

Tomasz Zawilak
 Politechnika Wroclawska, Wroclaw

SILNIK SYNCHRONICZNY WZBUDZANY MAGNESAMI TRWAŁYMI W NAPĘDZIE POMPY DUŻEJ MOCY

LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR IN LARGE PUMP DRIVE APPLICATION

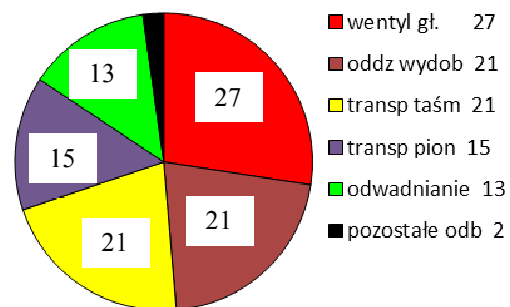
Streszczenie: W pracy przedstawiono możliwości budowy oraz parametry eksploatacyjne silnika synchronicznego LSPMSM napędzającego pompę dużej mocy. Silnik ten ma bardzo wysoką sprawność (spełniającą wymagania IE5 normy IEC 60034-30-1) oraz nie pobiera mocy biernej z sieci zasilającej ($\cos\phi\approx 0,99$). Parametry te są stałe w bardzo dużym zakresie zmian obciążenia.

Abstract: This paper presents the properties of a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor in large pump drive application. Designed and manufactured motor has very high efficiency exceeding IE5 level, according to IEC 60034-30-1. High efficiency and high power factor are almost constant in wide range of output power.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni
Keywords: electrical machines, synchronous motor, permanent magnet, direct on line starting

1. Wstęp

Nieustająca tendencja do poszukiwania oszczędności energii oraz energooszczędnych rozwiązań technicznych przejawia się także w dziedzinie maszyn elektrycznych. Według najnowszej normy IEC 60034-30-1 uzyskanie sprawności odpowiadającej klasie IE5 będzie nieosiągalne dla klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn indukcyjnych. Alternatywą stają się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi. Ze względu na zamienność z silnikami indukcyjnymi istotne są konstrukcje z możliwością uruchamiania przez bezpośrednie przyłączenie do sieci zasilającej (z ang. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor). Przez wiele lat konstrukcje tego typu ograniczone były do mocy kilkunastu kilowatów. Coraz lepsze rozpoznanie zjawisk zachodzących w tego typu maszynach (szczególnie rozruchu i synchronizacji), umożliwiło zaprojektowanie i wykonanie modeli fizycznych o mocach kilkuset kilowatów [7], a następnie megawatowych [2, 3,4,5]. Na rysunku 1 pokazano strukturę zużycia energii elektrycznej przez poszczególne procesy wydobywania w kopalni podziemnej. Zagadnienie oszczędności energii elektrycznej szczególnie istotne jest w procesach wentylacji i odwodnienia głównego, które zużywają ok. 40 % zapotrzebowania energetycznego kopalni. Są to napędy elektryczne bardzo dużej mocy pracujące w systemie ruchu ciągłego (rys. 2, 3).



Rys. 1. Struktura zużycia energii elektrycznej w kopalni podziemnej



Rys. 2. Widok pompy głównego odwodnienia kopalni

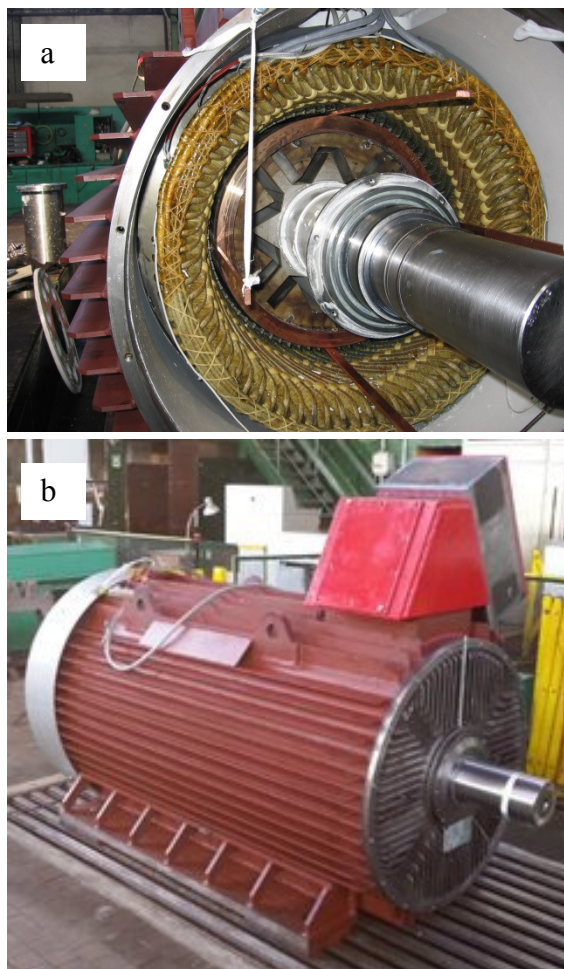


Rys. 3. Widok wentylatora głównego przewietrzania kopalni

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie możliwości budowy, właściwości i parametrów energetycznych silnika synchronicznego dużej mocy typu LSPMSM, współpracującego z pompą głównego odwodnienia kopalni.

2. Badany obiekt

Przedstawiany model prototypowego silnika LSPMSM powstał na potrzeby napędzania zmodernizowanej pompy głównego odwodnienia kopalni. W projekcie określono, że silnik napędowy powinien mieć moc znamionową 1600 kW przy prędkości obrotowej 1500 obr/min. Klasyczne maszyny trójfazowe (indukcyjne i synchroniczne ze wzbudzeniem elektromagnetycznym) w tym zakresie mocy i prędkości obrotowej wykonywane są często z promieniowymi kanałami wentylacyjnymi. Wykonanie w obudowie zamkniętej wymaga wówczas zastosowania podwójnego obiegu czynnika chłodzącego (wewnętrzny i zewnętrzny), co komplikuje konstrukcję oraz zmniejsza sprawność maszyny. Zastosowanie magnesów trwałych oraz w konsekwencji ograniczenie strat (głównie w wirniku) pozwala na wykonanie silnika z chłodzeniem powietrzem powierzchniowym IC 411 (TEFC) lub IC 416 (TEFV) w większych (w porównaniu do klasycznych maszyn) gabarytach. Przy współpracy Politechniki Wrocławskiej oraz DFME Damel zaprojektowano, a następnie wykonano prototypowy model silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (SI 560X-4Apm rys. 4).



Rys. 4. Model prototypu silnika LSPMSM (SI 560X-4Apm): (a) podczas montażu, (b) na stacji prób

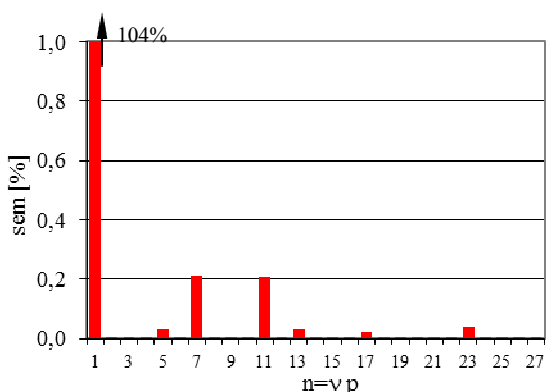
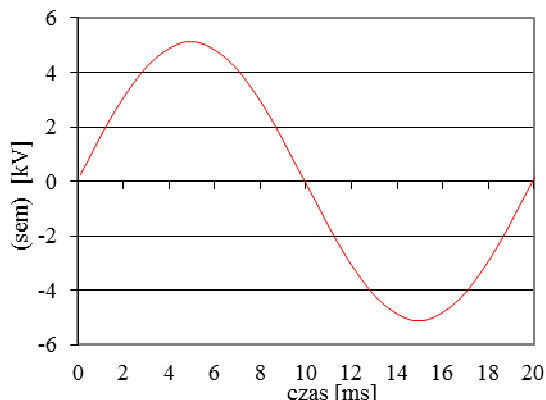
3. Analiza właściwości badanego modelu silnika

Specyfika maszyn typu LSPMSM powoduje, że do chwili obecnej nie opracowano jednoznacznych wytycznych pozwalających na określenie ich parametrów z określoną dokładnością [1]. Z tego powodu analizę właściwości dokonano dwiema uzupełniającymi się metodami: symulacyjną oraz pomiarową.

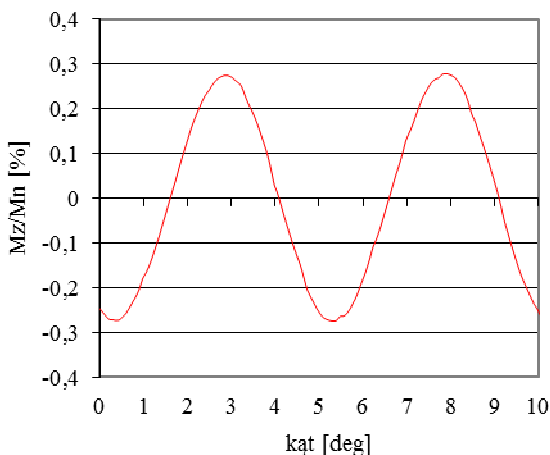
3.1. Analiza silnika w stanie bezprądowym

Na rysunku 5 pokazano przebieg napięcia indukowanego w uzwojeniu stojana prototypowego silnika LSPMSM. Z jego analizy harmonicznej wynika, że największe amplitudy z wyższych harmonicznych (rzędu 7 i 11) nie przekraczają 0,25% harmonicznej podstawowej, co należy uznać za bardzo dobry wynik, rzadko osiągany nawet w generatorach dużej mocy. Sinusoidalny kształt napięcia indukowanego uzyskano dzięki właściwemu dobraniu liczby zębów

klatki rozruchowej do liczby żłobków stojana oraz właściwemu ułożeniu magnesów.



Rys. 5. Przebieg napięcia indukowanego oraz jego analiza harmoniczna (odniesione do harmonicznej podstawowej napięcia znamionowego)

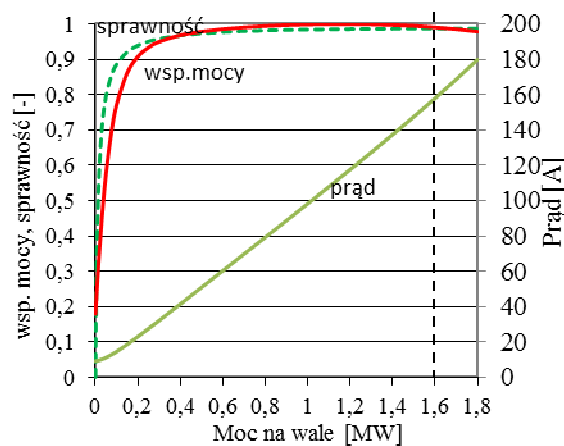


Rys. 6. Obliczony przebieg momentu zaczepowego (odniesiony do momentu znamionowego) w funkcji położenia wirnika (zakres kątowy dwóch podziałek żłobkowych stojana)

Korelacja liczby żłobków wirnika i stojana ma istotny wpływ na wartość momentu zaczepowego. Na rysunku 6. pokazano obliczony przebieg momentu zaczepowego dla dwóch podziałek żłobkowych stojana. Wartość maksymalną momentu zaczepowego na poziomie 0,3% momentu znamionowego należy uznać za bardzo małą.

3.2. Analiza parametrów silnika w stanie obciążenia

Charakterystyki obciążenia badanego silnika LSPMSM uzyskano korygując wyniki obliczeń o uzyskane pomiarowo elementy składowe strat. Wykonanie charakterystyki biegu jałowego bez włożonych magnesów trwałych pozwala na wyodrębnienie strat mechanicznych oraz strat podstawowych w żelazie. Obliczenia symulacyjne pozwoliły na wyznaczenie strat dodatkowych w żelazie oraz strat od wyższych harmonicznych w klatce rozruchowej. Wyniki obliczeń w postaci skutecznej wartości prądu twornika, współczynnika mocy oraz sprawności w funkcji obciążenia na wale przedstawiono na rysunku 7.



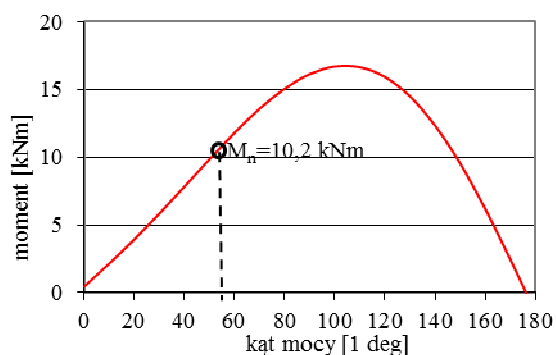
Rys. 7. Charakterystyki elektromechaniczne (prąd stojana, sprawność, współczynnik. mocy) badanego silnika LSPMSM (S1 560X-4ApM)

Parametry znamionowe silnika przedstawiono zestawione w tabeli 1.

Na rysunku 8 przedstawiono charakterystykę kątową badanego modelu silnika LSPMSM, z której wynika, że obciążenie znamionowe uzyskiwane jest przy kącie $\vartheta=55$ deg. Statyczna przeciążalność momentem wynosi 1,65.

Tabela 1. Parametry modelu silnika typu SI 560X-4Apm

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 temperat. uzwojenia	°C	70
prąd rozruchowy	I_r/I_n	6,5
początkowy moment rozruchowy	M_r/M_n	2,6
minimalny moment rozruchowy	M_{rmin}/M_n	1,7



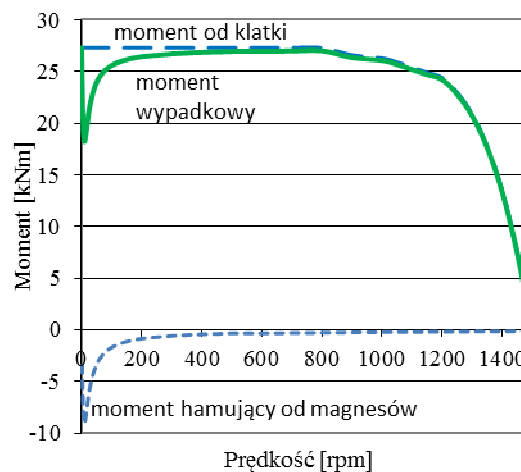
Rys. 8. Charakterystyka kątowna $M=f(\vartheta)$

3.3. Analiza parametrów rozruchowych

Właściwości rozruchowe maszyn LSPMSM są kluczowym zagadnieniem wpływającym na ich eksploatację. Moment hamujący od magnesów trwałych, występujący w dolnym zakresie prędkości obrotowych, w znacznym stopniu utrudnia proces rozruchu. Nieumiejętność odpowiedniego zaprojektowania obwodu rozruchowego w dużym stopniu, przez szereg lat, ograniczała rozwój tych maszyn w zakresie dużych mocy. Skutecznym rozwiązaniem pozwalającym na zwiększenie momentu rozruchowego przy jednoczesnym zachowaniu niewielkiego poślizgu przy synchronizacji jest zastosowanie dwóch klatek w wirniku [6].

Dzięki wykonanej pomiarowo charakterystyce zwarcia skorygowano elementy modelu istotne z punktu widzenia właściwości rozruchowych, a następnie wyznaczono statyczną charakterystykę mechaniczną (rys. 9.). Z jej przebiegu wynika, że osiągnięty moment rozruchowy jest

wystarczająco duży, nawet po uwzględnieniu możliwych spadków napięcia (nawet 20%).

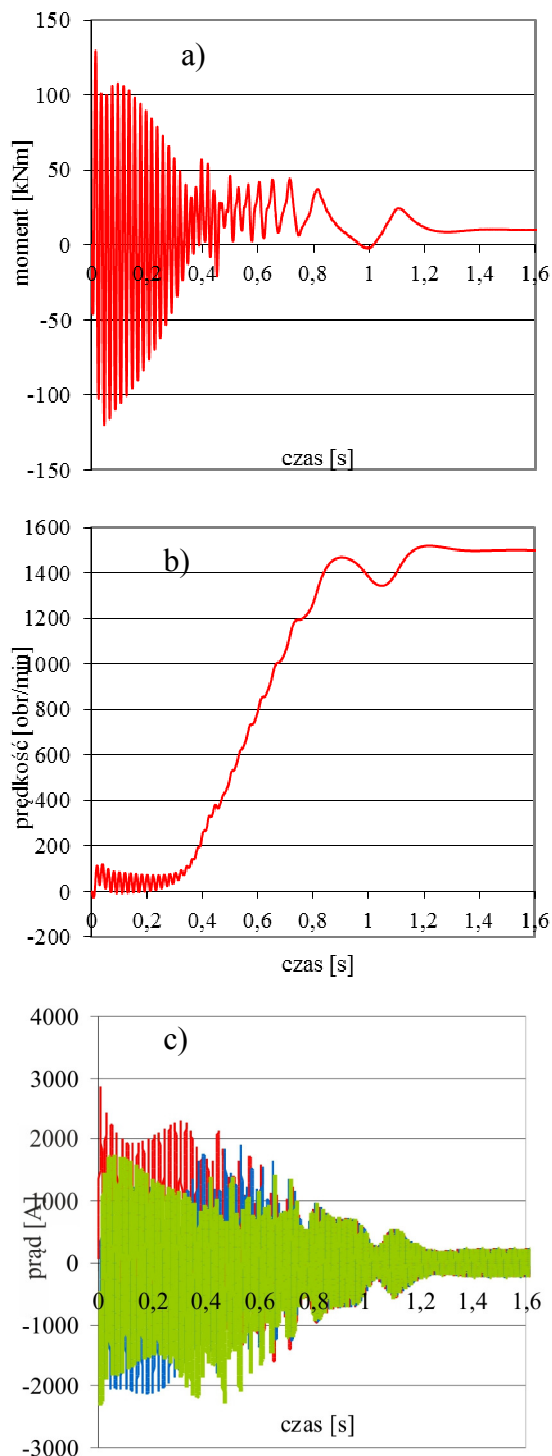


Rys. 9. Całkowity moment asynchroniczny oraz jego składowe dla badanego silnika LSPMSM

3.4. Rozruch silnika na stanowisku pracy

Przebieg podstawowych wielkości fizycznych podczas rozruchu silnika sprzęgniętego z pompą (rys. 2) przedstawiono na rysunku 10. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że czas rozruchu wynosi ok. 1,2 s. Głównym czynnikiem determinującym czas rozruchu jest moment bezwładności wirnika.

Na podstawie wykresu momentu elektromagnetycznego (rys. 10a) można stwierdzić, że początkowy uder momentu może osiągać wartość nawet 13-krotnie większą od momentu znamionowego. Takie udary są znacznie większe niż w porównywanych silnikach indukcyjnych i porównywalne z udarami występującymi przy zwarciu dwufazowym klasycznej maszyny synchronicznej. Wynika z tego konieczność szczególnej uwagi przy konstruowaniu elementów przenoszących moment (wpusty, sprzęgła). Warto także zauważyć, że podczas całego rozruchu moment ma względnie dużą składową przemienną, co dodatkowo obciąża układ przeniesienia napędu.



Rys. 10. Czasowe wykresy: momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu (c) w czasie rozruchu silnika sprzęgniętego z pompą

4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych wyników obliczeń oraz pomiarów modelu fizycznego można stwierdzić, że możliwe jest wykonanie energooszczędnego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi bardzo dużej mocy. Silnik ten charakteryzuje się dużą sprawnością (ok. 98,7 %) oraz praktycznie nie pobiera z sieci mocy biernej ($\cos\varphi \approx 0,99$). Sprawność tego silnika, a szczególnie współczynnik mocy są stałe i mają maksymalną wartość w bardzo dużym zakresie zmian obciążenia.

5. 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]. Feng X., Liu L., Kang J., Zhang Y.: *Super Premium Efficient Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor*, XIX International Conference on Electrical Machines, ICEM 2010, Roma, Italy.
- [5]. 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).
- [6]. Zawilak T.: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*, Przegląd Elektrotechniczny, 2/2013, s. 177-179.
- [7]. Zawilak T., Zawilak J.: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. Przegląd Elektrotechniczny 1/2014, R. 90, s. 224-226.

Autor

dr inż. Tomasz Zawilak
 Politechnika Wrocławska
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.
 Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
 tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl
 tel. (71) 320 33 42