

Radosław Machlarz
Politechnika Lubelska, Lublin

WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK STATYCZNYCH SYNCHRONICZNEGO SILNIKA RELUKTANCYJNEGO Z UŻYCIEM METODY POŁOWO-OBWODOWEJ

DETERMINATION OF STEADY STATE CHARACTERISTICS OF AXIALLY LAMINATED SYNCHRONOUS RELUCTANCE MOTOR USING FIELD-CIRCUIT METHOD

Abstract: The paper presents a field-circuit approach to determining the steady state performance characteristics of synchronous reluctance motor with magnetic circuit non-linearity taking into account.

The method was implemented for the calculation of torque-angle characteristic and main exploitation parameters characteristics of two pole synchronous reluctance motor with axially laminated, anisotropic rotor. For a number of consecutive values of current angle and different excitation levels the direct and quadrature axis current components were calculated. On the basis of radial component of airgap flux density distributions resolved for both axes and each excitation current value, the magnetizing flux linkages in direct and quadrature axes were determined. Calculated flux linkage vs. excitation current functions were stored as a look-up tables.

An iterative method of solving a set of non-linear algebraic equations was adopted, with values of flux linkages taken from a look-up table. The curves obtained on the basis of field-circuit model and measured ones were presented together for comparison. The reasons for observed discrepancy between calculated and measured curves were discussed.

1. Wstęp

Silnik reluktancyjny synchroniczny o rozruchu bezpośrednim staje się obecnie coraz bardziej realną alternatywą dla silnika indukcyjnego, szczególnie w napędach grupowych małej mocy oraz tanich napędach indywidualnych wymagających stałej lub regulowanej w niewielkim zakresie prędkości obrotowej. Stojan takiego silnika jest konstrukcyjnie identyczny jak stojan silnika indukcyjnego. Wirnik natomiast, charakteryzujący się znaczną asymetrią obwodu magnetycznego, może należeć do jednej z dwóch klas rozwiązań konstrukcyjnych: wirnika pakietowanego konwencjonalnie, tj. poprzecznie w stosunku do osi maszyny (TL – *transversally laminated*) oraz wirnika o rozłożonej anizotropii magnetycznej pakietowanego poosiowo, w którym płaszczyzny blach są równoległe do osi maszyny (ALA – *axially laminated anisotropic*).

Wirnik pakietowany poprzecznie jest technologicznie łatwiejszy w realizacji, ale charakteryzuje się niezbyt dużym współczynnikiem asymetrii magnetycznej. Najmniej kosztownym rozwiązaniem jest przeróbka gotowego wirnika klatkowego lub, stosowana przez większość producentów, modyfikacja wykroju blachy

wirnika klatkowego polegająca na wprowadzeniu dużych żłobków zwiększających reluktancję w osi poprzecznej [4].

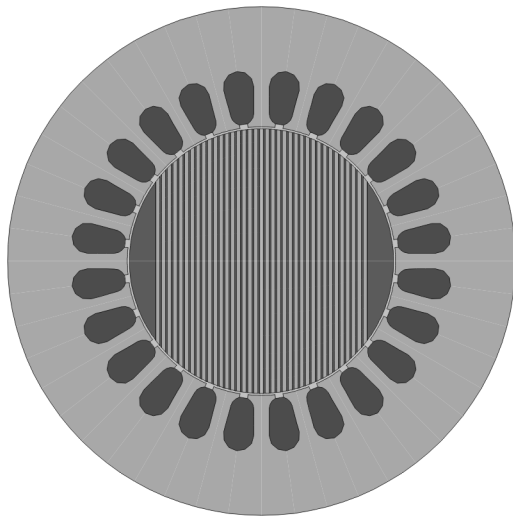
Wirnik pakietowany wzdłużnie typu ALA złożony jest z odpowiednio ukształtowanych pakietów blach o uwarstwieniu osiowym. Poosiowe pakietowanie blach pozwala na uzyskanie dużo większych wartości współczynnika asymetrii magnetycznej niż w przypadku pakietowania poprzecznego, ale stwarza również większe trudności w jego praktycznej realizacji, szczególnie jeśli chodzi o utrzymanie odpowiednio niskiej wartości szczeliny powietrznej i wymaganej sztywności mechanicznej takiej konstrukcji [1].

W przybliżonej analizie właściwości silnika reluktancyjnego synchronicznego korzysta się często z modelu obwodowego, którego równania wyprowadza się na podstawie wykresu fazorowego w układzie współrzędnych $d - q$. Zakłada się przy tym, że występujące w równaniach współczynniki są stałe (model liniowy).

W rzeczywistości, w wyniku nasycania się obwodu magnetycznego, indukcyjności synchroniczne L_d i L_q nie są stałe lecz zależą od obciążenia maszyny, a ściślej – od poziomu wymu-

szenia prądowego w poszczególnych osiach. Może to prowadzić do znacznych błędów w szacowaniu wartości parametrów eksploatacyjnych na podstawie modelu liniowego.

W referacie przedstawiono prostą metodę wyznaczania podstawowych charakterystyk eksploatacyjnych (w stanie ustalonym) dwubiegunowego synchronicznego silnika reluktancyjnego z wirnikiem anizotropowym pakietowanym poosiowo (rys. 1), z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia ferromagnetycznego.



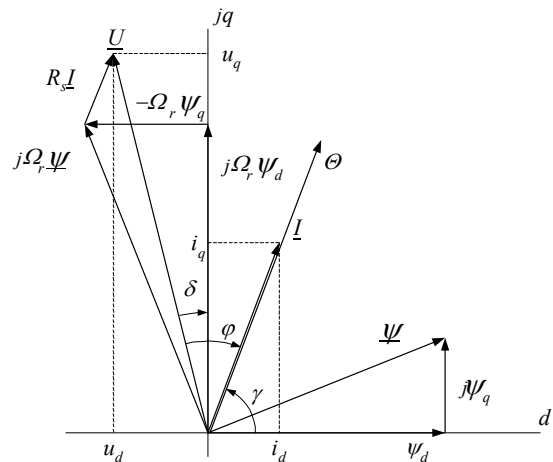
Rys. 1. Przekrój poprzeczny silnika reluktancyjnego synchronicznego z wirnikiem typu ALA.

2. Metoda

Połowo-obwodowa metoda analizy własności ruchowych synchronicznego silnika reluktancyjnego stanowi połączenie podejścia klasycznego, tj. rozwiązywania układu równań napięciowych modelu obwodowego wraz z równaniem momentu elektromagnetycznego (1) oraz analizy rozkładu pola magnetycznego w przekroju poprzecznym maszyny metodą elementów skończonych, z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki magnesowania rdzenia.

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d - \Omega_r \Psi_q(i_q) \\ u_q &= R_s i_q + \Omega_r \Psi_d(i_d) \\ T_e &= \frac{m}{2} p (\Psi_d(i_d) i_q - \Psi_q(i_q) i_d) \end{aligned} \quad (1)$$

Równania napięciowe modelu obwodowego wyprowadzono w oparciu o wykres fazorowy w stanie ustalonym (rys. 2).



Rys. 2. Wykres fazorowy synchronicznego silnika reluktancyjnego w układzie d-q.

Symbole użyte w równaniach napięciowych, w równaniu momentu oraz na wykresie fazorowym oznaczają:

u_d, u_q – składowe napięcia w osiach d i q ,

i_d, i_q – składowe prądu w osiach d i q ,

$$(i_d = I \cos \gamma, i_q = I \sin \gamma),$$

R_s – rezystancja stojana,

Ω_r – prędkość kątowna wirnika,

$\Psi_d(i_d), \Psi_q(i_q)$ – składowe strumienia skojarzonego w osiach d i q ,

T_e – moment elektromagnetyczny,

m – liczba faz,

p – liczba par biegunów,

γ – kąt wymuszenia,

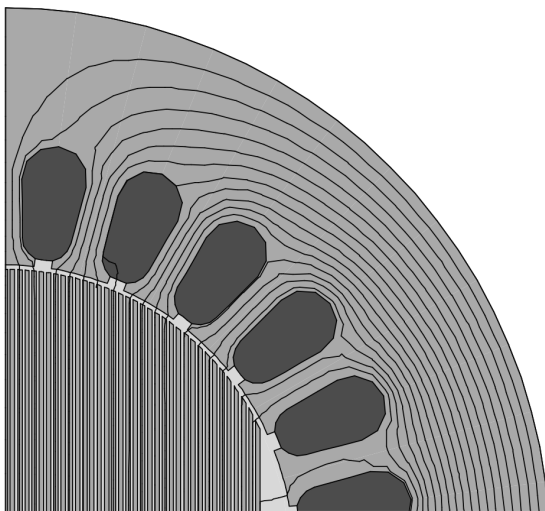
φ – kąt przesunięcia fazowego między prądem a napięciem,

δ – kąt obciążenia.

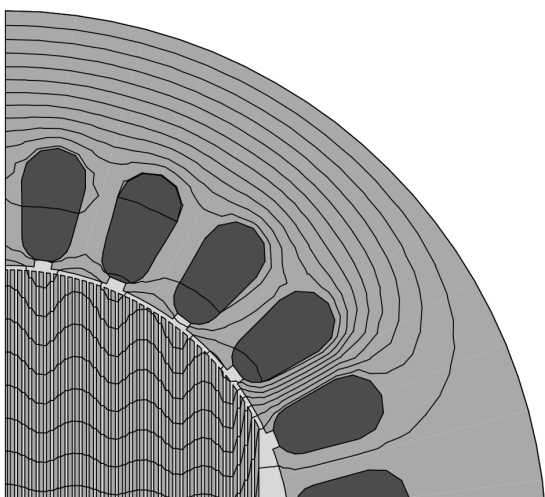
Składowe strumienia skojarzonego $\Psi_d(i_d)$ oraz $\Psi_q(i_q)$, występujące w równaniach (1), są nieliniowymi funkcjami odpowiednich składowych prądu. Wyznaczenie tych funkcji dla spodziewanego zakresu prądu wymuszenia i kąta obciążenia wymaga przeprowadzenia szeregu analiz rozkładu pola magnetycznego. Z uwagi na dużą anizotropię magnetyczną wirnika typu ALA można pominąć zjawisko magnesowania poprzecznego, tj. wpływu wymuszenia w osi d na strumień w osi q i odwrotnie [2]. Przy tym założeniu można analizować rozkład pola w maszynie niezależnie dla obydwu kierunków działania wymuszenia tzn. oddzielnie dla wymuszenia działającego w osi podłużnej oraz w kierunku osi poprzecznej. Dzięki temu obszar

analizy pola można zmniejszyć do połowy podziałki biegunowej, czyli jednej czwartej przekroju poprzecznego maszyny.

Wartości wymuszeń prądowych w poszczególnych osiach – i_d i i_q , obliczono dla szeregu wartości prądu stojana z przedziału od 0 do $2I_N$ i kolejnych wartości kąta wymuszenia w zakresie $0 \div 90^\circ$. Przykładowy rozkład pola magnetycznego uzyskany za pomocą programu Opera 2D dla wymuszenia w osi d przedstawiono na rys. 3. a dla wymuszenia w osi q na rys. 4.



Rys. 3. Przykładowy obraz pola dla wymuszenia w osi d .



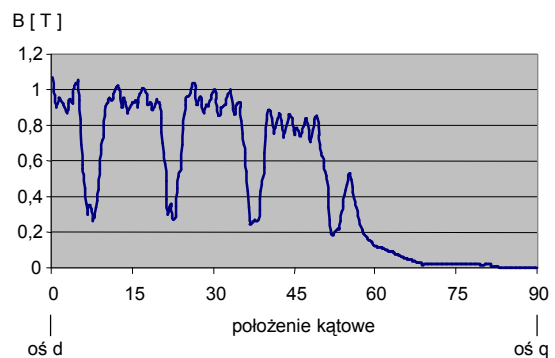
Rys. 4. Przykładowy obraz pola dla wymuszenia w osi q .

W oparciu o uzyskane wyniki analizy polowej dla obydwu kierunków działania wymuszenia dokonano wyznaczenia rozkładów składowej promieniowej indukcji w szczelinie (rys. 5, 6). Po przeprowadzeniu następnie analizy harmonicznej otrzymanych przebiegów obliczono amplitudy podstawowych harmonicznych rozkładu przestrzennego składowej radialnej indukcji w szczelinie B_{m1d} i B_{m1q} . Wartości strumieni skojarzonych związanych z tak obliczonymi indukcjami w obydwu osiach, tj. $\Psi_d(i_d)$ i $\Psi_q(i_q)$, obliczono z zależności:

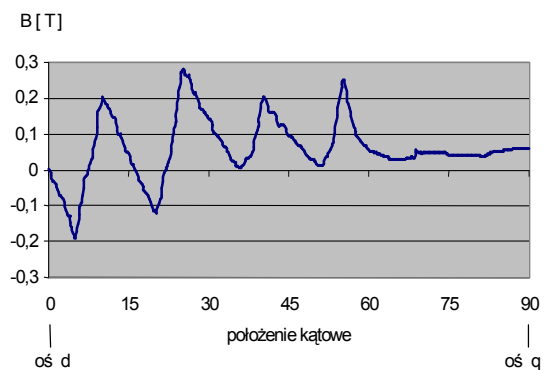
$$\Psi_{d(q)} = k_w N l_{Fe} D_r B_{m1d(q)} \quad (2)$$

gdzie:

k_w – współczynnik uzwojenia,
 N – liczba zwojów szeregowych na fazę,
 l_{Fe} – długość czynna pakietu wirnika,
 D_r – średnica wirnika.



Rys. 5. Przykładowy rozkład składowej promieniowej indukcji dla wymuszenia w osi d .



Rys. 5. Przykładowy rozkład składowej promieniowej indukcji dla wymuszenia w osi q .

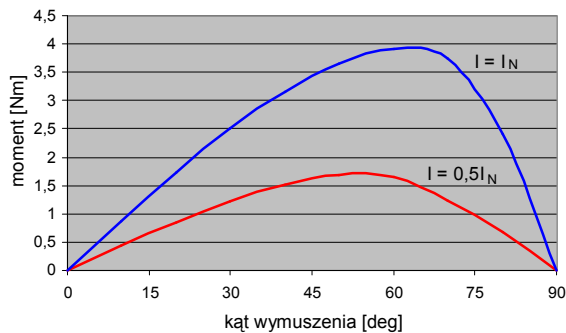
Obliczone wartości strumieni w kierunku danej osi zestawiono z wartościami odpowiednich składowych prądu stojana i zapisano w postaci

tablic. W ten sposób zostały wyznaczone nieliniowe funkcje strumieni skojarzonych $\Psi_d(i_d)$ oraz $\Psi_q(i_q)$, występujące w równaniach modelu obwodowego.

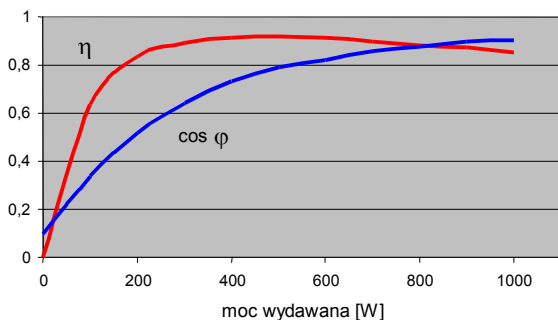
Rozwiązanie nieliniowego układu równań algebraicznych przeprowadzono metodą iteracyjną z wykorzystaniem programu Matlab, dla znamionowych warunków zasilania, tj. przy $U = 380V$ i $f = 50Hz$. W obliczeniach nie uwzględniano strat w żelazie wirnika natomiast wartości strat w żelazie stojana oraz strat mechanicznych przyjęto jak dla silnika klatkowego tej samej wielkości mechanicznej.

3. Wyniki

Wyniki obliczeń charakterystyki kątowej momentu (rys. 6) oraz charakterystyk sprawności i współczynnika mocy w funkcji mocy na wale (rys. 7) zestawiono z odpowiednimi charakterystykami otrzymanymi doświadczalnie (rys. 8, 9).



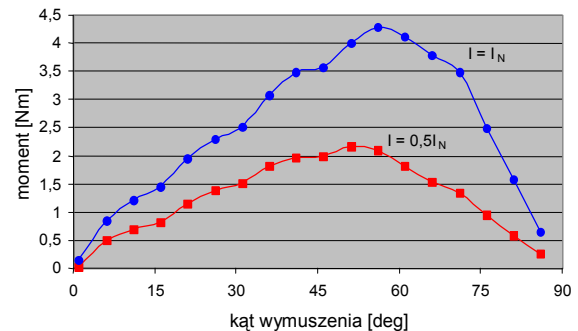
Rys. 6. Charakterystyki kątowej momentu wyznaczone metodą polowo-obwodową.



Rys. 7. Charakterystyki sprawności i współczynnika mocy wyznaczone metodą polowo-obwodową.

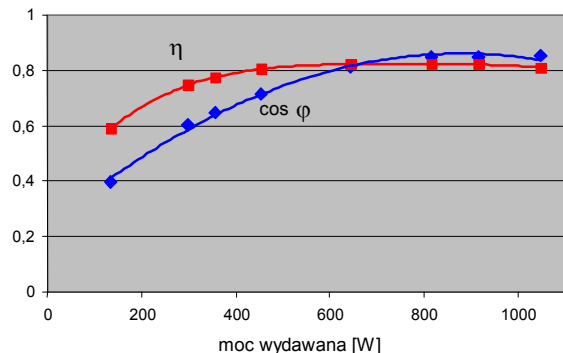
Pomiary przeprowadzono na modelu fizycznym dwubiegunowego synchronicznego silnika reluktancyjnego z wirnikiem anizotropowym o

przekroju jak na rys. 1, zbudowanym na bazie stojana dwubiegunowego silnika klatkowego o wzniosie wału 80mm.



Rys. 8. Charakterystyki kątowej momentu wyznaczone doświadczalnie.

Dające się zauważyć różnice między obliczonymi i pomierzonymi charakterystykami sprawności mogą wynikać z faktu nieuwzględnienia w obliczeniach strat w żelazie wirnika a także strumieni rozproszenia od czoł uzwojeń.



Rys. 9. Charakterystyki sprawności i współczynnika mocy wyznaczone doświadczalnie.

4. Wnioski

Zaproponowana metoda wyznaczania charakterystyk statycznych synchronicznego silnika reluktancyjnego, mimo przyjęcia pewnych uproszczeń, wykazuje dość dobrą zgodność z wynikami doświadczalnymi. Pozwala to twierdzić, iż mogłaby być wykorzystywana do przybliżonego szacowania kluczowych parametrów eksploatacyjnych maszyn reluktancyjnych będących w stadium projektowania.

5. Literatura

[1]. Boldea I., Fu Z. X., Nasar S. A., "Performance evaluation of axially-laminated anisotropic (ALA) rotor reluctance synchronous motors", IEEE Trans.

on Ind. Appl., Vol. 30, No. 4, July/August 1994, pp. 977-984.

[2]. Vagati A., Pastorelli M., Scapino F., Franceschini G., “*Impact of cross saturation in synchronous reluctance motors of the transverse-laminated type*”, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 36, No. 4, July/August 2000, pp. 1039-1045.

[3]. Haataja J., Pyrhönen J., “*Synchronous reluctance motor: an alternative to induction motor*”, ICEM 2000, Helsinki, pp. 1762-1766.

[4]. Miksiewicz R., Jakubiec M., “*Polowo-obwodowy model obliczeniowy synchronicznych silników reluktancyjnych*”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr. 64/2002, BOBRME Komel, pp. 229-234.

Autor

dr inż. Radosław Machlarz.

Katedra Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Lubelska

ul. Nadbystrzycka 38a

20-950 Lublin

tel. (81)5381606

r.machlarz@pollub.pl