

ENERGOOSZCZĘDNE SILNIKI SYNCHRONICZNE Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM

HIGH EFFICIENCY LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Jan Zawilak, Tomasz Zawilak - Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania magnesów trwałych w silnikach prądu przemiennego. Istotą 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. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi średniej mocy $P=110$ kW. Charakteryzuje się on lepszymi parametrami eksploatacyjnymi tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz mniejszym prądem pobieranym z sieci.

Słowa kluczowe: silniki synchroniczne, magnesy trwałe

This paper presents the results of permanent magnets applications in AC motors. The main advantage of these motors is simple construction and direct on line start ability. These machines have the same dimensions as induction motors and may be successfully interchangeable. Operating characteristics of a 110 kW motor are shown. They prove that this motor has higher power factor and efficiency at lower input current comparing to typical induction motor.

Key words: synchronous motors, permanent magnets

Wstęp

Dzięki prostej budowie i niezawodnej pracy silniki indukcyjne mają powszechne zastosowania w przemysłowych napędach elektrycznych. Ich zasada działania wymaga dostarczenia energii biernej indukcyjnej. 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, 8]. 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 na temat energooszczędnych silników elektrycznych o nowych strukturach obwodów magnetycznych wzbudzanych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Silniki te mają być dostosowane jako zamienniki z powszechnie stosowanymi silnikami indukcyjnymi.

Silniki synchroniczne wzbudzane magnesami trwałymi

Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych umożliwiających zastąpienie silników indukcyjnych zdeteminowane 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 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.

Budowa silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi

1. Budowa stojana

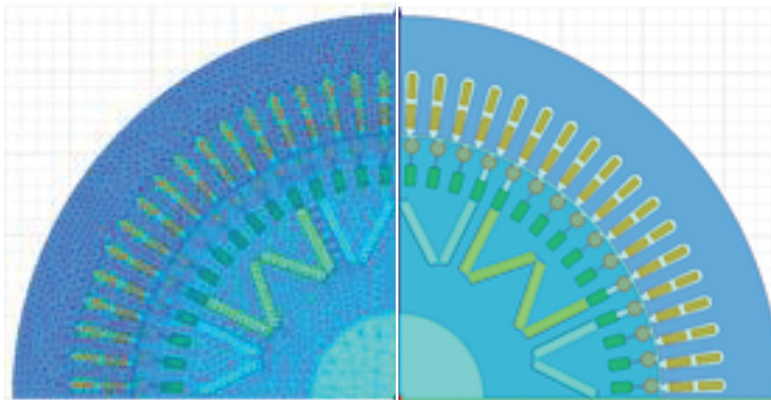
Budowa układu mechanicznego oraz stojana jest identyczna jak silnika indukcyjnego. W stojanie umieszczone jest uzwojenie tego samego rodzaju a jedynie zwojność dobierana jest do aktualnych warunków magnetowodu.

2. Budowa wirnika

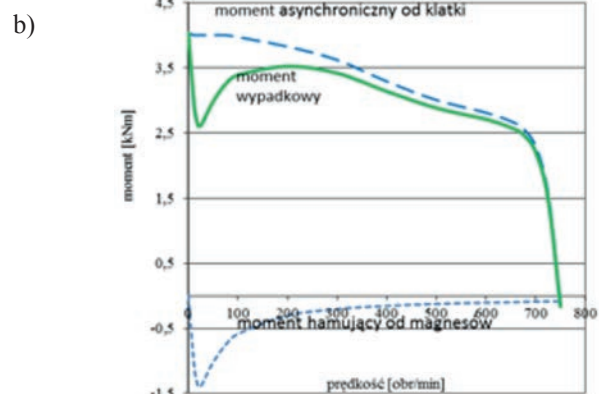
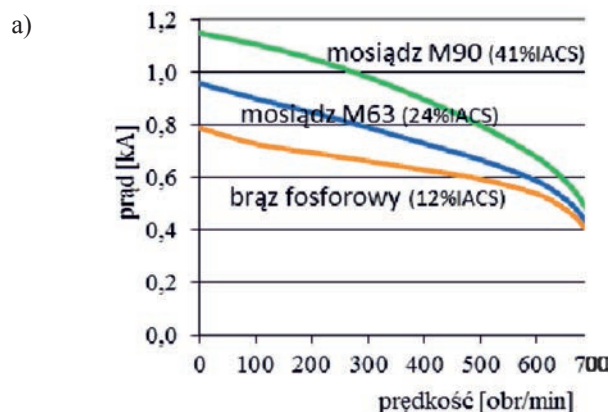
Różnica w budowie wirnika wynika z konieczności umieszczenia magnesów trwałych. Ponieważ przyjęto, że silniki tego typu mają być uruchamiane przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej, to ich rozruch odbywa się przez wytworzenie momentu asynchronicznego. Moment ten wytworzony jest przez uzwojenie klatkowe ułożone w wirniku podobnie jak w silniku indukcyjnym. Dobór uzwojenia klatkowego umożliwiając kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych (liczba i wymiary prętów uzwojenia) jest przedmiotem wielu prac m.in. [7, 8, 9].

W czasie rozruchu magnesy trwale wytwarzają moment hamujący zmniejszający wypadkowy moment rozruchowy, szczególnie w dolnym zakresie prędkości obrotowych. Dlatego uzwojenie klatkowe musi wytworzyć duży moment rozruchowy w zakresie małych prędkości obrotowych. Rozruch musi zakończyć się skuteczną synchronizacją, co jest szczególnie trudne do zrealizowania przy dużych momentach bezwładności napędu (np. wentylatora) i wirnik musi mieć mały poślizg umożliwiający uzyskanie dużych wartości momentu wpadu [5, 6].

Warunki te spełnia zastosowanie uzwojenia dwuklatkowego. Zaprojektowany silnik z magnesami trwałymi ma górne pręty okrągłe oraz dolne z prętów prostokątnych. Doboru wymiarów magnetowodu wirnika dokonano na podstawie badań symulacyjnych za pomocą oprogramowania Maxwell 2D (v.14). W symulacjach wybrano typ rozwiązania „transient”, pozwalający na modelowanie pracy maszyny przy wymuszeniu napięciowym z jednoczesnym uwzględnieniem ruchu, najbliższy odzwierciedlający rozpatrywane zjawiska. Widok geometrii modelu symulacyjnego silnika pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria części połowej rozpatrywanego modelu silnika
Fig. 1. Field part geometry of studied LSPMSM



Rys. 2. Charakterystyka prądu rozruchowego stojana (a) oraz momentu silnika (b) w funkcji prędkości obrotowej
Fig. 2. Characteristics of current vs. speed (a) and torque vs. speed (b)

Ze względu na występowanie zjawiska rozproszenia strumienia magnesów nie jest wskazane stosowanie we wszystkich żłobkach jednakowego przesmyku pomiędzy żłobkami uzwojenia klatkowego. Analitycznie zbadano wpływ szerokości przesmyku pomiędzy prętami na krańcach biegunów magnesów na wartość napięcia indukowanego w stanie bezprądowym. Z obliczeń wynika, że strumień rozproszenia magnesów zamykający się przez przesmyk pomiędzy prętami klatek zmienia się od około 10 % przy szerokości przesmyku 1 mm do około 1 % przy szerokości przesmyku 8 mm. Ze względu na optymalną wartość indukowanego napięcia w uzwojeniu stojana wybrano szerokość przesmyku równą 4 mm.

W silnikach dwuklatkowych wykonanych w technologii spawanej odpowiednie właściwości momentów można uzyskać odpowiednim doбором materiałów uzwojenia klatkowego. Symulacyjnie przebadano wpływ rodzaju materiału prętów klatki górnej na przebieg momentu asynchronicznego. W tym celu wykonano obliczenia przy założeniu, że pręty klatki górnej są wykonane z mosiądzu M90, mosiądzu M63 lub brązu fosforowego. We wszystkich przypadkach materiałem klatki dolnej była miedź [9].

Wykres zależności średniej wartości momentu oraz prądu stojana w funkcji prędkości obrotowej dla różnych materiałów klatki górnej pokazano na rysunku 2.

Na podstawie wykonanych obliczeń uznano, że dla rozpatrywanego modelu silnika najlepsze parametry rozruchowe uzyskuje się dla górnej klatki wykonanej z mosiądzu M63 a dolnej z miedzi.

Wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy silnika wykonano obliczenia wypadkowego momentu rozru-

chowego silnika z magnesami trwałymi a wyniki obliczeń pokazano na rysunku 2b. Można zauważyć, że wartość momentu rozruchowego jest w pełnym zakresie prędkości większa od momentu znamionowego, dzięki czemu możliwy jest rozruch silnika przy stałym obciążeniu na wale silnika.

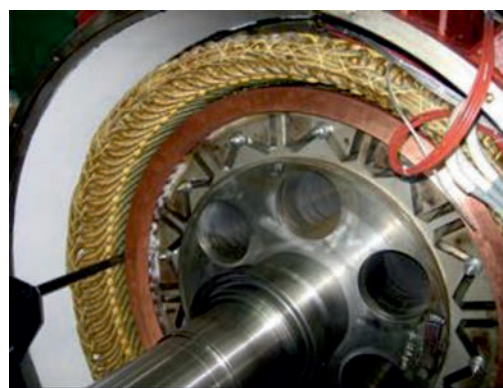
Modele fizyczne silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi

W pracy pokazano dwa modele fizyczne silników z magnesami trwałymi zaprojektowane z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Do budowy modelu fizycznego silnika o mocy znamionowej 110 kW, napięciu 500 V wykorzystano stojan oraz konstrukcję mechaniczną fabrycznego silnika indukcyjnego. Wirnik tego modelu wykonano wg opisanych zasad i pokazano na rysunku 3.

Drugi model silnika o mocy znamionowej $P=1100$ kW, napięciu $U=6000$ V wykonano jako prototypowy o nowym stojanie i wirniku pokazano na rysunku 4.



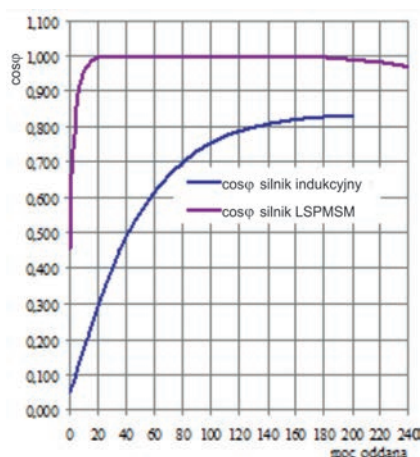
Rys. 3. Widok wirnika z magnesami trwałymi silnika o mocy $P=110$ kW
Fig. 3. A picture of the fabricated rotor of 110 kW LSPMSM



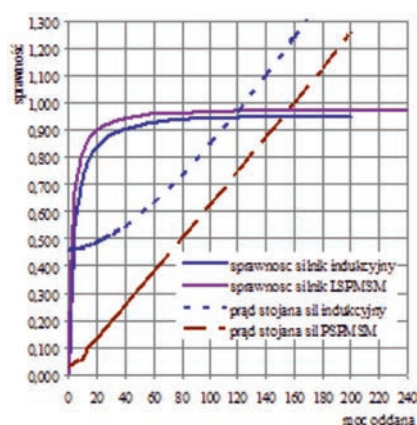
Rys. 4. Widok wirnika z magnesami trwałymi o mocy $P=1100$ kW
Fig. 4. A picture of the fabricated rotor of 1100 kW LSPMSM

Tab. 1. Wyniki pomiarów badanego silnika podczas obciążenia bezpośredniego mocą znamionową
Tab. 1. Measured full load characteristics

Lp	U V	I ₁ A	P ₁ kW	cosφ --	n obr./min	T kNm	P ₂ kW	η %
1	500,0	202,1	153,8	0,879	750	1,909	150	97,1
2	499,6	180,0	140,5	0,902	750	1,751	137	98,0
3	499,9	138,7	111,8	0,931	750	1,400	110	98,2
4	499,4	102,1	83,7	0,947	750	1,05	82	98,9



Rys. 5. Charakterystyki współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi
Fig. 5. Power factor vs. load power for induction motor and studied LSPMSM



Rys. 6. Charakterystyki współczynnika sprawności i prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi
Fig. 6. Efficiency and input current vs. load power for induction motor and studied LSPMSM

Badania modelu fizycznego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi bardzo dużej mocy

Zdobyte doświadczenia podczas budowy i eksploatacji silników średniej mocy ($P=110\text{ kW}$ oraz 160 kW) dały podstawy do podjęcia prac i budowy silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy tj. większej niż $1\,000\text{ kW}$ (rys. 7).

Silnik ten poddano badaniom wyznaczając parametry i charakterystyki podczas stanu jałowego. Częściowe wyniki pomiarów zamieszczono w tabeli 2.

Tab. 2. Wyniki pomiarów silnika o mocy znamionowej $P=1100\text{ kW}$ w stanie jałowym

Tab. 2. No load characteristics of fabricated 1100 kW LSPMSM

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



Rys. 7. Widok silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy $P=1100\text{ kW}$ na stanowisku badań w DFME DAMEL

Fig. 7. Studied LSPMSM at test bench of 1100 kW in DFME DAMEL

Wnioski

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 $0,75$ do $0,93$),
- współczynnik mocy jest praktycznie stały w całym zakresie zmian obciążenia,

- w silniku synchronicznym zwiększa się współczynnik sprawności (z $0,935$ do $0,982$),
- sprawność jest praktycznie stała w całym zakresie zmian obciążenia,
- zmniejsza się prąd znamionowy pobierany z sieci (z 181 do 139 A) przy takiej samej mocy oddawanej.

Zwiększenie współczynnika sprawności oraz współczynnika mocy powoduje zmniejszenie prądu pobieranego z sieci zasilającej przy takim samym poborze mocy czynnej. Powoduje to istotne zmniejszenie strat mocy w całym układzie przesyłu energii elektrycznej.

Ze względu na ograniczenie mocy w laboratorium badawczym nie wykonano badań obciążeniowych silnika o mocy $P=1100\text{ kW}$. Badania te zostaną wykonane na stanowisku pracy w stacji głównego przewietrzania kopalni węgla kamiennego.

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, p. 4066 - 4072
- [2] Bao Y., Liu L., Zhang Y., Feng, X., *Performance investigation and comparison of line start-up permanent magnet synchronous motor with super premium efficiency*, International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011, 1–6
- [3] De Almeida A.T., Ferreira F. J. T. E., FONG J. A. C., *Standards for Efficiency of Electric Motors*. IEEE Industry Applications Magazine, Vol. 17, no 1. 2011, 12–19
- [4] Qu Fengbo; Li Zhipeng; Cheng Shukang; Li Weili; *Calculation and simulation analysis on starting performance of the high-voltage line-start PMSM*. (ICCA SM), 2010 Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling, Volume: 3, 2010, p. V3-198 - V3-202
- [5] Libert F., Soulard J., Engstrom J., *Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor IECM 2002*. Brugge, Belgium Aug. 25-28 2002, paper no. 153
- [6] Miller T. J. E., *Synchronization of Line-Start Permanent Magnet ac Motors*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 103, No.7, 1984., 1822–1828

- [7] 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
- [8] 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. 2012, nr 32, s. 105-111
- [9] 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
- [10] Zawilak J., Zawilak T., *Silniki synchroniczne średniej mocy wzbudzone magnesami trwałymi*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2013, nr 100, s. 5-8

NOWOŚCI WYDAWNICZE - Z GÓRNICZEJ PÓŁKI

Tadeusz Mikoś, Janusz Chmura, Antoni Tajduś „**Górnice metody ratowania zabytkowych dzielnic staromiejskich**”, AGH Kraków 2013 r.

Publikacja jest wynikiem wieloletnich doświadczeń pracowników ze środowiska górniczego Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Zakres tematyczny obejmuje problemy ratowania dzielnic staromiejskich w naszym kraju.

Podczas II wojny światowej i po wyzwoleniu zanotowano wiele poważnych katastrof budowlanych w Jarosławiu, Opatowie, Lublinie, Sandomierzu i Kłodzku, które swym zasięgiem zaczęły obejmować poszczególne budowle, a nawet zabytkowe dzielnice. Konieczność ich ratowania stała się wielkim wyzwaniem dla nauki i techniki. Zaprezentowane w publikacji kompleksowe metody ratowania zespołów staromiejskich mogą być z powodzeniem stosowane w zabezpieczaniu innych zabytkowych miast w kraju i za granicą.

