PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Streszczenie: W pracy tej przedstawiono przykłady rozwiązań zasilania napędów elektrycznych z magazynów energii elektrycznej i układów fotowoltaicznych i podano ich zalety oraz wady. Podano rodzaje magazynów energii wykorzystywanych w układach fotowoltaicznych. Dokonano przeglądu niektórych typów akumulatorów energii elektrycznej oraz przedstawiono ich uwagi, co do eksploatacji. Omówiono ich przydatność do zastosowań w układach fotowoltaicznych zasilających napędy elektryczne. W skład najczęściej spotykanych napędów wchodzi silniki elektryczne klatkowe jedno i trójfazowe oraz silniki bocznikowe prądu stałego z magnesami trwałymi w obwodzie wzbudzenia. Silniki elektryczne są podłączane do układów fotowoltaicznych poprzez interfejsy zawierające układy sterowania tych silników. Przedstawiono własne rozwiązanie konstrukcyjne układu zasilania układu napędowego, w omawianym temacie, oraz podano przykładowy wynik badań symulacyjnych z silnikiem prądu stałego z wykorzystaniem programu symulacyjnego PSpice. Otrzymano przebieg prędkości obrotowej wirnika w odpowiedzi na skok napięcia zasilania twornika maszyny prądu stałego z magnesami trwałymi w obwodzie wzbudzenia maszyny. Pracę zakończono wnioskami oraz sugestiami, co do przyszłego ulepszenia podanej konstrukcji.

Abstract: This paper presents examples of solutions for powering electric drives from electricity storage and photovoltaic systems, and their advantages and disadvantages are given. The various types of energy storage used in photovoltaic systems are given. Some types of electric energy batteries were reviewed and their comments on operation were presented. Their suitability for applications in photovoltaic systems supplying electric drives is discussed. The most common drives include single- and three-phase squirrel-cage electric motors and shunt DC motors with permanent magnets in the excitation circuit. Electric motors are connected to the photovoltaic systems through interfaces containing the control systems of these motors. One presented the design solution of the power supply system of the drive system in the discussed topic, as well as an exemplary result of simulation tests with a DC motor using the PSpice simulation program. The rotational speed of the rotor was obtained in response to the voltage jump of the armature supply voltage of the DC machine with permanent magnets in the excitation circuit of the machine. The work was completed with conclusions and suggestions for the future improvement of the given structure.

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, magazynowanie energii, układy napędowe, badania symulacyjne

Keywords: photovoltaic cells, energy storage, electric drive systems, simulation tests

1. Wstęp

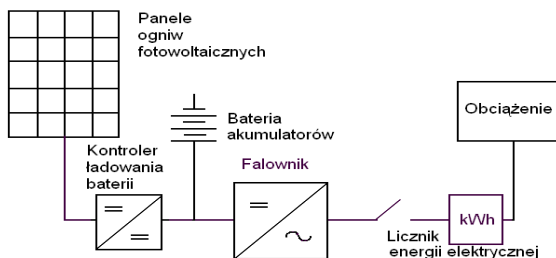
Napędy elektryczne są szczególnym rodzajem odbiorów, które znajdują szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach życia a zwłaszcza w przemyśle. W skład nich wchodzi silniki różnych typów. Różnią się one konstrukcją, sposobem rozruchu oraz wymaganiami związanymi ze źródłami zasilania. Nowoczesne źródła energii to między innymi ogniwa fotowoltaiczne. W układach fotowoltaicznych istnieje problem związany z procesem magazynowania energii. Układy napędowe z silnikami pracującymi w tych systemach wymagają dostarczenia znacznej ilości energii podczas rozruchu i hamowania oraz skokowego obciążenia, a więc narzucają

niestandardowe rozwiązania źródeł magazynowania oraz układów sterowania. W pracy tej podano rozwiązania układów fotowoltaicznych i podano ich zalety oraz wady. Przedstawiono własne rozwiązania konstrukcyjne układu zasilania układu napędowego oraz podano wynik badania symulacyjnego z silnikiem prądu stałego. Pracę zakończono wnioskami.

2. Układ fotowoltaiczny

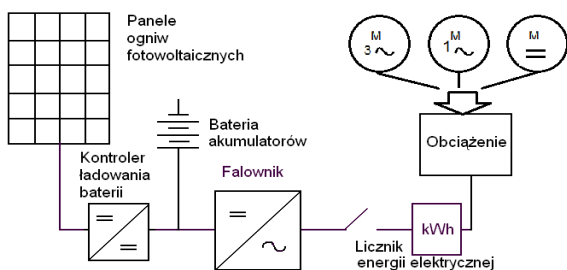
Na Rys.1. przedstawiono podstawowy układ fotowoltaiczny zawierający panel fotowoltaiczny, kontroler ładowania baterii, baterię akumulatorów (magazyn energii), falownik, licznik energii elektrycznej oraz obciążenie. Kontroler ładowa-

nia baterii pracuje w trybie uzyskania stałej mocy MPPT.



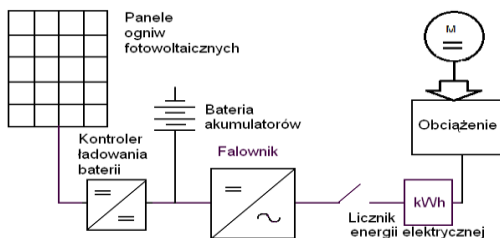
Rys. 1. Podstawowy układ fotowoltaiczny

Na Rys.2. podano układ rozszerzony o odbiory: silnik prądu stałego, trójfazowy silnik klatkowy, jednofazowy silnik prądu przemiennego. Zasilane są one przez interfejs w bloku „Obciążenie”. Wadą rozwiązania jest zastosowanie dodatkowego przekształtnika dla silnika prądu stałego.



Rys. 2. Podstawowy układ fotowoltaiczny z opcjonalnym obciążeniem w formie silnika 3-fazowego klatkowego, silnika 1-fazowego, silnika bocznikowego prądu stałego

Na Rys.3 przedstawiono podstawowy układ fotowoltaiczny, w którym obciążenie stanowi silnik prądu stałego. W tym przypadku układ sterowania falownika może zostać przełączony w tryb sterowania impulsowego bez potrzeby zmiany falownika na przekształtnik prądu stałego. Stanowi to zaletę tej konstrukcji, wadę stanowi bardziej skomplikowany układ sterowania.



Rys. 3. Podstawowy układ fotowoltaiczny z silnikiem prądu stałego w obwodzie obciążenia

3. Rodzaje magazynów energii wykorzystywanych w układach fotowoltaicznych

W Tabeli 1 przedstawiono typy i odmiany akumulatorów (magazynów energii) wykorzystywanych w układach fotowoltaicznych. Z uwag eksploatacyjnych, zawartych w Tabeli 1, można wywnioskować, że w układach fotowoltaicznych z silnikami elektrycznymi najbardziej odpowiednie, jako magazyny energii, mogą być akumulatory nikielowo-żelazowe Ni-Fe – z uwagi na znaczną odporność na przeładowania, zwarcia i nadmierne rozładowania.

Silniki elektryczne podczas rozruchu, hamowania oraz nawrotów stanowią duże obciążenie prądowe dla akumulatorów, więc baterie Ni-Fe mogłyby zdawać tutaj egzamin. Poza tym czas życia tych akumulatorów wynosi 30-40 lat.

Oczywistą wadą tych akumulatorów jest konieczność uzupełniania elektrolitu oraz występujące zjawisko wydzielania się wodoru podczas ich ładowania. Na uwagę zasługują jeszcze akumulatory litowo-jonowe Li-Ion oraz litowo-polimerowe Li-Poly. Obydwa typy posiadają swoje zalety i wady. Baterie Litowo-jonowe są lekkie i znajdują zastosowanie w pojazdach elektrycznych. Akumulatorów tych nie można dłużej przechowywać w stanie całkowicie rozładowanym. Baterie litowo-polimerowe Li-Poly posiadają małe gabaryty są lekkie, lecz cechuje je niższa żywotność.

4. Rodzaje napędów elektrycznych

Zasadniczo można wyróżnić napędy elektryczne z silnikami prądu stałego i przemiennego pracujące w układach fotowoltaicznych [4], [5]. Obydwa rodzaje silników różnią się między sobą konstrukcją rodzajem zasilania oraz charakterystykami [11], [12].

Bardzo pomocne w praktyce jest przeprowadzenie badań symulacyjnych w celu sprawdzenia zachowania się w rzeczywistych warunkach układu oraz silnika [8]. W pracy przeprowadzono symulację silnika prądu stałego, z magnesami trwałymi w obwodzie wzbudzenia, dla rzeczywistych parametrów obwodu silnika. Jest to częsty przypadek w nowoczesnym napędzie elektrycznym pracującym w układach fotowoltaicznych.

Przeprowadzono symulację modelu silnika w postaci transmitancji operatorowej z wykorzystaniem programu symulacyjnego PSpice [9], [8].

Tabela 1. Typy i odmiany akumulatorów

| Typ akumulatora i jego odmiany | Uwagi co do eksploatacji |
|---|---|
| Akumulatory bezobsługowe ołowiowo-kwasowe regulowane zaworami VRLA (ang. Valve Regulated Lead - Acid) lub inaczej zwane LSA - szczelne ołowiowo-kwasowe (ang. Sealed Lead - Acid) | |
| 1) AGM (ang. Absorbed Glass Mat)-elektrolit zawarty we włóknie szklanym 2) Akumulatory żelowe GEL (elektrolit w postaci żelu) | Nie wolno nadmiernie ładować. Grozi to uszkodzeniem na skutek tzw. "zjawiska gazowania". Nie wolno zbyt długo przechowywać w stanie rozładowanym. Od czasu do czasu całkowicie rozładować i ponownie naładować. Ładowanie metodą stało-napięciową z kontrolą prądu. |
| Inne akumulatory | |
| Akumulatory litowo - jonowe Li-Ion | Bardzo często stosowane w instalacjach fotowoltaicznych. Unikać głębokiego rozładowania. Często ładować. Ładowanie kilkustopniowe (stały prąd, stałe napięcie). |
| Akumulator litowo - polimerowy Li-Poly | Ładowanie według określonego trybu stały prąd, stałe napięcie (CC/CV). |
| Akumulatory nikielowo-kadmowe Ni-Cd (zasadowe) | Wyparte obecnie prawie całkowicie przez - litowo - polimerowe oraz Ni-MH. Ładowanie stałym kontrolowanym prądem, stałym napięciem lub ich kombinacją. |
| Akumulatory ołowiowo- kwasowe z ciekłym elektrolitem w postaci wodnego roztworu kwasu siarkowego | Są tanie. Ich wadą jest duża masa, konieczność uzupełniania elektrolitu. Gazowanie podczas ostatniej fazy ładowania. Użytkowane muszą być w pomieszczeniach dobrze przewietrzanych. |
| Akumulatory nikielowo-żelazowe Ni-Fe | Są dużo trwalsze od ołowiowo-kwasowych, są odporne na przeładowanie i nadmierne rozładowanie i zwarcia. Idealnie nadają się do systemów fotowoltaicznych. Występuje zjawisko gazowania podczas ich ładowania i wzrasta ono wraz ze wzrostem prądu ładowania (należy zapewnić przewietrzanie). Podczas ładowania należy zapewnić napięcie 1,46 do 1,55V na ogniwo i uzupełnić elektrolit. Czas życia 30-40 lat. |
| Ogniwa nikielowo-wodorkowe Ni-MH | Nie należy ładować prądem stałym (istnieje groźba uszkodzenia). Należy je ładować impulsami prądowymi, np. z prostownika jednofazowego. Należy unikać nadmiernego naładowania. |

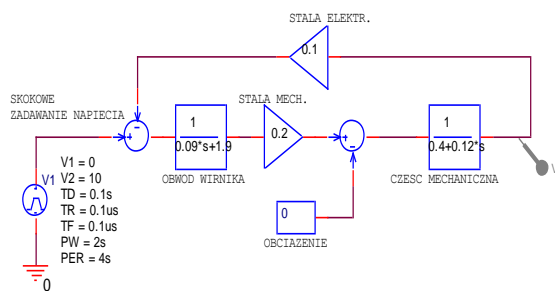
5. Badania symulacyjne silnika z magnesami trwałymi

Silnik prądu stałego z magnesami trwałymi w obwodzie wzbudzenia stanowi częsty przypadek w nowoczesnym napędzie elektrycznym pracującym w układach fotowoltaicznych.

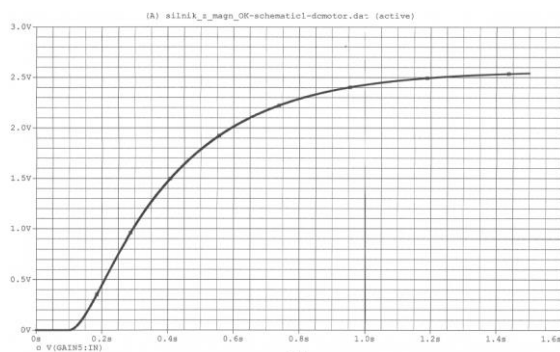
Badania przeprowadzono na silniku o następujących parametrach:

Współczynnik tarcia lepkiego zredukowany do wału wirnika $B_z = 0,4 \text{ Nms/rad}$
 Stała mechaniczna $k_{mech} = 0,2 \text{ Nm/A}$,
 Stała elektryczna $k_{el} = 0,1 \text{ Vs/rad}$
 Rezystancja $R_{tw} = 1,9 \text{ om}$
 Indukcyjność $L_{tw} = 0,09 \text{ H}$
 Moment bezwładności $J = 0,12 \text{ kgm}^2$. Schemat symulacyjny został przedstawiony na Rys.4, przy założeniu, że moment obciążenia równa się zeru. Na Rys.5. Przedstawiono wynik symulacji w postaci odpowiedzi prędkości, badanego sil-

nika prądu stałego z magnesami trwałymi, na skok napięcia zasilającego twornik.



Rys. 4. Zasympulowany model silnika prądu stałego w programie PSpice



Rys. 5. Odpowiedź prędkości obrotowej silnika prądu stałego na skok napięcia zadającego ($Y=0,05$ V/dz, $X=0,05$ s/dz)

6. Zakończenie i wnioski

Rozwiązania fotowoltaicznego zasilania układów silników elektrycznych, przedstawione w tej pracy w postaci blokowej, będą dalej rozwijane w szczegółowej konstrukcji i wyposażane w udoskonalane magazyny energii. Zestawione w tabeli magazyny energii stanowią najczęściej obecnie spotykane typy baterii.

7. Literatura

- [1]. Parol M., Maciejko A., Arendarski B., „Systemy magazynowania energii w sieciach elektroenergetycznych niskich napięć”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 6, str.1-6, 2020.
- [2]. Paziewski P., Watral Z., Michalski A., „Wybrane aspekty badań eksploatacyjnych autonomicznych zasilaczy dla zastosowań specjalnych”, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 9, str. 113-116, 2018.
- [3]. Hossain E., Faruque H., M., R., Sunny S.H., Mohammad N., Nawar N., “A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects”, */mdpi/ Energies/Journal*, No.13, 3651, str. 1-127, 2020.
- [4]. Niechaj M., „Autonomiczny fotowoltaiczny system napędowy bez elektrycznego źródła buforowego

z silnikiem indukcyjnym jednofazowym”, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 1, Politechnika Lubelska, Lublin, str. 189-194, 2013/98.

- [5]. Narendra A., N.Venkataramana Naik, Panda A., K., Tiwary N., “A Comprehensive Review of PV Driven Electrical Motors”, Elsevier, *Solar Energy*, Volume 195, str. 278-303, 2020.
- [6]. Guarino P., Cascella G., L., Stasi S., „New Strategies for Electric Drives Applications in Solar-Powered Airplanes”, *17th International Conference on Systems*, Rhodes Island, Greece, July 16-19, No. 18, str. 27-36, 2013.
- [7]. Boros R.R., Bodnár I., „Grid and PV Fed Uninterruptible Induction Motor Drive, Implementation and Measurements”, */mdpi/ Energies/Journal*, No. 15/708, str. 1-18, 2022.
- [8]. Sami S.S., Obaid Z.A., “Detailed modeling and simulation of different DC motor types for research and educational purposes”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, Vol. 12, No. 2, str. 703-714, Jun 2021.
- [9]. Faiz J., Ojaghi M., Keyhani A., “PSPICE simulation of single-phase induction motors”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (Volume: 14, Issue: 1), str. 86–92, March 1999.
- [10]. Şchiop A., “Simulation of the Induction Motor Drives in OrCAD Environment”, *Journal of Electrical and Electronics Engineering, University of Oradea, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology Iss.2*, str. 195-198, 2009.
- [11]. Glinka T., „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi”, *Wydawnictwo Naukowe PWN, WNT*, 2018.
- [12]. Przepiórkowski J., „Silniki elektryczne w praktyce elektronika”, wyd. 2 – *Wydawnictwo BTC*, 2012.

Autor

dr inż. Jerzy Bakalarczyk, Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, Instytut Techniki i Logistyki, ul. Okrzei 94A, 87-800 Włocławek, E-mail: j.bakalarczyk@ksw.wloclawek.pl.