

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania magnesów trwałych w silnikach średniej mocy 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 i napięciu znamionowym $U=500$ V. Charakteryzuje się on lepszymi parametrami eksploatacyjnymi tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz mniejszym prądem pobieranym z sieci w porównaniu z silnikiem indukcyjnym.

Abstract. This paper presents the results of application permanent magnets in medium power AC motors. The main advantages of these motors are robust construction and direct on line start ability. Due to similar size they may replace classical induction motor. The full load characteristics of LSPMSM ($P_n=110$ kW, $U_n=500$ V) are shown. They prove that this motor is characterized by higher power factor, higher efficiency and lower input current comparing to induction motor. **High efficiency permanent magnet synchronous motor.**

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, magnesy trwałe, sprawność, współczynnik mocy, badania.

Keywords: Electric machines, synchronous motors, permanent magnets, efficiency, power factor, tests

doi:10.12915/pe.2014.01.56

Wstęp

Dzięki prostej budowie i niezawodnej pracy silniki indukcyjne mają powszechne zastosowania w przemysłowych napędach elektrycznych. Ich zasada działania wymaga dostarczenia energii bierniej 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 CO₂. 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 wzbudanych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Silniki te mają być dostosowane jako zamiennie z powszechnie stosowanymi silnikami indukcyjnymi o rozruchu bezpośrednim.

Silniki synchroniczne wzbudane 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 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 wzbudanych magnesami trwałymi

• Budowa stojana

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.

• Budowa wirnika

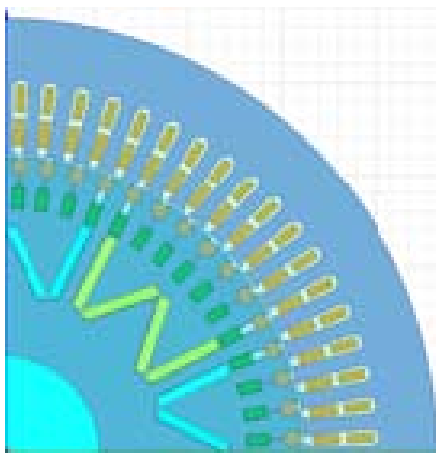
Różnica w budowie wirnika wynika z konieczności umieszczenia magnesów trwałych. Ponieważ przyjęto, że silniki tego typu mają być uruchamiane przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej, to ich rozruch odbywa się przez wytworzenie momentu asynchronicznego. Moment ten wytworzony jest przez uzwojenie kłatkowe ułożone w wirniku podobnie jak w silniku indukcyjnym. Dobór uzwojenia kłatkowego umożliwiający kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych (liczba i wymiary prętów uzwojenia) jest przedmiotem wielu prac m.in. [7, 8, 12].

W czasie rozruchu magnesy trwałe wytwarzają moment hamujący zmniejszający wypadkowy moment rozruchowy, szczególnie w dolnym zakresie prędkości obrotowych. Dlatego uzwojenie kłatkowe 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 dwukłatkowego. 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, najbliższej odzwierciedlający rozpatrywane zjawiska. Widok geometrii modelu symulacyjnego silnika przedstawiono na rysunku 1.

Ze względu na występowanie zjawiska rozproszenia strumienia magnesów nie jest wskazane stosowanie we wszystkich żłobkach jednakowego przesmyku pomiędzy żłobkami uzwojenia kłatkowego. Analitycznie zbadano wpływ szerokości przesmyku pomiędzy prętami na krańcach biegunów magnesów na wartość napięcia

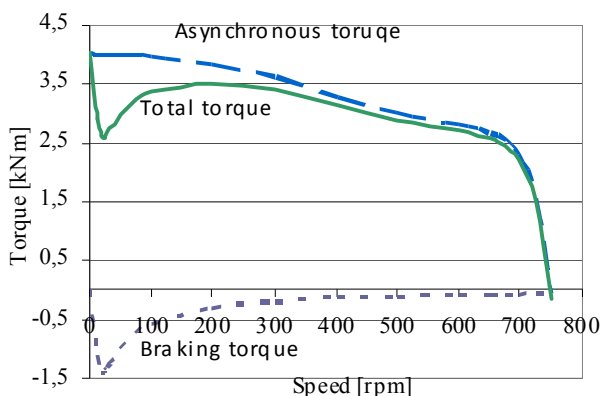
indukowanego w stanie bezprądowym. Z obliczeń wynika, że strumień rozproszenia magnesów zamykający się przez przesmyk pomiędzy prętami klatek zmienia się od około 10 % przy szerokości przesmyku 1 mm do około 1 % przy przesmyku 8 mm. Optymalną wartość szerokości przesmyku wybrano ze względu na indukowane napięcie w uzwojeniu stojana.



Rys.1. Geometria części polowej rozpatrywanego modelu silnika”

W silnikach dwukłatkowych wykonanych w technologii spawanej odpowiednie właściwości momentów można uzyskiwać doбором materiałów uzwojenia kłatkowego. Wykonano obliczenia przy założeniu, że pręty klatki górnej są wykonane z mosiądzu natomiast materiałem klatki dolnej była miedź [12].

Wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy silnika wykonano obliczenia wypadkowego momentu rozruchowego silnika z magnesami trwałymi a wyniki obliczeń pokazano na rysunku 2.



Rys.2. Wypadkowy moment asynchroniczny oraz jego składowe momenty silnika z magnesami trwałymi

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.

Badania modelu fizycznego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Do budowy modelu fizycznego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi wykorzystano stojan oraz konstrukcję mechaniczną fabrycznego silnika indukcyjnego. Wirnik tego modelu wykonano wg opisanych zasad i pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Widok wirnika z magnesami trwałymi

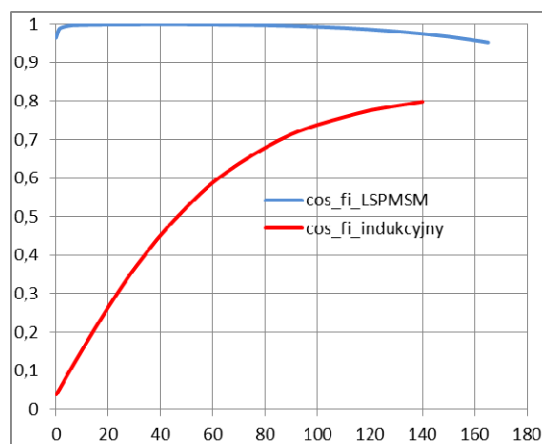
Model silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy znamionowej $P=110$ kW napięciu znamionowym $U=500$ V przebadano w laboratorium przemysłowym. Silnik ten poddano próbie nagrzewania przy obciążeniu bezpośrednim a wyniki zestawiono w tabeli 1.

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.

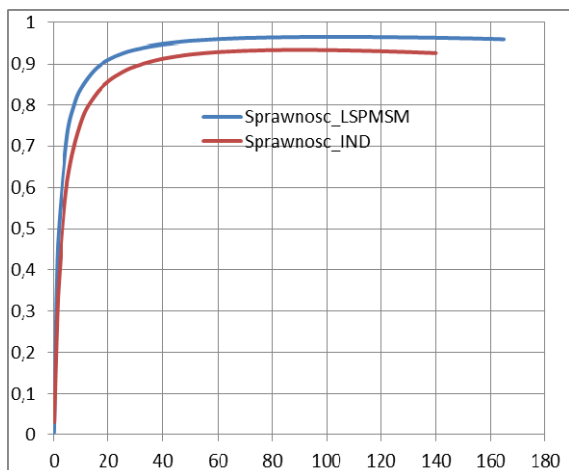
Tabela 1 Wyniki pomiarów badanego silnika podczas obciążenia bezpośredniego mocą znamionową

Lp	U	I_1	P_1	$\cos\phi$	n	T	P_2	η
	V	A	kW	--	obr/min	kNm	kW	%
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

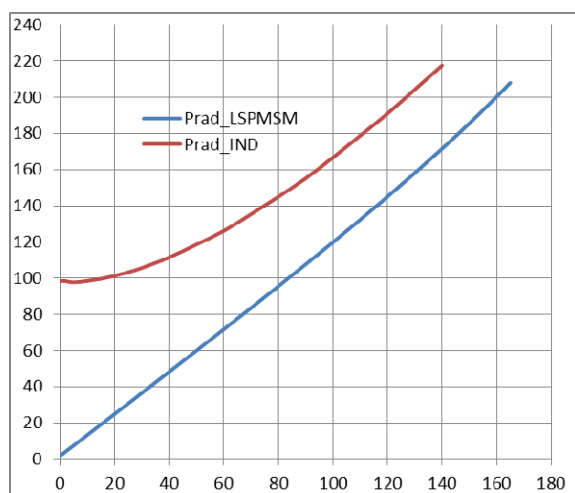
Na rysunkach 4, 5, 6 pokazano charakterystyki eksploatacyjne badanego silnika zmierzone w pełnym zakresie zmian obciążenia bezpośredniego i porównano je z silnikiem indukcyjnym.



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



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



Rys.6. Wykresy prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi

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 (współczynnik mocy jest większy: z 0,75 do 0,93),
- współczynnik mocy jest praktycznie stały w całym zakresie zmian obciążenia,
- w silniku synchronicznym większy jest współczynnik sprawności (z 0,935 do 0,982),
- sprawność jest praktycznie stała w całym zakresie zmian obciążenia,

- mniejszy jest prąd znamionowy pobierany z sieci (z 181 do 139 A) przy takiej samej mocy oddawanej.

Zdobyte doświadczenia z silnikami o średniej mocy ($P=75, 110$ oraz 160 kW) upoważniły do podjęcia prac nad budową silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy tj. większej niż $1\ 000$ kW. Wyniki tych prac zostaną opublikowane w najbliższym czasie.

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] Feng, X.; Liu, L.; Kang, J.; Zhang, Y., Super premium efficient line start-up permanent magnet synchronous motor. 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), Rome, Italy, 6-8 September 2010, p. 1 – 6
- [5] Qu Fengbo; Li Zhipeng; Cheng Shukang; Li Weili, Calculation and simulation analysis on starting performance of the high-voltage line-start PMSM. (ICCASM), 2010 Intern. Conf. on Computer Application and System Modeling, Volume: 3, 2010, p. V3-198 - V3-202
- [6] Knight A. M., McClay I. C., The design of high efficiency line start motors. IEEE Transactions on Ind. Applications. Vol. 36, No. 6, 2000, 1555-1562.
- [7] Libert F., Soulard J., Engstrom J., Design of a 4-pole line start permanent magnet synchronous motor ICES 2002. Brugge, Belgium Aug. 25-28 2002, paper no. 153.
- [8] 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
- [9] Rahman M. A., Osheiba A. M., Radwan T. S., Synchronization process of line-start permanent magnet synchronous motor. Electric Power Components and Systems, Vol. 25: 6, 577–592
- [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., 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
- [12] 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

Autorzy: dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr., dr inż. Tomasz Zawilak Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, E-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl; tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl.