

Wiesław Jażdżyński, Marcin Bajek
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WYZNACZANIE I ANALIZA GRANICZNYCH WŁASNOŚCI OPTYMALIZOWANEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM (LSPMSM)

DETERMINING BOUNDARY PROPERTIES AND THEIR ANALYSIS OF A LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE

Abstract: In the paper an approach is presented, which helps a decision-maker to take a proper decision when searching for a best construction of a line-start permanent magnet synchronous machine (LSPMSM). A motor construction with the U-shape internal magnets in the rotor has been investigated. Calculation results concerning two ideal compromise solutions of a bi-criterial optimization problem are presented. An analytical model has been applied in the synthesis program, and FEM calculations were used to validate this model. Both constructions have been verified employing the simulation technique in Matlab environment, to examine their self-starting property.

1. Wstęp

Własności maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi są na ogół korzystniejsze od analogicznych rozwiązań konstrukcyjnych bez magnesów. Nie zwalnia to projektantów od działań mających na celu racjonalizację ich konstrukcji. Spośród możliwych sposobów prawdopodobnie najefektywniejszym postępowaniem jest wybór formalnego podejścia opartego o np. programowanie nieliniowe. Optymalne rozwiązania projektowe otrzymuje się wtedy stosunkowo szybko i są one zbliżone do konstrukcji optymalnej, pod warunkiem odpowiedniej dokładności użytego modelu maszyny. W artykule przedstawiono niektóre wyniki zastosowania takiego podejścia w ujęciu bikryterialnym. W szczególności analizowane będą tzw. idealne rozwiązania kompromisowe. Ich znajomość pozwala projektantowi ocenić graniczne własności poszukiwanej konstrukcji maszyny przed decyzją wyboru końcowej wersji najlepszego projektu. Projektowany jest optymalny silnik synchroniczny z magnesami trwałymi przeznaczony do rozruchu bezpośredniego (ang. LSPMSM) o danych: $P_N=1.5\text{kW}$, $U_N=400\text{V}$, $f_N=50\text{Hz}$, $p=2$.

2. Model maszyny i program syntezy

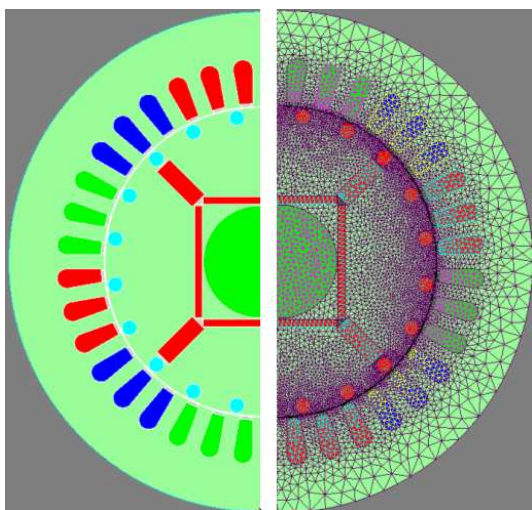
2.1. Model maszyny

Świadomość, że dokładność wyników optymalizacji nie może być większa od dokładności użytego modelu, oraz istnienie w analizowanej maszynie złożonej interakcji dwóch pól magnetycznych pochodzących od magnesów wirnika i przepływu stojana sugeruje potrzebę użycia modeli połowych. Podejście takie cechuje:

- a) stosunkowo duża dokładność, również dla przypadków magnetycznie nieliniowych
- b) bardzo duży nakład pracy obliczeniowej wynikający z:
 - iteracyjnego charakteru obliczeń połowych
 - iteracyjnego charakteru obliczeń optymalizacyjnych
 - konieczności iteracyjnego wyznaczania wybranych stanów pracy maszyny, np. stanu znamionowego

Powyższe uwagi wskazują na możliwość poważnego ograniczenia zakresu prac badawczych (duży czas obliczeń), a to uzasadnia użycie modelu analitycznego o odpowiednich własnościach. Model taki został opracowany [1,2] i wykorzystany w artykule. W wyniku wcześniejszych prac [3] wybrano maszynę z układem magnesów wewnątrz wirnika w kształcie litery U. W przykładzie tym przyjęto 36 żłobków stojana z uzwojeniem jednowarstwowym oraz 20

żłobków wirnika z klatką wykonaną z prętów miedzianych. Szkic geometrii konstrukcji wyjściowej maszyny jest przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Model wyjściowej konstrukcji analizowanej maszyny wykorzystany w obliczeniach polowych

Opracowany model analityczny jest rozszerzeniem modelu opisanego w [4]. Rozszerzenie polega m. innymi na uwzględnieniu spadków napięć magnetycznych w elementach ferromagnetycznych maszyny. Przyjęto, że model jest magnetycznie liniowy. Pomimo skomplikowanego kształtu pola uzyskano dobrą zgodność z wynikami obliczeń polowych, w szczególności dla stanu pracy synchronicznej i kątów mocy odpowiadających pracy znamionowej maszyny, tak dla prądów i momentu elektromagnetycznego, jak strat w żelazie. Bardziej szczegółowy opis modelu znajduje się w pracach [1,2,5]. Wyniki uzyskane przy jego pomocy były weryfikowane przy pomocy modelu polowego, przed i po optymalizacji.

2.2. Model syntezy

W optymalizacji używa się algorytmicznej postaci modelu zwanej programem syntezy [6], który realizuje odwzorowanie:

{zmienne optymalizacji} \Rightarrow {własności maszyny} \Rightarrow {funkcje kryterialne + funkcje ograniczeń},

a decyzję wyboru kolejnych iteracji w poszukiwaniu rozwiązania podejmuje algorytm optymalizacyjny. Przy wyborze zbioru zmiennych optymalizacji oraz obszaru dopuszczalnego kierowano się m. innymi

zasadą, że efekt optymalizacji jest na ogół lepszy, gdy zwiększymy wymiar wektora zmiennych optymalizacji, a zbiór ograniczeń aktywnych jest mniejszy.

3. Optymalizacja konstrukcji

3.1. Definicja problemów

Poszukiwanie optymalnej konstrukcji LSPMSM zostało zdefiniowane przy pomocy problemu bikryterialnego w postaci:

$$\max_{\mathbf{x}} \eta_N, \min_{\mathbf{x}} C_{ma} \mid \mathbf{x} \in X, \eta_N \geq 0.772 \quad (1)$$

gdzie:

η_N – sprawność znamionowa

C_{ma} – koszt materiałów aktywnych

\mathbf{x} – wektor 15 zmiennych optymalizacji definiujących geometrię silnika i uzwojenie stojana

X – obszar dopuszczalny zdefiniowany przy pomocy 5 nieliniowych i 36 liniowych ograniczeń nierównościowych.

Ograniczenie na sprawność znamionową w (1) wynika z warunku, aby otrzymane konstrukcje były co najmniej klasy IE1 [7]. Założono, że znamionowe straty mechaniczne wynoszą $1\% P_N$, a zgodnie z normą [8] straty dodatkowe obciążenia są równe ok. $2.7\% P_N$. Temperatura uzwojeń stojana była w obliczeniach stała i równa 75°C (stan znamionowej pracy synchronicznej), natomiast wirnika - 20°C (potrzebne tylko do warunków rozruchu ze stanu nienagrzanego maszyny).

Rozwiązania idealne uzyskano rozwiązując dwa zadania pomocnicze optymalizacji skalarnej:

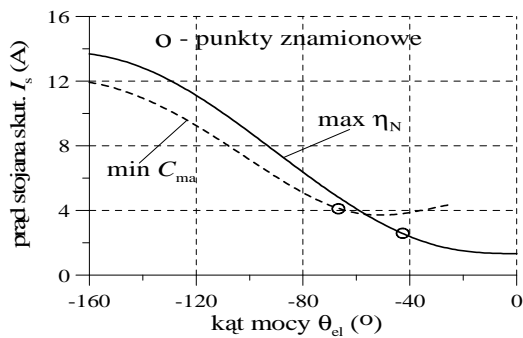
$$\max_{\mathbf{x}} \eta_N \mid \mathbf{x} \in X \quad (2)$$

oraz:

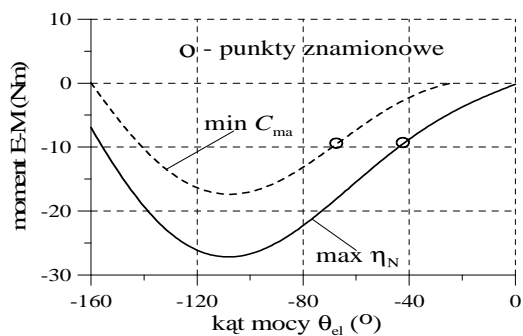
$$\min_{\mathbf{x}} C_{ma} \mid \mathbf{x} \in X, \eta_N \geq 0.772 \quad (3)$$

3.2. Rozwiązanie problemu

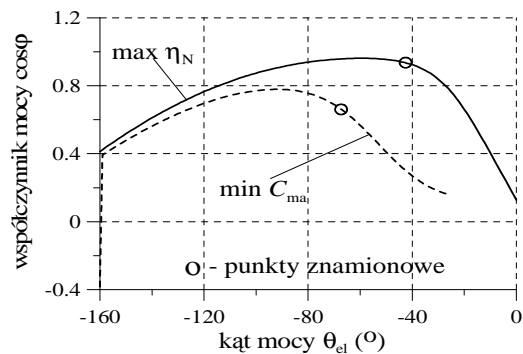
Zadania (2) i (3) zostały rozwiązane jako problemy programowania nieliniowego w środowisku Matlab. Ważniejsze wyniki w postaci graficznej znajdują się na rys. 2-5.



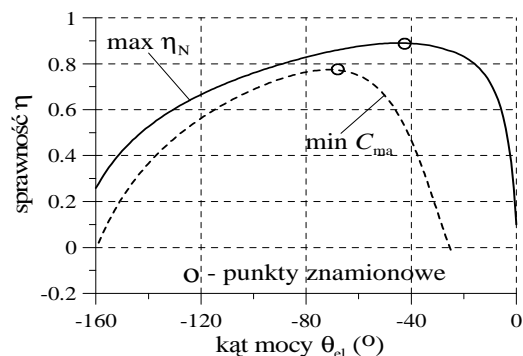
Rys. 2. Skuteczny prąd stojana w funkcji obciążenia dla konstrukcji idealnych



Rys. 3. Zależność momentu elektromagnetycznego od obciążenia dla konstrukcji idealnych



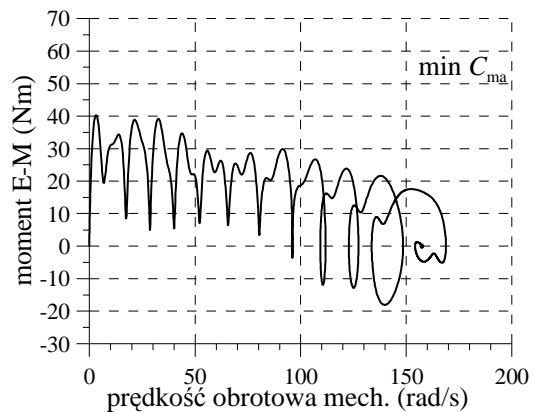
Rys. 4. Zależność współczynnika mocy od obciążenia dla konstrukcji idealnych



Rys. 5. Zależność sprawności od obciążenia dla konstrukcji idealnych

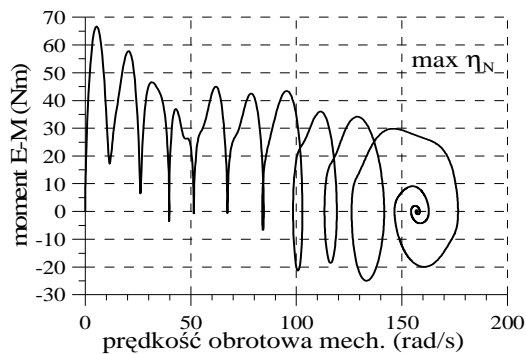
W pewnym, wyidealizowanym sensie konstrukcje wynikające z rozwiązania (2) i (3) reprezentują priorytet producenta (min C_{ma}) oraz użytkownika (max η_N). Konstrukcja wybrana jako najlepsza jest z reguły wynikiem pewnego kompromisu między tymi dwoma konstrukcjami. Można zauważyć, że w zależności od wyboru priorytetu projektowania, własności silnika zmieniają się dość znacznie. W celu lepszej oceny własności konstrukcji zostały zaznaczone punkty odpowiadające pracy znamionowej dla obu konstrukcji. Sprawność wyznaczono przy założeniu, że uwzględnione są straty elektryczne, w rdzeniach silnika, mechaniczne ($1\%P_N$) oraz dodatkowe ($2.7\%P_N$ wg [8]). Dla konstrukcji {min C_{ma} } postawiono warunek, aby zgodnie z [7] minimalna sprawność znamionowa odpowiadała klasie IE1 (tzn. 77.2%).

W silnikach LSPMSM ważnym aspektem prac projektowych jest zapewnienie prawidłowego rozruchu zakończonyego samo-synchronizacją. W obliczeniach w artykule założono (w definicji obszaru dopuszczalnego), aby samo-synchronizacja była możliwa bez obciążenia zewnętrznego. Rys. 6 i 7 potwierdzają zdolność obu konstrukcji do wykonania takiego rozruchu.



Rys. 6. Moment elektromagnetyczny w czasie rozruchu dla konstrukcji {min C_{ma} }

Dalsze dane dotyczące analizowanych konstrukcji znajdują się w tabeli 1. Można zauważyć, że w konstrukcji {min C_{ma} } narzucone ograniczenia minimalnej przeciążalności $T_b/T_N \geq 1.8$ oraz minimalnej sprawności $\eta_N \geq 77.2\%$ są aktywne.



Rys. 7. Moment elektromagnetyczny w czasie rozruchu dla konstrukcji {max η_N }

Tabela 1. Ważniejsze własności analizowanych konstrukcji

Wielkość	Konstrukcja {min C_{ma} }	Konstrukcja {max η_N }
θ_N [°]	-67.885	-42.886
I_{sN} [A]	4.1924	2.5979
$\cos\phi_N$	0.66763	0.93653
η_N [%]	77.2	88.981
T_l/T_N	2.828	4.01
$T_{l,ampl}/T_N$	2.824	6.11
$I_{l,l}$ [A]	17.734	19.414
T_b/T_N	1.8	2.816
C_m [PLN]	91.813	277.31

W konstrukcji {max η_N } uzyskano sprawność ok. 89% przy spełnieniu wymagań norm [8] odnośnie strat dodatkowych, co wskazuje, że spełnia ona z nadadkiem warunek minimalnej sprawności dla klasy IE4 (jest to w fazie ustaleń, ale informacje w [7] pozwalają oszacować tą wartość), niestety, za cenę znacznego zwiększenia kosztu maszyny. Wzrost ten jest ok. 3-krotny względem konstrukcji {min C_{ma} }.

6. Wnioski

Przeprowadzone badania i obliczenia wskazują na duże możliwości analizowanej konstrukcji LSPMSM w zakresie poprawy własności energetycznych. Dotyczy to zwłaszcza rozwiązań zbliżonych do wariantu {max η_N }. Można zauważyć, że konstrukcja ta charakteryzuje się cechami silników energooszczędnych [9] w znacznie większym stopniu, niż wysoko-sprawne silniki indukcyjne, co wynika z ich wyraźnie większej wartości znamionowego współczynnika mocy. Opracowany model i procedura projektowania pozwalają uzyskać optymalne rozwiązania

projektowe odpowiadające konstrukcjom optymalnym w sensie zdefiniowanego problemu optymalizacji. Więcej informacji dotyczących rozwiązane problemu można znaleźć w [5].

Literatura

- [1] Jażdżyński W., Bajek M.: *Obliczenia analityczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) z pominięciem zjawisk nieliniowych*. Maszyny elektryczne. Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL, nr 83, Katowice 2009, str. 73-76
- [2] Jażdżyński W., Bajek M.: *Optimization of Construction of a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor with the Use of a Magnetically Linear Analytical Model*. Przegląd Elektrotechniczny, (w druku).
- [3] Jażdżyński W., Bajek M.: *Wpływ struktury wirnika na niektóre własności silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM)*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 84, nr 2, 2008, str. 117-121
- [4] Honsinger V.B.: *The fields and parameters of interior type AC permanent magnet machines*, IEEE Trans. Power App. Syst., Pas-101(1982), str. 867-876.
- [5] W. Jażdżyński, M. Bajek: *Modeling and Bi-Criterial Optimization of a Line Start Permanent Magnet Synchronous Machine to Find an IE4 Class High-Efficiency Motor*, Proc. of the Intern. Conf. on Electrical Machines, Roma, Italy, 2010 (w druku).
- [6] W. Jażdżyński: *Multicriterial optimisation of squirrel-cage induction motor design*, Proc. Inst. Elect. Eng., pt. B, 136(1989), str. 299-307
- [7] *Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single – speed, three – phase, cage – induction motors (IE – code)*, IEC 60034 – 30. Edition 1.0 2008 – 10
- [8] *Rotating electrical machines – Part 2 – 1: Standard methods for determining losses and efficiency from test (excluding machines for traction vehicles)*, IEC Standard 60034 – 2 – 1. Edition 1.0 2007 – 09
- [9] W. Jażdżyński: *Some Economic Aspects of Designing Optimal Energy-Efficient and High-Efficiency Induction Motors*, Proc. of the Intern. Conf. on Electrical Machines, vol. 3, Brugge, Belgium, Aug. 2002, artykuł 228
- [10] *FLUX 2D, User's guide*, ver. 9.2.2_1, vol. 1-4, 2005

Artykuł jest częściowo sponsorowany z funduszy projektu badawczego nr N N510 108538 finansowanego w latach 2010-2012 przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy

dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, (+48) 12 617 28 98, wjaz@agh.edu.pl

mgr inż. Marcin Bajek, Akademia Górniczo-Hutnicza (Studia Doktoranckie), Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, (+48) 12 617 28 98, martinbajek@yahoo.co.uk.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Goryca