

Układ napędowy zasilany z baterii ogniw fotowoltaicznych współpracujący z siecią elektroenergetyczną

Krzysztof Kolano

Z uwagi na stosunkowo duże koszty energii pozyskiwanej z baterii fotowoltaicznych najkorzystniej jest zasiląć z nich urządzenia o małym zapotrzebowaniu na energię w znacznym oddaleniu od sieci zasilającej (tzw. systemy autonomiczne). Konieczność budowy linii zasilającej, stosowne pozwolenia itp. sprawiają, że wyższe koszty poniesione na budowę urządzenia zasilanego z baterii PV są przynajmniej częściowo kompensowane. Jako przykłady takich rozwiązań można podać przydrożne znaki aktywnie informujące o przejściu dla pieszych bądź punkcie pomiaru prędkości

Zastosowanie generatorów fotowoltaicznych jako podstawowych źródeł energii dla silników elektrycznych stosowanych w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych wiąże się z koniecznością rozwiązania kilku problemów natury technicznej związanych ze stosunkowo trudnym ich rozruchem. Urządzenia te charakteryzują się stosunkowo dużym momentem spoczynkowym, co wiąże się z dużym poborem prądu rozruchowego. Dla tego typu systemów PV konieczne jest określenie wymiarów i mocy szczytowej baterii w zależności od wymagań stawianych przez odbiornik energii. Zbyt mała bateria PV nie będzie w stanie w pewnych warunkach (zachmurzenie, deszczowe dni) dostarczyć wymaganej ilości energii. Znaczne przewymiarowanie baterii podniesie koszt całego systemu, a nie zwiększy korzyści (nadmiar energii wyprodukowanej w okresie słonecznych dni nie będzie mógł być wykorzystany). Zapewnienie niezawodności zasilania dla odbiorników, dla których utrata zasilania może pociągnąć za sobą poważne konsekwencje i duże straty ekonomiczne (np.: dozowniki pokarmów i urządzenia wentylacyjno-klimatyzacyjne na fermach hodowlanych) jest sprawą bardzo ważną. W takich przypadkach system PV powinien oprócz akumulatora posiadać jeszcze generator rezerwowy, np. spalinowy. Ze względu na dość wysoki koszt takiej inwestycji (bateria PV, akumulator, generator rezerwowy, przekształtnik) konieczna jest precyzyjna analiza różnych wariantów doboru elementów w celu wyboru możliwie najlepszego rozwiązania.

Niestety brak zewnętrznego zasilania sprawia, że w przypadku dłuższego okresu niskiego poziomu nasłonecznienia lub zaśnieżenia modułów PV energia zgromadzona w akumulatorze rezerwowym może być niewystarczająca do zapewnienia ciągłości zasilania odbiornika. Zapewnienie ciągłości pracy odbiornika wiąże się z koniecznością zastosowania rezerwo-

ELECTRIC DRIVE SYSTEM FED FROM PV SOLAR CELLS AND THE POWER GRID

Abstract: Within last few years the possibility of constructing PV low power generators used for electric driving systems feeding emerged. The amount of energy produced by these unconventional energy sources depends on current weather conditions. In this article the electrical drive system fed both from PV arrays and the power grid has been described. It is based on industrial frequency converter with special MPPT control algorithm. This structure is designed to meet requirements of most drive systems, especially 3-phase air conditioning units. Defining the minimum level of output frequency of the frequency converter allows to affect on the amount of energy consumed from the power grid. Despite the weather condition (insolation) PV array always works with maximum possible efficiency.

wego źródła energii elektrycznej w postaci generatora spalinowego lub najkorzystniej współpracy z siecią zasilającą, jeżeli ona w pobliżu istnieje. Rozwiązanie takie umożliwia elastyczne korzystanie z energii elektrycznej niezależnie od warunków meteorologicznych i bez konieczności stosowania baterii akumulatorów. Sieć elektroenergetyczna pełni w tym układzie rolę zarówno idealnego odbiornika będącego w stanie przyjąć w dowolnej chwili każdą ilość wytworzonej mocy, jak i idealnego źródła zapewniającego stały dopływ potrzebnej energii. Dla tego typu elektrowni PV zasilającej układ napędowy istotne jest określenie:

- wytycznych doboru elementów baterii PV oraz współpracującego z nią falownika;
- ilości produkowanej energii w ciągu dnia, poszczególnych miesięcy i roku;
- optymalnego położenia baterii PV względem płaszczyzny horyzontalnej, jak i azymutu;
- ilości energii oddawanej do sieci oraz określenie całkowitej sprawności systemu.

Powyższe zagadnienia zostały przeanalizowane dla dachowej elektrowni słonecznej małej mocy zasilającej układ napędowy, współpracującej z siecią elektroenergetyczną, której schemat przedstawiono na rys. 1. Taki fotowoltaiczny system napędowy został zaprojektowany, wykonany i wstępnie przetestowany w laboratorium Katedry Napędów i Maszyn Elektrycznych Politechniki Lubelskiej.

Baterie fotowoltaiczne zamieniają promieniowanie słoneczne na energię elektryczną prądu stałego we wcześniej określonym zakresie napięć, gdy tylko wartość natężenia promieniowania słonecznego jest wystarczająca. W falowniku następuje zamiana napięcia stałego na napięcie przemienné. W nocy i w czasie niedostatecznego nasłonecznienia energia elektryczna odbiorników pobierana jest z sieci. Rozwiązanie takie umożliwia więc elastyczne korzystanie z energii elektrycznej niezależnie od warunków meteorologicznych i bez konieczności stosowania drogiej baterii akumulatorów. Sieć pełni w tym układzie rolę zarówno idealnego odbiornika będącego w stanie przyjąć w dowolnej chwili każdą wartość mocy, jak i źródła zapewniającego stały dopływ energii.

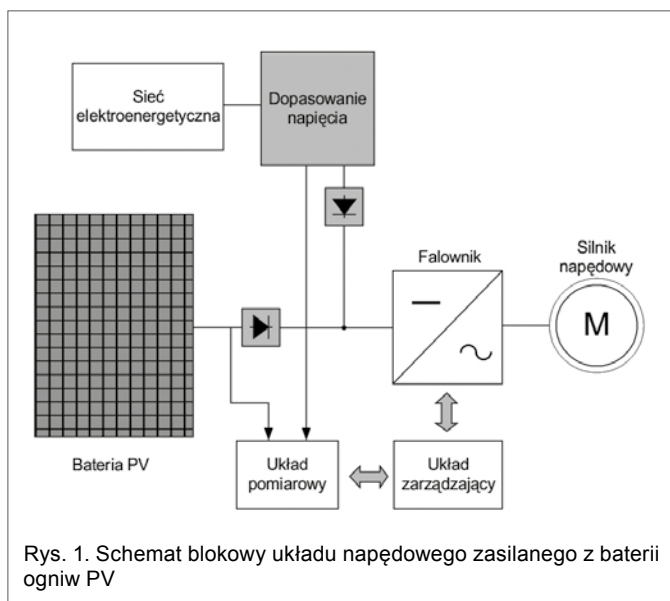
Proponowana struktura sterowania układu napędowego zasilanego z baterii PV współpracującej z siecią elektroenergetyczną

Algorytm projektowania elektrowni fotowoltaicznej współpracującej z siecią prądu przemiennego składa się z kilku etapów. Pierwszym krokiem jest wstępne określenie powierzchni oraz mocy i napięcia wyjściowego baterii słonecznej. Następnie należy dobrać falownik o odpowiednich parametrach, po czym na podstawie komputerowych symulacji działania systemu weryfikuje się poprawność dopasowania pomiędzy mocami tych urządzeń. Pomocnym tutaj wskaźnikiem jest sprawność całego systemu. Na tym etapie można rozważyć celowość wprowadzenia dodatkowych modułów do skompensowania strat mocy pobieranej przez układ oraz dokonać dalszych symulacji.

Baterię słoneczną projektuje się dla tzw. standardowych warunków, tj. natężenia promieniowania słonecznego równego 1000 W/m^2 oraz temperatury otoczenia 25°C . W pierwszym kroku określa się typ i liczbę szeregowo połączonych modułów determinujących wartość napięcia na szynie prądu stałego. Z wieloletnich badań doświadczalnych określono, że wartość tego napięcia dla systemów o mocy od 1 do 5 kW powinna zawierać się w granicach 50–120 V. Taki poziom napięcia zapewnia ograniczenie strat spowodowanych niedopasowaniem ogniw, a także redukcję kosztów aparatury łączeniowej. Kolejnym krokiem jest określenie liczby równolegle połączonych ze sobą łańcuchów modułów, narzucającej wartość maksymalnego prądu, a zatem i poziomu mocy uzyskiwanej z baterii fotowoltaicznej.

Falownik musi spełniać odpowiednie wymagania wynikające z pełnionej przez niego roli interfejsu w układzie elektrowni. Ze względu na sprawność energetyczną całego systemu istotne jest, by przekształtnik posiadał układ śledzenia mocy maksymalnej MPP. Z punktu widzenia sieci pierwszoplanowymi kryteriami są: bezpieczeństwo sieci (zabezpieczenia), jakość mocy prądu przemiennego (regulacja częstotliwości i napięcia wyjściowego, zawartość wyższych harmonicznych oraz pobór mocy biernej). Od strony baterii fotowoltaicznej bardzo istotne jest, żeby falownik (falowniki) akceptował cały zakres występujących napięć i mocy.

Współpraca z siecią zasilającą jest z punktu widzenia komfortu użytkownika najlepszym rozwiązaniem. Sieć jest w stanie przyjąć nadwyżkę produkowanej energii w chwilach, gdy odbiornik nie jest w stanie jej wykorzystać, a może również być źródłem energii w momencie niedostatecznego poziomu nasłonecznienia. O ile w przypadku poboru dodatkowej porcji energii z sieci nie napotkamy na wielkie trudności techniczne, to w przypadku nadwyżki wyprodukowanej energii koniecz-



ne jest stosowanie specjalizowanych urządzeń dopasowujących parametry elektryczne instalacji fotowoltaicznej i sieci elektroenergetycznej. Dodatkowym utrudnieniem jest konieczność spełnienia norm wymaganych przez odbiorcę nadwyżki energii, jakim staje się lokalny Zakład Energetyczny i podpisanie stosownej umowy. Stosowne procedury i wysokie koszty dodatkowych urządzeń znacznie ograniczają rozwój tej gałęzi energetyki, a ich rentowność ogranicza się do dużych inwestycji. Nie brak jest rozwiązań systemów autonomicznych, które poprawnie spełniają swoją rolę, zapewniając pracę w punkcie mocy maksymalnej nawet tak wymagającym odbiornikom, jak układy napędu elektrycznego, jednak zmiany nasłonecznienia wywołują proporcjonalną zmianę ich wydajności, co w przypadku niektórych aplikacji jest nie do zaakceptowania. Rozwiązaniem tych problemów może być praca systemu fotowoltaicznego wspomaganego siecią zasilającą (rys. 1).

Ideą pracy takiego układu jest odpowiednie połączenie systemu autonomicznego z siecią zasilającą dostarczającą w wykonanym prototypie jedynie brakującą w danej chwili energii koniecznej do zapewnienia poprawnej pracy układu. Podstawową zasadą pracy takiego systemu jest brak przewymiarowania baterii PV – niemal zawsze istnieje niedobór energii kompensowany siecią zasilającą.

$$P_{PV} \leq P_0$$

gdzie:

P_{PV} – sumaryczna moc szczytowa baterii PV;

P_0 – moc elektryczna odbiornika.

Rozwiązanie takie ma dwie podstawowe zalety – obniża koszt baterii fotowoltaicznej oraz znosi konieczność zagospodarowania nadwyżki energii wyprodukowanej z modułów PV przy umożliwieniu pracy odbiornika w dowolnych warunkach nasłonecznienia.

Uproszczony schemat blokowy układu napędowego zasilanego z baterii PV współpracującego z siecią przedstawiono na rys. 1.

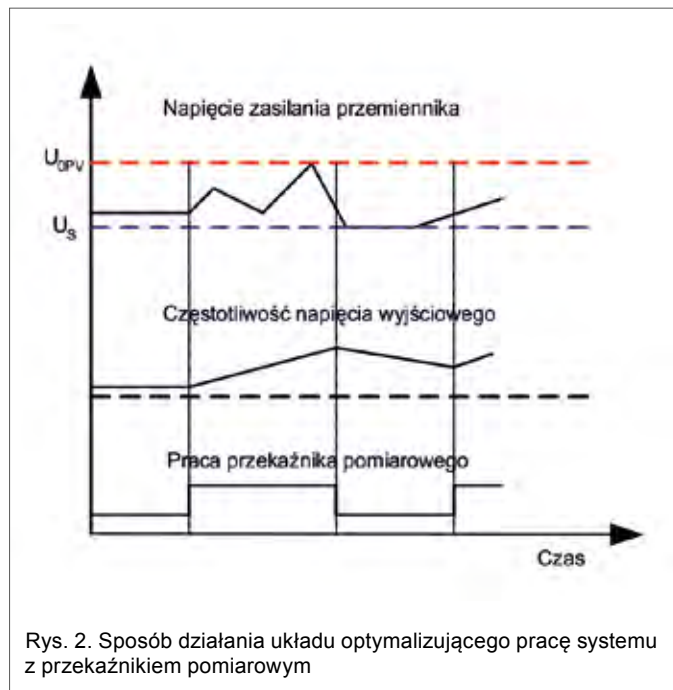
Z uwagi na charakterystykę prądowo-napięciową baterii PV, którą determinuje aktualne nasłonecznienie, konieczna jest zmiana parametrów zasilania odbiornika, tak aby punkt pra-

cy baterii znajdował się niezależnie od natężenia oświetlenia w punkcie mocy maksymalnej. Fakt ten sprawia, że jedynie odpowiednio sterowany przemiennik częstotliwości jest w stanie poprawnie współpracować z baterią ogniw PV. W systemach autonomicznych zakres zmian częstotliwości musi być tak duży, aby umożliwić pracę odbiornika w szerokim zakresie nasłonecznienia. W przypadku wspomaganego układu zasilania przez sieć elektroenergetyczną zakres zmian częstotliwości jest ustalany przez użytkownika w zakresie od prędkości minimalnej – przy minimalnym nasłonecznieniu (wtedy cała energia jest pobierana z sieci) do częstotliwości maksymalnej – przy której cała energia pobierana jest z baterii ogniw PV. Poprzez odpowiedni dobór parametrów elektrycznych baterii PV oraz poziom napięcia sieciowego możliwe jest ustalenie arbitralnej częstotliwości zasilania silnika niezależnie od poziomu nasłonecznienia.

Dobór poszczególnych elementów struktury systemu fotowoltaicznego

Podstawowym elementem koniecznym do zapewnienia prawidłowej pracy całego systemu fotowoltaicznego jest układ napędowy. Jego integralną część stanowi przemiennik częstotliwości. Specyficzne wymagania dotyczące jego zasilania sprawiają, że liczba odpowiadających urządzeń jest stosunkowo mała. Najtrudniejszym do spełnienia kryterium jest wymóg zasilania przemiennika napięciem stałym o wartości średniej wahającej się od 1 do 0,8 napięcia jałowego baterii PV. W toku poszukiwań urządzenia spełniające wymagania w wykonanym prototypie układu zdecydowano się zastosować prosty przemiennik częstotliwości ADV20 firmy SIEL. Jego konstrukcja umożliwia zasilanie napięciem stałym w miejscu instalowania opcjonalnego modułu hamującego. Z punktu widzenia użytkownika przemiennik ten zachowuje się analogicznie jak przy tradycyjnym podłączeniu do sieci. Niestety urządzenie to nie umożliwia bezpośredniej aplikacji algorytmów optymalizujących pracę układu napędowego zasilanego z baterii PV w punkcie mocy maksymalnej. Do nadzorowania i optymalizacji pracy układu zastosowano zewnętrzny moduł sterujący, którym w najprostszym rozwiązaniu jest przełącznik pomiarowy, który kontrolując napięcie na szynie zasilającej przemiennika częstotliwości, uruchamia komendę zwiększenia częstotliwości napięcia wyjściowego do wartości zadeklarowanej przez użytkownika w przemienniku. Komenda ta jest wydawana w chwili przekroczenia napięcia stałego wartości odpowiadającej 0,8 U_{0PV} baterii. Wzrost napięcia powyżej tego poziomu jest sygnałem, że warunki nasłonecznienia uległy poprawie i ilość energii pobieranej z baterii może zostać zwiększona. Spadek napięcia poniżej tej wartości powinien wywołać proces odwrotny – powrót do prędkości ustalonej przez użytkownika odpowiadającej wartości średniej napięcia, tj. ok. 0,75 U_{0PV} baterii. Dobierając odpowiednie nastawy parametrów odpowiadających za szybkość zmian przyspieszenia, powyższa struktura będzie zachowywała się jak klasyczny układ śledzący optymalny punkt pracy baterii z zachowaniem prędkości minimalnej niezależnej od nasłonecznienia (rys. 2).

Podczas definiowania parametrów pracy układu napędowego (minimalna prędkość obrotowa) należy zwrócić szczególną uwagę na dobór źródła napięcia stałego, które w przypadku braku nasłonecznienia przejmie funkcję dostarczania energii elektrycznej.



Rys. 2. Sposób działania układu optymalizującego pracę systemu z przełącznikiem pomiarowym

W skrajnym przypadku, gdy wartość prędkości minimalnej będzie równa prędkości znamionowej układu napędowego, moc źródła napięcia musi być co najmniej równa mocy elektrycznej układu napędowego. Wraz z obniżeniem prędkości minimalnej odpowiednio mniejsza będzie również moc szczytowa zasilacza (zależność tę determinuje rodzaj maszyny roboczej).

$$P_Z = P_E \left(\frac{f_{\min}}{f_n} \right)^k$$

gdzie:

P_Z – moc elektryczna zasilacza;

P_E – znamionowa moc elektryczna układu napędowego;

$f_{\min}$ – częstotliwość minimalna pracy układu napędowego;

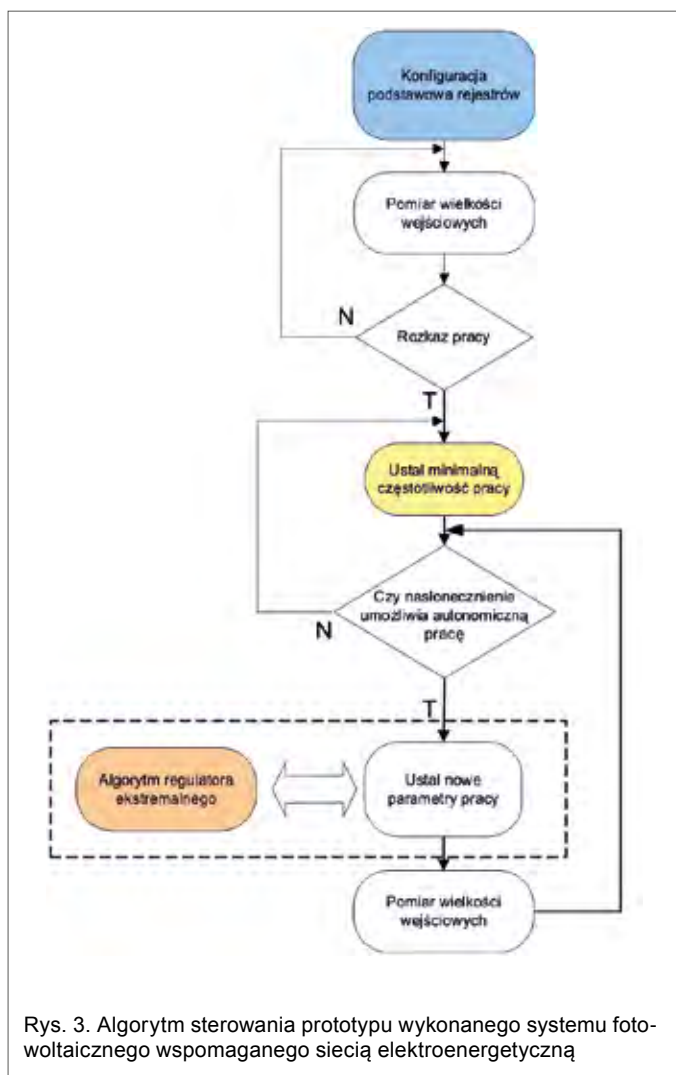
f_n – częstotliwość znamionowa pracy układu napędowego;

k – współczynnik zależny od rodzaju obciążenia.

Zwiększając zakres akceptowalnych zmian prędkości, zmniejszamy ilość energii pobieranej z sieci (w przypadku mniejszego nasłonecznienia), a w przypadku gdy wartość minimalna prędkości jest równa 0, możemy mówić o autonomicznym układzie napędowym zasilanym z baterii PV.

Podstawowym kryterium doboru silnika do instalacji PV jest jego moc elektryczna oraz napięcie znamionowe, które powinno wynosić 0,8 U_{0PV} . W całym cyklu pracy napięcie zasilania przemiennika częstotliwości może zawierać się w przedziale od 0,75 U_{0PV} do U_{0PV} , ale specyfika charakterystyki prądowo-napięciowej powoduje, że punkt pracy optymalnej znajduje się w szerokim spektrum nasłonecznienia przy wartości bliskiej 0,8 U_{0PV} (stąd należy przyjąć to napięcie jako znamionowe silnika).

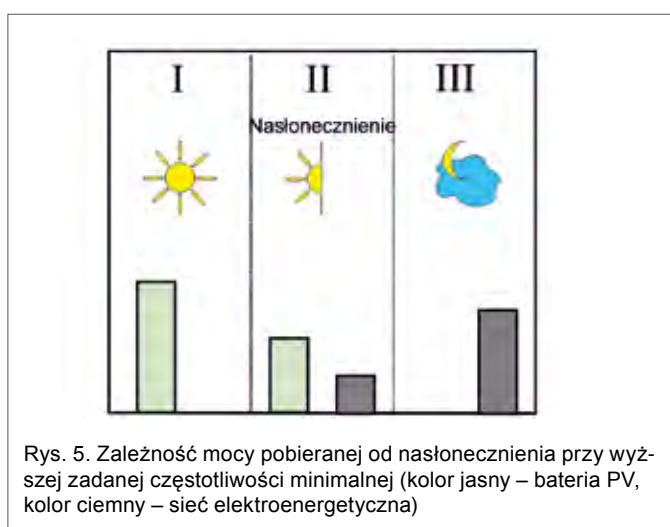
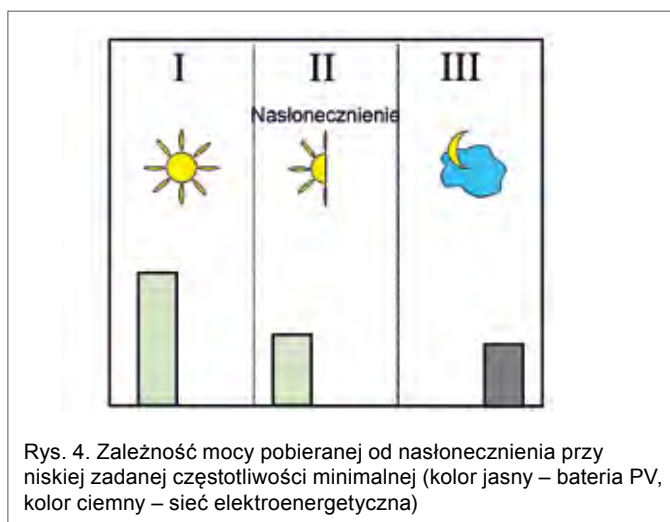
Zastosowanie jako urządzenia sterującego przełącznika podnapięciowego jest bardzo wygodnym rozwiązaniem, które pozwala w bardzo krótkim czasie zestawić system napędowy zasilany z baterii ogniw fotowoltaicznych maksymalizujący ilość energii z nich uzyskiwanej. Niestety brak możliwości zaimplementowania w nim funkcji obliczania mocy i bezpośred-



nich funkcji optymalizacji (możliwy jest jedynie pomiar napięcia i przybliżona optymalizacja) sprawia, że w przypadku systemów, gdzie niedokładność aproksymacji mocy baterii prowadziłaby do dużych strat, konieczne staje się użycie bardziej zaawansowanego układu sterującego opartego na strukturze mikroprocesorowej. Dużym ułatwieniem jest możliwość wykorzystania elementów pomiarowych znajdujących się w przemienniku częstotliwości. Jego architektura umożliwia dokonywanie pomiarów prądów i napięć na szynie prądu stałego, co w znacznym stopniu ułatwia kontrolę działania tego systemu fotowoltaicznego. Zarówno dane pomiarowe, jak i sterujące mogą być przekazywane w trybie transmisji szeregowej magistralą ModBus. Rozwiązanie takie pozwala na wykorzystanie algorytmów regulatorów ekstremalnych, które po odpowiednim dostrojeniu zdecydowanie lepiej reagują na zmianę parametrów nasłonecznienia i przyczyniają się do lepszego wykorzystania energii słonecznej (rys. 3).

Bilans mocy układu

Specyfika pracy układów napędowych zasilanych z baterii ogniw fotowoltaicznych zakłada konieczność zmiany ich mocy skorelowanej ze zmianami nasłonecznienia. Z punktu widzenia użytkownika jest to zjawisko niepożądane w większości napędów maszyn roboczych. Wyjątkiem mogą być układy klimatyzacyjne i wentylacyjne, których wydajność może być



uzależniona od nasłonecznienia. Jednak nawet w tych układach napędowych duże zmiany prędkości obrotowej (z zatrzymaniem urządzenia włącznie) są często nie do zaakceptowania. W omawianej strukturze istnieje możliwość sparametryzowania minimalnych parametrów pracy, poniżej których funkcjonowanie systemu byłoby niemożliwe. Przypadek, w którym zezwolono na dużą zmianę wydajności układu napędowego, ilustruje rys. 4.

Zarówno w stanie maksymalnego nasłonecznienia, jak i wyraźnego jego spadku (do ok. 50%) możliwa jest autonomiczna praca urządzenia przy wykorzystaniu jedynie energii pochodzącej z baterii PV. Przy spadku nasłonecznienia poniżej 50% udział energii z sieci elektroenergetycznej wzrasta, by przy minimalnym nasłonecznieniu osiągnąć 100%.

W przypadku gdy założona prędkość nie może znacznie się obniżyć, konieczne jest zawężenie możliwych zmian częstotliwości. Rysunek 5 ilustruje rozkład poboru mocy dla różnych poziomów nasłonecznienia.

W obu przypadkach mamy do czynienia z pracą baterii ogniw fotowoltaicznych w pobliżu punktu mocy maksymalnej, a więc przy możliwie najlepszej wydajności systemu.

Podsumowanie

Przedstawiona struktura sterowania wykonanego i przetestowanego prototypu systemu fotowoltaicznego charakteryzuje się dużą uniwersalnością i prostotą. Umożliwia ona zasilanie

z baterii ogniw PV niemal dowolnego układu napędowego. Niedostatek mocy, wynikający ze zmiennych w czasie warunków nasłonecznienia, jest kompensowany mocą pobraną z sieci elektroenergetycznej. Ważną zaletą takiego systemu jest to, że moc baterii PV może być znacząco mniejsza niż moc elektryczna układu napędowego. Bateria PV pełni wtedy rolę wspomagającą sieć elektroenergetyczną i bezpośrednio wpływa na obniżenie ilości zużywanej energii elektrycznej pobieranej z sieci elektroenergetycznej. Istotną informacją dla inwestora jest możliwość późniejszej prostej rozbudowy systemu i dalszy wzrost udziału energii pozyskanej z baterii PV w ogólnym bilansie energetycznym systemu.

Opisany układ wydaje się szczególnie odpowiadać potrzebom zasilania systemów klimatyzacji budynków biurowych, gdzie zastosowanie wspomagającej baterii ogniw PV mogłoby znacząco wpłynąć na bilans energetyczny budynku, przy zachowaniu względnie niskich kosztów całej instalacji.

Literatura

- [1] KAŻMIERKOWSKI M. P., ABRACHAMSEN F., PEDERSEN J. K., BLAABJERG F.: *Oszczędności silnika dla napędów pomp i wentylatorów*. „Napędy i Sterowanie” 8/2000.

- [2] KOLANO K., KOLANO J.: *Praktyczna realizacja układów napędowych z trójfazowym silnikiem indukcyjnym zasilanym z baterii ogniw fotowoltaicznych*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy KOMEL „Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe” nr 77/2007. Katowice – maj 2007. s. 5–10.
- [3] KOLANO K., KOLANO J.: *Problemy rozruchu układów napędowych prądu przemiennego zasilanych z baterii ogniw fotowoltaicznych*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy KOMEL „Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe” nr 82/2009. Katowice – maj 2009. s. 1–6
- [4] LIPIŃSKI M. I IN.: *Pozyskiwanie energii elektrycznej ze Słońca*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków 1998.

dr inż. Krzysztof Kolano – Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych, Politechnika Lubelska

artykuł recenzowany