

Marek Niechaj
Politechnika Lubelska, Lublin

ASPEKTY WSPÓŁPRACY MASZYN ELEKTRYCZNYCH I GENERATORÓW FOTOWOLTAICZNYCH

ASPECTS OF ELECTRICAL MACHINES AND PHOTOVOLTAIC GENERATORS COOPERATION

Abstract: The most important aspects, determining the operation possibilities of different kind electrical machines in photovoltaic (PV) driving systems, have been discussed in this article. In such a system a PV generator, directly converting sunlight energy into electrical energy, is the basic energy source for electrical machine. Technically, and presently often economically, reasonable examples of PV driving systems applications, such as driving of pumps, compressors, fans and feeders, have been presented below. The basic properties of PV generators, as low-voltage DC-current energy sources with significantly of fate changing parameters, have been short reminded. The basic features of different kind structures of PV driving systems (grid-connected, stand-alone with accumulators, stand-alone without electrical buffer energy sources) have been presented in brief. Detailed description and analysis of different kind electrical machines properties at an angle of possibilities of their operation in PV driving systems has been done. The instructions for selection of energoelectrical energy converters used between PV generators and electrical machines have been also presented. The application of these converters is necessary, because direct connection of the machine to PV generator is either impossible, or in practice not profitable. The article issues will be much more important in Poland in near future, because of permanent, intensive growth of PV market in the wide world (tens percents yearly) for the last several years. This fact should cause analogous state of affairs in Poland soon.

1. Wstęp

Mimo intensywnego kilkunastoletniego rozwoju światowego rynku fotowoltaicznego ceny modułów PV nie spadają tak szybko, jak jeszcze kilka lat temu głosiły optymistyczne prognozy. Spowodowane jest to głównie ogromnym popytem na moduły i związanym z tym zjawiskiem windowania marż przez ich producentów i dystrybutorów. Mimo to ceny te ulegają systematycznemu obniżaniu, co w porównaniu z wyraźnym wzrostem cen energii produkowanej z surowców kopalnych powoduje coraz mniejszą nieopłacalność, a dla wielu rozwiązań nawet wyraźną opłacalność stosowania fotowoltaiki [1]. Widać to jeszcze lepiej, gdy uwzględni się oczywiste korzyści ekologiczne, a w konsekwencji przyszłe ekonomiczne. Obecne stosowanie surowców kopalnych do celów energetycznych zmusi bowiem następne pokolenia do ponoszenia znacznych kosztów celem zredukowania negatywnych skutków takiej produkcji energii. Jednym ze znaczących zastosowań fotowoltaiki są fotowoltaiczne systemy napędowe, w których generatory PV stanowią podstawowe źródło energii dla maszyn elektrycznych. Poniżej wymieniono przykładowe, uzasadnione technicznie, a często również ekonomicznie (dla chwili obecnej bądź

niedalekiej przyszłości), zastosowania praktyczne tych systemów:

1. Pompy wody (nawadnianie pól i szklarni, zapewnianie wody do celów pitnych i gospodarczych w obiektach rekreacyjnych i gospodarstwach hodowlanych, filtrowanie wody w basenach, fontannach i stawach), pompy w instalacjach kolektorów słonecznych.
2. Sprężarki klimatyzatorów i niektórych agregatów chłodniczych.
3. Wentylatory (suszenie płodów rolnych, chłodzenie skraplaczy klimatyzatorów, napowietrzanie stawów rybackich, nawiew w obiektach mieszkalnych i gospodarczych).
4. Zadajniki karmy na fermach hodowlanych i rybackich.

Każde z wymienionych urządzeń charakteryzuje się innymi wymaganiami stawianymi silnikowi w zależności od miejsca instalacji i pełnionej funkcji, takimi jak: zapewnienie odpowiedniej wymaganej pewności pracy urządzenia, wymagania odnośnie stałości prędkości, wartość momentu rozruchowego, niemożność bądź nieopłacalność zastosowania w danym przypadku niektórych rodzajów silników. Z tego powodu nie da się przedstawić jednoznacznych kryteriów doboru silnika dla ogólnie

nego przykładu zastosowania. W wyjątkowych przypadkach może się więc okazać, że konieczne jest zastosowanie rozwiązania które w dalszej części artykułu nie będzie wymienione jako najbardziej zalecane dla danego rodzaju silnika, czy też dla konkretnej struktury systemu PV.

2. Właściwości generatora PV

Generator PV małej mocy (do ok. 1kW) jest niskonapięciowym źródłem energii prądu stałego o znacznej, losowej zmienności parametrów wyjściowych, głównie wartości oddawanej mocy. Zazwyczaj zmiany te są powolne, ale niekiedy mogą sięgać kilkudziesięciu procent w ciągu kilkuset milisekund. Zmienność ta stawia specyficzne wymagania układom dopasowującym parametry energii generatora do wymagań silnika (najczęściej przekształtnikom energoelektronicznym), a często, szczególnie przy dużych wymaganiach odnośnie pewności zasilania, zmusza do stosowania źródeł buforowych – elementów będących w stanie magazynować energię w postaci elektrycznej (akumulatory, kondensatory) bądź już przetworzonej przez maszynę roboczą (dla pomp – gromadzenie wody w zbiornikach, dla urządzeń chłodniczych – pojemność cieplna schłodzonego obiektu).

Podstawowymi czynnikami wpływającymi na parametry generatora PV są:

1. Wartość nasłonecznienia, czyli natężenia promieniowania słonecznego na powierzchni ogniw PV tworzących cały generator. Od nasłonecznienia liniowo zależy prąd zwarcia generatora. Na nasłonecznienie mają wpływ przede wszystkim: pora dnia, zachmurzenie, ustawienie modułów generatora (kąt pochylenia i azymutu), zacielenie przez otaczające obiekty, zanieczyszczenia i śnieg osadzające się na powierzchni modułów. Ostatnie dwa czynniki mogą powodować problemy w pracy generatora, gdyż powodując nierównomierność nasłonecznienia ogniw zniekształcają jego charakterystyki, co znacznie obniża sprawności konwersji energii. Problemy te można jednak zminimalizować odpowiednio umiejscawiając i okresowo czyszcząc moduły.

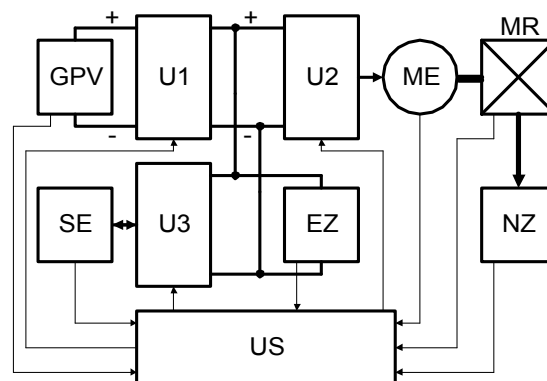
2. Punkt pracy na charakterystyce prądowo-napięciowej (I-U) generatora. Może się on przemieszczać od stanu jałowego, poprzez punkt MPP (Maximum Power Point – punkt mocy maksymalnej, gdzie generator oddaje największą możliwą do uzyskania w danych warunkach

nasłonecznienia i temperatury moc), do stanu zwarcia. Ze względu na wysoki koszt energii produkowanej w systemach PV należy zawsze dążyć do zapewnienia pracy generatora PV w MPP. Do tego celu służą układy maksymalizujące moc generatora [2].

3. Temperatura ogniw PV. Nie wpływa ona praktycznie na wartość prądu zwarcia, wpływa natomiast na napięcie jałowe generatora - wzrost o 2,5°C powoduje spadek napięcia jałowego, a w konsekwencji i mocy, o ok. 1%.

4. Starzenie się ogniw generatora.

3. Struktury napędowych systemów PV



Rys.1. Ogólny schemat blokowy napędowego systemu fotowoltaicznego

GPV – generator fotowoltaiczny

ME – maszyna elektryczna

MR – maszyna robocza

U1, U2, U3 – układy dopasowujące

EZ – elektryczne źródło buforowe

NZ – nie-elektryczne źródło buforowe

SE – sieć energetyczna

US – układ sterujący pracą systemu

Najczęściej spotykane struktury napędowych systemów PV można podzielić na (rys.1):

- I. Współpracująca z siecią. Zawiera GPV, U2, ME, MR, U3, SE, US, wyjątkowo NZ. U3 jest przekształtnikiem nawrotnym (umożliwiającym dwukierunkowy przepływ energii), komutowanym przez SE. Struktura U2 zależy od rodzaju silnika (szerzej omówiono to w rozdziale 4.). W systemie tym pewność zasilania silnika jest większa niż z samej sieci, bo GPV stanowi dodatkowe, niezależne źródło energii.

- II. Autonomiczna z elektrycznym źródłem buforowym. Zawiera GPV, U1 (łącznik lub częściej przerywacz obniżający napięcie, jego zadaniem jest m. in. maksymalizacja mocy GPV), EZ (akumulator, rzadko kondensator [3]), U2 (zależy od rodzaju silnika), ME, MR, US, wyjątkowo NZ. Gdy jako EZ zastosowano aku-

mulator, dobór technicznych parametrów napędu (w stanach dynamicznych i quasi-ustalonych trwających co najwyżej kilkadziesiąt minut, a więc i zagadnienia nagrzewania się elementów układu napędowego) jest prosty i sprowadza się do dobrze znanego zagadnienia zasilania maszyn ze „sztywnego” źródła napięcia stałego o niemal niezmiennej w czasie wartości. Wynika to z niewielkiej rezystancji wewnętrznej oraz stosunkowo dużej pojemności energetycznej akumulatora, co uniezależnia pracę silnika od wahań mocy dostarczanej przez GPV. Należy pamiętać, że akumulator jest źródłem niskonapięciowym, najczęściej o wartości 24V, a nawet w systemach większych mocy (powyżej 1kW) nie przekraczającym 120V. Dlatego też w przypadku gdy nieodzowne jest stosowanie silnika o wyższym napięciu znamionowym, konieczne jest podwyższenie wartości napięcia akumulatora (opisane w rozdziale 4.). Osobnym zagadnieniem jest długoterminowa praca systemu, a także dobór pojemności akumulatora i mocy znamionowej GPV. Jest to problem trudny w analizie, a do jego rozwiązania służy specjalistyczne oprogramowanie.

III. Autonomiczna bez elektrycznego źródła buforowego, z przekształtnikiem. Zawiera GPV, U2 (zależy od rodzaju silnika), ME, MR, US, często NZ. Element U2 pełni tu kilka zadań: przekształca energię prądu stałego na postać użyteczną dla ME, maksymalizuje moc GPV, zabezpiecza ME przed zbyt dużym napięciem i prądem oraz steruje procesami rozruchu i hamowania ME. Struktura ta dobrze się nadaje do napędu wentylatorów i pomp wody przy niskich wysokościach podnoszenia.

IV. Autonomiczna bez elektrycznego źródła buforowego, bez przekształtnika. Zawiera GPV, U2 (ręczny łącznik), ME (komutatorowa), MR. Podstawową wadą tego rozwiązania jest brak możliwości dopasowania charakterystyk I-U generatora PV z charakterystykami I-U silnika obciążonego maszyną roboczą, co wyklucza maksymalizację mocy GPV i tym samym znacznie obniża sprawność systemu. Najmniejszą niezgodność charakterystyk uzyskuje się dla napędu wentylatorów. Dodatkową wadą w przypadku MR o dużym momencie rozruchowym jest to, że rozruch silnika nastąpi dopiero przy znacznych wartościach nasłonecznienia, co grozi przegrzaniem zatrzymanego silnika gdy posiada on chłodzenie własne. Ze względu na liczne wady tej struktury, nie

należy jej stosować w praktyce. Wyjątkiem mogą być systemy o mocy znamionowej silnika rzędu co najwyżej kilkunastu watów przy sterowaniu ręcznym procesem załączania i wyłączania, np. zasilanie silnika wentylatora samochodowego. W innych przypadkach bardziej opłaca się zastosować strukturę III (z przerywaczem). Mimo iż koszt przerywacza wraz z układem US pozornie podniesie koszt instalacyjny systemu (o kilkadziesiąt złotych), jednakże przerywacz zapewni pracę GPV w MPP w szerokim zakresie zmian nasłonecznienia, co poprzez zwiększenie efektywności wykorzystania energii generatora skutkuje mniejszą wymaganą mocą znamionową GPV. Jak widać, poniesienie dodatkowych kosztów na przerywacz wywoła spadek całkowitego kosztu systemu i poprawę jego parametrów.

4. Właściwości i sterowanie maszyn elektrycznych, pod kątem ich pracy w systemach fotowoltaicznych

Najważniejszym wymaganiem stawianym silnikowi elektrycznemu jest spełnianie warunków narzuconych przez maszynę roboczą. Z tego powodu większość parametrów silnika już w początkowym etapie projektowania systemu PV zostaje narzucona, a na dalszych etapach można jedynie się do tych parametrów dostosowywać. Chodzi tu głównie o: znamionową moc i prędkość obrotową, wymagania odnośnie regulacji prędkości, przeciążalność momentem i wartość momentu rozruchowego, rodzaj budowy i stopień ochrony zależne od środowiskowych warunków pracy (temperatura otoczenia, wilgotność powietrza, ewentualna obecność w powietrzu pyłu, substancji żrących czy też wybuchowych).

Gdy powyższe kryteria, przy konkretnym zastosowaniu maszyny roboczej, spełnia kilka rodzajów silników, to przede wszystkim należy wstępnie przyjąć zastosowanie maszyny komutatorowej, gdyż jest ona przystosowana do bezpośredniego zasilania energią prądu stałego. Silnik taki wymagać będzie tańszego, prostszego, bardziej niezawodnego i o większej sprawności układu dopasowującego parametry energii elektrycznej pochodzącej od generatora PV do wymagań silnika - zwykłego łącznika (np. stycznika), choć zdecydowanie korzystniejsze jest zastosowanie przerywacza prądu stałego (przetwornicy DC/DC). Zalety prostszego układu dopasowującego w wielu przypadkach skompensują wady silników komuta-

torowych, głównie nieco wyższy koszt (w porównaniu z maszyną indukcyjną) i konieczność częstszej konserwacji silnika.

Spośród maszyn komutatorowych, do zastosowania w systemach PV nadają się tylko silniki ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, a także, w niektórych szczególnych przypadkach, silniki szeregowe. Zaletą maszyn z magnesami trwałymi są bowiem: wysoka sprawność, bardzo dobre właściwości rozruchowe nawet przy oporowym momencie rozruchowym znacznie przekraczającym moment znamionowy silnika, czy wreszcie prostota regulacji, stabilizacji i kontroli momentu (poprzez kontrolę prądu) i prędkości (poprzez kontrolę napięcia twornika).

Silniki szeregowe, często charakteryzujące się wysoką wartością znamionowej prędkości obrotowej, można zastosować do napędu maszyn roboczych szybkoobrotowych (np. sprężarek i turbin wirowych) o jednoznacznej charakterystyce momentu oporowego, czyli takich którym nie grozi rozbieganie wskutek ewentualnego odciążenia, jak np. pompie wirowej przy braku wody. Ich zaletą jest niska cena oraz małe rozmiary i masa. Wadą jest natomiast niższa sprawność i trudność kontroli prędkości, która zależy znacząco nie tylko od napięcia silnika, ale i od jego momentu obciążenia. Stabilizacja prędkości wymaga więc pomiaru napięcia i prądu, na podstawie których specjalny algorytm obliczałby przybliżoną wartość prędkości. Ze względu na niską cenę tego silnika jego zastosowanie może się okazać bardziej opłacalne w porównaniu z indukcyjnym szybkoobrotowym, gdyż nawet kilkukrotna wymiana wirnika czy całego silnika będzie mniej kosztowna od zastosowania maszyny indukcyjnej wraz z falownikiem przystosowanym do zasilania jej napięciem o wysokiej częstotliwości.

W systemach PV nie należy natomiast stosować silników obcowzbudnych, bocznikowych i szeregowo-bocznikowych, gdyż mimo iż są one nieco tańsze od tych z magnesami trwałymi, to charakteryzują się istotnymi wadami dyskwalifikującymi je do pracy w systemach PV, przede wszystkim niższą sprawnością wynikającą ze strat mocy w uzwojeniu wzbudzenia. Jest to szczególnie istotne gdy silnik często pracuje z obciążeniem wyraźnie mniejszym od znamionowego, gdyż moc pobierana przez uzwojenie wzbudzenia jest niezależna lub zależna w niewielkim stopniu od momentu na wale silnika. Ponadto uzwojenie wzbudzenia

wymagałoby dodatkowego układu zasilającego (przerywacza lub łącznika z układem sterującym) i bardziej złożonego sposobu sterowania: najpierw załączanie prądu wzbudzenia, a po jego ustaleniu załączanie obwodu twornika i rozruch silnika.

Podstawowymi wadami maszyn komutatorowych, w porównaniu z indukcyjnymi i komutowanymi elektronicznie, są: większa zawodność i konieczność częstszej konserwacji, głośniejsza praca, a ponadto silnik taki nie może pracować w szczególnie uciążliwych warunkach (np. w atmosferze żrącej i wybuchowej). Gdy więc ze względu na te wady maszyna komutatorowa nie może być zastosowana, należy wybrać silnik nie wyposażony w komutator mechaniczny.

Spośród takich maszyn, z technicznego punktu widzenia najbardziej odpowiednie do zastosowania w systemach PV są silniki prądu stałego z komutacją elektroniczną, charakteryzują się one bowiem wysoką sprawnością i dość korzystnymi właściwościami ruchowymi w porównaniu z indukcyjnymi, a ponadto silniki takie są przeznaczone do zasilania, poprzez odpowiedni sterownik, z niskonapięciowego źródła napięcia stałego, co jest bardzo pożądaną cechą każdego odbiornika pracującego w systemie PV. Podstawową wadą takich maszyn jest jak dotąd wysoka cena, co wynika głównie z ich produkcji jednostkowej. Tym niemniej maszyny te, po wprowadzeniu na szeroką skalę do produkcji seryjnej, mogą się okazać konkurencyjne w stosunku do maszyn komutatorowych, nawet po uwzględnieniu większego kosztu sterownika w porównaniu z przerywaczem.

W chwili obecnej, spośród maszyn bezkomutatorowych, najbardziej odpowiednią ze względów ekonomicznych maszyną jest silnik indukcyjny trójfazowy niskonapięciowy, cechuje go bowiem szeroka oferta producentów i niska cena, nawet po zamówieniu go w wersji na niskie napięcie znamionowe.

Nie zaleca się natomiast stosowania silników indukcyjnych jednofazowych ze względu na ich mniejszą sprawność, problemy z zamówieniem w wersji niskonapięciowej, a przede wszystkim problemy z ich rozruchem. Nie da się bowiem zastosować dla nich rozruchu częstotliwościowego. Najpierw należy zastosować rozruch bezpośredni, najlepiej przy obniżonej częstotliwości do np. 25Hz, a potem można zwiększać prędkość poprzez wzrost częstotli-

wości. Rozruch bezpośredni zaś, jak wiadomo, wymaga poboru stosunkowo dużej mocy ze źródła zasilania, co w przypadku generatora PV przy słabszym nasłonecznieniu byłoby trudne czy wręcz niemożliwe do przeprowadzenia i wymagałoby zastosowania buforowego źródła energii elektrycznej, chociażby w postaci kondensatora dostarczającego energię na czas rozruchu.

Aby wykorzystać w systemie PV silnik indukcyjny, niezbędne jest zastosowanie przekształtnika energii prądu stałego na energię prądu przemiennego (DC/AC). Stosując silnik trójfazowy, najlepszym rozwiązaniem jest zamówienie go w wersji niskonapięciowej (najlepiej na napięcie około 50÷66% napięcia znamionowego generatora PV). Dzięki temu jako przekształtnik DC/AC można zastosować jedynie falownik mostkowy składający się z sześciu tranzystorów, najlepiej typu MOSFET ze względu na mniejszy spadek napięcia i mniejsze straty przełączania w porównaniu z tranzystorami IGBT. Zastosowanie strategii sterowania tranzystorów metodą modulacji szerokości impulsu (PWM) zapewnia możliwość znacznych zmian prędkości silnika, cichą jego pracę i wysoką sprawność. Falowniki te wymagają co prawda skomplikowanej realizacji sprzętowej (wpływa to na zwiększenie awaryjności pracy) i złożonych algorytmów sterowania, ale przy obecnym stopniu rozwoju techniki mikroprocesorowej nie stanowi to większego problemu i jest stosunkowo tanim rozwiązaniem.

Dla systemów, w których zastosowano silnik o mocy poniżej około 200W i gdy napędzana maszyna robocza charakteryzuje się niezbyt dużą wartością momentu rozruchowego, zamiast strategii PWM można sterować tranzystory impulsami prostokątnymi, co spowoduje zasilanie silnika napięciem schodkowym. Regulację wartości skutecznej napięcia wyjściowego można realizować poprzez zmianę wypełnienia impulsu. Rozwiązanie to charakteryzuje się co prawda gorszymi właściwościami (głośniejsza praca silnika, mniejsza sprawność), ale jest prostsze do zrealizowania i odznacza się większą niezawodnością i sprawnością samego falownika (mniejsze straty przełączania).

Często z daną maszyną roboczą związane są ograniczenia co do rodzaju silnika, np. pompa w agregacie lodówki, zamknięta wraz z silnikiem w nierozbieralnej obudowie, musi być napędzana silnikiem nie wymagającym konserwacji, a więc nie może to być maszyna komu-

tatorowa. Analogicznie, wiele dostępnych na rynku urządzeń jest seryjnie wyposażonych w konkretny typ silnika, np. wirowe pompy wody małej mocy napędzane są zwykle silnikami indukcyjnymi jednofazowymi. Wymiana takiej maszyny na inną (trójfazową, komutatorową), choć często byłaby dopuszczalna z technicznego punktu widzenia, to będzie nieopłacalna przy niewielkiej ilości zamawianych u producenta urządzeń. Dopóki więc nie nastąpi wyraźny rozwój rynku fotowoltaicznego w Polsce, a co za tym idzie masowa produkcja urządzeń wyposażonych we wcześniej zalecane typy silników najlepiej współpracujących z generatorami PV, dopóty wykorzystanie silników standardowo montowanych z daną maszyną roboczą jest bardziej uzasadnione niż ich wymiana na silniki lepiej spełniające wymagania odnośnie pracy w systemach PV, nawet mimo ich wad (np. niższej sprawności, co wymaga zwiększenia mocy znamionowej generatora PV). Jak widać, przy zasilaniu standardowych urządzeń gospodarstwa domowego wyposażonych seryjnie w silnik jednofazowy (pompy wody, lodówki) istnieje konieczność dostosowania systemu PV do zasilania silnika jednofazowego.

W takich przypadkach przetwornica DC/AC musi najczęściej zapewniać podwyższenie napięcia generatora PV. Można zastosować następujące rozwiązania:

1. Dla silników jednofazowych o mocy do około 200W można zastosować transformatorową przetwornicę DC/AC typu push-pull, której tranzystory będą sterowane napięciem prostokątnym lub wedle strategii PWM. Jej zaletami są: niska cena, prostota wykonania zapewniająca w miarę wysoką niezawodność oraz możliwość nawet ponad 10-krotnego podwyższenia wartości napięcia. Niestety, rozwiązanie to charakteryzuje się wieloma wadami: duży ciężar (transformator), niska sprawność (rzędu 50-70%) i niewielki moment rozruchowy silnika. Rozwiązanie to zalecane jest jedynie do odbiorników nie wymagających regulacji prędkości, np. lodówki, pod warunkiem dodatkowego podwyższenia podczas rozruchu napięcia celem uzyskania odpowiedniej wartości momentu rozruchowego.

2. W systemach większych mocy zaleca się stosować układ kaskadowo połączonych dwóch przekształtników: najpierw przerywacza podwyższającego napięcie generatora PV, a następnie przetwornicy DC/AC w postaci falownika PWM. Jedną z zalet tego rozwiązania jest możliwość regulacji przez przerywacz wartości skutecznej napięcia zasilającego silnik, a falownik może jedynie regulować częstotliwość tego napięcia. Zastosowanie specjalnej konstrukcji i sterowania falownika umożliwi też oddzielne zasilanie uzwojenia rozruchowego, a tym samym rozruch częstotliwościowy silnika. Niestety, rozwiązanie to posiada swoje mankamenty wynikające z kaskadowego połączenia dwóch przekształtników: niska sprawność (ale wyższa niż dla przetwornicy push-pull), większa awaryjność i bardziej skomplikowane sterowanie.

3. W systemach PV o mocy znamionowej silnika powyżej około 1kW należy połączyć szeregowo wszystkie moduły generatora PV, co zapewni odpowiednio wysoką wartość napięcia stałego i pozwoli ominąć problem podwyższenia wartości skutecznej napięcia. Zastosowanie maszyny indukcyjnej w systemie o napięciu generatora PV niższym od ok. 300V stwarza problemy z dostępnością ofert producentów falowników, gdyż standardowo dostępne na rynku falowniki są przystosowane do zasilania napięciem przemiennym sieciowym (jednofazowe 230V~ lub trójfazowe 3×400V~). Taki falownik może pracować tylko przy stałej i wysokiej wartości napięcia pośredniczącego obwodu prądu stałego. Do zastosowań w systemach PV wymagane są więc falowniki o nietypowym sterowaniu, a więc droższe od standardowych – muszą być przystosowane do zasilania napięciem stałym, którego wartość charakteryzuje się zmiennością do ok. 30% w przypadku bezpośredniego zasilania falownika z generatora PV.

Na zakończenie należy podkreślić, że do pracy w systemach PV należy stosować silniki, które łącznie z układami dopasowującymi będą miały możliwie najwyższą sprawność. Wymóg ten wynika z wymienionej we wstępie wady systemów PV jaką jest wysoka cena energii w nich wytwarzanej. Dodatkowo, w systemach tych koszt silnika jest zazwyczaj dużo niższy od kosztu generatora, a za to sprawność silnika należy do najniższych w porównaniu z innymi elementami systemu PV: źródłem buforowym, a także przekształtnikami energoelektronicz-

nymi. Dlatego też zastosowanie nawet droższego silnika, ale o wysokiej sprawności, wstępnie w niewielkim stopniu podwyższy koszt systemu, ale za to w dalszych etapach projektowania umożliwi zastosowanie generatora PV o mniejszej mocy znamionowej, co wyraźnie obniży ostateczny koszt systemu, albo przy tej samej mocy znamionowej generatora zwiększy ilość energii możliwej do dostarczenia maszynie roboczej, czyli podwyższy pewność jej zasilania. Z tego też powodu w systemach PV nie należy w ogóle stosować silników o małej sprawności, a szczególnie nie przystosowanych do bezpośredniego zasilania napięciem stałym, takich jak: indukcyjny jednofazowy ze zwartą fazą pomocniczą (sprawność zazwyczaj nie przekracza 25%), Warrena (jednofazowy synchroniczny reluktancyjno-histerozowy o sprawności rzędu 1%) oraz silniki krokowe, które dodatkowo w swoich typowych zastosowaniach (pozycjonowanie położenia kąтового) wymagają zasilania przy zatrzymanym wirniku w celu utrzymania momentu na wale, a to jest w stanie zapewnić przez dłuższy czas jedynie system PV współpracujący z siecią lub z akumulatorem jako źródłem buforowym.

Dodatkowo zalecane jest by napięcie znamionowe silnika nie różniło się znacząco od napięcia znamionowego generatora PV, gdyż nie będzie to wymagało stosowania przekształtnika znacznie zmieniającego wartość napięcia, a takie przekształtniki charakteryzują się wyraźnie niższą sprawnością.

5. Literatura

- [1]. Niechaj M., Jęczeń P.: *Aspekty ekonomiczne budowy systemów fotowoltaicznych*. Materiały sympozjum SM2005. Lublin 2005
- [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. 81-5381340, mn@elektron.pol.lublin.pl