

Tomasz Zawilak, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

SILNIK SYNCHRONICZNY WZBUDZANY MAGNESAMI TRWAŁYMI W NAPĘDZIE MŁYNA KULOWEGO

LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR IN BALL MILL APPLICATION

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zastosowania silników typu LSPMSM w napędzie młyna kulowego. Istotą tych silników jest ich prosta budowa i eksploatacja, a uruchomienie odbywa się przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne oraz przeanalizowano właściwości rozruchowe silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi ($P=630\text{ kW}$, $U=6000\text{ V}$, $n=187,5\text{ obr/min}$) napędzającego młyn w ZWR KGHM.

Abstract: This paper presents the results of application Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) in ball mill drive. The main advantages of these motors are robust construction and direct on line start ability. The full load characteristics and starting abilities of LSPMSM ($P_n=630\text{ kW}$, $U_n=6000\text{ V}$, $n_n=187,5\text{ rpm}$) driving a ball mill in KGHM Concentration Plant are shown.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni
Keywords: synchronous motor, permanent magnet, direct on line starting

1. Wstęp

Nieustająca tendencja do poszukiwania energooszczędnych rozwiązań przejawia się także w dziedzinie maszyn elektrycznych. Według najnowszej normy IEC 60034-30-1 uzyskanie sprawności odpowiadającej klasie IE5 będzie nieosiągalne dla klasycznych maszyn indukcyjnych. Alternatywą stają się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi, w tym te z możliwością uruchamiania poprzez bezpośrednie przyłączenie do sieci zasilającej (z ang. Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor). Przez wiele lat konstrukcje tego typu ograniczały się do mocy kilkunastu kilowatów. Coraz lepsze rozpoznanie charakterystycznych zjawisk zachodzących w tego typu maszynach (szczególnie rozruchu i synchronizacji), spowodowały występowanie pierwszych prototypów o mocach większych od 1MW [2, 3, 4, 5]. Celem artykułu jest przedstawienie właściwości napędu młyna kulowego dużej mocy z wolnoobrotowym silnikiem typu LSPMSM.

2. Badany obiekt

We współpracy Politechniki Wrocławskiej, KGHM Polska Miedź S.A. oraz DFME (wcześniej Dolmel) zaprojektowano, a następnie wykonano prototypowy silnik LSPMSM (SMH-1732T, 630kW), przewidziany do napędu młyna kulowego (rys. 1).



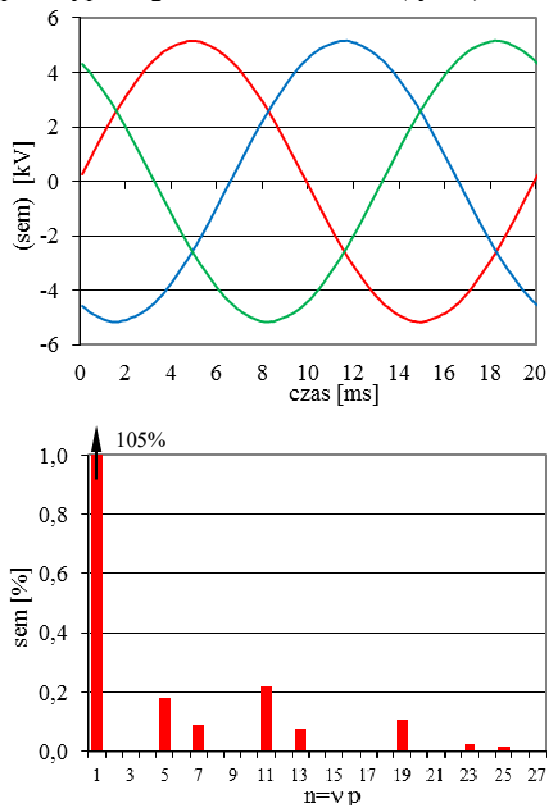
Rys. 1. Prototypowy silnik LSPMSM (SMH-1732T, 630kW) na stacji prób oraz zainstalowany na obiekcie

3. Analiza właściwości silnika

Specyfika maszyn typu LSPMSM powoduje, że do dziś nie opracowano jednoznacznych wytycznych pozwalających na określenie ich parametrów z określoną dokładnością [1]. Z tego powodu analizę właściwości dokonano dwiema uzupełniającymi się metodami: pomiarową oraz polowo-obwodowym modelem symulacyjnym. Model silnika zbudowano za pomocą oprogramowania Maxwell 2D (v.16). W symulacjach wybrano typ rozwiązania „transient”, pozwalający na modelowanie pracy maszyny przy wymuszeniu napięciowym z jednoczesnym uwzględnieniem ruchu, najbliższym odzwierciedlający rozpatrywane zjawiska.

3.1. Analiza w stanie bezprądowym

Wyznaczono przebieg napięcia indukowanego prototypowego silnika LSPMSM (rys. 3).

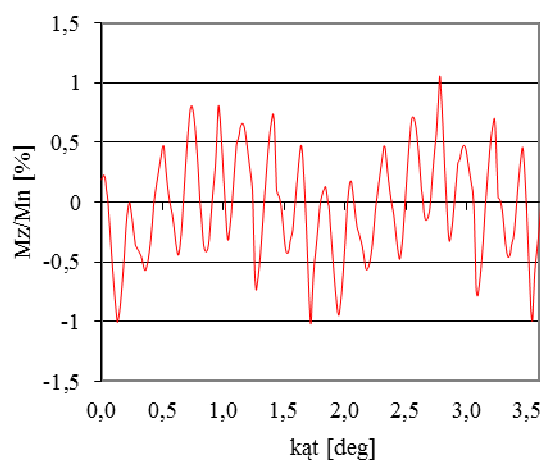


Rys. 3. Przebieg napięcia indukowanego oraz jego analiza harmoniczna (odniesione do harmonicznej podstawowej napięcia znamionowego)

Z analizy harmonicznej napięcia wynika, że największe amplitudy z wyższych harmonicznych nie przekraczają 0,25%, co należy uznać za bardzo dobry wynik, rzadko osiągnany nawet w generatorach dużej mocy. Sinusoidalny

kształt napięcia indukowanego uzyskano dzięki właściwemu dopasowaniu liczby żłobków klatki rozruchowej do liczby żłobków stojana oraz właściwemu ułożeniu magnesów.

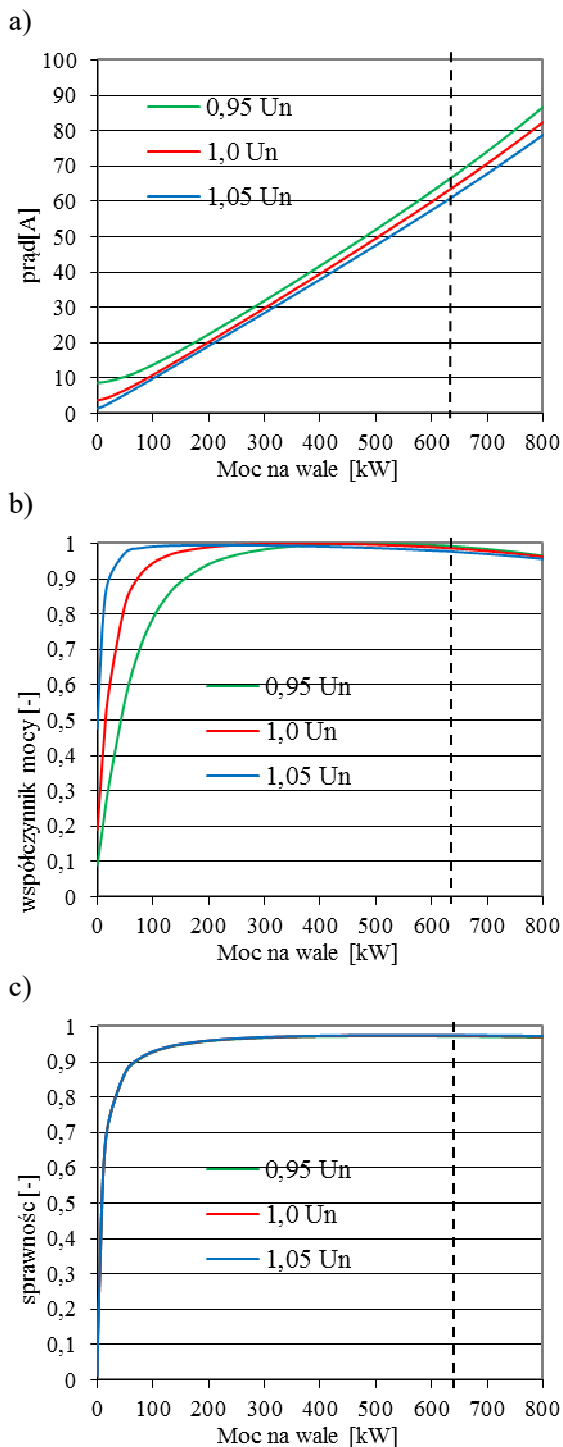
Korelacja liczby żłobków wirnika i stojana ma istotny wpływ na wartość momentu zaczepowego. Na rysunku 4 pokazano obliczony przebieg momentu zaczepowego dla dwóch podziałek żłobkowych stojana, którego maksymalna wartość wynosi ok. 1 % momentu znamionowego. Taki moment zaczepowy w tego typu maszynach uznawany jest jako bardzo mały.



Rys. 4. Obliczony przebieg momentu zaczepowego (odniesiony do momentu znamionowego) w funkcji położenia wirnika (zakres kątowy dwóch podziałek żłobkowych stojana)

3.2. Analiza parametrów 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. Symulacje polowo-obwodowe 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 pokazano na rysunku 5.



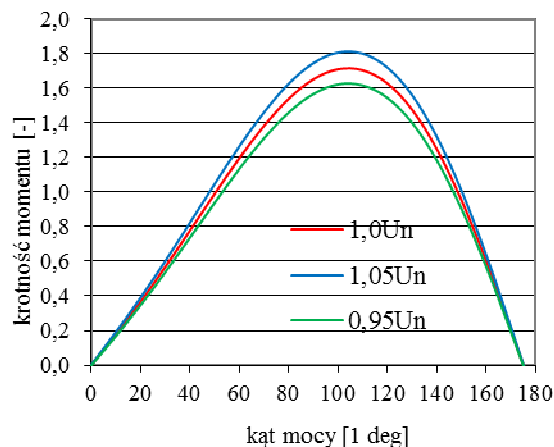
Rys. 5. Charakterystyki elektromechaniczne: prąd stojana – a), współczynnik mocy – b), sprawność – c) badanego silnika LSPMSM (SMH-1732T), dla różnych wartości napięcia zasilającego

Parametry znamionowe badanego silnika zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry silnika typu SMH-1732T

moc znamionowa	kW	630
prędkość obrotowa znamionowa	obr/min	187,5
moment znamion. M_n	kN·m	32,1
napięcie (U_n)	V	6000
prąd (I_n)	A	63
współczynnik mocy	$\cos\varphi_n$	0,99
sprawność	η_n	97,1
ustalony przyrost temp. uzwojenia	°C	70
prąd rozruchowy	I_r/I_n	7,3
początkowy moment rozruchowy	M_r/M_n	2,0
minimalny moment rozruchowy	M_{rmin}/M_n	0,95

Na rysunku 6 pokazano charakterystykę kątową badanego silnika LSPMSM, z której wynika, że obciążenie znamionowe uzyskiwane jest przy kącie 50 deg. Statyczna przeciążalność momentem wynosi 1,7.



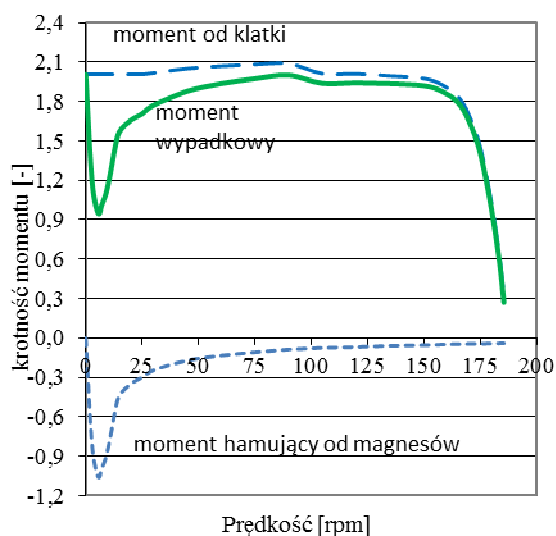
Rys. 6. Charakterystyka kątowa $M=f(v)$ (w odniesieniu do momentu znamionowego)

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. Odpowiednie zaprojektowanie obwodu rozruchowego w dużym stopniu przez szereg lat ograniczało rozwój tych ma-

szyn w zakresie dużych mocy. Skutecznym rozwiązaniem pozwalającym na zwiększenie momentu rozruchowego przy jednoczesnym zachowaniu niewielkiego poślizgu przy synchronizacji jest zastosowanie dwóch kłatek w wirniku [6].

Dzięki wykonanej pomiarowo charakterystyce zwarcia skorygowano elementy modelu istotne z punktu widzenia właściwości rozruchowych, a następnie wyznaczono statyczną charakterystykę mechaniczną (rys. 7.).

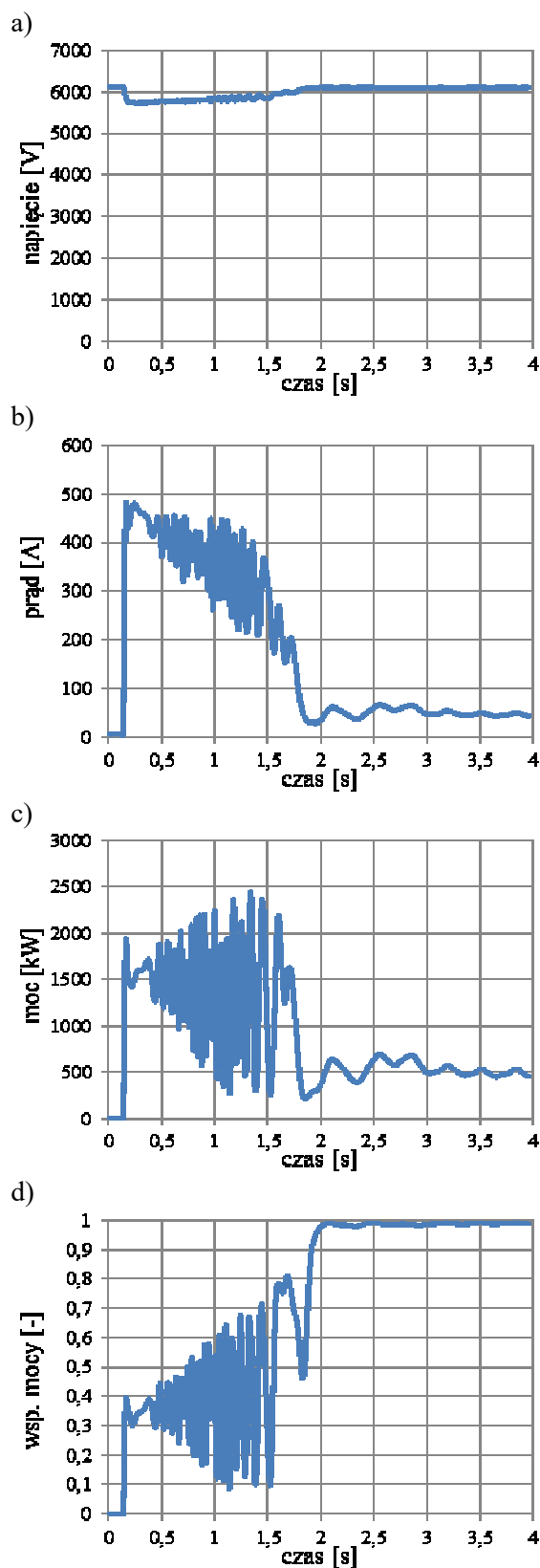


Rys. 7. Całkowity moment asynchroniczny oraz jego składowe dla badanego silnika LSPMSM (odniesione do momentu znamionowego)

3.4. Rozruch silnika na stanowisku pracy

Najważniejszym sprawdzianem dla prototypowego silnika były testy ruchowe na stanowisku pracy. Wykonano rejestrację napięcia oraz prądu podczas rozruchu silnika ze sprzęgniętym i załadowanym kulami młynem. Przebieg podstawowych wielkości fizycznych podczas rozruchu pokazano na rysunku 8.

Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że czas rozruchu wynosi ok. 2 sek. W pierwszej chwili rozruchu następuje spadek napięcia wynoszący około 7 % napięcia znamionowego. Wraz z maleniem prądu pobieranego przez silnik podczas rozruchu napięcie odbudowuje się do poziomu sprzed chwili załączenia. Moc pobierana po rozruchu stabilizuje się na poziomie ok. 500 kW, co oznacza, że nawet w pełni załadowany młyn obciąża silnik w 80% mocy znamionowej. Znacznie większa moc podczas rozruchu jest zamieniana na ciepło w klatce rozruchowej.



Rys. 8. Przebiegi napięcia zasilającego (a), prądu stojana (b), mocy czynnej (c) oraz współczynnika mocy (d), w czasie rozruchu silnika sprzęgniętego z załadowanym młynem kulowym

Szacunkowy przyrost temperatury klatki rozruchowej podczas pełnego rozruchu wynosi około 40 °C. Oznacza to, że nawet dla nagrzanego silnika można jeszcze wykonać około 4 rozruchy następujące po sobie, co ze względu na specyfikę pracy napędu młyna raczej nie wystąpi.

4. Podsumowanie

Na podstawie wykonanych obliczeń, a szczególnie po wykonaniu badań eksploatacyjnych prototypu silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi napędzającego młyn kulowy stwierdzono, że można je zastosować w napędach elektrycznych o najtrudniejszych wymaganiach technicznych związanych z momentem rozruchowym i momentem bezwładności.

Zastosowanie takich silników w miejsce silników indukcyjnych pozwala zmniejszyć straty energii w silniku przez zwiększenie sprawności oraz układzie zasilającym przez zwiększenie współczynnika mocy i zmniejszenie pobieranego prądu. Istotnie zmniejsza się koszt eksploatacji, a inwestycja może zwrócić się w krótkim czasie.

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.

Autorzy

dr inż. Tomasz Zawilak
tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl
tel. 71 320 33 42

dr hab. inż. Jan Zawilak prof. nadzw.
jan.zawilak@pwr.edu.pl
Politechnika Wrocławska
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektr.
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław