

Marek Niechaj
Politechnika Lubelska, Lublin

OPTIMALIZACJA PRACY MASZyny ELEKTRYCZNEJ W FOTOWOLTAICZNYM SYSTEMIE NAPĘDOWYM

THE OPTIMIZATION OF ELECTRICAL MACHINE'S OPERATION IN PHOTOVOLTAIC DRIVE SYSTEM

Abstract: This article presents essential methods of securing the improvement of electrical machine's operation parameters, during machine's operation in the systems with photovoltaic generator (directly converting sunlight radiation energy into electrical energy) as the basic energy source. The article mainly fixes attention on the aspects that are possible to carry into effect at the stage of project, installation and exploitation of the photovoltaic system. These aspects refer to attaining maximum efficiency of energy conversion by the machine and in the whole system, maximization of machine's lifetime, and also maximization of supply reliability of electrical machine's load. The described problem is very significant for stand-alone system structures (i.e. not co-operating with electroenergetical grid) and simultaneously without electrochemical accumulators as buffer energy sources. Such structures have: systems with direct connection of electrical machine to photovoltaic generator, systems without any electrical buffer energy source but comprising ergoelectrical converter between photovoltaic generator and machine, and finally systems with two converters and a capacitor as electrical buffer source.

1. Wstęp

Ze względu na wysoki koszt energii elektrycznej pozyskiwanej w generatorach fotowoltaicznych (PV), przetwarzających energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną prądu stałego, niezmiernie istotną rolę projektanta i użytkownika systemu PV jest taki dobór parametrów wszystkich elementów systemu, by w maksymalnym stopniu wykorzystać możliwości wytwórcze generatora, zapewniając jednocześnie maksymalną pewność zasilania odbiorcy energii. Spełnienie tego warunku wiąże się przede wszystkim z maksymalizacją sprawności konwersji energii w całym systemie, co jest bezpośrednio powiązane z zapewnieniem maksymalnej sprawności wszystkich elementów systemu. Równie istotne jest także zapewnienie maksymalnej sprawności konwersji energii przez generator PV, a za to odpowiadają elementy systemu bezpośrednio obciążające generator.

W fotowoltaicznych systemach napędowych podstawowym odbiorcą energii elektrycznej jest maszyna elektryczna (silnik), przekazująca następnie energię mechaniczną swemu obciążeniu – maszynie roboczej. W [1] opisano podstawowe właściwości fotowoltaicznych systemów napędowych, w szczególności właściwości generatorów PV jako źródeł energii o zmiennej w szerokim zakresie wydajności

energetycznej, najistotniejsze właściwości różnych struktur systemów PV, możliwości zastosowania różnego rodzaju maszyn elektrycznych w systemach PV, a także wymagania stawiane przekształtnikom współpracującym z tymi maszynami i generatorami PV.

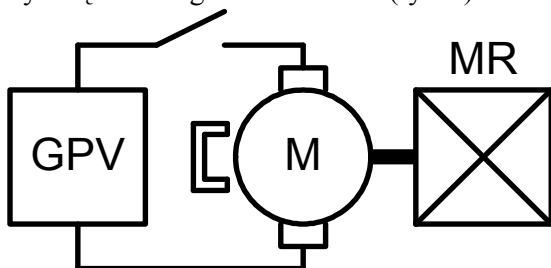
W niniejszym artykule skoncentrowano się na sposobach poprawy efektywności wykorzystania w fotowoltaicznym systemie napędowym zarówno maszyny elektrycznej, jak i generatora PV. Ze wspomnianych wcześniej wysokich wymagań odnośnie sprawności konwersji energii wynika, że niezależnie od struktury systemu PV (współpracująca z siecią, autonomiczna z elektrycznym źródłem buforowym i autonomiczna bez takiego źródła) należy stosować maszyny energooszczędne. Dodatkowo, w przypadku systemów w których nie występuje elektryczne źródło buforowe (sieć energetyczna, akumulator, kondensator), maszyna taka powinna charakteryzować się nie tylko wysoką sprawnością znamionową, ale też możliwie jak najbardziej płaskim przebiegiem krzywej sprawności w szerokim zakresie pobieranej mocy. Należy też, jeśli jest to możliwe bez znacznego ograniczenia wypełniania przez maszynę roboczą podstawowych funkcji narzuconych jej przez użytkownika systemu, tak zaplanować reżim pracy maszyny roboczej, by

zapewniała ona pracę silnika z maksymalną sprawnością, bądź przynajmniej w strefie w pobliżu maksymalnej sprawności.

W kolejnych rozdziałach omówiono dodatkowo, szczegółowe wymagania dotyczące zasad doboru maszyny elektrycznej i reżimu jej pracy w systemie PV, w zależności od struktury tego systemu.

2. Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w systemie z bezpośrednim jej podłączeniem do generatora PV

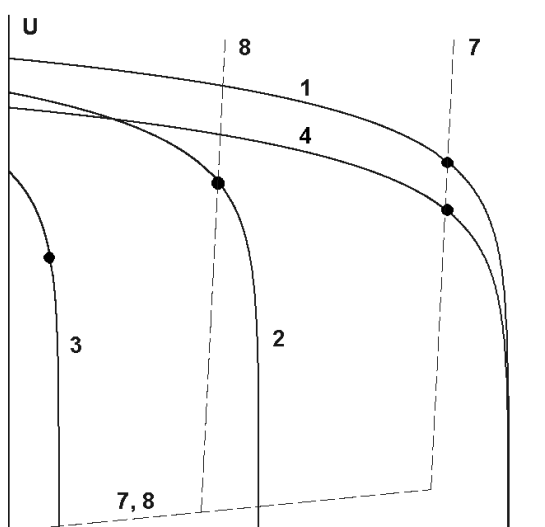
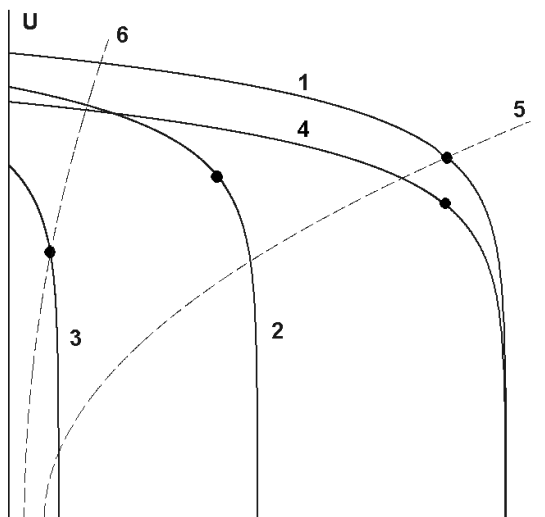
Poniżej poddano analizie najprostszą z możliwych do uzyskania struktur systemu PV. System ten nie zawiera elektrycznego źródła buforowego i nie występuje w nim przekształtnik energoelektryczny pomiędzy maszyną elektryczną M oraz generatorem PV (rys. 1).



Rys.1. Schemat ideowo-blokowy systemu PV z bezpośrednim podłączeniem generatora fotowoltaicznego (GPV) do maszyny elektrycznej komutatorowej ze wzbudzeniem od magnesów trwałych (M), napędzającej maszynę roboczą (MR).

Jak wykazano w [1], w takim systemie może znaleźć zastosowanie przede wszystkim maszyna komutatorowa ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, a w niektórych rzadkich przypadkach także szeregowa. W dalszej części nie analizowano pracy maszyny szeregowej.

Na rys. 2 porównano charakterystyki wyjściowe GPV (zależności napięcia na zaciskach generatora PV od prądu pobieranego z generatora, dla czterech przypadków pogodowych) oraz charakterystyki wejściowe (zależności napięcia na tworniku od prądu twornika) silnika M napędzającego najbardziej typowe dla fotowoltaicznych systemów napędowych maszyny robocze: o charakterystyce wentylatorowej (pompa odśrodkowa, wentylator) bądź dźwigowej (transporter, zadajnik karmy).



Rys.2. Porównanie charakterystyk wyjściowych GPV (1,2,3,4) z ch-kami wejściowymi maszyny M, napędzającej maszynę robocze typu wentylatorowego (5,6) oraz dźwigowego (7,8).

Punkty zaznaczone na ch-kach 1÷4 określają punkty mocy maksymalnej GPV (MPP).

1 – napromienienie 1000W/m^2 , temperatura ogniw PV ok. 20°C (np. bezchmurny dzień kwietniowy)

2 – napromienienie 500W/m^2 , temperatura ogniw j.w. (lekkie zachmurzenie)

3 – napromienienie 100W/m^2 , temperatura ogniw j.w. (dzień pochmurny)

4 – napromienienie 1000W/m^2 , temperatura ogniw PV ok. 60°C (np. bezchmurny dzień sierpniowy)

Ze względu na bezpośrednie podłączenie M do GPV, prąd i napięcie twornika silnika są jednocześnie odpowiednio prądem i napięciem wyjściowym GPV. Dlatego też punkty przecięcia

charakterystyk M i GPV określają punkty pracy całego systemu PV w stanie ustalonym.

Optymalizacja pracy omawianej struktury systemu polega na takim dopasowaniu charakterystyk wyjściowych GPV i charakterystyki wejściowej silnika, by charakterystyka silnika w jak najszerszym zakresie znajdowała się w pobliżu punktów mocy maksymalnej (MPP) generatora, niezależnie od temperatury ogniw PV tworzących generator oraz od ich napromienienia, czyli natężenia promieniowania słonecznego padającego na ogniwa.

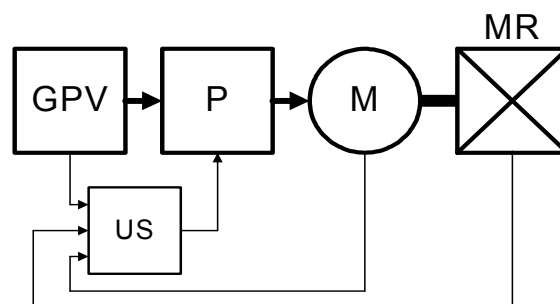
Dla omawianej struktury bardzo dobre dopasowanie nie jest możliwe, aczkolwiek w przypadku napędu MR o charakterystyce wentylatorowej niekiedy może być dokonane w zadowalająco dobry sposób. Na szczegółowy sposób dopasowania wpływ mają przede wszystkim wymagania stawiane przez użytkownika systemu. Jeśli zależy mu na jak największej pewności zasilania, czyli zapewnieniu efektywnej pracy wentylatora nawet w chwilach pochmurnych (dla niewielkich wartości napromienienia), wskazane jest zastosowanie wentylatora o charakterystyce zbliżonej do linii 6 (rys. 2). Jeśli natomiast użytkownikowi zależy na możliwie najbardziej efektywnym wykorzystaniu systemu, czyli jak najniższym jego koszcie instalacyjnym w stosunku do uzyskiwanej wydajności wentylatora, to wskazane jest zastosowanie wentylatora o charakterystyce zbliżonej do linii 5. Zapewni to optymalną pracę wszystkich elementów systemu dla wysokich wartości napromienienia, ale w dni pochmurne wentylator w ogóle nie będzie pracował, bądź też jego praca będzie nieodczuwalna (brak wyczuwalnego przepływu powietrza ze względu na zbyt niską prędkość wirowania wirnika).

W przypadku maszyny roboczej o charakterystyce dźwigowej (np. transportera), nie jest możliwe zadowalające nawet w niewielkim stopniu dopasowanie maszyny elektrycznej do generatora PV. Dla małych wartości napromienienia (krzywa 3 na rys. 2) transporter niezależnie od obciążenia w ogóle nie będzie pracował, a moc oddawana przez GPV będzie jedynie nagrzewała uzwojenie twornika. Należy przy tym podkreślić, że wykorzystanie mocowe generatora będzie w tej sytuacji niewielkie w stosunku do aktualnych możliwości wytwórczych GPV, ze względu na pracę GPV daleko od MPP (w pobliżu punktu zwarcia). Dla średniego obciążenia transportera (linia 8) system będzie efektywnie pracował dla średnich warto-

ści napromienienia (krzywa 2), ale dla dużych wartości napromienienia (krzywa 1) GPV będzie niewykorzystany – praca daleko od MPP (w pobliżu punktu biegu jałowego). Z kolei przy pełnym obciążeniu transportera (linia 7), silnik będzie pracował jedynie dla wysokich wartości napromienienia.

Cechą korzystną systemu z transporterem, która wynika z porównania charakterystyk 1 oraz 4 z charakterystyką 7, jest dość dobra niezależność efektywności od temperatury ogniw PV, czego nie da się zapewnić w systemie z wentylatorem. Jak wynika między innymi z powyższych analiz, system ten może w praktyce znaleźć zastosowanie jedynie do zasilania silników o mocy znamionowej rzędu co najwyżej kilkunastu watów, napędzających np. wentylatory samochodowe [1]. Przy większych mocach i innych rodzajach maszyn elektrycznych i maszyn roboczych zalecana jest struktura systemu z przekształtnikiem pomiędzy GPV a silnikiem.

3. Optymalizacja systemu z przekształtnikiem pomiędzy generatorem PV i maszyną elektryczną



Rys.3. Schemat fotowoltaicznego systemu napędowego bez elektrycznego źródła buforowego, z przekształtnikiem P pomiędzy GPV oraz M. US – układ sterujący przekształtnikiem

W przypadku maszyny komutatorowej z magnesami trwałymi bądź szeregowej (dalej w skrócie: maszyny DC), pomiędzy generatorem PV a maszyną elektryczną stosuje się przekształtnik DC/DC – przerywacz, najczęściej o strukturze obniżającej napięcie, rzadziej podwyższający napięcie. Ale struktura ta stwarza możliwość zastosowania w systemie PV maszyny indukcyjnej trójfazowej bądź maszyny z magnesami trwałymi i komutacją elektroniczną (dalej w skrócie: maszyny AC). W takich przypadkach jako P stosuje się przekształtnik DC/AC, przy czym dla maszyny indukcyjnej

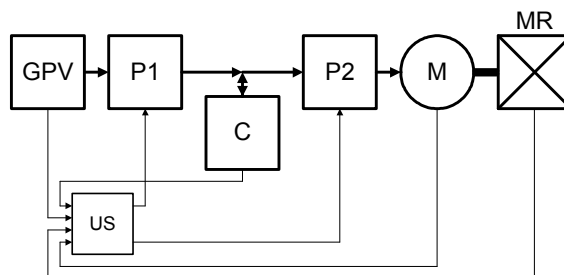
najlepsze właściwości zapewnia falownik MSI (z modulacją szerokości impulsu).

Optymalizacja pracy silnika w tej strukturze systemu polega na zapewnieniu takiego sterowania przekształtnikiem, by zapewniał on pracę GPV w MPP niezależnie od napromienienia i temperatury ogniw PV, czyli przy zmianach położenia MPP jak na rys. 2 [2]. Jest to możliwe do zrealizowania w miarę prosty i dokładny sposób, gdy zastosuje się jedną z poniższych strategii sterowania:

I) Sterowanie przekształtnika według jednoznacznej funkcji któregoś z parametrów zasilania maszyny elektrycznej. W przypadku maszyn AC wykorzystuje się częstotliwość zasilania, wraz z odpowiednim dopasowaniem do danej częstotliwości wartości skutecznej zasilającego napięcia celem uzyskania maksymalnej sprawności maszyny. Z kolei dla maszyny DC wykorzystuje się wartość średnią napięcia twornika. W układach zbudowanych według tej strategii można przykładowo zastosować dodatnie sprzężenie zwrotne od częstotliwości bądź wartości średniej napięcia [2]. Strategia ta jest prostsza w realizacji od omówionej poniżej, ale niestety zapewnia mniejszą dokładność optymalizacji pracy systemu.

II) Wykorzystanie do sterowania przekształtnika wspomnianych przy omawianiu strategii I parametrów (częstotliwość, wartość średniej napięcia), ale nie są już one jednoznacznie funkcją parametrów zasilania maszyny, lecz ulegają ciągłym zmianom, nawet przy stałym napromienieniu i temperaturze ogniw GPV. Celem tych zmian jest poszukiwanie maksymalnej wartości parametru sterowania, która to wartość zapewnia maksymalną prędkość wirowania maszyny w danych warunkach napromienienia i temperatury. Po znalezieniu tego maksimum prędkości, parametr sterujący oscyluje wokół wartości która zapewniła maksymalną prędkość aż do momentu zmiany któregoś z czynników zewnętrznych – od strony GPV (napromienienie, temperatura) lub MR (zmiana momentu obciążenia). Układy sterowania wykorzystujące tę strategię zwane są układami przeszkakującymi [2]. Opisana strategia zapewnia wyraźnie lepszą optymalizację pracy systemu, ale jest trudniejsza w realizacji praktycznej i wymaga większego nakładu pracy na etapie projektowania i uruchamiania systemu w celu zapewnienia stabilnej jego pracy.

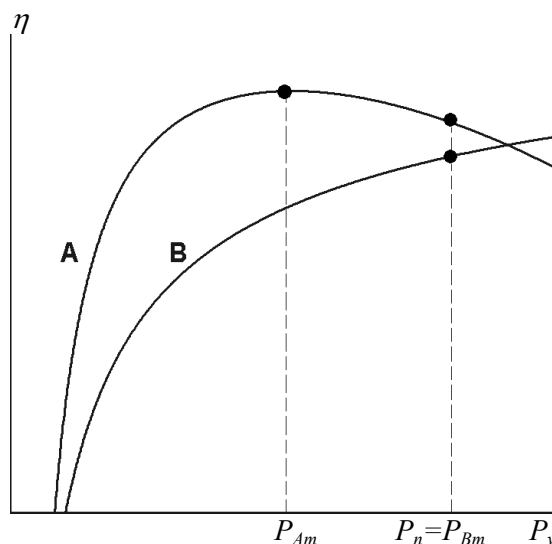
4. Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w systemie PV z kondensatorem jako elektrycznym źródłem buforowym



Rys.4. Schemat systemu z dwoma przekształtnikami P1 i P2 oraz z kondensatorem C jako elektrycznym źródłem buforowym

Szczegółowy opis tej struktury został zamieszczony w [3]. Sposób optymalizacji pracy maszyny M pracującej w systemie z kondensatorem zależy od kształtu charakterystyki sprawności zespołu napędowego (maszyna elektryczna wraz z maszyną roboczą) – rys. 5. System ten, zależnie od wartości napromienienia GPV, może zapewnić cztery stany pracy maszyny elektrycznej, przy założeniu że użytkownik w danej chwili chciałby korzystać z pracy zespołu napędowego:

1. Postój, np. w nocy lub przy bardzo niskiej wartości napromienienia (poniżej ok. 5W/m^2 – pochmurny dzień w grudniu).



Rys.5. Przebieg sprawności dwóch zespołów napędowych (A,B) w funkcji mocy wejściowej P_w pobieranej przez maszynę elektryczną
 P_m – moc odpowiadająca maksymalnej sprawności zespołu napędowego
 P_n – znamionowa moc wejściowa zespołu napędowego

2. Stan pracy przerywanej, występujący dla niskich i średnioniskich wartości napromienienia (w orientacyjnym zakresie $5 \div 200 \text{ W/m}^2$). Podczas postoju maszyny GPV ładuje kondensator, z kolei podczas pracy maszyna pobiera z GPV i z kondensatora moc P_m (rys. 5), rozładowując go. Optymalizacja pracy maszyny w tym stanie polega na zapewnieniu jej pracy z maksymalną sprawnością, czyli z mocą P_m .
3. Stan pracy ciągłej, dla średnich wartości napromienienia (orientacyjnie $200 \div 500 \text{ W/m}^2$). W stanie tym, przy wzroście napromienienia, maszyna elektryczna zwiększa pobieraną moc od wartości P_m do wartości P_n , czyli przechodzi od pracy z maksymalną sprawnością do pracy z maksymalną mocą. Stan ten występuje jedynie dla zespołów napędowych o kształcie charakterystyki jak krzywa A na rys. 5.
4. Stan pracy ciągłej dla wysokich wartości napromienienia (orientacyjnie powyżej 500 W/m^2). Maszyna pracuje ze znamionową mocą P_n niezależnie od napromienienia. W tym stanie optymalizacja pracy nie jest możliwa, gdyż ze względu na groźbę uszkodzenia maszyny (zbyt duży prąd lub zbyt duża prędkość) nie można zapewnić jej pracy z mocą wejściową powyżej wartości znamionowej. To niestety skutkuje przemieszczaniem się punktu pracy GPV od MPP w stronę punktu biegu jałowego.

5. Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w systemie PV z akumulatorem bądź siecią energetyczną jako elektrycznym źródłem buforowym

W systemach autonomicznych z akumulatorem, bądź też współpracujących z siecią elektroenergetyczną, praca maszyny elektrycznej jest praktycznie niezależna od napromienienia i temperatury ogniwa generatora. Dla tych systemów optymalizacja pracy maszyny elektrycznej jest dobrze znanym zagadnieniem związanym z zasilaniem jej ze źródła energii o stałych parametrach (napięcie, ewentualnie częstotliwość dla systemów współpracujących z siecią prądu przemiennego). Ze względu na wspomnianą we wstępie wymaganą wysoką sprawność wszystkich elementów systemu, należy zapewnić pracę maszyny elektrycznej w okolicy maksimum jej mocy wejściowej P_m (rys. 5). Z kolei realizacja maksymalizacji mocy generatora PV

jest zagadnieniem całkowicie niezależnym od optymalizacji pracy maszyny elektrycznej.

6. Literatura

- [1]. Niechaj M.: *Aspekty współpracy maszyn elektrycznych i generatorów fotowoltaicznych*. Zeszyty Problemowe BOBRME *Maszyny elektryczne* nr 75/2006
- [2]. Niechaj M.: *Maksymalizacja mocy generatora w fotowoltaicznych systemach napędowych*. Książka *Electric driving systems supplied from unconventional power sources. Selected problems*. Seria wydawnicza Postępy Napędu Elektrycznego i Energoelektroniki, PAN. Lublin 2000
- [3]. Niechaj M.: *Analiza pracy silnika magnetoelektrycznego zasilanego w systemie fotowoltaicznym z kondensatorem jako buforowym źródłem zasilania*. Materiały konferencji PES-2. Zakopane 1999

Autor

dr inż. Marek Niechaj
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81-5384340, mn@elektron.pol.lublin.pl