

Konrad Dąbała, Zdzisław Krzemień
Instytut Elektrotechniki, Warszawa

PRĄDNICA O MAŁEJ PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ PRZEZNACZONA DO STOSOWANIA W ODNAWIALNYCH ŹRÓDŁACH ENERGII

LOW-SPEED GENERATOR DESTINED TO RENEWABLE ENERGY SOURCES

Abstract: Devices destined to convert renewable energy (wind, water) to mechanical energy – wind and water turbines – have generally low speed. So, it is necessary to use gears, which generate losses, noises and decreased reliability of construction.

The best solution is using low-speed generators in this type of system. In Electrotechnical Institute in Warsaw It was designed, manufactured and tested of prototype of synchronous generator with permanent magnets and rated power 1 kW, speed 100 rpm.

1. Wstęp

Urządzenia stosowane do przetwarzania energii odnawialnej (wiatr, woda) na energię mechaniczną – turbiny wodne i wiatrowe – mają zwykle niewielką prędkość obrotową. Otrzymana energia mechaniczna jest z reguły zamieniana na energię elektryczną. Przetworniki energii mechanicznej na elektryczną, czyli różnego typu prądnice, mają zwykle znaczną prędkość obrotową co wymusza stosowanie podwyższających przekładni mechanicznych. Przekładnie te powodują straty, hałas i zmniejszają niezawodność konstrukcji. Sposobem na wyeliminowanie tych niedogodności jest instalowanie w takich systemach prądnic o małej znamionowej prędkości obrotowej.

Podaż na rynku prądnic o małej prędkości obrotowej i stosunkowo małej mocy jest niewielka. Tylko pojedyncze firmy oferują takie produkty. Przeważnie są to prądnice o prędkości obrotowej około 300 obr/min i znacznej masie.

Ponieważ nawet w Polsce istnieje wielu potencjalnych inwestorów małych elektrowni o niewielkiej mocy, wykorzystujących odnawialne źródła energii, zainteresowanie takimi prądnicami jest zauważalne.

Elektrownie takie nadają się do zasilania w energię elektryczną obiektów wydzielonych, np: domków letniskowych, biwaków, przyczep kempingowych, a także wspomaganie zasilania w obiektach mieszkalnych lub gospodarczych w celu zmniejszenia ilości energii pobieranej z sieci energetycznej.

Wychodząc naprzeciw temu zapotrzebowaniu w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki zaprojektowano i wykonano prototyp prądnicy o dużym stopniu uniwersal-

ności (możliwość stosowania w mikroelektrowniach wiatrowych i wodnych) o stosunkowo niewielkiej znamionowej prędkości obrotowej i przewidzianej do pracy w szerokim zakresie temperatur otoczenia przy różnych rodzajach obciążenia.

Prądnica ta może współpracować z turbiną wiatrową lub wodną przy następujących rodzajach pracy:

- obciążenie rezystancyjne – grzanie wody lub powietrza;
- obciążenie poprzez prostownik: ładowanie akumulatorów;
- praca poprzez urządzenia energoelektroniczne i transformator na odbiory wymagające stałej częstotliwości 50 Hz przy napięciu 230 V.

W elektrowniach o niewielkich mocach (kilka, kilkanaście kilowatów) prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi wydają się być najlepszym rozwiązaniem. Brak uzwojenia w wirniku i elementów elektronicznych wirujących sprawia, że prądnice te cechują się wysoką niezawodnością. Również sprawność jest wyższa, a wymiary maszyny są mniejsze w porównaniu z rozwiązaniami klasycznymi.

Najbardziej właściwym zastosowaniem takich elektrowni jest praca na odbiory wydzielone. Ich współpraca z siecią nie wydaje się być ekonomicznie uzasadniona bowiem realne dochody byłyby niewielkie, a formalności związane z podłączeniem do sieci energetycznej są bardzo skomplikowane i takie same jak w przypadku dużej elektrowni. Jednakże taką możliwość należy również brać pod uwagę.

Z punktu widzenia użytkownika elektrownia taka powinna być tania, bezpieczna w eksploatacji, łatwa do montażu, obsługi i konserwacji.

2. Zaprojektowanie i wykonanie prądnicy

Przyjęto następujące podstawowe założenia projektowe:

- konstrukcja tradycyjna, trójfazowe uzwojenie twornika;
- moc znamionowa – 1 kW;
- znamionowa prędkość obrotowa – 100 obr/min.;
- napięcie znamionowe – 52,5 V.

Przyjęto, że liczba biegunów będzie równa 24, częstotliwość napięcia wyjściowego przy prędkości obrotowej 100 obr/min. będzie wynosić 20 Hz. Bezpośrednio prądnica ta będzie mogła pracować jedynie na odbiory rezystancyjne, natomiast w przypadku pracy na ładowanie baterii akumulatorów lub na odbiory wymagające napięcia 230 V przy 50 Hz konieczne będzie stosowanie elektronicznego układu pośredniczącego.

Prądnicę oznaczono typem GM 180M-24. Na rysunku 1 przedstawiono fotografię stojana i wirnika prądnicy.



Rys. 1. Stojan i wirnik prądnicy GM 180M-24

Znaczna ilość biegunów sprawia, że maszyna ta ma stosunkowo krótki obwód magnetyczny przy dość dużej średnicy. Wznios maszyny wynosi 180 mm. Wymagało to wykonania specjalnego kadłuba, nie można było zastosować kadłubów od standardowych silników.

Niewielka prędkość obrotowa – znamionowa 100 obr/min. – sprawia, że uznano montowanie na wale maszyny wentylatora za bezzasadne. Spowodowałoby to wydłużenie maszyny, a skuteczność działania wentylatora przy tej prędkości obrotowej byłaby wątpliwa.

Magnesy były klejone do powierzchni wirnika. Obliczone naprężenia rozciągające na powierzchni klejenia magnesów mają znikome wartości wobec dopuszczalnych dla zastosowanego kleju, zarówno przy znamionowej prędkości obrotowej jak i przy 300 obr/min. Uznano więc, że stosowanie bandażu jest niecelowe.

Masa prądnicy wynosi 50 kg.

Na rysunku 2 przedstawiono fotografię kompletnej prądnicy.



Rys. 2. Kompletna prądnica typu GM 180M-24

3. Wyniki badań prądnicy

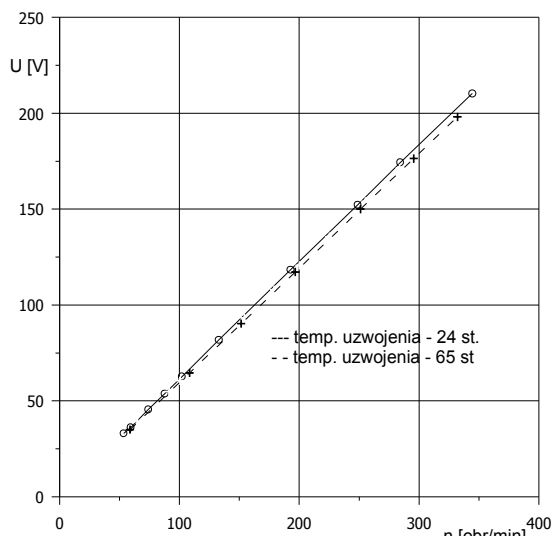
Prądnica napędzana była poprzez wałek skrętny, silnikiem indukcyjnym zasilanym z falownika. Obciążeniem był regulowany układ rezystorów.

Przyrost temperatury uzwojenia stojana prądnicy mierzony był za pomocą mostka do pomiaru rezystancji pod obciążeniem metodą superpozycji. Temperaturę kadłuba mierzono za pomocą termometru kontaktowego i termometru laserowego.

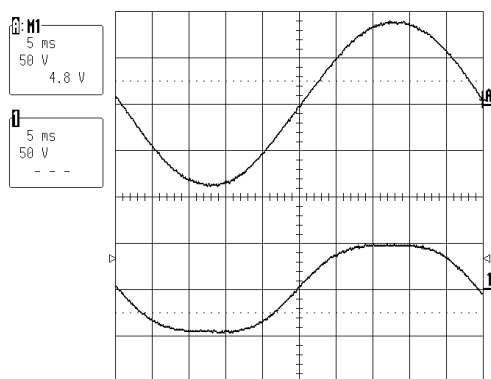
Moment zaczepowy (początkowy) wyznaczany był w stanie statycznym przy pomocy pomiaru siły działającej na ramieniu przymocowanym do wału prądnicy w trzech położeniach wirnika. Średnia wartość zmierzonego momentu wyniosła 2,1 Nm.

Charakterystykę napięcia biegu jałowego w funkcji prędkości obrotowej przedstawiono na rysunku 3. Ze względu na zależność parametrów magnesów od temperatury próby wykonano dla stanu zimnego i stanu nagrzanego prądnicy.

Pomiary wykazały jednak, że zastosowane magnesy wykazują stosunkowo małą zależność parametrów od temperatury: napięcia przewodowe prądnicy w stanie zimnym i w stanie nagrzanym różnią się tylko o około 2 V.



Rys. 3. Zależność napięcia międzyfazowego od prędkości obrotowej: linia ciągła – prądnica w stanie zimnym, temperatura otoczenia równa 24 °C; linia przerywana - prądnica w stanie nagrzanym, temperatura uzwojenia równa 65°C



Rys. 4. Oscylogramy napięcia fazowego (I) i międzyfazowego (A) przy biegu jałowym, $n = 100$ obr/min. ($f = 20$ Hz, $U_p = 63,5$ V)

Na rysunku 4 przedstawiono oscylogramy napięcia przewodowego oraz fazowego przy biegu jałowym prądnicy i prędkości obrotowej 100 obr/min. Napięcie międzyfazowe ma przebieg praktycznie sinusoidalny. Zawartość wyższych harmonicznych jest niewielka. Efekt ten osiągnięto poprzez zastosowanie skosu żłobków w pakiecie stojana.

Próby nagrzewania prądnicy przeprowadzono przy obciążeniu rezystancyjnym utrzymując stałą prędkość obrotową. Próby te wykonano dla następujących częstotliwości napięcia wyjściowego: 20, 30, 40 i 50 Hz. Wartość mocy do-

bierano tak, aby prąd fazowy był zbliżony do wartości obliczonej w projekcie, przy czym przyjmowano, że moc powinna wynosić pełne setki watów. Moc obciążenia dla poszczególnych prędkości obrotowych wynosiła 800, 1000, 1600, 2200, 2800 W. Ponieważ stwierdzono, że istnieje pewna rezerwa cieplna maszyny część prób wykonano przy zwiększonej mocy, a mianowicie 1100 W przy $f = 20$ Hz, 1800 W przy $f = 30$ Hz, 3000 W przy $f = 50$ Hz. W tabelicy 1 przedstawiono zestawienie wyników prób nagrzewania.

Tablica 1. Zestawienie wyników prób nagrzewania

n	P	Ustalony przyrost temp. uzw. $\Delta\theta_{Cu}$	Ustalona temperatura kadłuba θ_k
obr/min	W	K	°C
100	1000	33	45
	1100	50	57
150	1600	36	47
	1800	53	60
200	2200	41	49
250	2800	43	51
	3000	52	60

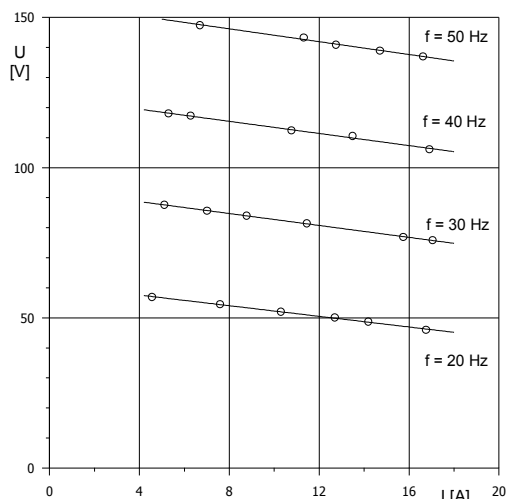
Wykonane próby nagrzewania wskazują, że prądnica ta może pracować przy obciążeniach większych niż przyjęto w projekcie

W tabelicy 2 przedstawiono zestawienie ustalonych parametrów prądnicy odczytanych po próbach nagrzewania.

Próby obciążenia przeprowadzono bezpośrednio po próbach nagrzewania – w stanie nagrzanym prądnicy dla czterech wartości częstotliwości napięcia wyjściowego. Na rysunku 5 zestawiono charakterystyki $U = f(I)$ przy różnych prędkościach obrotowych prądnicy.

Tablica 2. Porównanie ustalonych parametrów prądnicy po próbach nagrzewania

n	P	U	I	η
obr/min	W	V	A	%
100	1000	53.1	11.07	84.45
	1100	50.1	12.70	81.52
150	1600	81.4	11.45	88.35
	1800	78.7	13.26	86.22
200	2200	113.3	11.27	90.72
250	2800	143.3	11.32	92.16
	3000	141.3	12.33	91.54



Rys. 5. Charakterystyki $U = f(I)$ przy różnych prędkościach obrotowych prądnicy

Tablica 3. Porównanie spadków napięcia wyjściowego prądnicy przy różnych prędkościach obrotowych prądnicy

f	Napięcie biegu jałowego	Napięcie przy obc. prądem - 11.5 A	Spadek napięcia
Hz	V	V	V
20	61.2	51.0	10.2
30	93.0	81.2	11.8
40	123.8	111.7	12.1
50	155.2	142.8	12.4

W tablicy 3 zestawiono spadki napięcia wyjściowego prądnicy przy obciążeniu prądem 11,5 A. Wynoszą one od 16,6% przy 20 Hz do 8% przy 50 Hz. Nachylenie charakterystyk obciążeniowych jest zbliżone przy różnych prędkościach obrotowych prądnicy.

4. Porównanie parametrów dostępnych na rynku prądnic

Znaleziono następujące dostępne na rynku prądnice o stosunkowo niewielkiej mocy i prędkości obrotowej:

- prądnica produkcji chińskiej o mocy 3,3 kW przy $n = 250$ obr/min. i masie 80 kg. Przy 100 obr/min. moc jest równa 1,3 kW, czyli

przy tej prędkości obrotowej wykorzystanie wynosi 62 kg/kW;

- prądnica produkcji krajowej o mocy 3,5 kW przy $n = 150$ obr/min. i masie 170 kg. Przy 100 obr/min. moc jest równa 2,3 kW, czyli wykorzystanie wynosi wówczas 74 kg/kW.

Prądnica GM180M-24 ma współczynnik wykorzystania 50 kg/kW czyli lepszy odpowiednio o 24% i 48% od prądnic dostępnych na rynku, a jeśli przyjmujemy, że moc tej prądnicy wynosi 1,1 kW wartości te ulegną dalszemu wzrostowi.

5. Wnioski

- Wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że prądnica typu GM 180-24 charakteryzuje się bardzo dobrymi własnościami eksploatacyjnymi i może być stosowana w odnawialnych źródłach energii.
- Prądnica ta ma znacznie lepszy współczynnik wykorzystania materiałowego w porównaniu z innymi dostępnymi na rynku prądnicami.
- Istnieje możliwość pracy prądnicy przy prędkościach obrotowych znacznie wyższych niż przyjęto w projekcie uzyskując odpowiednio zwiększone moce.
- Wyniki badań i uzyskane doświadczenie stanowiąc będą podstawę do zaprojektowania i wykonania całej serii wolnoobrotowych prądnic przeznaczonych do współpracy z odnawialnymi źródłami energii.

Praca wykonana w ramach projektu rozwojowego NR01-0006-04 zatytułowanego: „Nowatorska elektrownia rzeczna o małych nakładach inwestycyjnych z turbiną ślimakową”.

Autorzy

Dr inż. Konrad Dąbała,
tel. 0-22 812-30-20

e-mail: k.dabala@iel.waw.pl

Dr inż. Zdzisław Krzemień,

e-mail: z.krzemien@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki,

Zakład Maszyn Elektrycznych

ul. Pożaryskiego 28,04-703 Warszawa