

Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi

Jan Zawilak, Tomasz Zawilak

1. Wstęp

Dzięki prostej budowie i niezawodnej pracy silniki indukcyjne mają powszechne zastosowanie w przemysłowych napędach elektrycznych. Ich zasada działania wymaga dostarczenia energii biernej indukcyjnej. W 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 powoduje wzrost kosztów eksploatacji. W dużej skali przemysłowej związane to jest jednocześnie z większym zanieczyszczeniem środowiska, spowodowanym zwiększoną emisją CO₂ przez elektrociepownie. 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 sumarycznej 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 mają być stosowane jako zamienniki powszechnie stosowanych silników indukcyjnych.

2. Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi


Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych, umożliwiających zastąpienie silników indukcyjnych, zdefiniowane jest postawionym celem, a mianowicie uzyskaniem napędów energooszczędnych i niezawodnych. Uzyskanie 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 zmiennej 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 wzbudzanych magnesami trwałymi

Budowa układu mechanicznego oraz stojana jest identyczna jak silnika indukcyjnego. W stojanie umieszczone jest uzwo-

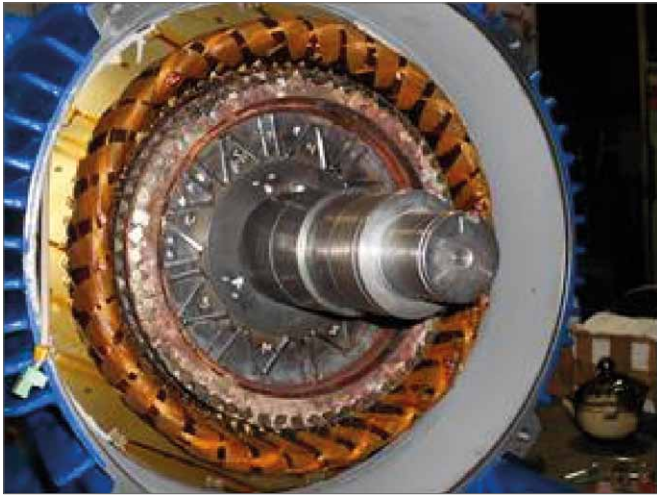
Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania magnesów trwałych w silnikach elektrycznych prądu przemiennego. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi. Charakteryzują się one lepszymi parametrami eksploatacyjnymi, tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz pobierają z sieci zasilającej prąd o mniejszej wartości skutecznej. Zaletą tych silników jest ich prosta budowa i eksploatacja, a uruchomienie odbywa się przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego. Maszyny te mają takie same gabaryty i mogą zastąpić silniki indukcyjne przez prostą wymianę.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, magnesy trwałe, parametry energetyczne, sprawność

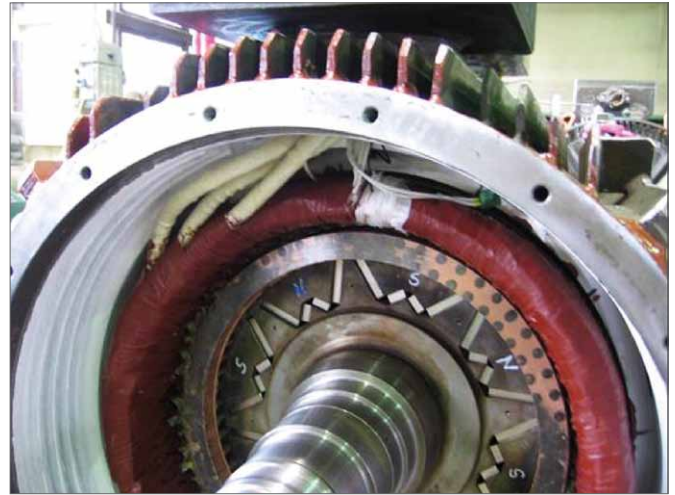
 **Abstract:** The paper presents results of research on the use of permanent magnets in electric motors of alternating current. Showing the operational characteristics of the induced synchronous permanent magnet. They are characterized by better operating parameters, ie higher the power factor, a greater degree of efficiency and a smaller current consumed from the network. The essence of these engines is their simple construction and operation of a launch takes place through direct connection to the power supply. These machines have the same dimensions and can replace induction motors through a simple exchange.

jenie tego samego rodzaju, a jedynie zwojność dobiera się odpowiednio 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].

Pierwsze modele maszyn zbudowano dla małych mocy, które można wykonać niewielkim nakładem środków finansowych, a także zbadać w warunkach laboratoryjnych [13]. Pozytywne



Rys. 1. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy znamionowej 110 kW



Rys. 3. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy znamionowej 160 kW



Rys. 2. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o mocy znamionowej 110 kW



Rys. 4. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi z wentylatorem typu WOO 200B

wyniki uzyskane w silnikach małej mocy skłoniły autorów do próby wykonania silników większej (średniej) mocy, tj. ponad 100 kW [12, 14]. 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, 2, 3, 4) [15].

2.2. Badania modelu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi średniej mocy

Modele silników synchronicznych z magnesami trwałymi o mocach znamionowych $P = 110$ oraz 160 kW napięciu znamionowym $U = 500$ V i prędkości obrotowej $n = 750$ obr/min przebadano w laboratoriach przemysłowych.

Charakterystyki pomierzono podczas obciążenia bezpośredniego, a wyniki pomiarów zestawiono w tabelach 1 i 2.

Na rysunkach 5, 6 pokazano charakterystyki eksploatacyjne silnika o mocy znamionowej $P = 160$ kW zmierzone w pełnym zakresie zmian obciążenia bezpośredniego i porównano je z silnikiem indukcyjnym.

Tabela 1. Wyniki pomiarów silnika z obciążeniem bezpośrednim mocą znamionową $P = 110$ kW

Lp.	U	I_1	P_1	$\cos\varphi$	P_2	η
	V	A	kW	-	kW	%
1	500,0	202,1	153,8	0,879	150	97,1
2	499,6	180,0	140,5	0,902	137	98,0
3	499,9	138,7	111,8	0,931	110	98,2
4	499,4	102,1	83,7	0,947	82	98,9

2.3. Badania modelu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi dużej mocy

Zdobyte doświadczenia podczas budowy i eksploatacji silników średniej mocy dały podstawy do podjęcia prac i budowy silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy, tj. większej niż $1\ 000$ kW (rys. 7, 8).

Silnik ten poddano badaniom, wyznaczając parametry i charakterystyki podczas stanu jałowego. Częściowe wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 2. Wyniki pomiarów silnika z obciążeniem bezpośrednim mocą znamionową $P = 160$ kW

$U_{ab} = 501$ V	$U_{cb} = 499$ V	$U_{ca} = 500$ V
$I_a = 192,6$ A	$I_c = 191,8$ A	$I_b = 190,1$ A
$U = 500$ V	$I = 191,7$ A	$P_1 = 163,5$ kW
$n = 749,8$ obr/min	$T = 2,032$ kNm	$P_2 = 159,6$ kW
$f = 49,99$ Hz	$\cos\varphi = 0,9839$	$\eta = 97,6$ %
$\theta_{Cu} = 79,0^\circ\text{C}$	$\theta_{ot} = 19,5^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{Cu} = 59,5$ K

Tabela 3. Wyniki pomiarów silnika o mocy znamionowej $P = 1100$ kW w stanie jałowym

Lp.	U_0	I_0	P_0	$\cos\varphi_0$	f
-	V	A	kW	-	Hz
1	6316,2	15,53	16,84	0,0991	49,99
2	6485,1	9,03	16,32	0,1609	49,99
3	6653,6	3,04	15,94	0,4549	49,99
4	6717,4	2,33	15,12	0,5588	49,99

Tabela 4. Parametry silników synchronicznych z magnesami trwałymi o mocach znamionowych 110 i 160 kW w zestawieniu z odpowiadającymi im silnikami indukcyjnymi

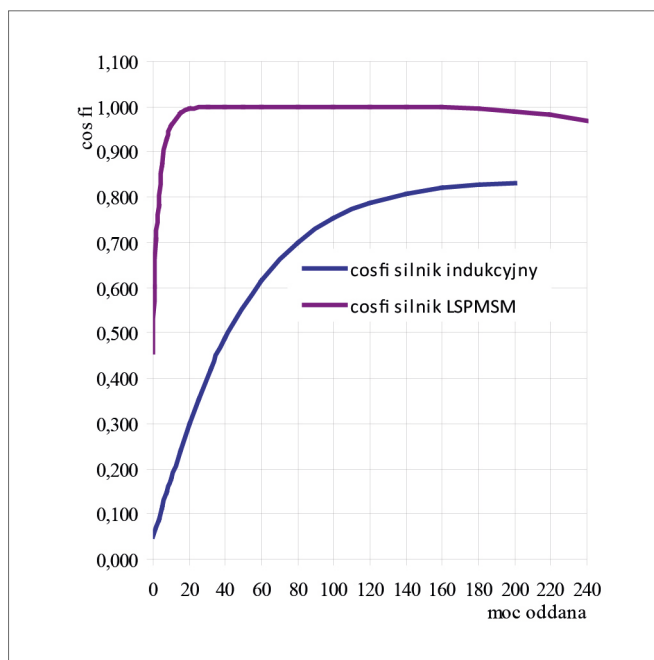
Rodzaj silnika		Indukcyjny	Synchroniczny z magnesami trwałymi
Wielkość	Jednostka	Wartość	
Napięcie zasilania	V	500	500
Prąd znamionowy	A	181	131
Moc znamionowa	kW	110	110
Współczynnik mocy	-	0,75	0,99
Współczynnik sprawności	%	93,5	97,7
Napięcie zasilania	V	500	500
Prąd znamionowy	A	240	191
Moc znamionowa	kW	160	160
Współczynnik mocy	-	0,81	0,99
Współczynnik sprawności	%	95,1	97,6

3. Podsumowanie i wnioski

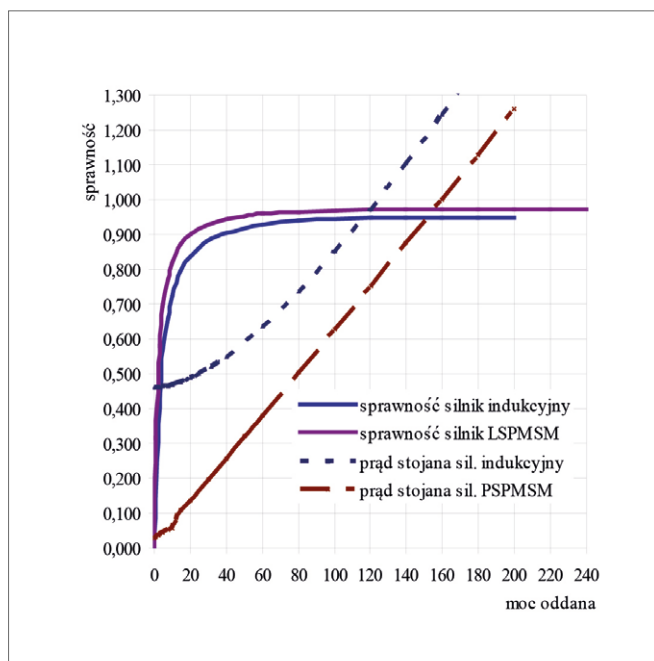
W tabeli 4 zestawiono parametry eksploatacyjne badanych silników synchronicznych z magnesami trwałymi i porównano je z odpowiadającymi parametrami silników indukcyjnych porównywalnej mocy znamionowej.

Na podstawie porównania charakterystyk i parametrów silników indukcyjnych i synchronicznych z magnesami trwałymi można stwierdzić, że:

- w silnikach synchronicznych kompensuje się moc bierną pobieraną z sieci (zwiększa współczynnik mocy);



Rys. 5. Charakterystyki współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi



Rys. 6. Charakterystyki współczynnika sprawności i prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi

- współczynnik mocy jest praktycznie stały w całym zakresie zmian obciążenia;
 - w silnikach synchronicznych zwiększa się współczynnik sprawności;
 - sprawność jest praktycznie stała w całym zakresie zmian obciążenia;
 - zmniejsza się prąd znamionowy pobierany z sieci przy takiej samej mocy oddawanej.
- Zwiększenie współczynnika sprawności oraz współczynnika mocy powoduje zmniejszenie prądu pobieranego z sieci zasil-



Rys. 7. Montaż magnesów w silniku o mocy znamionowej $P = 1100$ kW



Rys. 8. Widok silnika o mocy $P = 1100$ kW na stanowisku pracy

lającej przy takim samym poborze mocy czynnej. Powoduje to istotne zmniejszenie strat mocy w całym układzie przesyłu energii elektrycznej.

Zdobyte doświadczenia z silnikami o średniej mocy upoważniły do podjęcia prac oraz zbudowania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy, tj. $P = 1000$ kW.

Literatura

- [1] BAO Y., LIU L., ZHANG Y., FENG X.: *Performance investigation and comparison of line start-up permanent magnet synchronous motor with super premium efficiency*. Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on, Aug. 20–23, 2011.
- [2] BAO Y., MEHMOOD W., FENG X.: *Super premium efficiency line start permanent magnet synchronous motor: design, test and comparison*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2012 Record of Conference Papers Industry Applications Society 59th Annual IEEE.
- [3] FENG X., LIU L., KANG J., ZHANG Y.: *Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor*. in Proc. of XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Roma, Italy, Sept. 6–8, 2010.

- [4] HAN Z., YANG H., CHEN Y.: *Investigation of the rotor mechanical stresses of various interior permanent magnet motors*. in Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on Tokyo, Japan, 2009, pp. 1–6.
- [5] KALLUF F.J.H., POMPERMAIER C., SADOWSKI N.: *Magnet flux optimization method for Line-Start Permanent Magnet motors*. in Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09, Miami, FL. IEEE International, 2009, pp. 953–957.
- [6] LU Q., HUANG X., YE Y., FANG Y.: *Experiment and analysis of high power line-start PM motor*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2012.
- [7] MELFI M.J., UMANS S.D.: *Transients During Line-Starting of Squirrel-Cage Induction Motors*. IEEE PCIC Conference Record, 2010.
- [8] MELFI M.J., UMANS S.D., ATEM J.E.: *Viability of highly-efficient multi-horsepower line-start permanent-magnet motors*. Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC), 2013 Record of Conference Papers Industry Applications Society 60th Annual IEEE.
- [9] ZAWILAK T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2013, s. 177–179.
- [10] ZAWILAK T.: *Wykorzystanie efektu wypierania prądu w rozruchu bezpośrednim maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 32/2012, s. 105–111.
- [11] ZAWILAK T.: *Wpływ kształtu szczeliny powietrznej na właściwości silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 93/2011, s. 137–142.
- [12] ZAWILAK T.: *Wpływ rozmieszczenia magnesów na właściwości eksploatacyjne silnika typu LSPMSM*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały. 30/2010, s. 3–12.
- [13] ZAWILAK T., ANTAL L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim – badania eksperymentalne*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” 77/2007, s. 277–282.
- [14] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2014, s. 224–226.
- [15] ZAWILAK T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2013, s. 177–179.



dr hab. inż. Jan Zawilak prof. PWR., dr inż. Tomasz Zawilak – Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

artykuł recenzowany