

Marek Niechaj
 Politechnika Lubelska, Lublin

AUTONOMICZNY FOTOWOLTAICZNY SYSTEM NAPĘDOWY BEZ ELEKTRYCZNEGO ŹRÓDŁA BUFOROWEGO Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM JEDNOFAZOWYM

STAND-ALONE PHOTOVOLTAIC DRIVE SYSTEM WITH SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR AND WITHOUT ELECTRIC BUFFER SOURCE

Streszczenie: W artykule opisano autonomiczny system napędowy małej mocy, w którym występuje wielokrotna konwersja energii. W pierwszym etapie energia promieniowania słonecznego zamieniana jest w generatorze fotowoltaicznym na niskonapięciową energię elektryczną prądu stałego. Z kolei napięcie wyjściowe generatora zostaje podwyższone przy pomocy przerywacza prądu stałego, a następnie zamienione przez falownik mostkowy na jednofazowe napięcie przemienné o zmiennej częstotliwości i zmiennej wartości skutecznej. Napięcie to zasila jednofazowy silnik indukcyjny z rozruchową fazą kondensatorową. Ostatecznie, silnik napędza maszynę roboczą – w wykonanym i przetestowanym systemie jest to śmigło wentylatora. System ten, dla różnych odbiorników, może znaleźć praktyczne zastosowanie głównie w rekreacji: chłodzenie i wentylacja w upalne dni, zapewnienie pracy fontann, filtracja wody w basenach.

Abstract: An off-grid low power drive system with multiple energy conversion is described in the paper. At first, solar irradiation energy is directly converted into low-voltage DC current electrical energy by photovoltaic generator. Then, the generator's output voltage is increased by DC boost chopper. In the next stage, this voltage is transformed into AC single-phase voltage, with variable frequency and RMS value, by bridge inverter. This voltage feeds single-phase induction motor with capacitor starting coil. Finally, the motor drives its load – in created and tested system this is the propeller of the fan. The described system, with different load machines, can find practical application in recreation, for: cooling and ventilation while hot days, providing operation of fountains, filtration of water in swimming pools.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, silnik indukcyjny jednofazowy, przekształtnik energoelektroniczny
Keywords: photovoltaics, one-phase induction motor, power electronic converter

1. Wprowadzenie

W systemach fotowoltaicznych (PV) energia elektryczna pozyskiwana jest dzięki bezpośredniej konwersji promieniowania słonecznego, zachodzącej w generatorach PV.

Z kolei w fotowoltaicznych systemach napędowych energia wytworzona przez generator PV jest, po dostosowaniu jej parametrów do potrzeb silnika elektrycznego, przekształcana w energię mechaniczną ruchu obrotowego, a następnie za pomocą maszyny roboczej (np. pompy wody, wentylatora, zadajnika) zamieniana na energię o docelowej postaci, pożytecznej dla użytkownika systemu.

Systemy PV można podzielić na współpracujące z siecią i autonomiczne. Wśród autonomicznych wyróżnia się dwie zasadnicze grupy: z elektrycznym źródłem buforowym (np. akumulatorem elektrochemicznym, baterią kondensatorów) oraz systemy bez elektrycznego źródła buforowego. Dla opisywanego w artykule systemu, ze względu na wykorzystany w nim od-

biornik (wentylator stołowy) i powiązane z tym faktem jego przeznaczenie oraz reżim pracy, dopuszczalne jest zastosowanie struktury autonomicznej bez elektrycznego źródła buforowego. Oczywiście możliwe jest wykorzystanie tego rozwiązania również przy współpracy z dodatkowym tzw. nieelektrycznym źródłem buforowym, przykładowo (gdyby maszyną roboczą była pompa wody) mógłby to być zbiornik na wodę, bądź pojemność higroskopijna nawadnianego gruntu.

Najkorzystniejsze właściwości fotowoltaicznego systemu napędowego (sprawność konwersji energii, sztywność charakterystyk mechanicznych, właściwości dynamiczne – w tym rozruchowe) uzyskuje się przy zastosowanych następujących rodzajach silników [1]:

- komutatorowe prądu stałego (z magnesami trwałymi lub szeregowe);
- bezszczotkowe prądu stałego;
- indukcyjne trójfazowe niskonapięciowe.

Niekiedy jednak wymagania użytkownika (już posiadany zespół napędowy, bądź problemy z zamówieniem odpowiedniego zespołu) powodują konieczność przystosowania systemu PV do pracy w nim mniej zalecanego rodzaju silnika, np. indukcyjnego jednofazowego. Najlepszymi przykładami takich urządzeń są wentylatory stołowe i niewielkie pompy wody. Są to odbiorniki o mocach silników zazwyczaj nie przekraczających kilkudziesięciu (wentylatory) lub kilkuset (pompy) watów, standardowo wyposażane przez producentów w silniki indukcyjne jednofazowe, najczęściej z kondensatorową fazą rozruchową. Zamówienie takiego zespołu w wersji wyposażonej np. w silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi jest, bądź praktycznie niemożliwe, bądź byłoby związane ze znacznym wzrostem kosztu urządzenia. W takich sytuacjach racjonalnym rozwiązaniem staje się dostosowanie postaci energii wytwarzanej przez generator PV do energii wymaganej przez silnik jednofazowy, tym bardziej, że w ostatnich latach można zaobserwować znaczący spadek kosztów wytwarzania energii PV, czego nie można powiedzieć o kosztach wytwarzania maszyn elektrycznych.

Dostosowanie systemu PV do zasilania w nim klasycznego indukcyjnego silnika jednofazowego wymaga umożliwienia realizacji co najmniej dwóch operacji konwersji energii elektrycznej:

1. Podwyższenie wartości skutecznej napięcia, co wynika z faktu, że generator PV małej mocy jest źródłem niskonapięciowym (napięcie wyjściowe wynosi orientacyjnie 10÷100V), a typowy silnik jednofazowy z kondensatorową fazą rozruchową charakteryzuje się napięciem znamionowym o wartości skutecznej 230V.

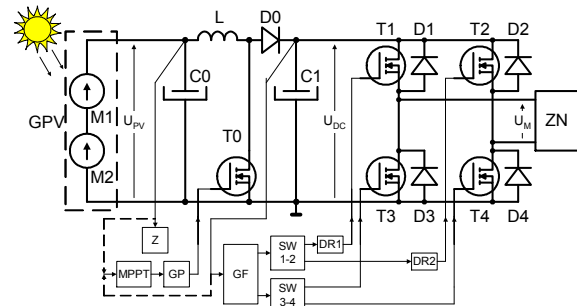
2. Konwersja napięcia stałego na przemienne, co wynika z właściwości generatora PV jako źródła napięcia stałego, oraz z cech silnika indukcyjnego, który pracuje przy zasilaniu napięciem przemiennym – najkorzystniej o kształcie jak najbardziej zbliżonym do sinusoidalnego.

Oczywiście kolejność tych operacji może być inna, np. najpierw konwersja DC/AC, a następnie podwyższenie wartości napięcia. Można też zastosować przetwornicę transformatorową, w jednym bloku realizującą przekształcenie napięcia stałego na przemienne wraz z podwyższeniem napięcia.

Dodatkowo, ze względu na korzyści techniczne i ekonomiczne wynikające z zapewnienia pracy generatora PV w punkcie mocy maksymalnej (MPP – Maximum Power Point) mocno zaleca-

na jest realizacja w systemie trzeciej operacji – maksymalizacji mocy generatora PV (MPPT, czyli MPP Tracking) [2].

2. Opis wykonanego systemu



Rys. 1. Uproszczony schemat ideowo-blokowy GPV – generator PV, złożony z dwóch szeregowo połączonych modułów (M1, M2), każdy o parametrach znamionowych: $P_{Mn}=55Wp$, $U_{Mn}=17,5V$, $I_{Mn}=3,15A$, napięcie jałowe i prąd zwarcia: $U_{0n}=21,7V$, $I_{zn}=3,65A$;

C0 (3300 μ F/63V) – łagodzi stany dynamiczne przy szybkich zmianach napromienienia generatora, ponadto ułatwia rozruch silnika i usprawnia pracę układu MPPT;

T0 (IRF840), L (ok.1,2mH), D0 (BYT79), C1 (400 μ F/450V) – tworzą część silnoprądową przerywacza podwyższającego napięcie (typu boost);

T1÷T4 (IRF740), D1÷D4 (BYT79) – tworzą część silnoprądową falownika jednofazowego mostkowego;

ZN – zasilany zespół napędowy (wentylator stołowy o średnicy śmigła 39cm). Jego parametry znamionowe (na podstawie tabliczki znamionowej i pomiarów): $U_n=230V$, $I_n=0,2A$, pobierana moc czynna $P_n=41,5W$, znamionowa prędkość $n_n=1230$ obr/min (pomiar tachometrem dotykowym na osi śmigła);

Z – impulsowy zasilacz części sterującej;

MPPT – układ bezpośredniej, bądź pośredniej, maksymalizacji mocy generatora PV;

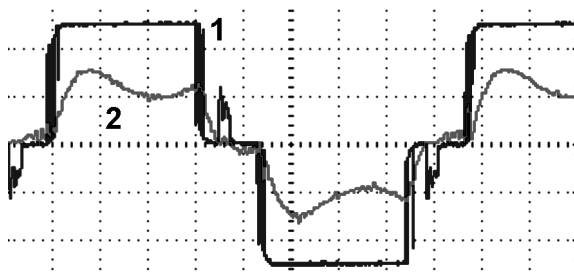
GP – generator impulsów sterujących przerywaczem (częstotliwość impulsowania 21kHz);

GF – generator impulsów sterujących falownikiem. T1 i T2 zawsze są sterowane z niską częstotliwością (w zakresie 15÷63Hz), co umożliwi zastosowanie dla tych tranzystorów prostych driverów DR1 i DR2. T3 i T4 mogą być sterowane bądź z częstotliwością niską (taką jak T1, T2), bądź z wysoką przy strategii modulacji szerokości impulsu (MSI);

SW – układy zapewniające naprzemienną pracę tranzystorów T1-T2 oraz T3-T4.

2.1. Formowanie napięcia zasilającego silnik

Napięcie wyjściowe generatora U_{PV} podwyższone jest w przerywaczu do wartości U_{DC} , będącej jednocześnie amplitudą napięcia zasilania silnika. Z kolei w falowniku dokonuje się zamiana napięcia stałego U_{DC} na przemienne o wartości skutecznej U_M i zmiennej częstotliwości podstawowej harmonicznej f , oraz o kształcie impulsów prostokątnych niskiej częstotliwości ze stałym wypełnieniem, najkorzystniejszym dla pracy silnika (rys.2).



Rys. 2. Przebiegi napięcia (1: 100V/dz) i prądu silnika (2: 0,2A/dz) przy parametrach zasilania $U_M=207V$, $f=56Hz$. Prędkość wentylatora równa znamionowej $n_n=1230\text{obr/min}$

Podstawa czasu: 2ms/dz

Ze względu na maksymalizację sprawności konwersji energii w przerywaczu, należy dążyć do możliwie najmniejszego stosunku pomiędzy napięciami na wyjściu (U_{DC}) oraz wejściu (U_{PV}) przerywacza. Aby to osiągnąć, należy zapewnić możliwie wysoką wartość U_{PV} – dlatego moduły M1 i M2 zdecydowanie należy łączyć szeregowo, a nie równolegle. Drugim ze sposobów jest minimalizacja wartości wymaganego napięcia U_{DC} . Ponieważ wartość U_M jest narzucona parametrami silnika, a konkretnie zakres jej zmian wynika z charakterystyki $U_M=f(f)$ gwarantującej pracę silnika z maksymalną sprawnością (wynika to z opisu zamieszczonego w rozdziale 2.5), więc sposobem na obniżenie U_{DC} może być zapewnienie jak najmniejszej wartości współczynnika szczytu k_s , jako że:

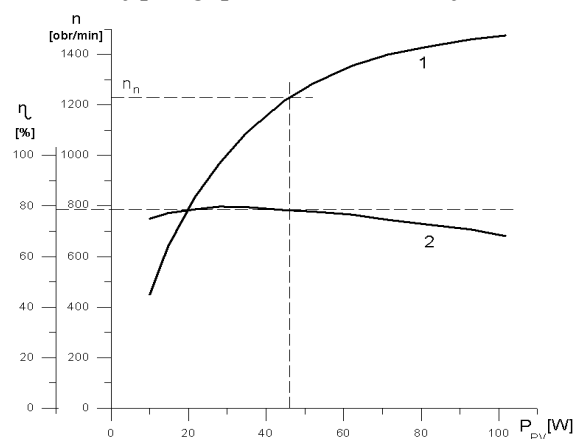
$$U_{DC}=k_s \cdot U_M \quad (1)$$

Między innymi z tego powodu zdecydowano się na wybór kształtu napięcia zasilającego silnik w formie sygnału prostokątnego. Wypełnienie dla tego przebiegu ustalono na 70%, przy którym $k_s=1,19$ (dla porównania, przy sinusoidzie $k_s=1,41$). Dodatkowo, jak wykazały badania przy różnych wartościach wypełnienia przebiegu prostokątnego, właśnie dla wypełnienia 70% sprawność zespołu napędowego oka-

zała się największa. Warto jednak nadmienić, że ze względu na między innymi dydaktyczny charakter wykonanego systemu, możliwy jest prosty wpływ przez operatora na strategię kształtowania napięcia wyjściowego falownika (zmiana wartości wypełnienia, zapewnienie strategii MSI).

2.2. Ograniczenie prędkości silnika

Przy bezobsługowej (demonstracyjnej) pracy systemu, parametry pracy zespołu napędowego zależą jedynie od wartości mocy, którą może dostarczyć generator PV, zgodnie z charakterystyką 1 na rys.3. Jej paraboliczny kształt wynika przede wszystkim z nieliniowej zależności mocy użytecznej oddawanej przez wentylator od trzeciej potęgi prędkości obrotowej.



Rys. 3. Zależności:

1. Prędkości silnika od mocy pobieranej z generatora: $n=f(P_{PV})$;

2. Sprawności: $\eta=f(P_{PV})$;

Zaznaczono położenia odpowiadające pracy znamionowej, czyli dla $n_n=1230\text{ obr/min}$.

Jak wynika z rys.3, w skonstruowanym systemie istnieją możliwości zapewnienia pracy badanego wentylatora z parametrami przekraczającymi parametry znamionowe – osiągnięta prędkość może dochodzić do 1500obr/min. Poźnie jest to niewiele (przekroczenie prędkości znamionowej o ok. 22%), biorąc jednak pod uwagę, że moc użyteczna wentylatora zależy, zgodnie z teorią, od trzeciej potęgi prędkości obrotowej, ostatecznym rezultatem jest wzrost mocy mechanicznej dostarczanej przez silnik, aż o 80% w porównaniu z mocą znamionową. Konsekwencją tego jest zwiększony o ok. 35% pobór prądu, a więc wzrost strat na rezystancji uzwojeń o ok. 85% w porównaniu ze stratami przy prądzie znamionowym. Co prawda, biorąc pod uwagę fakt, że silnik posiada chłodzenie własne, zwiększone wydzielanie ciepła zostanie

częściowo zrekompensovane przez skuteczniejsze chłodzenie, tym niemniej kompensacja ta byłaby niewystarczająca dla długotrwałej pracy przy znaczącym przekroczeniu prędkości znamionowej. Mogłoby to bowiem doprowadzić do termicznego uszkodzenia izolacji uzwojeń silnika. Ponadto, subiektywna ocena pracy wentylatora o stosunkowo dużej znamionowej wydajności powietrza, pozwala na stwierdzenie, że strumień powietrza przy pracy tylko z wydajnością znamionową powinien być dla użytkownika całkowicie wystarczający, więc nie ma zapotrzebowania na pracę wentylatora z prędkością znacząco większą od znamionowej. Dodatkowo, szum powietrza przy takiej prędkości zaczyna być akustycznie dokuczliwy. Z powyższych powodów, przy zastosowaniu użytkowym należy ograniczyć prędkość maksymalną wentylatora przez ograniczenie maksymalnej częstotliwości zasilania silnika. Poziom ograniczenia powinien być możliwy do nastawy przez użytkownika, np. potencjometrem.

2.3. Maksymalizacja mocy generatora PV

Zadaniem układu MPPT jest zapewnienie pracy generatora PV z maksymalną, możliwą do uzyskania w konkretnych warunkach pogodowych, mocą wyjściową P_{PV} . Ogólnie, może się to odbywać bądź przy wykorzystaniu metody bezpośredniej (kontrola parametrów na wyjściu generatora – np. napięcia U_{PV}), bądź pośredniej (maksymalizacja napięcia U_{DC} na wyjściu przerywacza) [2]. Realizacja obu tych metod może być dokonywana bądź przez przeszukiwanie charakterystyki wyjściowej generatora (przy takiej pracy współczynnik wypełnienia impulsów sterujących przerywaczem ulega cyklicznym oscylacjom), bądź przy wykorzystaniu dodatniego sprzężenia zwrotnego. Podczas demonstracyjnej pracy systemu stosowana jest metoda pośrednia z dodatnim sprzężeniem zwrotnym, omówiona w [3]. Zapewnia ona stabilniejszą pracę systemu, choć ogólnie charakteryzuje się nieco gorszą dokładnością maksymalizacji niż metoda przeszukiwania.

Ze względu na omówioną wcześniej konieczność ograniczenia maksymalnej prędkości silnika, a w konsekwencji mocy pobieranej z generatora, system w zależności od bieżącej wartości napromienienia będzie mógł działać w którymś z dwóch przedziałów pracy:

I. Dla małych i średnich wartości napromienienia generator pracuje w MPP (z mocą maksy-

malną), a silnik z prędkością zmienną, zależnie od zmian napromienienia.

II. Dla wysokich wartości napromienienia generator przestaje pracować w MPP (punkt pracy na jego charakterystyce zewnętrznej przesuwa się w stronę biegu jałowego), a silnik pracuje ze stałą, zadaną przez użytkownika prędkością, niezależnie od zmian napromienienia.

2.4. Dobór mocy znamionowej generatora PV

Jak wynika z charakterystyki 1 zamieszczonej na rys.3, minimalna moc znamionowa generatora PV powinna wynosić ok. 50Wp, gdyż przy mniejszej wartości wentylator nigdy nie osiągnie, choćby na chwilę, prędkości znamionowej. Z kolei, wartość maksymalna mocy znamionowej generatora jest teoretycznie nieograniczona. Co więcej, przewymiarowanie mocy generatora ma swoje zalety: użyteczna praca wentylatora jest możliwa przy mniejszych wartościach napromienienia (np. dla 1 modułu o mocy 50Wp od napromienienia $E \approx 200W/m^2$, dla dwóch modułów od $E \approx 100W/m^2$, itd.), a ponadto zmniejsza się wartość napromienienia powyżej której system pracuje w wyżej opisanym przedziale II, czyli ze stałą prędkością wentylatora, gdzie wahania napromienienia nie powodują wahań prędkości silnika. Ale przewymiarowanie generatora PV cechują też wady: wzrost kosztu inwestycyjnego (koszt generatora niemal liniowo zależy od jego mocy) oraz wzrost powierzchni i masy generatora (problemy z mobilnością systemu). Jak widać, dobór mocy znamionowej wymaga kompromisu, głównie między użytecznością systemu (im większy generator tym większe zadowolenie użytkownika z pracy odbiornika), a kosztem systemu (większy generator to większy koszt). Ze względu na to że w konkretnych odmiennych zastosowaniach pożądana proporcja między tymi czynnikami może być różna, nie da się podać dla danego odbiornika ściśle zalecanej wartości mocy znamionowej generatora PV. W opisywanym systemie wykorzystano już posiadane moduły PV, każdy o mocy znamionowej 55Wp. W związku z tym znamionowa moc generatora mogła wynosić całkowitą wielokrotność mocy jednego modułu, czyli 55Wp, 110Wp, 165Wp, itd. Jako kompromisową wartość przyjęto 110Wp.

2.5. Charakterystyka U/f falownika

Częstotliwość podstawowej harmonicznej napięcia silnika jest automatycznie dopasowywana do wartości U_{DC} , zgodnie z zależnością:

$$f \approx 0,2 \cdot U_{DC} + 7 \quad (2)$$

Została ona wyznaczona eksperymentalnie i jest słuszna dla danego zespołu napędowego pracującego w konkretnych warunkach. Idea tego wyznaczenia polegała na naniesieniu w jednym układzie współrzędnych kilku charakterystyk $n=f(P_{PV})$, przy czym dla każdej z nich częstotliwość pracy falownika była niezmienna, a zmieniła się U_{DC} i w konsekwencji P_{PV} oraz n . Następnie, kierując się zasadą jak najniższej mocy P_{PV} , określono dla danej prędkości n wartości U_{DC} oraz f zapewniające pracę systemu z najwyższą sprawnością. Uzyskane punkty (U_{DC}, f) aproksymowano zależnością (2).

Wymuszenie pracy falownika zgodnie z (2) zapewnia maksymalną sprawność konwersji energii układu: przerywacz-falownik-silnik-wentylator. Przy jej wyznaczaniu kierowano się bowiem zasadą maksymalizacji mocy użytecznej systemu (czyli wyjściowej wentylatora), a warunek ten jest spełniony, gdy dla danej prędkości wentylatora uzyskuje się minimalną wartość mocy pobieranej z generatora PV.

2.6. Sprawność systemu

Linia 2 na rys.3 obrazuje charakterystykę sprawności konwersji energii przez część energoelektroniczną systemu, czyli oba przekształtniki wraz z układem sterowania, w funkcji mocy P_{PV} dostarczanej przez generator. Do jej dokładnego wyznaczenia niezbędne było zapewnienie pracy systemu przy kilkunastu stałych wartościach mocy P_{PV} . Wykorzystano w tym celu, zamiast rzeczywistego generatora PV, symulator generatora PV opisany w [4]. Sprawność η została zdefiniowana, a w konsekwencji obliczona na podstawie odpowiednich pomiarów, jako stosunek mocy czynnej na zaciskach silnika do mocy pobieranej z symulatora. Dlatego należy mieć świadomość, że rzeczywista sprawność całego systemu, uwzględniająca wszystkie etapy konwersji, jest dużo niższa, uwzględnia ona bowiem również straty energii w silniku, w maszynie roboczej oraz w generatorze PV, w tym straty wynikające z nieidealnej maksymalizacji mocy generatora, w szczególności, gdy system działa w II przedziale pracy (jak opisano w rozdziale 2.3), czyli gdy poprzez ograniczenie prędkości silnika obniża się sprawność konwersji energii w generatorze.

Jak wynika z rys.3, sprawność w najważniejszym zakresie pracy (moce P_{PV} , dla których prędkość wentylatora nie przekracza znamionowej) jest rzędu $0,75 \div 0,8$. Jest to wartość typowa dla urządzenia stosunkowo małej mocy (a więc takiego, w którym znacząca jest wartość mocy pobieranej przez część sterującą – rzędu $1 \div 1,5W$), ponadto realizującego dwuetapową konwersję energii (dwa kaskadowo połączone przekształtniki).

Warto jednak podkreślić energetycznie pozytywne zjawisko. Otóż, o ile przy znamionowej wydajności wentylatora (jej łatwo mierzalnym wyznacznikiem jest prędkość 1230obr/min) silnik pobiera z sieci o napięciu sinusoidalnym 230V/50Hz moc czynną 41,5W, o tyle przy tej samej wydajności wentylatora ten sam silnik, ale zasilany z opisywanego falownika, pobiera jedynie 36W mocy czynnej, przy poborze mocy z generatora PV równym 46,1W. Silnik pracuje w tych optymalnych energetycznie warunkach z częstotliwością większą od znamionowej (56Hz) i z mniejszą wartością skuteczną napięcia (207V). Porównując więc pobór mocy z różnych źródeł: sieci AC (41,5W) i generatora PV (46,1W) można stwierdzić, że zastosowanie opisanej części energoelektronicznej zwiększyło pobór mocy nie aż o 20-25% (jak by wynikało z ch-ki sprawności z rys.3), lecz jedynie o 10-15%, gdyż wzrosła sprawność pracy samego silnika. I to wzrosła mimo, że nie jest on zasilany napięciem sinusoidalnym.

3. Podsumowanie

Opisany system został zrealizowany w wersji umożliwiającej zarówno badania przez studentów podczas zajęć laboratoryjnych, jak też i wielogodzinną bezobsługową pracę demonstracyjną, potwierdzoną wielokrotnie podczas pokazów, w tym dwukrotnie w ramach Lubelskiego Festiwalu Nauki. Wszystkie elementy systemu, poza modułami PV, zespołem napędowym oraz przewodami łączącymi te elementy, zmieściły się bez problemu w obudowie plastikowej o wymiarach 23x21x9,5cm i masie (razem z zawartością) 3,5kg. W związku z tym montaż/demontaż systemu nie wymaga dużego wysiłku i zajmuje maksimum kilka minut, przy czym najwięcej czasu należy poświęcić na odpowiednie ustawienie modułów PV, które przy mocy generatora 110Wp posiadają łączną powierzchnię około 1m².

Mimo zastosowania dwóch kaskadowo połączonych przekształtników, a w związku z tym

potencjalnie większej awaryjności niż przy konwersji jednostopniowej, wykonany system działa bezawaryjnie od kilku lat. Z pewnością do bezawaryjności przyczyniło się dość proste sterowanie analogowe, a także wyeliminowanie wysokonapięciowych driverów dla tranzystorów T0, T3 i T4. Z kolei, wysokonapięciowe drivery dla tranzystorów T1 i T2 cechują się prostą budową ze względu na niską wymaganą częstotliwość przełączania tych tranzystorów, dodatkowo przy niemal zerowej wartości prądu. Dlatego, bez znaczącego wzrostu strat przełączania, dla T1 i T2 dopuszczalny jest dłuższy czas przełączania, niż dla T3 i T4.

Ze względu na strukturę autonomiczną, system może znaleźć zastosowanie w miejscach oddalonych od sieci energetycznej. Jednocześnie, dzięki brakowi kosztownego, ciężkiego i kłopotliwego w eksploatacji elektrycznego źródła buforowego, jest on relatywnie tani i bardziej mobilny. Autonomiczność oraz brak źródła buforowego mają jednak swe mankamenty, z których podstawowym jest możliwość praktycznego wdrożenia jedynie do zastosowań dla których zachodzi dobra korelacja między napięciem oraz zapotrzebowaniem na użyteczną pracę napędzanej maszyny roboczej. Przykładami spełniającymi to wymaganie są:

1. Wentylatory przeznaczone do poprawy komfortu człowieka w upalne dni, jako że upalne dni charakteryzują się co najmniej dobrym napięciem.
2. Dmuchawy wspomagające suszenie ziół i innych roślin, przy wykorzystaniu jako źródła energii cieplnej bezpośredniego promieniowania Słońca w widmie podczerwieni.
3. Pompy wody dla fontann. Tutaj dodatkowo możliwe jest samoczynne uzyskanie ciekawego wizualnie efektu zmiennej wydajności fontanny wraz ze zmianami zachmurzenia, bądź wraz z przesłanianiem modułów PV przez cienie osób przechodzących obok tych modułów.
4. Pompy w systemach filtracji wody basenów.
5. Dmuchawy napowietrzające zbiorniki wodne (np. stawy rybne).

Powyższe maszyny robocze charakteryzują się niewielkim oporowym momentem rozruchowym, dzięki czemu rozruch następuje nawet przy zachmurzonym niebie, a także cechuje je podobny kształt charakterystyk mechanicznych – tzw. charakterystyka wentylatorowa, dla której moment oporowy zależy od kwadratu prędkości obrotowej wału silnika. W związku z tym zaprezentowane w artykule wnioski z badań

wentylatora są słuszne dla wszystkich wymienionych maszyn roboczych.

W przypadku eksploatacji zespołu napędowego (np. wentylatora stołowego) w niewielkiej odległości od użytkownika, dodatkowym mankamentem może być niekiedy odczuwalna głośniejsza praca silnika wskutek zasilania go napięciem niesinusoidalnym. Jednakże wskutek niskiej częstotliwości przełączania tranzystorów falownika, efekty akustyczne wywołane przez znaczące energetycznie harmoniczne o niskich częstotliwościach nie są aż tak dobrze słyszalne przez ludzkie ucho. Warto nadmienić, że silnik zasilany opisanym napięciem prostokątnym pracuje zdecydowanie ciszej, niż przy zasilaniu go z typowego falownika MSI o częstotliwości impulsowania tranzystorów rzędu kilku kHz, a więc w zakresie dla którego ucho ludzkie jest najbardziej czułe. Dodatkowo, przy średnich i dużych prędkościach wentylatora (powyżej ok. 1000obr/min) szum wywołany przez przepływ powietrza zagłusza dodatkowe efekty akustyczne od strony silnika. Podsumowując, mankament głośniejszej pracy silnika zasilanego z falownika jest odczuwalny jedynie w cichym otoczeniu oraz przy niskich prędkościach wentylatora (szczególnie przy rozruchu wentylatora) i przy bliskiej odległości (poniżej ok. 2m) od wentylatora.

4. Literatura

- [1]. Niechaj M.: *Aspekty współpracy maszyn elektrycznych i generatorów fotowoltaicznych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, s.217-222.
- [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, s.24-39.
- [3]. Niechaj M.: *Numeryczny model fotowoltaicznego systemu napędowego z maksymalizacją mocy opartą na dodatnim sprzężeniu zwrotnym*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 86/2010, s.17-22.
- [4]. Niechaj M., Horodecki A.: *Symulacja pracy generatora fotowoltaicznego*. Konferencja Modelowanie i Symulacja MiS2002, Warszawa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s.437-444.

Autor

Marek Niechaj
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Politechniki Lubelskiej
m.niechaj@pollub.pl