

Tomasz Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ROZRUCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH DUŻEJ MOCY PRZY CZĘŚCIOWYM ZASILANIU UZWOJENIA STOJANA

PART WINDING STARTING OF LARGE POWER SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: A concept of part-winding starting of high power synchronous motors is presented. During the start up some of the parallel branches are directly supplied from a power network whereas the residual branches are disconnected. After start up of the motor all branches are fed in parallel. Calculated with FEM transients of torque, speed and current during start up are presented.

1. Wstęp

Problem rozruchu maszyn prądu przemiennego jest szczególnie ważny dla silników dużych mocy (rzędu powyżej kilkuset kilowatów). Najprostszym sposobem rozruchu jest bezpośrednie przyłączenie do sieci. Zaletą tego typu rozruchu jest prostota oraz niski koszt inwestycyjny, wadą zaś duża wartość prądu rozruchowego powodująca spadki napięcia zależne od mocy zwarciowej sieci zasilającej. Aby odciążać sieć podczas rozruchu stosuje się metody rozruchu polegające na obniżeniu napięcia zasilającego silnik. Takie rozwiązanie powoduje jednak nieproporcjonalne zmniejszenie momentu rozruchowego w stosunku do ograniczenia prądu. Zastosowanie autotransformatora do obniżenia napięcia pozwala na uzyskanie tych samych proporcji po stronie zasilającej. Wiąże się jednak ze znacznie większym kosztem inwestycyjnym w porównaniu do zastosowania rozrusznika stojanowego.

Celem pracy jest opisanie alternatywnej metody łagodzenia rozruchu tj. zmniejszenia prądu rozruchowego, polegającej na zasilaniu części uzwojenia stojana.

2. Rozruch przez częściowe zasilanie uzwojenia stojana

Łagodzenie rozruchu przez częściowe zasilanie uzwojenia stojana znane jest już od ponad 50 lat [1]. Wydzielenia części uzwojenia zasilanego tylko podczas rozruchu można dokonać w różny sposób, jednak najbardziej naturalnym jest wykorzystanie w tym celu gałęzi równoległych. Podczas rozruchu nie zasilane gałęzie pozostają w stanie otwartym, bądź przyłącza się do nich baterię kondensatorów [2].

Wyłączenie na czas rozruchu części uzwojenia wprowadza niesymetrię, w wyniku której nie

jest możliwe uzyskanie pola wirującego kołowego. Rozkład indukcji zawiera wyższe harmoniczne o znacznych amplitudach, co skutkuje zniekształceniem charakterystyki mechanicznej [1, 3, 4]. Zagadnienie to stanowi główny cel analizy stanu pracy maszyny związanej z tego typu rozruchem. W pracy [4] przedstawiono teoretyczne podstawy występowania harmonicznych pasożytniczych w przebiegu charakterystyki mechanicznej. Analizę tego zagadnienia w ujęciu polowym dla silnika indukcyjnego czterobiegowego małej mocy przedstawiono w pracy [5], zaś dla wolnoobrotowego dużej mocy w [6]. Wolnobieżne maszyny indukcyjne, ze względu na większą możliwą ilość gałęzi równoległych, dają lepsze możliwości doboru właściwego układu zasilania. Silniki indukcyjne o dużej liczbie par biegunów są jednak rzadko stosowane z powodu niskiego współczynnika mocy. Dlatego celowe wydaje się wykonanie badań dotyczących wolnoobrotowych silników synchronicznych dużej mocy. W przypadku maszyn synchronicznych analiza zjawisk jest jednak trudniejsza. Niesymetria magnetyczna w osiach d i q uniemożliwia zastosowanie analitycznych metod obliczeniowych opracowanych dla silników indukcyjnych [3, 4]. Ponadto podczas rozruchu silnika synchronicznego uzwojenie wzbudzenia jest zwarte, a ze względu na szeregowo połączenie uzwojenia biegunów daje przepływ na całym obwodzie maszyny. Z tych powodów najodpowiedniejsze do badania tej metody rozruchu wydaje się wykorzystanie modeli polowo-obwodowych.

3. Badany silnik

Możliwości łagodzenia rozruchu przeanalizowano na przykładzie silnika synchronicznego

typu GAe 1716t, którego dane znamionowe zestawiono w tabeli 1. Silniki tego typu są wykorzystywane między innymi do napędu wentylatorów w kopalniach KGHM.

Tabela 1. Dane znamionowe silnika GAe 1716t

P_N	MW	3,15 MW
n_N	obr/min	375
M_N	kN·m	80,2
U_N	V	6 000
I_N	A	350
$\cos\varphi_N$	--	0,8 poj
M_r/M_N	--	0,8
I_r/I_N	--	8,0

Obliczenia wykonano za pomocą modelu polowo-obwodowego, którego geometrię części polowej oraz schemat elektryczny części obwodowej pokazano na rysunku 1.

Uzwojenie rozpatrywanego silnika składa się z czterech symetrycznych gałęzi równoległych wytwarzających podczas normalnej pracy sześć biegunów. Przy takiej konstrukcji uzwojenia stojana, rozruchu można dokonać w kilku wariantach. W badaniach rozpatrzono następujące przypadki różniące się liczbą gałęzi równoległych zasilanych podczas rozruchu silnika:

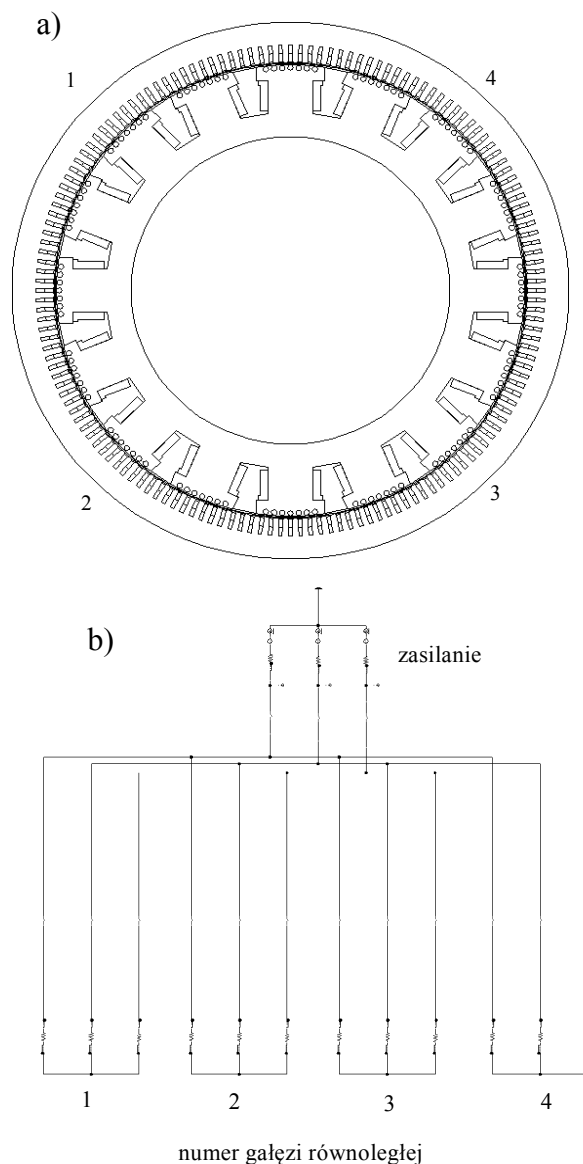
- A - załączone wszystkie gałęzie 1-4,
- B - załączone gałęzie 1, 2, 3,
- C - załączone gałęzie 1, 2,
- D - załączona gałąź 1.

Układ zasilania (C) nie jest jedynym wariantem zasilania połowy uzwojenia. W publikacji [6] rozpatrzono przypadek, gdy gałęzie równoległe leżą naprzeciwko siebie (np. gałęzie 1 i 3). Wyniki obliczeń pokazały jednak, że w tym drugim przypadku charakterystyka momentu rozruchowego silnika wykazuje siodło uniemożliwiające uruchomienie silnika, nawet bez obciążenia. Z tego powodu przypadek ten nie jest rozpatrywany dla silnika synchronicznego.

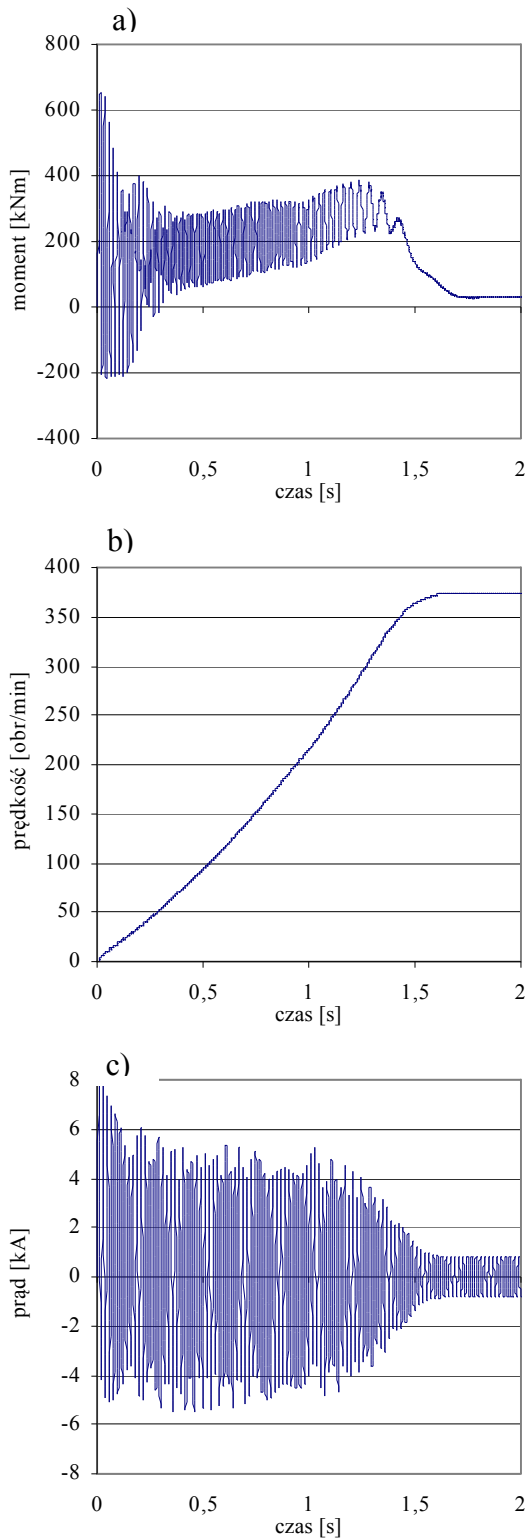
4. Wyniki badań

Wykorzystując opracowany model polowo-obwodowy przeprowadzono symulacje rozruchu silnika w stanach dynamicznych. W symulacjach założono wentylatorowy charakter obciążenia (przy zamkniętych klapach). Ze względu na czas obliczeń przyjęto 5-ciokrotnie mniejszy od rzeczywistego moment bezwładności. W badaniach skupiono się na pierwszej fazie

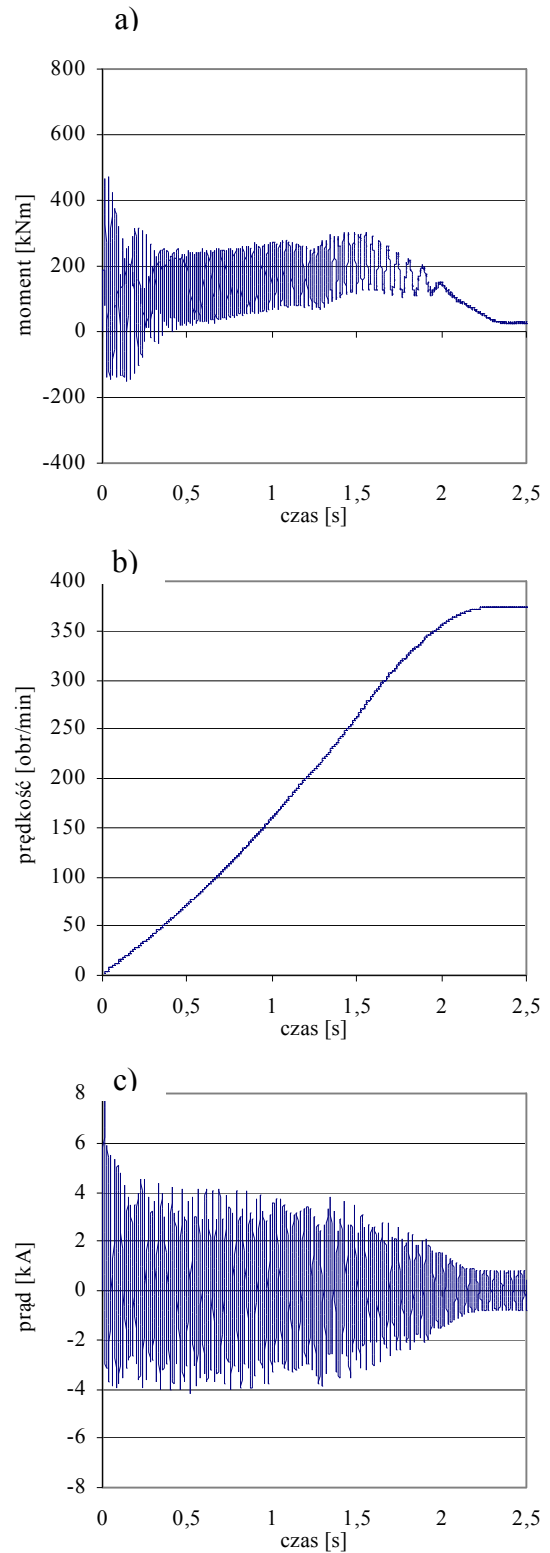
rozruchu. Symulacje nie uwzględniają przejścia na zasilanie wszystkich gałęzi (z wyjątkiem wariantu D), a także synchronizacji, która powinna już przebiegać podobnie jak w fabrycznym silniku synchronicznym. Wyniki symulacji w postaci przebiegów: momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej oraz prądu stojana w funkcji czasu rozruchu pokazano na rysunkach 2 i 5.



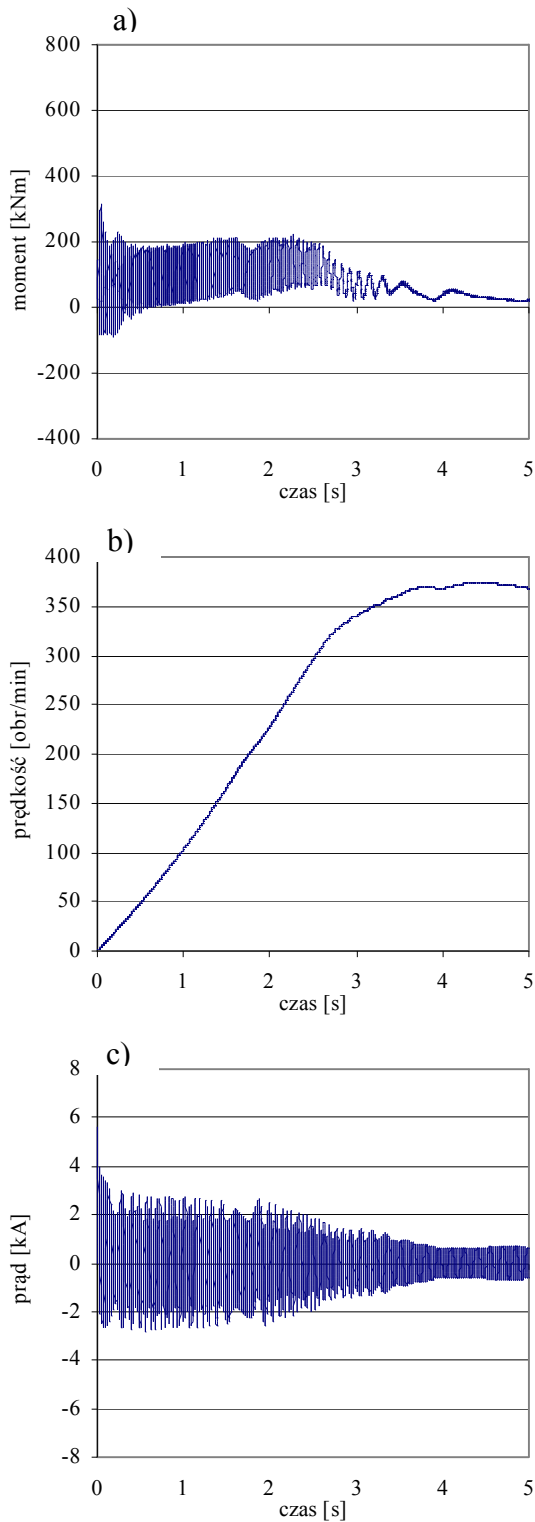
Rys. 1. Model obliczeniowy badanego silnika: a) geometria, b) schemat połączenia uzwojenia stojana



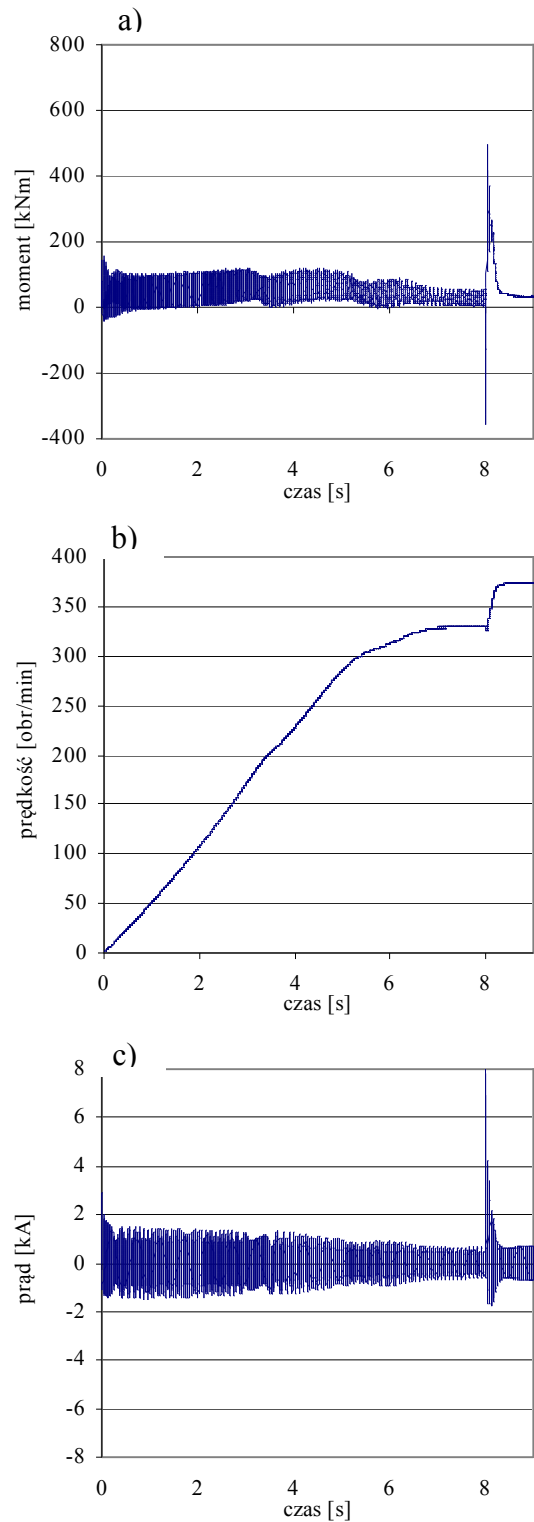
Rys. 2. Przebieg momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu dla wariantu A (zasilane wszystkie gałęzie równoległe)



Rys. 3. Przebieg momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu dla wariantu B (zasilane gałęzie numer 1, 2 oraz 3)



Rys. 4. Przebieg momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu dla wariantu C (zasilane gałęzie 1 i 2)



Rys. 5. Przebieg momentu (a), prędkości obrotowej (b) oraz prądu stojana (c) w czasie rozruchu dla wariantu D (zasilana 1 gałąź)

5. Omówienie wyników oraz podsumowanie

Na podstawie wyników symulacji wyznaczono parametry rozruchowe dla poszczególnych wariantów A, B, C oraz D zasilania uzwojenia badanego silnika. Przyjmując jako odniesienie rozruch bezpośredni (A) określono względne wartości momentu, prądu oraz dobroci rozruchu dla pozostałych układów zasilania. Wartości tych parametrów zestawiono w tabeli 2. Wynika z niej, że wartość momentu rozruchowego (m_r) oraz prądu rozruchowego (i_r) zmniejsza się w przybliżeniu proporcjonalnie do liczby zasilanych gałęzi równoległych. Oznacza to, że względna wartość współczynnika dobroci (d) rozruchu jest bliska jedności.

Tabela 2. Zestawienie względnych parametrów rozruchowych dla wszystkich wariantów zasilania uzwojenia podczas rozruchu silnika

wariant	m_r	i_r	d
A	1	1	1
B	0,781	0,754	1,04
C	0,537	0,502	1,07
D	0,269	0,262	1,03

Wyznaczone parametry statyczne oraz przedstawione wyniki symulacji dowodzą, że dla wszystkich wariantów możliwy jest rozruch przy obciążeniu o charakterystyce wentylatorowej. W obliczeniach pominięto jednak statyczny opór tarcia wentylatora, co może mieć znaczenie dla wariantu D, gdzie moment rozruchowy wynosi zaledwie 0,2 momentu znamionowego. Ponadto dla układu zasilania jednej gałęzi, silnik osiąga prędkość podsynchroniczną dla znacznie większego poślizgu niż w pozostałych przypadkach. Jest to wynikiem harmonicznej pasywności pola magnetycznego, widocznej na statycznej charakterystyce mechanicznej pokazanej dla silnika indukcyjnego w [6].

W takim przypadku konieczne jest zasilanie pozostałych gałęzi przy prędkości około 330 obr/min. (widoczne na rysunku 5), co jednak skutkuje udarem prądu pobieranego z sieci. Uwzględniając oba czynniki wariant D wydaje się mało korzystny.

Rozruch silnika z obciążeniem o wentylatorowej charakterystyce najlepszy jest przy zasilaniu dwóch gałęzi równoległych (C), który umożliwia dwukrotne zmniejszenie prądu rozruchowego przy momencie obrotowym zapewniającym płynny rozruch układu.

6. Literatura

- [1] Alger P.J.: *Performance calculations for part-winding starting of 3-phase motors*, AIEE transactions, Vol. 75, Part III, 1957, pp. 1535-1543
- [2] Antal L., Zawilak J., Zawilak T.: *Rozruch silników indukcyjnych z rozdzielonymi uzwojeniami stojana*, Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne, BOBRME Komel, nr 68, 2006, ss. 99-105
- [3] Helmer R., Wang D., Ponick B.: *Investigation of Part-winding Start Used in Cage Induction Motors* Proc. Of 18th Conference on Electrical Machines ICEM 08, 2008
- [4] Rajaraman K.C.: *Theory and design of part-winding starting* IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 14, No. 1, 1999, pp. 31-36
- [5] Stermecki A., Ticar I., Zagradisnik I., Kitak P.: *FEM-based design of an induction motor's part winding to reduce the starting current* IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 4, 2006 pp. 1299-1302
- [6] Zawilak T.: *Rozruch silników dużej mocy prądu przemiennego przy rozdzielonych uzwojeniach stojana*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, BOBRME Komel, nr 80, 2008, ss. 233-237

Autor

Dr inż. Tomasz Zawilak,
e-mail: tomasz.zawilak@pwr.wroc.pl
Politechnika Wrocławska
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław