

Marcin J. Wilk, Krzysztof Makowski
Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych

ANALIZA ROZRUCHU JEDNOFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO Z POMOCNICZYM UZWOJENIEM KONDENSATOROWYM PRZY ZMIANIE GEOMETRII ŻŁOBKA

AN EFFECT OF ROTOR SLOT GEOMETRY ON STARTING PROPERTIES OF SINGLE-PHASE CAPACITOR INDUCTION MOTOR

Streszczenie: Jednofazowe silniki indukcyjne są powszechnie stosowane w przemyśle oraz AGD. Charakteryzują się one jednak stosunkowo niską sprawnością oraz momentem rozruchowym. Metody optymalizacyjne oraz dwuwymiarowy model polowo-obwodowy można z powodzeniem zastosować w projektowaniu prototypów (wirtualnych) nowych silników lub poprawy istniejących. W artykule przedstawiono zarys procesu optymalizacji jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym. Wydajność obliczeń numerycznych optymalizacyjnych zależy od sposobu sformułowania problemu optymalizacji. Wyboru funkcji celu, zmiennych niezależnych oraz obszaru dopuszczalnego zmian parametrów można dokonać przeprowadzając analizę wrażliwości przyjętych kryteriów optymalizacji testowanego silnika. W tym celu zbadano wpływ zmiennych geometrycznych opisujących kształt żłobka wirnika oraz pojemności kondensatora pracy w środowisku obliczeniowym GOT-it/Flux2D na przyjęte kryteria, czyli moment obrotowy i prąd w stanie zahamowanego wirnika.

Abstract: Single-phase induction motor are widely used in industry and home appliance devices. However, they are characterized by relatively low efficiency and starting torque. Using a finite element model combined with optimization methods can be useful in designing new prototypes (virtual) or to improve existing motor. The paper outlines the process of optimization of a single-phase capacitor induction motor. Numerical optimization performance depends on the formulation of the optimization problem. Selection of the objective function, the variables and the area of solution can be assessed by performing sensitivity analysis of adopted optimization criteria of tested motor. For this purpose, the effect of geometric variables describing shape of rotor slot and capacitor capacitance on chosen criteria, like rotational torque and current was examined in locked rotor test in Flux2d/GOT-it software.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, jednofazowy, silnik indukcyjny, kondensatorowy, model polowy, optymalizacja, moment rozruchowy, prąd rozruchowy*

Keywords: *electrical machines, single-phase, capacitor induction motor, field model, optimization, starting torque, starting current*

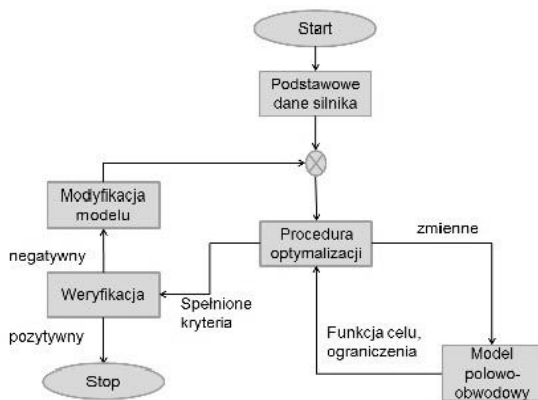
1. Wstęp

Jednofazowe silniki indukcyjne są powszechnie stosowane w aplikacjach przemysłu lekkiego (pompy, wentylatory, dmuchawy, kompresory) oraz w różnego rodzaju urządzeniach gospodarstwa domowego (pralki, lodówki, kosiarki). Najczęściej są używane w zakresie mocy ułamkowej ze względu na małe wymiary, masę jak również łatwość w użyciu. Artykuł przedstawia ogólne założenia realizowanego projektu optymalizacji wirnika silnika jednofazowego przy jednoznacznie sformułowanych kryteriach optymalizacji oraz zbiorze ograniczeń wynikających z konstrukcji bazowej. Dla użytkownika bardzo ważny jest nie tylko koszt

zakup maszyn ale także koszt jej eksploatacji, dlatego dąży się również do poszukiwania konstrukcji optymalnych ze względu na wskaźniki energetyczne maszyny. Natomiast zadaniem producenta jest zaprojektowanie i wytwarzanie silników o określonej sprawności, parametrach rozruchowych i termicznych. Pogodzenie tych dwóch wymagań jest bardzo trudne ze względu na ich sprzeczność. W związku z powyższym należy użyć metod wielokryterialnych w celu jednoczesnego zwiększenia wskaźników energetycznych oraz momentu rozruchowego silnika. Bardzo istotnym elementem procedury optymalizacyjnej jest opracowany w środowisku Flux2D parametryczny model polowo-obwodowy badanego silnika, który

uwzględnia zmiany parametrów maszyny podczas różnych stanów pracy.

Ogólny schemat proponowanej procedury optymalizacji przedstawiono na rys.1, która polega na poszukiwaniu maksymalnego momentu rozruchowego lub minimalnego prądu rozruchowego dla danego zbioru nierównościowych ograniczeń (np. graniczne wymiary żłobka, maksymalna gęstość prądu w uzwojeniach stojana). Jako warunki początkowe przyjęto parametry geometryczne oraz konstrukcyjne silnika bazowego, na podstawie których zbudowano parametryczny model polowo-obwodowy silnika w środowisku Flux2D

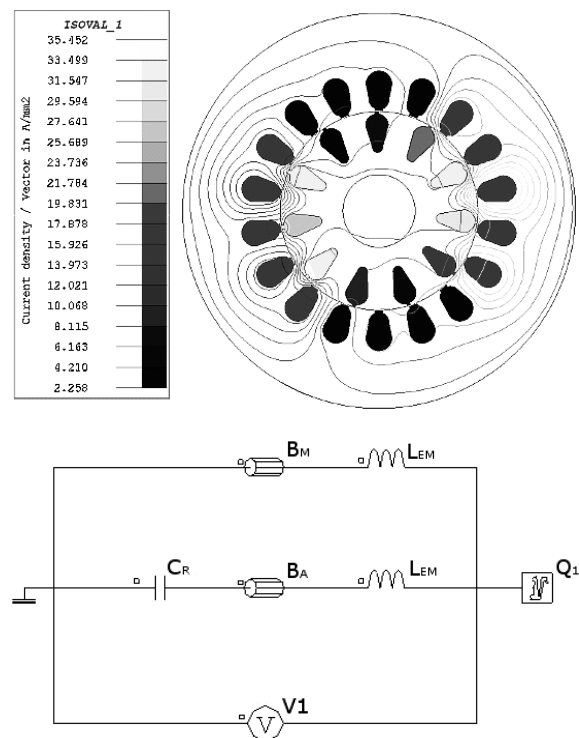


Rys. 1 Ogólny schemat procedury optymalizacji rozruchu badanego silnika

W bloku optymalizacji realizowanym w programie GOT określone są zakresy zmiennych niezależnych optymalizacji, ograniczenia oraz funkcje celu, które służą do odpowiednich zmian modelu aby osiągnąć zadane kryterium np. maksymalny moment rozruchowy silnika. Jeśli osiągnięte jest kryterium optymalizacji następuje porównanie nowej konstrukcji klatki wirnika z modelem bazowym. W przypadku, gdy weryfikacja zakończy się wynikiem pozytywnym następuje zatrzymanie procedury, natomiast w przeciwnym wypadku cały proces powtarzany jest od początku. Przed rozpoczęciem procesu optymalizacji konieczne jest uzasadnienie wyboru zmiennych optymalizacji. W tym celu wykonano symulacyjne badania wrażliwości zmiennych optymalizacji, jakimi są wymiary żłobka wirnika oraz pojemność kondensatora pracy na kryteria optymalizacji, którymi w przypadku rozruchu są moment rozruchowy, prąd rozruchowy, gęstość prądu w uzwojeniach stojana.

2. Model obliczeniowy

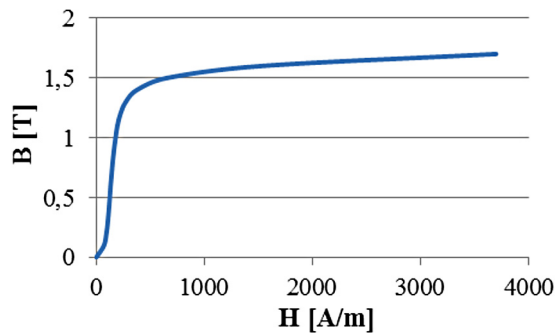
Do opracowania modelu symulacyjnego wykorzystano dane konstrukcyjne jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym typu SEg 56-2A[1,2]. Stojan silnika składa się z dwóch uzwojeń: głównego (B_M) oraz pomocniczego (B_A), które rozłożono w 18 żłobkach. Zastosowany kondensator pracy (C_R) w uzwojeniu pomocniczym pozwala na uzyskanie odpowiedniego momentu rozruchowego. Przekrój poprzeczny, obraz pola, rozkład (amplitudy) gęstości prądu oraz sprzężony obwód elektryczny modelu polowo-obwodowego badanego silnika przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2 Model polowo-obwodowy jednofazowego silnika indukcyjnego

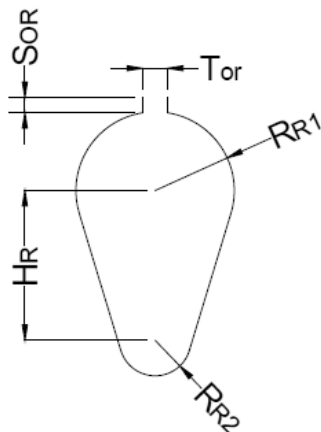
W obwodzie elektrycznym uwzględniono (jako stałe) indukcyjności połączeń czołowych (L_{EM} , L_{EA}) oraz rezystancje i indukcyjności segmentów pierścienia zwierającego klatki wirnika. Sprzężenie części obwodowej i polowej modelu odbywa się poprzez 11 aluminiowych prętów (solid conductors), w których uwzględniono zjawisko wypierania prądów oraz uzwojeń stojana B_A i B_M (stranded coils). Symulacji rozruchu silnika dokonano za pomocą aplikacji AC Magnetic pakietu Flux2D

(dla poślizgu równego 1), przy uwzględnieniu charakterystyki magnesowania pakietu rdzenia silnika (rys. 3).



Rys. 3 Charakterystyka magnesowania pakietu rdzenia badanego silnika

W obliczeniach przyjęto stałą temperaturę prętów wirnika (115 °C) oraz miedzianych uzwojeń stojana (75 °C i 85 °C). Model zbudowany w środowisku Flux2D może być sterowany zewnętrznie programem GOT-it służącym do optymalizacji. W modelu połowym zdefiniowano odpowiednie funkcje celu, np. moment i prąd rozruchowy (wyjścia) oraz zmienne parametry (wejścia). Na rysunku 4 przedstawiono kształt żłobka wirnika, którego poszczególne wymiary geometryczne są zmiennymi niezależnymi problemu optymalizacji badanego silnika.



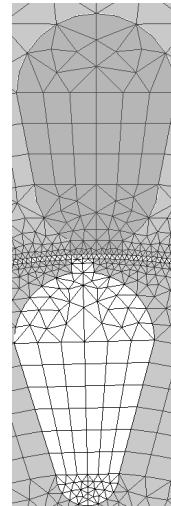
Rys. 4 Kształt żłobka wirnika

Położenie środka górnego sklepienia uzależniono od promienia R_{R1} , dzięki czemu żłobek zachowuje kształt kropłowy. W tabeli 1 umieszczono wykaz, zakres i krok zmian tych parametrów, które uzupełnia pojemność kondensatora pracy C_f . Model dyskretyzowano za pomocą siatki o 30,5K węzłów, której fragment przedstawiono na rys. 5.

Tab. 1 Zmienne niezależne problemu optymalizacji

Parametr	Wartość	Granice	Krok
C_f	3	1.5-6	0.5 μF
H_r	4.75	3.5-7.5	0.005 mm
R_{R1}	2.55	1.15-2.7	0.005 mm
R_{R2}	1.15	0.75-2.7	0.005 mm
T_{OR}	0.8	0.2-2	0.005 mm
S_{OR}	0.5	0.25-1	0.005 mm

W częściach trapezowych żłobków stojana i wirnika zastosowano czworokątne elementy, natomiast w pozostałych elementach modelowanego przekroju silnika zastosowano elementy trójkątne. Zastosowanie bardziej regularnych elementów pozwala na zachowanie wysokiej jakości siatki przy zmianach wymiarów żłobka.



Rys. 5 Fragment siatki elementów skończonych w strefie żłobkowej stojana i wirnika

3. Analiza wrażliwości parametrów

Podczas symulacji, program GOT-it jest aplikacją nadrzędną dla modelu optymalizacyjnego, pobiera funkcje oraz parametry, natomiast użytkownik określa funkcję celu oraz ograniczeń. Jako funkcję celu w przypadku rozruchu silnika obrano:

$$f(X) = 0.5 \cdot T_L + 0.5 \cdot I_L. \quad (1)$$

Jako ograniczenie przyjęto maksymalną gęstość prądu stojana (J_s) podczas rozruchu silnika:

$$J_s \leq 11.4 \text{ A/mm}^2. \quad (2)$$

gdzie:

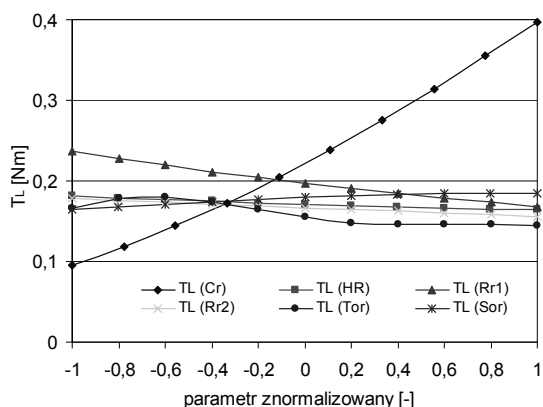
T_L oznacza elektromagnetyczny moment silnika przy zahamowanym wirniku wyznaczony

metodą pracy wirtualnej [3], a I_L prąd rozruchowy silnika.

Problem bikryterialny jest rozwiązywany w 6-wymiarowej domenie zmiennych niezależnych:

$$X = [C_r, H_r, R_{R1}, R_{R2}, T_{OR}, S_{OR}] \quad (3)$$

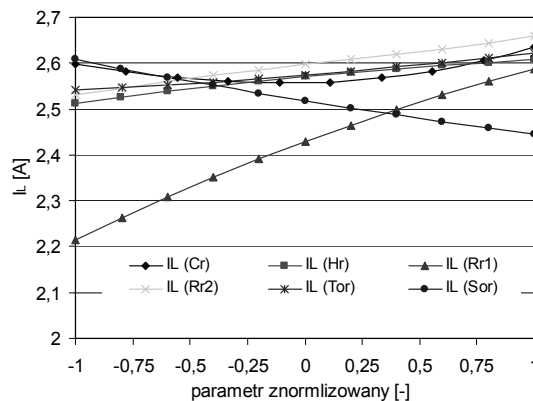
Ograniczenie gęstości prądu zdefiniowano jako najwyższą wartość gęstości prądu uzwojeń stojana. Po ustanowieniu połączenia między programem GOT-it i Flux2D [3,4] wykonano symulacyjne badania wrażliwości parametrów, które pozwalają określić wpływ poszczególnych parametrów na analizowane funkcje kryterialne, tj. moment i prąd rozruchowy oraz gęstość prądu stojana, po uprzedniej normalizacji parametrów do zakresu [-1,1]. Podczas obliczeń zmieniano tylko jeden parametr, a pozostałe ustalono jako nominalne. Na rys. 6 przedstawiono wpływ poszczególnych parametrów na moment rozruchowy.



Rys. 6 Wpływ parametrów na moment rozruchowy silnika

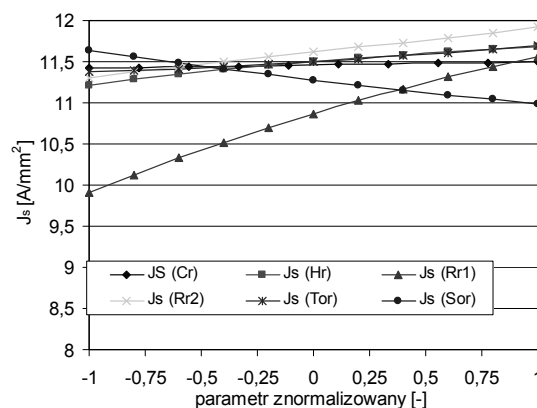
Zgodnie z przewidywaniem największy wpływ na moment rozruchowy ma pojemność kondensatora pracy. Z powyższego wykresu można odczytać, że zwiększając pojemność kondensatora można ponad dwukrotnie zwiększyć moment rozruchowy silnika. Również zmniejszanie wysokości żłóbka daje 6% wzrost momentu rozruchowego. Podobny (5%) wzrost momentu rozruchowego można uzyskać przez odpowiednie zmiany szerokości i wysokości otwarcia żłóbka wirnika (Rys. 6). Na rys. 7 przedstawiono wpływ parametrów na prąd rozruchowy silnika, na podstawie którego można stwierdzić, że największy wpływ ma promień górnego sklepienia - jego zmniejszenie powoduje obniżenie wartości prądu o ok. 17%. Również zmniejszanie pozostałych parametrów

geometrycznych żłóbka może korzystnie ograniczyć prąd rozruchowy silnika (ok. 6%). Jednocześnie okazało się, że dla pojemności nominalnej kondensatora uzyskuje się minimalny prąd rozruchowy silnika.



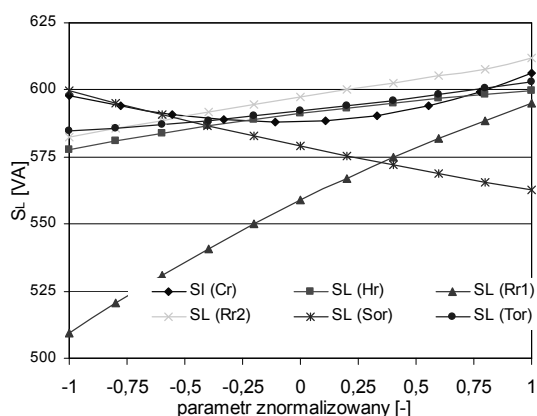
Rys. 7 Wpływ analizowanych parametrów na prąd rozruchowy

Na podstawie przytoczonych wyników badań można stwierdzić sprzeczny charakter zmian momentu oraz prądu rozruchowego w analizowanej domenie zmiennych X. Z tego względu zdecydowano się na wielokryterialne podejście do optymalizacji rozruchu silnika, której celem jest maksymalizacja momentu oraz minimalizacja prądu rozruchowego jednocześnie. Zmiany geometrii żłóbka wirnika mają również wpływ na gęstość prądu w uzwojeniach stojana. Z wykresu można odczytać, że największy wpływ na gęstość prądu stojana ma promień R_{R1} (rys. 8).



Rys. 8 Wpływ analizowanych parametrów na gęstość prądu stojana

Podczas badania silnika indukcyjnego w stanie zahamowanego wirnika należy również mierzyć moc pozorną S_L [5]. Na rys. 9 wpływ analizowanych zmiennych na moc S_L .



Rys. 9 Wpływ analizowanych parametrów na moc pozorną silnika

Zwiększanie wysokości otwarcia żłobka wirnika powoduje spadek mocy pozornej o 6%, natomiast zmniejszanie pozostałych wymiarów przynosi maksymalny spadek równy 17%, przy czym minimum mocy jest osiągane dla pojemności kondensatora pracy równej 3.5μF.

4. Podsumowanie i wnioski

Artykuł przedstawia w ogólnym zarysie problem optymalizacji jednofazowego silnika indukcyjnego z pomocniczym uzwojeniem kondensatorowym. W przedstawionych rozważaniach problem ograniczono do optymalizacji rozruchu silnika, której celem jest maksymalizacja momentu rozruchowego przy równoczesnej minimalizacji prądu rozruchowego przy ograniczeniu gęstości prądu stojana. Przedstawione wyniki symulacji dotyczą określenia wpływu obranych parametrów, czyli pojemności kondensatora oraz wymiarów pręta wirnika. Mają one znaczenie praktyczne, ponieważ dzięki nim można oszacować zakres zmian parametrów oraz ich wpływ na analizowane funkcje kryterialne, a więc moment i prąd rozruchowy oraz inne wielkości silnika np. starty uzwojeniowe. Ze względu na sprzeczny charakter zmian momentu oraz prądu rozruchowego autorzy zdecydowali się zastosować bikryterialną funkcję celu z ograniczeniem nierównościowym pochodzącym od gęstości prądu stojana. W dalszych badaniach przeprowadzona zostanie optymalizacja silnika, której celem jest maksymalizacja momentu obrotowego oraz wskaźników energetycznych przy pracy znamionowej z wykorzystaniem algorytmów stochastycznych [6].

5. Literatura

- [1]. Makowski K., Wilk M.J. *Experimental verification of field-circuit model of a single-phase capacitor induction motor*. Przegląd Elektrotechniczny 2012, R. 88, nr 7b, s. 116-118.
- [2]. Muenier G. *The finite element method for electromagnetic modeling*, Wiley-ISTE, 2008
- [3]. Flux 2D, v.10.4, User guide Cedrat 2010
- [4]. GOT-it Technical example: Actuator optimization, Cedrat 2011
- [5]. Śliwiński T. *Metody obliczania silników indukcyjnych t. 1. Analiza*
- [6]. Anuszczyk J., Błaszczyk P. *Strategie ewolucyjne w optymalizacji silników zwartobiegunowych* Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 86/2010, s75-78.

Autorzy

Politechnika Wrocławska
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27; 50-370 Wrocław
Mgr inż. Marcin J. Wilk,
marcin.j.wilk(at)pwr.wroc.pl
Dr hab. inż. Krzysztof Makowski, Prof. PWR
krzysztof.makowski(at)pwr.wroc.pl

Informacje dodatkowe

Niniejsza praca powstała w ramach grantu NCN dla osób nieposiadających tytułu doktora pt. „Multikryterialna optymalizacja jednofazowego silnika indukcyjnego” umowa nr UMO-2011/03/N/ST-8/06348

Recenzent

prof. dr hab. inż. Maria Dems

