

Energooszczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania magnesów trwałych w silnikach bardzo dużej 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 mocy $P=1100$ i 1600 kW i napięciu znamionowym $U=6000$ V. Charakteryzują się one lepszymi parametrami eksploatacyjnymi tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz mniejszym prądem pobieranym z sieci w porównaniu z silnikami indukcyjnymi.

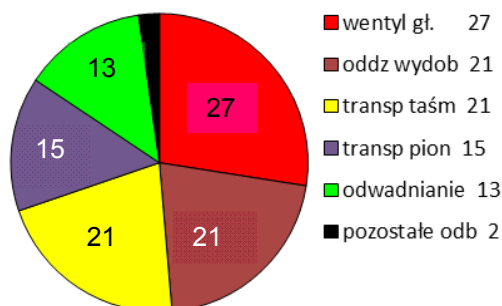
Abstract. This paper presents the results of application permanent magnets in very high power AC motors. The main advantages of these motors are robust construction and direct on line start ability. Due to similar size they may replace classical induction motor. The full load characteristics of LSPMSM ($P_n=1100$ and 1600 kW, $U_n=6000$ V) are shown. They prove that this motors are characterized by higher power factor, higher efficiency and lower input current comparing to induction motors. **The results of application permanent magnets in very high power AC motors**

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni

Keywords: synchronous motor, permanent magnet, direct on line starting

Wstęp

Zakłady wydobywcze są bardzo dużymi odbiorcami energii elektrycznej. Duże zużycie energii przez kopalnie węgla i miedzi powoduje wzrost kosztów wydobycia oraz uszczuplenia zasobów mocy w systemie elektroenergetycznym. W każdej kopalni podziemnej, oprócz podstawowych maszyn i urządzeń takich jak maszyny wydobywcze, transportowe zainstalowanych jest wiele pomp i wentylatorów. Napędy wentylatorów i pomp głównych pobierają rocznie w jednej kopalni ok. 115 200 MWh co stanowi ok. 48 % energii zakładu. Są to urządzenia w pełnym zakresie mocy (od kilkunastu kilowatów do megawatów) pracujące w systemie ciągłym. Na rysunku 1 pokazano strukturę zużycia energii elektrycznej w jednej z kopalń podziemnych.



Rys. 1. Struktura zużycia energii elektrycznej w kopalni podziemnej

Obecnie zastosowane są napędy z silnikami elektrycznymi o niezadowalającej sprawności. Najczęściej są to silniki indukcyjne. Dlatego nawet niewielka poprawa sprawności napędu sumarycznie pozwoli na duże oszczędności energii.

Dlatego wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniami nowych, energooszczędnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych [1, 2, 3, 4, 5].

Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych do napędów kopalnianych zdeteterminowane jest postawionym celem, a mianowicie uzyskaniem napędów energooszczędnych i niezawodnych [12]. 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 trybu pracy napędów np. wentylatorów i pomp czyli umożliwiać skokową lub ciągłą regulację prędkości obrotowej pozwalającą na racjonalizację zużycia energii [8, 9, 10]. Niezawodność silników powinna być nie mniejsza i eksploatacja nie gorsza niż silników indukcyjnych co oznacza możliwie najprostszą konstrukcję poszukiwanych nowych struktur maszyn. Silniki wzbudzone magnesami mają taką konstrukcję, że mogą być uruchamiane przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej – podobnie jak silniki indukcyjne.

Celem pracy jest pokazanie możliwości zbudowania energooszczędnych silników synchronicznych wzbudzonych magnesami trwałymi o bardzo dużej mocy znamionowej.

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi do napędu wentylatora dużej mocy

Prezentowany prototypowy silnik LSPMSM powstał na potrzeby napędzania zmodernizowanego wentylatora głównego przewietrzenia w KWK Sośnica-Makoszowy. W projekcie modernizacji określono, że silnik napędowy powinien mieć moc znamionową 1100 kW przy prędkości 500 obr/min. Klasyczne maszyny trójfazowe (indukcyjne i synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym) w tym zakresie mocy i prędkości obrotowej wykonywane są z promieniowymi kanałami wentylacyjnymi. Wykonanie w obudowie zamkniętej wymaga wówczas zastosowania podwójnego obiegu czynnika chłodzącego (wewnętrznego i zewnętrznego), co komplikuje konstrukcję oraz zmniejsza sprawność maszyny. Zastosowanie magnesów trwałych oraz w konsekwencji zmniejszenie strat (głównie w wirniku) pozwala na wykonanie silnika z chłodzeniem powietrznym powierzchniowym IC 411 (TEFC) lub IC 416 (TEFV) w większych (w porównaniu do klasycznych maszyn) gabarytach.

Na rysunku 2 pokazano fotografię silnika prototypowego podczas montażu, a na rysunku 3 zamontowany silnik na stanowisku pracy, sprzęgnięty z wentylatorem głównego przewietrzenia.

Na rysunku 4 pokazano obliczone charakterystyki momentów (asynchronicznego oraz od magnesów trwałych) podczas rozruchu badanego silnika. Z przebiegu

charakterystyki momentu wypadkowego wynika, że osiągany moment rozruchowy jest wystarczająco duży, nawet po uwzględnieniu możliwych spadków napięcia (nawet 20 %).

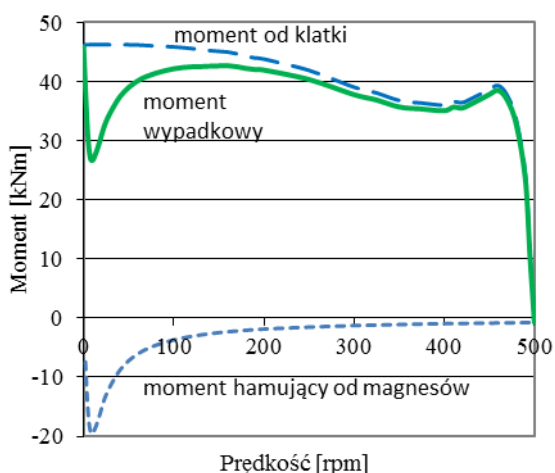


Rys. 2. Wirnik prototypowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi podczas montażu



Rys. 3. Prototypowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi zamontowany na stanowisku pracy

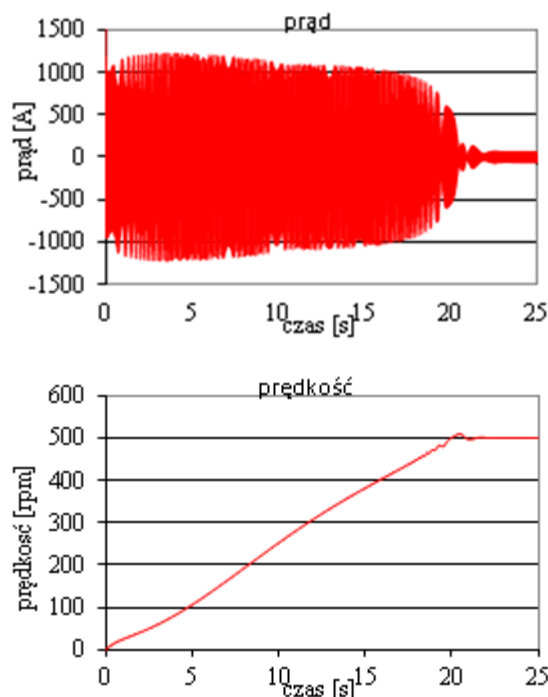
Na rysunku 4 pokazano wykresy prądu stojana i prędkości obrotowej podczas rozruchu badanego silnika.



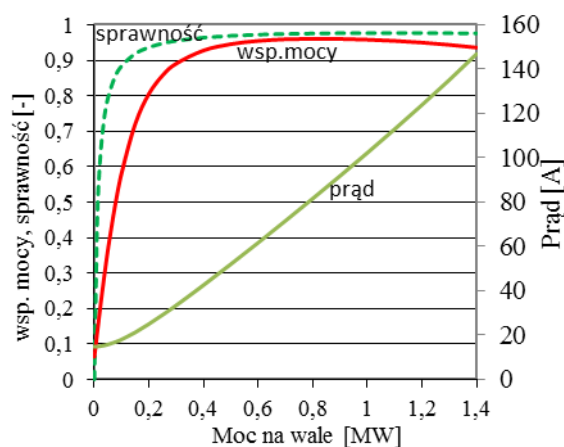
Rys. 4. Wykresy momentów w funkcji prędkości obrotowej silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Korelacja liczby żłobków wirnika i stojana ma istotny wpływ na wartość momentu zaczepowego. W badanym silniku maksymalny moment zaczepowy ma bardzo małą wartość tj. ok 1 %, momentu znamionowego.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że czas rozruchu wynosi ok. 20 s, co jest typową wartością dla napędów z wentylatorem tej mocy. Głównym czynnikiem determinującym czas rozruchu jest moment bezwładności wirnika wentylatora, prawie 20 krotnie większy od momentu bezwładności wirnika silnika. Szacunkowy przyrost temperatury klatki rozruchowej podczas pełnego rozruchu wynosi około 200 °C. Ciepło wydzielone w wirniku jest istotne ze względu na możliwość odmagnesowania magnesów trwałych. Znając całkowitą masę masy bieguna można oszacować przyrost temperatury żelaza w pobliżu magnesów po przepłynięciu ciepła z klatki do pakietu. Dla tego przypadku przyrost ten wynosi około 35 °C. Na tej podstawie określono, że maksymalna ilość rozruchów ze stanu zimnego wynosi 3, natomiast silnika nagrzanego 1 rozruch. Zwiększenie liczby rozruchów o 1 więcej wymaga zastosowania magnesów o lepszej klasie termicznej tj. UH, zamiast SH.



Rys. 5. Przebieg prądu stojana oraz prędkości obrotowej podczas rozruchu badanego silnika



Rys.6. Charakterystyki elektromechaniczne badanego silnika (prąd stojana, sprawność, współczynnik mocy)

Należy zwrócić uwagę na początkowy udar momentu oraz jego dużą składową przemienną w czasie rozruchu.

Wymaga to szczególnej uwagi przy dobieraniu elementów przenoszących moment (wpusty, sprzęgła).

Na rysunku 6 pokazano charakterystyki elektromechaniczne badanego silnika.

W tabeli 1 zestawiono najważniejsze parametry badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi napędzającego wentylator.

Tabela 1. Parametry znamionowe badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi napędzającego wentylator

moc znamionowa	kW	1100
prędkość obrotowa	obr/min	500
moment	kN m	21,0
napięcie	V	6000
prąd	A	113
współczynnik mocy	--	0,955
sprawność	%	97,7
ustalony przyrost temp. uzwojenia	°C	80
prąd rozruchowy	I_r/I_n	7,0
początkowy moment rozruchowy	M_r/M_n	2,3
minimalny moment rozruchowy	M_{min}/M_n	1,3



Rys. 7. Prototypowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi napędzający pompę

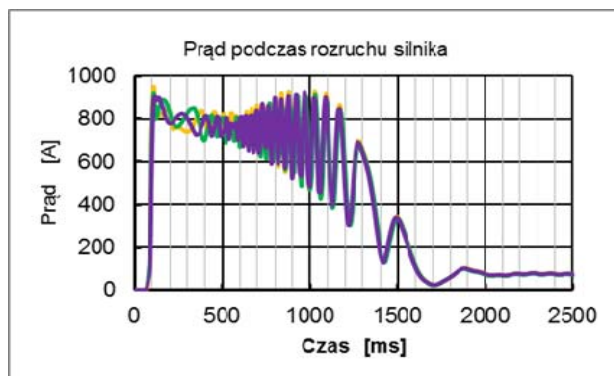
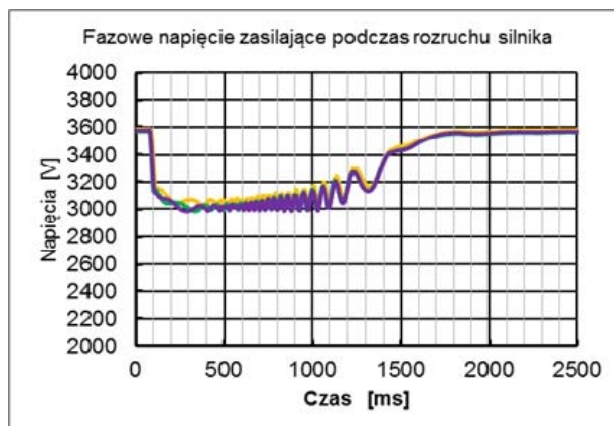
Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi do napędu pompy dużej mocy

Przedstawiono model prototypowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim zbudowanego do napędu zmodernizowanej pompy głównego odwodnienia kopalni. W

projekcie określono, że silnik ten ma moc znamionową 1600 kW przy prędkości obrotowej 1500 obr/min [11].

Na rysunku 7 pokazano fotografie badanego silnika podczas montażu oraz zainstalowanego na stanowisku roboczym (sprzęgnięty z pompą).

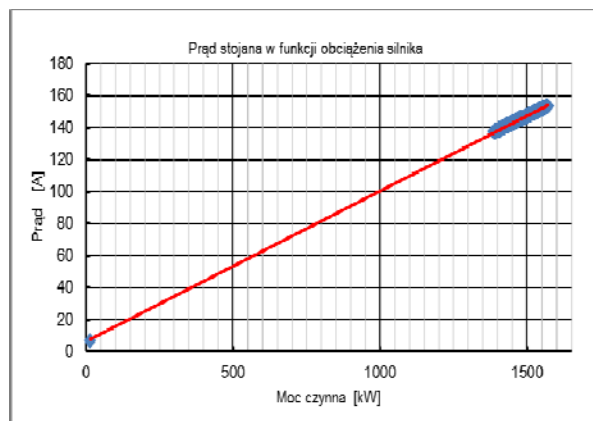
Na rysunku 8 pokazano zmierzone przebiegi napięcia zasilającego oraz prądu pobieranego przez silnik z pompą w czasie rozruchu.



Rys. 8. Przebieg napięcia i prądu stojana podczas rozruchu badanego silnika

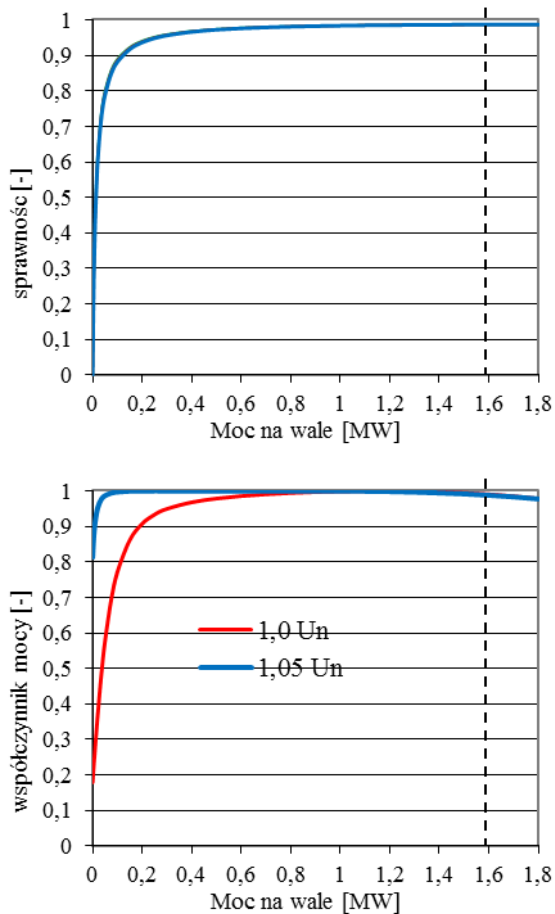
Należy zwrócić uwagę na fakt, że mimo spadku napięcia w sieci zasilającej o ok. 18 %, ze względu na czas rozruchu układu napędowego ok. 18 sek., inne układy napędowe zasilone z tej samej sekcji nie reagują na tą zmianę napięcia.

Na rysunku 9 pokazano wykres prądu pobieranego przez silnik z pompą w funkcji obciążenia



Rys. 9. Przebieg prądu stojana w funkcji obciążenia badanego silnika

Na rysunku 10 pokazano wykresy sprawności i współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika synchronicznego z magnesami trwałymi obciążonego pompą głównego odwodnienia kopalni.



Rys. 10. Wykresy sprawności i współczynnika mocy w funkcji obciążenia badanego silnika

W tabeli 2 zestawiono najważniejsze parametry znamionowe badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi napędzającego pompę.

Tabela 2. Parametry znamionowe badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi napędzającego pompę

moc znamionowa	kW	1600
prędkość obrotowa	obr/min	1500
moment znamionowy	kN·m	10,2
napięcie znamionowe	V	6000
prąd znamionowy	A	158
współczynnik mocy	---	0,99
sprawność	%	98,7
ustalony przyrost temperatury uzwojenia stojana	°C	70
prąd rozruchowy	I_r/I_n	6,5
początkowy moment rozruchowy	M_r/M_n	2,6
minimalny moment rozruchowy	M_{min}/M_n	1,7

Wnioski

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie energooszczędnych silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim

(asynchronicznym) do napędów bardzo dużych mocy i bardzo dużym momencie bezwładności.

Ponieważ moc bierna skompensowana jest przez wzbudzenie magnesami trwałymi to współczynnik mocy silnika jest stały w bardzo dużym zakresie zmian obciążenia co czyni ten silnik znacznie lepszym od silnika indukcyjnego.

Ponieważ projekty takich silników wykonuje się na indywidualne zamówienie to mogą być dostosowane do określonych warunków pracy tj. zaprojektowane energooszczędnie o skompensowanej mocy biernej ($\cos\varphi \approx 1$) i maksymalnej sprawności.

Prototypy badanych silników wykonano w Dąbrowskiej Fabryce Maszyn Elektrycznych DAMEL.

LITERATURA

- [1] de Almeida A.T., Ferreira F.J.T.E., Quintino Duarte A., Technical and Economical Considerations on Super High-Efficiency Three-Phase Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, no 2, 2014, pp. 1274-1285
- [2] Lu Q., Huang X., Ye Y., Fang Y.: Experiment and analysis of high power line-start PM motor, *Przegląd Elektrotechniczny* 2/2012
- [3] Bao Y., Mehmood W., Feng X., Super premium efficiency linestart permanent magnet synchronous motor: design, test and comparison, *Petroleum and Chemical Industry Technical Conference(PCIC)*, 2012.
- [4] Debruyne C., Sergeant P., Derammelaere S., Desmet J., Lieven Vandeveld L.: Influence of Supply Voltage Distortion on the Energy Efficiency of Line Start Permanent Magnet. *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 50, no. 2, march/april 2014
- [5] Feng X., Liu L., Kang J., Zhang Y.: Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor, *XIX International Conference on Electrical Machines, ICM 2010*, Roma, Italy
- [6] Ugale R.T., BalaKrishna Y., Chaudhari B. N.: Effects of Short Power Interruptions and Voltage Sags on the Performance of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. *4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008. PEMD 2008 (str. 184-188)
- [7] Zawilak T.: Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2/2013, s. 177–179.
- [8] Zawilak T., Zawilak J.: Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim., *Górnictwo Odkrywkowe*. 2014, R. 55, nr 1, s. 29-33
- [9] Zawilak T., Zawilak J.: Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności., *Przegląd Elektrotechniczny*. 2014, R. 90, nr 1, s. 224-226
- [10] Zawilak T., Zawilak J.: *Patent. Polska, nr 218489*. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi : H02K 1/27. Zgłosz. pat. nr P 394666 z dn. 26.04.2011
- [11] Zawilak T.: Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie pompy dużej mocy., *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*. 2015, nr 106, s. 247-251
- [12] Zawilak T., Zawilak J.: Wpływ warunków zasilania na parametry eksploatacyjne silnika z magnesami trwałymi., *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe*. 2015, nr 108, s. 185-190

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jan Zawilak, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych E-mail: jan.zawilak@pwr.edu.pl; dr. inż. Tomasz Zawilak, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław, E-mail: tomasz.zawilak@pwr.edu.pl.