

Jan Zawilak
Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

SILNIKI SYNCHRONICZNE ŚREDNIEJ MOCY WZBUDZANE MAGNESAMI TRWAŁYMI

MEDIUM POWER PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania magnesów trwałych w silnikach prądu przemiennego. Jedną z zalet jest ich prosta budowa i eksploatacja. Ich uruchomienie odbywa się przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego. Maszyny te mają takie same gabaryty i mogą zastąpić silniki indukcyjne przez ich wymianę. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne silnika synchronicznego średniej mocy ($P=160$ kW) wzbudzanego magnesami trwałymi. Charakteryzuje się on lepszymi parametrami eksploatacyjnymi tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz mniejszym prądem pobieranym z sieci.

Abstract: The paper presents the results of permanent magnets application in AC motors. The main advantage of this motor type is simple construction and inherent self-start. These machines have the same dimensions as induction motors and may be successfully equivalent. Running properties of the 160 kW motor are shown. The investigated motor has higher both power factor and efficiency in comparison to the induction motor.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, silnik synchroniczny, magnesy trwałe, wysoka sprawność*
Keywords: *electrical machines, synchronous motor, permanent magnets, high efficiency*

1. Wstęp

Dzięki prostej budowie i niezawodnej pracy silniki indukcyjne mają powszechne zastosowania w przemysłowych napędach elektrycznych. Silniki te pobierają dużą moc bierną indukcyjną. W niektórych silnikach indukcyjnych (o dużej liczbie biegunów pola magnetycznego) moc bierna może stanowić nawet ok. 60 % mocy pozornej. Niedopasowanie silnika do układu napędowego powoduje pogorszenie relacji między dostarczaną energią czynną a bierną. Zmniejsza się sprawność przetwarzania energii, co w dużej skali przemysłowej powoduje wzrost kosztów oraz uszczuplenia zasobów mocy w systemie elektroenergetycznym. Związane to jest jednocześnie z większym zanieczyszczeniem środowiska spowodowanym zwiększoną emisją CO_2 . Dlatego wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniami nowych, energooszczędnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych [1, 2, 3, 4, 5, 6, 11]. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w napędach elektrycznych o pracy ciągłej, w których niewielka poprawa sprawności sumarycznie pozwoli na duże oszczędności energii.

Celem pracy jest poszerzenie wiedzy nt. energooszczędnych silników elektrycznych o nowych strukturach obwodów magnetycznych wzbudzanych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Silniki te zbudowane są w taki sposób by można je montować zamiennie w miejsce silników indukcyjnych.

2. Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi

Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych umożliwiających zastąpienie silników indukcyjnych zdeterminowane jest postawionym celem, a mianowicie uzyskaniem napędów energooszczędnych i niezawodnych. Zbudowanie silników napędowych o sprawności większej niż sprawność obecnie stosowanych energooszczędnych silników indukcyjnych wymaga użycia w ich strukturach nowoczesnych materiałów, a w szczególności magnesów trwałych. Ponadto silniki powinny być przystosowane do zmiennego obciążenia tych napędów tzn. mieć niezmienną sprawność w dużym zakresie zmian obciążenia pozwalającą na racjonalizację zużycia energii. Niezawodność silników powinna być nie mniejsza

i eksploatacja nie gorsza niż silników indukcyjnych, co oznacza możliwie najprostszą konstrukcję poszukiwanych nowych struktur maszyn.

2.1 Budowa silników synchronicznych wzbudzonych magnesami trwałymi

Budowa układu mechanicznego oraz stojana jest identyczna jak silnika indukcyjnego. W stojanie umieszczone jest uzwojenie tego samego rodzaju a jedynie zwojność dobrano do aktualnych warunków magnetowodu. Różnica w budowie wirnika wynika z konieczności umieszczenia magnesów trwałych. Ponieważ przyjęto, że silniki tego typu mają być uruchamiane przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej, to ich rozruch odbywa się przez wytworzenie momentu asynchronicznego. Moment ten wytworzony jest przez uzwojenie klatkowe ułożone w wirniku podobnie jak w silniku indukcyjnym. Dobór uzwojenia klatkowego umożliwiający kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych (liczba i wymiary prętów uzwojenia) jest przedmiotem wielu prac m.in. [7, 8]. Wypełnienie magnetowodu wirnika, względny konstrukcyjne i technologiczne determinują ułożenie magnesów [9].

Ze względu na koszty i możliwości wykonania badań laboratoryjnych zaprojektowano pierwsze modele maszyn o małych mocach [10]. Uzyskane pozytywne wyniki skłoniły autorów do próby wykonania silników większej (średniej) mocy tj. ponad 100 kW. W modelach tych wykorzystano konstrukcję mechaniczną oraz magnetowód stojana typowego silnika indukcyjnego. W silniku tym zaprojektowano nowy wirnik, w którym umieszczono magnesy trwałe (rys. 1).

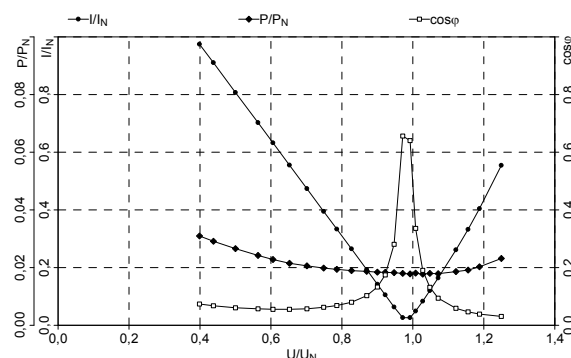


Rys. 1 Widok wirnika z magnesami trwałymi

2.2. Badania modelu silnika synchronicznego średniej mocy z magnesami trwałymi

Model silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy znamionowej $P=160$ kW napięciu znamionowym $U=500$ V przebadano w laboratorium przemysłowym.

Charakterystyki pomierzone podczas biegu jałowego pokazano na rysunku 2 a wyniki pomiarów w tabeli 1.



Rys. 2 Charakterystyki biegu jałowego badanego silnika

Tabela 1 Zestawienie wyników pomiarów charakterystyk biegu jałowego badanego silnika

nr	U_0	I_0	P_0	$\cos\varphi_0$
--	V	A	kW	--
12	450	28,5	2,946	0,133
13	461	21,0	2,936	0,175
14	473	12,7	2,924	0,281
15	485	5,2	2,871	0,656
16	496	5,2	2,847	0,641
17	504	9,9	2,891	0,336
18	514	16,7	2,833	0,191
19	524	24,1	2,871	0,131
20	536	32,8	2,869	0,094
21	561	52,3	2,973	0,059

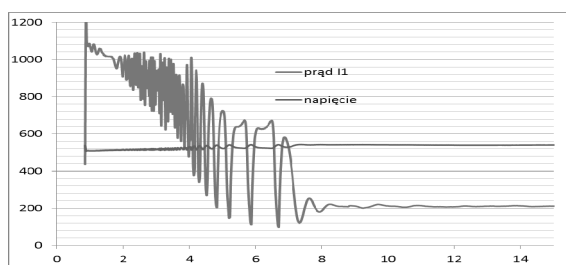
Silnik ten poddano próbie nagrzewania przy obciążeniu bezpośrednim. Pomiar temperatury wykonano przez pomiar rezystancji uzwojenia stojana, a wyniki zestawiono w tabeli 2.

W badanym silniku zastosowano izolację klasy F, ale do danych znamionowych przyjęto dopuszczalną temperaturę pracy odpowiadającą klasie izolacji B tj. $\theta_{dop} = 130$ °C. Z wykonanych pomiarów nagrzewania bezpośredniego silnika wynika, że jest on niewykorzystany termicznie z bardzo dużym zapasem tj. ok. 50 °C.

Tabela 2 Wyniki pomiarów badanego silnika podczas obciążenia bezpośredniego mocą znamionową

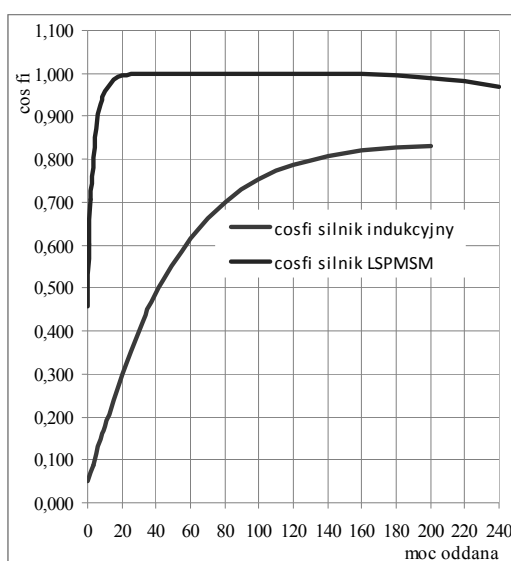
$U_{ab} = 501 \text{ V}$	$U_{cb} = 499 \text{ V}$	$U_{ca} = 500 \text{ V}$
$I_a = 192,6 \text{ A}$	$I_c = 191,8 \text{ A}$	$I_b = 190,1 \text{ A}$
$U = 500 \text{ V}$	$I = 191,7 \text{ A}$	$P_1 = 163,5 \text{ kW}$
$n = 749,8 \text{ obr/min}$	$T = 2,032 \text{ kNm}$	$P_2 = 159,6 \text{ kW}$
$f = 49,99 \text{ Hz}$	$\cos\varphi = 0,984$	$\eta = 97,6 \%$
$\theta_{Cu} = 79,0 \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{ot} = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{Cu} = 59,5 \text{ K}$

Wykres natężenia prądu stojana podczas rozruchu bezpośredniego silnika sprzężonego i obciążonego mocą wentylatora pokazano na rysunku 3.

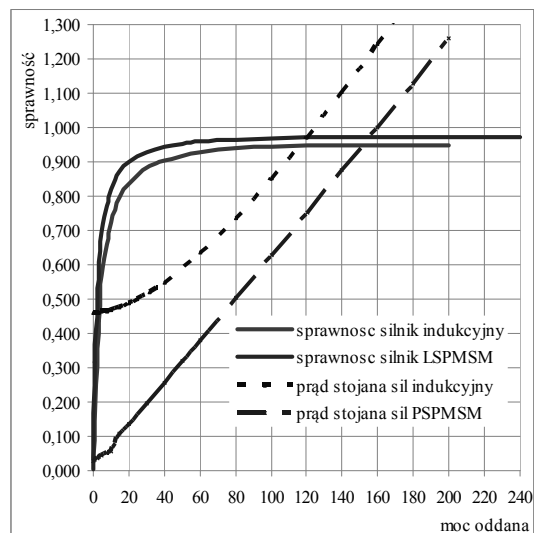


Rys. 3 Wykres natężenia prądu stojana podczas rozruchu bezpośredniego silnika obciążonego mocą sprzężonego z nim wentylatora

Na rysunkach 4, 5 pokazano charakterystyki eksploatacyjne badanego silnika zmierzone w pełnym zakresie zmian obciążenia bezpośredniego i porównano je z charakterystykami silnika indukcyjnego.



Rys. 4 Charakterystyki współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi



Rys. 5 Charakterystyki współczynnika sprawności i prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi

3. Podsumowanie i wnioski

W tabeli 3 zestawiono parametry eksploatacyjne badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi i porównano je z odpowiadającymi parametrami silnika indukcyjnego tej samej mocy.

Tabela 3 Zestawienie danych znamionowych silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi.

rodzaj silnika		indukcyjny	synchroniczny z magnesami trwałymi	
wielkość	jedn.	wartość		
		fabr.	oblicz.	pom.
napięcie znamion.	V	500	500	
prąd znamion.	A	240	190	192
moc znamion.	kW	160	160	
$\cos\varphi$	---	0,81	0,996	0,984
η	%	95,1	97,2	97,6

Na podstawie porównania charakterystyk i parametrów silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi można stwierdzić, że:

- w silniku synchronicznym kompensuje się moc bierną pobieraną z sieci (zwiększa współczynnik mocy z 0,81 do 0,984),

- współczynnik mocy jest praktycznie stały w całym zakresie zmian obciążenia,
- w silniku synchronicznym zwiększa się współczynnik sprawności (z 0,951 do 0,976),
- sprawność jest praktycznie stała w całym zakresie zmian obciążenia,
- zmniejsza się prąd znamionowy pobierany z sieci (z 240 do 192 A) przy takiej samej mocy oddawanej.

Zdobyte doświadczenia z silnikiem o średniej mocy ($P=160$ kW) dały podstawy do podjęcia prac nad budową silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy tj. większej niż 1 000 kW.

4. Literatura

- [1]. Aliabad, A.D., Mirsalim, M., Ershad, N.F.: *Line-Start Permanent-Magnet Motors: Significant Improvements in Starting Torque, Synchronization, and Steady-State Performance*. IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 46, Issue: 12, 2010, pp. 4066-4072
- [2]. Honsinger V.B.: *The fields and parameters of interior type AC permanent magnet machines*. IEEE-Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 4 April 1982. pp. 867-876
- [3]. Jabbar M. A., Zhejie Liu, Jing Dong: *Time-Stepping Finite-Element Analysis for the Dynamic Performance of a Permanent Magnet Synchronous Motor*. IEEE Transactions On Magnetics, vol. 39, No. 5, September 2003, pp. 2621-2623
- [4]. Kinnunen J., Pyrhonen J., Liukkonen O., Kurronen P.: *Analysis of directly network connected non-salient pole permanent magnet synchronous machines*. IEEE ISIE 2006, July 9-12, 2006 pp. 2217-2222
- [5]. Kral C., A. Haumer A.: *Modelica libraries for dc machines, three phase and polyphase machines*. Proc. 4th International Modelica Conference, Mar. 7-8. 2005, pp. 549-558.
- [6]. Zadeh M. H.: *Torque Ripple Suppression in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor*. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines Paper ID 1367, p. 1-5
- [7]. Zawilak T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R. 89, nr 2b, s. 177-179
- [8]. Zawilak T.: *Wykorzystanie efektu wypierania prądu w rozruchu bezpośrednim maszyn wzbudanych magnesami trwałymi*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2012, nr 32, s. 105-111
- [9]. Zawilak T.: *Wpływ kształtu szczeliny powietrznej na właściwości silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2011, nr 91, s. 137-142
- [10]. Zawilak T.: *Wpływ rozmieszczenia magnesów na właściwości eksploatacyjne silnika typu LSPMSM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 2010, nr 30, s. 3-12
- [11]. Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim - badania eksperymentalne*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2007, nr 77, s. 277-282.

Autorzy

dr hab. inż. Jan Zawilak prof. PWr.,
dr inż. Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn,
Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ryszard Palka