

Marek Niechaj
Politechnika Lubelska, Lublin

NUMERYCZNY MODEL FOTOWOLTAICZNEGO SYSTEMU NAPĘDOWEGO Z MAKSYMALIZACJĄ MOCY OPARTĄ NA DODATNIM SPRZĘŻENIU ZWROTNYM

NUMERICAL MODEL OF PHOTOVOLTAIC DRIVE SYSTEM WITH MPP TRACKER BASED ON POSITIVE FEEDBACK

Abstract: The paper deals with numerical model of the system with photovoltaic generator feeding the DC commutator motor with permanent magnet excitation, by DC buck chopper. The motor drives its load of fan characteristic – centrifugal water pump. The system is of Stand-Alone type, and without the electric buffer source (electrochemical accumulator or supercapacitor). The simple circuit for Maximum Power Point tracking, with positive feedback from average value of motor's armature voltage, has been applied in this system. The real system's diagram is presented and shortly described. The numerical model of the whole real system has been created in TCAD simulation software. This model's diagram is presented and described in details. The model of PV generator enables simple modeling of generator's cells insolation changes, and also different temperatures of the cells, independently. The results of computer simulations of such transient states as: start-ups of the motor for different PV cells insolation and temperature values, and linear increases and decreases of insolation, are presented. The good points and shortcomings of the described system and its model are recapitulated in the conclusions.

1. Wstęp

W fotowoltaicznych (PV) systemach napędowych generator PV stanowi jedyne, lub przynajmniej podstawowe, źródło energii dla maszyny elektrycznej (silnika), a za jej pośrednictwem także dla maszyny roboczej. Jednymi z najprostszych struktur systemów PV są systemy nie współpracujące z siecią elektroenergetyczną oraz bez elektrycznego źródła buforowego – bez ogniwa paliwowego, akumulatora lub kondensatora o dużej pojemności. Podstawową zaletą takich systemów jest względnie niski koszt instalacyjny i eksploatacyjny. Znajdują one uzasadnienie tam, gdzie występuje wysoki stopień chwilowej zgodności zapotrzebowania na energię wytworzoną przez maszynę roboczą oraz występowania znacznego napromienienia. Przykłady potencjalnych zastosowań takich systemów są następujące: pompy wody do nawadniania pól i szklarni; pompy wody do filtracji, napełniania i opróżniania basenów i fontann; pompy obiegowe wody lub innego czynnika roboczego w systemach kolektorów słonecznych; wentylatory do suszenia ziół; wentylatory do wytwarzania przewiewu w pomieszczeniach. Z kolei, po zastosowaniu nieelektrycznego źródła buforowego (zbiornik na wodę, pojemność cieplna ochładzanego pomieszczenia) systemy takie mogą znaleźć też

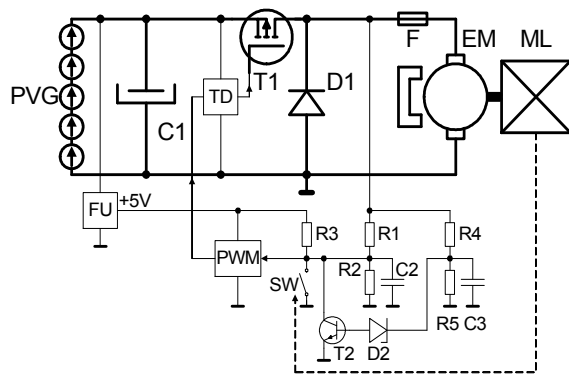
zastosowanie w klimatyzacji i zapewnieniu wody np. dla gospodarstw hodowlanych.

Ze względu na ciągle wysoki koszt instalacyjny generatorów PV, a w konsekwencji dość wysoki koszt jednostkowy energii wytwarzanej w takich źródłach, konieczne jest zapewnianie pracy generatora z maksymalną możliwą do uzyskania wydajnością, w różnych warunkach napromienienia i temperatury ogniw PV tworzących generator. Warunek ten będzie spełniony, gdy generator będzie możliwie jak najczęściej pracował w bliskiej okolicy punktów mocy maksymalnej (MPP) na charakterystykach wyjściowych (U-I) generatora. Za realizację tego zadania odpowiadają układy nazywane MPP Trackers (MPPT). Prawidłowo działający układ maksymalizacji powinien charakteryzować się następującymi cechami: niski koszt, jak najmniejszy pobór mocy, stabilność pracy i odporność na zakłócenia, duża dokładność maksymalizacji niezależnie od znacznej losowej zmienności napromienienia i temperatury, dobre właściwości dynamiczne (szybkie dopasowywanie się do nowych warunków napromienienia), prawidłowe działanie przy pracy generatora w niejednorodnych warunkach (częściowe zacienienie lub zabrudzenie modułów

PV) i po zmianie kształtu charakterystyk wskutek zatarzenia się ogniw [1].

2. Opis rzeczywistego systemu PV

W dalszej części omówiono pracę systemu, w którym komutatorowy silnik prądu stałego ze wzbudzeniem od magnesów trwałych napędza maszynę roboczą o charakterystyce wentylatorowej, w tym konkretnym systemie jest to odśrodkowa pompa wody. Silnik ze wzbudzeniem od magnesów trwałych charakteryzuje się wysoką sprawnością ze względu na brak strat w obwodzie wzbudzenia, a także prostotą sterowania, co umożliwi zastosowanie prostego i przez to taniego i mało awaryjnego przekształtnika energoelektronicznego – przerywacza prądu stałego. Zdecydowano się na strukturę przerywacza typu buck, gdyż charakteryzuje się ona najwyższą sprawnością i najmniejszą awaryjnością. Schemat systemu został przedstawiony na rys.1, a jego zasada działania została szczegółowo opisana w [2].



Rys.1. Schemat ideowy systemu rzeczywistego

Generator fotowoltaiczny (PVG) składa się z pięciu połączonych szeregowo modułów, każdy o danych znamionowych: moc w MPP 55Wp, napięcie jałowe 19,3V, napięcie w MPP 15,5V, prąd zwarcia 3,85A, prąd w MPP 3,55A. Dane te są słuszne dla tzw. warunków standardowych: przy napromienieniu 1000W/m^2 , temperaturze ogniw 25°C i widmie promieniowania AM1,5.

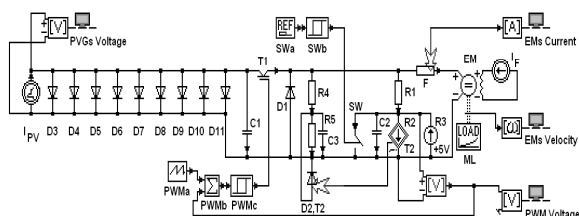
Tranzystor MOSFET z kanałem typu p (T1) oraz dioda Shottky'ego (D1) tworzą, wraz z indukcyjnością twornika silnika, przerywacz prądu stałego typu buck. Zastosowany kondensator C1 jest niezbędny ze względu na impulsowy prąd pobierany przez T1. Jego brak znacznie skróciłby żywotność generatora PV, a ponadto uniemożliwiłby maksymalizację mocy PVG, gdyż w okresach wyłączenia tranzystora T1 generator pracowałby w stanie biegu jałowego.

Maszyna elektryczna (EM) ma następujące parametry znamionowe: moc 220W, napięcie 60V, prąd 4,2A, prędkość kątowna 350rad/s. Napędza on maszynę roboczą (ML) – zasilaną pompę odśrodkową do wody zanieczyszczonej, o maksymalnej wydajności 170 l/h, maksymalnej wysokości podnoszenia 9m i maksymalnym poborze mocy 250W. Bezpiecznik zwłoczny (F) ma za zadanie zabezpieczyć silnik przed przegrzaniem uzwojenia twornika przez duży i zbyt długo płynący prąd, w przypadku awarii polegającej na znacznym wzroście oporów mechanicznych (np. wskutek zablokowania wirnika pompy). Bezpiecznik jest niezbędny, bowiem system nie jest wyposażony w układ ograniczania prądu silnika. Układ taki jest niepotrzebny, co uzasadniono w dalszej części. Wysokosprawny zasilacz impulsowy (FU) ma za zadanie zapewnić zasilanie elementom części sterującej. Elementy R1, R2, R3, C2 znajdują się w torze dodatniego sprzężenia zwrotnego od wartości średniej napięcia twornika silnika. Tworzą one bardzo prosty, ale też bardzo skuteczny, układ maksymalizacji mocy pobieranej przez silnik, co pośrednio zapewnia maksymalizację mocy oddawanej przez PVG. Kondensator C2 dodatkowo ogranicza tempo rozruchu silnika, a tym samym zabezpiecza silnik w stanach dynamicznych przed zbyt dużą chwilową wartością prądu twornika. Układ modulacji szerokości impulsu (PWM) przekształca stałe napięcie na wejściu tego układu w ciąg impulsów prostokątnych o stałej częstotliwości. Wypełnienie tych impulsów liniowo zależy od wartości napięcia na wejściu układu PWM. Sterownik (TD) ma za zadanie odpowiednio szybko załączać i wyłączać tranzystor T1. Elementy R4, R5, C3, D2, T2 tworzą ogranicznik wartości średniej napięcia silnika. Umożliwia to, w pośredni sposób, ograniczenie prędkości silnika. Dla pompy odśrodkowej i wentylatora, pracujących w konkretnych warunkach pracy przy niezmiennym poziomie podnoszenia lub niezmiennych oporach przepływu, moment oporowy w sposób jednoznaczny zależy od prędkości. Tym samym, ograniczając prędkość silnika, ogranicza się moment oporowy. A w stanie ustalonym, do momentu oporowego proporcjonalny jest prąd twornika. Ostatecznie więc, układ ograniczania wartości średniej napięcia twornika ogranicza też prąd silnika w stanie ustalonym, co zostanie dalej potwierdzone w ramach wykonanych symulacji. Dlatego dla maszyn roboczych typu:

pompa odśrodkowa czy też wentylator, nie jest konieczne stosowanie kontroli prądu pobieranego przez silnik, co znacznie uprościło układ. Przełącznik (SW) start/stop umożliwia rozruch silnika przez otwarcie SW, a także jego zatrzymanie, gdyż zamknięcie SW zatyka tranzystor T1, co odcina zasilanie z PVG i powoduje hamowanie zespołu napędowego wybiegiem. Jako SW może służyć np. czujnik poziomu wody w zbiorniku, jeśli pompa ma napełniać zbiornik.

3. Opis modelu numerycznego systemu

Do zamodelowania omawianego systemu wykorzystano program TCAD [3]. Jego podstawowym przeznaczeniem jest analiza pracy układów energoelektronicznych i układów napędu przekształtnikowego. Zasadniczo modelowany system składa się z części głównej (źródło zasilania, przekształtnik, maszyna elektryczna z obciążeniem) i z części pomocniczej (część sterująca oraz elementy komunikacji części sterującej z częścią główną – czujniki i sterowniki). Na rys.2 przedstawiono schemat modelu, odpowiadający systemowi rzeczywistemu z rys.1. Schemat modelu został wykonany przy pomocy programu TCadSchem, wchodzącego w skład pakietu TCAD.



Rys.2. Schemat modelu systemu PV

W dalszej części opisano poszczególne składniki modelu z rys.2.

3.1 Model PVG

Biblioteka elementów programu TCadSchem nie posiada źródła zasilania w postaci generatora PV. Dlatego model takiego źródła został utworzony z elementów dostępnych w pakiecie TCAD, na bazie opatentowanego modelu [4]. Model PVG składa się z następujących elementów:

1) I_{PV} – źródło prądu jednokierunkowego o programowanym przebiegu w funkcji czasu. Jego wydajność jest proporcjonalna do napromienienia modułów PV tworzących PVG.

Wartość I_{PV} jest określana na podstawie wzoru:

$$I_{PV} = 0,00385 \cdot E - 0,01 \quad (1)$$

E – napromienienie w W/m^2

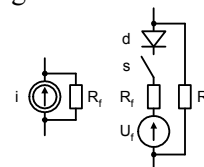
$0,00385A \cdot m^2/W$ – stała dla zastosowanych modułów PV

$0,01A$ – uwzględnia pobór prądu przez układy TD i FU, bezpośrednio z PVG

I tak, dla modelowanego napromienienia $1000W/m^2$: $I_{PV}=3,84A$, a dla modelowanego napromienienia $200W/m^2$: $I_{PV}=0,76A$.

Zastosowanie źródła programowanego umożliwiło symulację stanów dynamicznych pochodzących od strony PVG – liniowych wzrostów i spadków napromienienia.

2) D3,...D11 – dziewięć zaworów typu „diody”. Na rys.3 przedstawiono schematy zastępcze źródła prądowego i zaworu w TCAD.



Rys. 3. Schematy zastępcze elementów z programu TCAD: źródło prądu oraz zawór (diody, tranzystor, tyrystor)

Każde źródło napięcia i prądu w TCAD traktowane jest jako nieidealne. W przypadku źródła prądu, jego model składa się z idealnego źródła prądu oraz równoległej rezystancji wewnętrznej R_f . Z kolei model zaworu składa się z napięcia progowego U_f , rezystancji szeregowej R_f , łącznika idealnego s (nie występuje dla diody), diody idealnej d oraz rezystancji wstecznej R_f .

Cały model generatora PV oparty jest na schemacie zastępczym ogniwa PV [5] oraz na aproksymacji odcinkami liniowymi charakterystyki diody występującej w tym schemacie. Ilość tych odcinków jest równa ilości zaworów typu „diody” w modelu, plus jeden odcinek, zaczynający się od punktu zwarcia, który jest realizowany przez element I_{PV} . W omawianym modelu charakterystyka całego generatora jest więc uzyskiwana z dziesięciu odcinków dopasowanych tak, by jak najwierniej odzwierciedlić charakterystyki zewnętrzne rzeczywistego generatora dla różnych wartości napromienienia. Dopasowania tego dokonuje się dobierając odpowiednie wartości R_f (10 parametrów) oraz U_f (9 parametrów). Im więcej zaworów typu „diody” występuje w modelu, tym dokładniej model odwzorowuje rzeczywisty generator, ale komplikuje to model i wydłuża obliczenia. W omawianym modelu występuje 9 „diod”, co zapewniło wystarczająco dobrą dokładność.

Zastosowany model PVG umożliwia bardzo proste modelowanie zmian napromienienia –

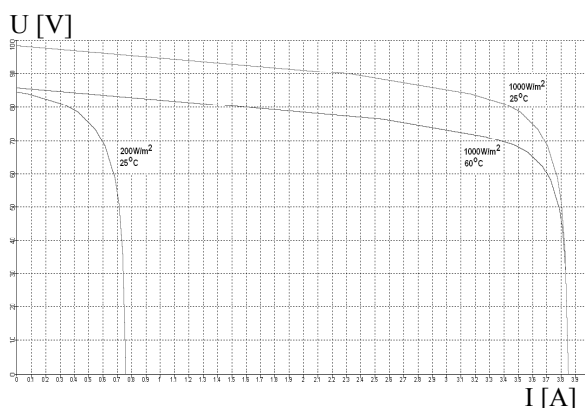
poprzez zmianę wydajności źródła I_{PV} , a także w miarę proste modelowanie pracy generatora dla różnych temperatur jego ogniw – poprzez proporcjonalną zmianę U_f dla każdej z „diod” D3-D11, zgodnie z zasadą że wzrostowi temperatury ogniw o 1°C odpowiada spadek U_f o 0,5%. Jak widać, w tym modelu zmiany modelowanego napromienienia i temperatury mogą być dokonywane niezależnie od siebie.

W tabeli 1 podano wartości parametrów elementów I_{PV} , D3, D4, ..., D11 dla całego generatora PV, dla różnych modelowanych wartości temperatury ogniw PVG. Podane wartości są słuszne dla konkretnego typu modułów zastosowanych w systemie rzeczywistym. Dla każdej z „diod” D3-D11 przyjęto względnie bardzo dużą wartość $R_f=10\text{M}\Omega$.

Tab. 1. Wartości parametrów elementów modelu PVG

| Element modelu | R_f [Ω] | U_f dla 25°C [V] | U_f dla 60°C [V] |
|----------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| I_{PV} | 1600 | --- | --- |
| D3 | 900 | 36,5 | 31 |
| D4 | 500 | 51,5 | 43,8 |
| D5 | 290 | 59 | 50,1 |
| D6 | 160 | 68,5 | 58,2 |
| D7 | 90 | 73,5 | 62,5 |
| D8 | 50 | 78,5 | 66,7 |
| D9 | 29 | 81 | 68,9 |
| D10 | 16 | 84 | 71,4 |
| D11 | 7,5 | 90 | 76,5 |

Na rys. 4 zaprezentowano przykładowe charakterystyki zewnętrzne U-I modelu całego PVG, dla różnych wartości modelowanego napromienienia i temperatury ogniw.



Rys. 4. Przykładowe charakterystyki zewnętrzne modelu PVG

3.2 Model tranzystora T2 i diody D2

W TCAD przyjęty jest model dyskretny tranzystora jako elementu dwustanowego. Niestety, brak jest modelu ciągłego tranzystora. Został więc on utworzony na bazie schematu zastępczego tranzystora jako czwórnika liniowego o parametrach mieszanych:

- Dioda (D2,T2) – modeluje obwód baza-emiter tranzystora T2 i od razu diodę Zenera D2 z systemu rzeczywistego. $U_{f0}=6,7\text{V}$, $R_f=10\text{k}\Omega$, $R_r=10\text{G}\Omega$.

- Źródło prądu (T2) sterowane prądem diody (D2,T2) – modeluje obwód kolektor-emiter tranzystora T2 z systemu rzeczywistego. Przyjęto wzmocnienie prądowe rzeczywistego tranzystora T2: $h_{21E}=200$, i tyle wynosi współczynnik wzmocnienia sterowanego źródła prądu T2 w modelu.

3.3 Opis modeli pozostałych elementów, na podstawie schematu z rys. 2:

- C1=470 μF ; wartość dobrana podczas symulacji tak, by ograniczyć pulsacje napięcia na zaciskach PVG poniżej 0,1V.

- T1: $R_f=0,06\Omega$, $U_f=0\text{V}$

- D1: $R_f=0,02\Omega$, $U_f=0,45\text{V}$

- F: $R=0,01\Omega$

- EM: model maszyny obcowzbudnej. Rezystancja twornika $R_a=0,96\Omega$, indukcyjność twornika $L_a=2,5\text{mH}$, znamionowy strumień $\Psi=0,16\text{Wb}$, prędkościowy współczynnik zmian momentu strat: $D=0,000114\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$, moment bezwładności wirnika: $J=0,00032\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

Aby z modelu maszyny obcowzbudnej uzyskać model maszyny ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, w obwodzie wzbudzenia zastosowano źródło prądu o stałej wydajności $I_f=1\text{A}$.

- ML: model maszyny o momencie oporowym proporcjonalnym do kwadratu prędkości. Moment ten opisuje równanie:

$$M=M''\cdot\omega^2 \quad (2)$$

W modelu: $M''=0,000006\text{Nm}\cdot\text{s}^2/\text{rad}^2$, moment bezwładności wirnika $J=0,001\text{kg}\cdot\text{m}^2$.

- R1=740k Ω ; wartość dobrana podczas symulacji tak, by zapewnić maksymalną moc oddawaną przez silnik dla wysokich wartości napromienienia.

- R2=47k Ω ; wartość założona. W modelu jest ona uwzględniona jako rezystancja R_f źródła prądowego T2.

- R3=330k Ω ; wartość dobrana podczas symulacji tak, by zapewnić maksymalną moc oddawaną przez silnik dla niskich wartości

napromienienia. W modelu jest ona uwzględniona jako rezystancja R_f źródła napięcia +5V.

- C2=2,2 μ F; wartość tą dobrano podczas symulacji by złagodzić tempo rozruchu silnika. Dzięki temu ograniczona została wartość chwilowa prądu twornika podczas rozruchu, tak by nie przekraczała dwukrotnej wartości znamionowej (8,4A).

- SW – łącznik sterowany z generatora sygnału skokowego SWa poprzez komparator SWb. Elementy te umożliwiają zatrzymanie silnika w żądanej chwili (na rys.6 i rys.7 w chwili 1,2s).

- R4=350k Ω ; wartość dobrana podczas symulacji. Zapewnia ograniczenie napięcia silnika do takiej wartości, przy której prąd silnika w stanie ustalonym nie przekracza prądu znamionowego (4,2A).

- R5=47k Ω ; wartość założona.

- C3=220nF; wartość dobrana eksperymentalnie, zapewniająca odpowiednie filtrowanie składowej zmiennej napięcia twornika, a jednocześnie odpowiednio szybką reakcję ogranicznika prędkości i brak przeregulowań prędkości.

- PWMA, PWMb, PWMc – generator sygnału piłokształtnego (amplituda 4,5V, częstotliwość 20kHz), sumator i komparator (napięcie odniesienia 4,5V). Takie parametry zapewniają sterowanie tranzystora T1 impulsami prostokątnymi o stałej częstotliwości 20kHz, ale o zmiennym wypełnieniu: dla (PWM Voltage)=0V współczynnik wypełnienia jest równy 0, dla (PWM Voltage) = 4,5V współczynnik wypełnienia jest równy 1.

- TD, FU – nie są modelowane, bo ich praca nie ma zauważalnego wpływu na kształt rejestrowanych przebiegów i na działanie całego modelu, choć bloki te są niezbędne w systemie rzeczywistym. Jak wcześniej wspomniano przy okazji omawiania modelu PVG, w modelu systemu uwzględniono jednak pobór mocy w systemie rzeczywistym przez te bloki.

- PVGsVoltage – czujnik rejestrujący napięcie na zaciskach generatora PV.

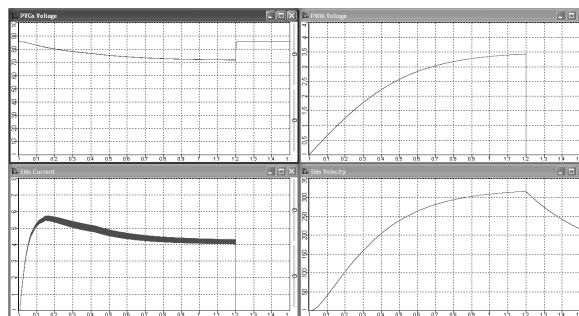
- PWM Voltage – czujnik rejestrujący napięcie w części sterującej, od którego liniowo zależy wartość współczynnika wypełnienia impulsu przerywacza.

- EMs Current – czujnik rejestrujący prąd twornika silnika.

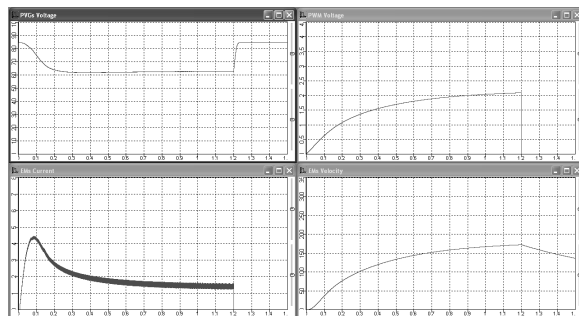
- EMs Velocity – czujnik rejestrujący prędkość kątową wału silnika i pompy.

4. Wyniki symulacji na modelu systemu

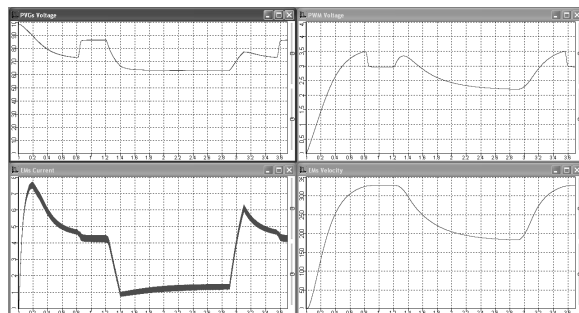
Na rys.6,7,8 przedstawiono wyniki symulacji wykonanych z krokiem obliczeń $h=0,5\mu$ s.



Rys. 6. Rozruch silnika, a po 1,2s odłączenie go od PVG przez zwarcie SW. Stałe napromienienie 1000 W/m², stała temperatura ogniwi 60°C – są to parametry typowe dla upalnego, bezchmurnego dnia letniego (środek dnia)



Rys. 7. Rozruch silnika, a po 1,2s odłączenie go od PVG przez zwarcie SW. Stałe napromienienie 200 W/m², stała temperatura ogniwi 25°C – są to parametry typowe dla zachmurzonego dnia letniego (środek dnia)



Rys. 8. Praca systemu przy zmianach napromienienia i stałej temperaturze ogniwi 25°C: 0÷1,2s – rozruch silnika przy napromienieniu 1000W/m². Prąd silnika podczas rozruchu chwilowo osiąga 1,8 prądu znamionowego. Gdy w 0,81s prędkość osiąga 320 rad /s, co w stanie ustalonym oznaczałoby pracę z prądem znamionowym 4,2A, zaczyna działać ogranicznik prędkości. Generator przechodzi z punktu MPP w stronę biegu jałowego, więc napięcie na

jego zaciskach rośnie. Prędkość się ustala, a wartość średnia prądu maleje do 4,2A.

1,2÷1,4s – liniowy spadek napromienienia do 200W/m². Napięcie PVG maleje do nowej wartości MPP (około 62V), prędkość silnika maleje do ok. 55% prędkości znamionowej, ale moc pobierana przez pompę maleje do 16% wartości znamionowej, bo moc wejściowa pompy jest proporcjonalna do trzeciej potęgi prędkości.

1,4÷2,9s – stałe napromienienie 200W/m².

2,9÷3,1s – liniowy wzrost napr. do 1000W/m².

3,1÷3,7s – stałe napr. 1000W/m². Występują zjawiska typowe dla końcowej fazy rozruchu

5. Wnioski końcowe

Jak wynika z przeprowadzonych symulacji, układ MPPT automatycznie i szybko dostosowuje pracę systemu do zmian napromienienia. Podczas nawet szybkich stanów dynamicznych brak jest przeregulowań prędkości oraz oscylacji sygnałów mechanicznych i elektrycznych, za wyjątkiem pulsacji prądu silnika, które są typowe dla pracy silnika zasilanego z przerywacza. Występują za to przeregulowania wartości średniej prądu, ale wynikają one z zamierzonej szybkości reakcji silnika na zmiany napromienienia, czyli zamierzonych dobrych właściwości dynamicznych. Można te przeregulowania zmniejszyć zwiększając wartość C2, ale wydłuży to procesy przejściowe.

Zastosowany układ MPPT jest niezwykle prosty, tani, charakteryzuje się znikomym poborem mocy, dobrą stabilnością i odpornością na zakłócenia. Symulacje pozwoliły na precyzyjne dobranie wartości R1 dla temperatury ogniw 40°C, a R3 dla 20°C. Wynikająca z symulacji dokładność maksymalizacji mocy w warunkach typowych dla miesięcy maj-wrzesień w Polsce (zmiany napromienienia od 100 do 1000W/m², zmiany temperatury ogniw PV od 10 do 60°C) nie spada poniżej 97,5%, co jest parametrem bardzo dobrym.

Niestety, wadą opisanego układu MPPT jest niedokładna maksymalizacja przy pracy generatora w niejednorodnych warunkach (częściowe zacinienie lub zabrudzenie modułów PV) i po zmianie kształtu charakterystyk wskutek zesterzenia ogniw. Dlatego podczas eksploatacji systemu należy pamiętać o prawidłowym ustawianiu generatora tak, aby nie był częściowo zaciemniany, a także okresowo czyścić powierzchnię jego modułów. Z kolei co kilka lat zaleca się kontrolne dostrojenie układu MPPT (wartości rezystorów R1, R3), by przy-

stosować układ do zmiany charakterystyk generatora wynikłych z procesu starzenia się ogniw. Symulacje komputerowe pozwoliły na szybkie zoptymalizowanie parametrów systemu (np. R1, R3, R4, C1, C2, C3) na drodze eksperymentalnej, metodą prób i błędów. Dzięki temu nie były konieczne żmudne obliczenia tych parametrów. Wadą symulacji jest jednak z pewnością czasochłonność w przygotowaniu modelu i przeprowadzeniu symulacji. Ponadto nieuwzględnienie w modelu dokładnych parametrów systemu oraz zaniedbanie niestacjonarności i nieliniowości elementów przyczyniają się do znaczących różnic ilościowych między uzyskanymi rezultatami z badań na modelu materialnym (prototypie) i omówionym modelu numerycznym.

Mankamentem omawianego systemu jest zastosowany rodzaj silnika (komutatorowy). Ogranicza to warunki środowiskowe zastosowania systemu i podwyższa jego koszty eksploatacyjne oraz awaryjność. Jednakże opisany układ maksymalizacji powinien dobrze współpracować z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego, przy czym jako parametr maksymalizowany można wybrać nie tylko wartość średnią napięcia zasilającego falownik sterujący silnikiem, ale też częstotliwość napięcia zasilającego silnik.

6. Literatura

- [1]. Niechaj M.: *Maksymalizacja mocy generatora w fotowoltaicznych systemach napędowych*. „Electric driving systems supplied from unconventional power sources” Seria wyd. „Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki” Lublin, 2000, s.24-39
- [2]. Niechaj M.: *The Operation of Power Electronic Converters in Photovoltaic Drive Systems*. EPE-PEMC 2008, Poznań, 1-3.09.2008, pp. 1913-1918
- [3]. Szczęsny R.: *Komputerowa symulacja układów energoelektronicznych*. Wyd. Pol. Gdańskiej, 1999
- [4]. Niechaj M.: *Sposób symulacji pracy generatora fotowoltaicznego*. Numer patentu: PL 193852 B1 Biuletyn Urzędu Patentowego, 2002, vol. 741
- [5]. Niechaj M., Horodecki A.: *Symulacja pracy generatora fotowoltaicznego*. MiS2002. Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002, s.437-444

Autor

Marek Niechaj, tel. 81-538-4340

m.niechaj@pollub.pl

Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Politechnika Lubelska