

Maria J. Zielińska, Wojciech G. Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

METODA WYZNACZANIA POŚLIZGOWYCH CHARAKTERYSTYK ADMITANCJI WYSOKOOBROTOWEGO SILNIKA KLATKOWEGO

A METHOD OF DETERMINING THE SLIPPING CHARACTERISTICS OF ADMITTANCE OF A SQUIRREL-CAGE HIGH-SPEED MOTOR

Abstract: High speed squirrel-cage induction motors are supplied with a high frequency voltage ranging from 400 to 1500Hz. The highest frequencies, i.e., the highest rotation speeds, arise from technological needs and are limited by manufacturing possibilities. These motors have a structure and electromagnetic properties that differentiate them from classic machines. In particular, they are distinguished by the high frequency of supply voltage, intensive cooling introduced to reduce the size of the motor, and closed rotor slots used to minimize vibrations and noise.

The paper presents how slip characteristics of admittance of a squirrel-cage motor were determined on the basis of laboratory measurements conducted with current of variable frequency. This characteristic is the geometric locus of motor admittance with the slip ranging from $+\infty$ to $-\infty$ and an assumed constant frequency of supply voltage. The image of these characteristics differs considerably from a typical pie chart and it evidences the differences in electromagnetic properties in comparison with typical induction motors. Changes in the current in the slot causes a varying state of saturation and thus rotor leakage inductance is not a constant parameter.

1. Wstęp

Wysokoobrotowe silniki indukcyjne klatkowe zasilane są napięciem o dużej częstotliwości w granicach od 400 do 1500 Hz. Największe częstotliwości, czyli najwyższe prędkości obrotowe wynikają z potrzeb technologicznych a ograniczone są możliwościami wykonawczymi.

Silniki te posiadają konstrukcję oraz własności elektromagnetyczne różniącą je od klasycznych silników klatkowych zasilanych napięciem o częstotliwości 50Hz [4], [5], [6]. Spowodowane jest to głównie przez dużą częstotliwość napięcia zasilającego, wprowadzenia intensywnego chłodzenia dla zmniejszenia wymiarów silnika oraz zastosowania żłobków zamkniętych w wirniku celem ograniczenia drgań i hałasu [3], [4].

Pojedyncze egzemplarze tych silników produkowane w Polsce, przystosowane są do określonych celów np. do napędu wysokoobrotowych szlifierek na liniach produkcyjnych bieżni pierścieni łożysk tocznych.

Rozwijające się technologie wysokoobrotowe skłaniają do przygotowania wdrożenia produkcji silników wysokoobrotowych dla odpowiedniego zakresu mocy, prędkości obrotowej i zakresu jej regulacji.

Silniki o dużej prędkości obrotowej są stosowane do napędu [1]:

- obrabiarek skrawających bardzo twarde materiały,
- szlifierek do łożysk tocznych,
- ultrawirówek do separacji zawiesin używanych w laboratoriach,
- kompresorów oraz pomp odśrodkowych,
- pomp próżniowych.

Obecnie światowy postęp w zastosowaniu technologii wysokoobrotowych spowodował iż produkuje się silniki elektryczne o maksymalnej prędkości obrotowej do 400000 min⁻¹.

Duża częstotliwość napięcia zasilającego silniki wysokoobrotowe wzmaga występowanie zjawiska wypierania prądu w prętach klatki wirnika, natomiast zastosowanie zamkniętego żłobka w wirniku wpływa na zwiększenie zjawiska nasycenia przesmyku jego zamknięcia. W powszechnie stosowanych silnikach zjawisko to uwzględnia się również w przypadku silników o żłobkach półzamkniętych często stosowanych w silnikach indukcyjnych.

Ponadto wprowadzenie intensywnego chłodzenia celem zmniejszenia wymiarów gabarytowych umożliwiło powiększenie gęstości prądów w uzwojeniach stojana i wirnika. Konieczność ograniczenia drgań i hałasu oraz strat mechanicznych powoduje iż w silnikach tych stosuje się żłobki zamknięte w wirniku. Rozwiązanie takie zmniejsza tarcie wirnika o mgłą ole-

jową, która jest tutaj czynnikiem chłodzącym lecz powiększa zjawisko nasycania się przesmyku nad prętem żłobka [7].

W artykule na podstawie badań laboratoryjnych wyznaczono poślizgowe charakterystyki admittancji silnika klatkowego przy zasilaniu napięciem o parametrycznie zmieniającej się częstotliwości. Charakterystyka ta jest miejscem geometrycznym admittancji silnika przy poślizgu zmieniającym się w granicach od $+\infty$ do $-\infty$ przy stałej częstotliwości napięcia zasilającego.

Zmiana prądu płynącego w żłobku wywołuje zmienny stan nasycenia, stąd też indukcyjność rozproszenia wirnika nie jest wielkością stałą.

Przy wyznaczaniu indukcyjności rozproszenia uzwojenia wirnika dla silników indukcyjnych zasilanych napięciem o częstotliwości 50Hz często pomija się wpływ nasycenia obwodu magnetycznego dla strumienia rozproszenia. Jest to postępowanie typowe i obowiązuje wówczas znany z literatury schemat zastępczy. Identyfikacja indukcyjności rozproszenia w silnikach z uwzględnieniem zjawiska nasycenia rdzenia jest zagadnieniem dość złożonym z uwagi na skomplikowany rozkład strumieni magnetycznych [3].

Dodatkowym utrudnieniem jest uwzględnienie wpływu nasycania się przesmyku nad zamkniętym żłobkiem wirnika.

2. Określenie prądu w uzwojeniu stojana silnika

W schematach zastępczych silników asynchronicznych zasilanych napięciem o częstotliwości 50Hz zwykle pomija się rezystancję gałęzi poprzecznej R_{Fe} , gdyż straty te stanowią niewielki udział w całkowitych stratach w silniku, natomiast dla silnika klatkowego wysokoobrotowej rezystancja ta została uwzględniona.

W przypadku zasilania silnika napięciem niższym od znamionowego w stanie ustalonym uwidacznia się znaczny wpływ rezystancji uzwojeń stojana.

Analizę przeprowadzono posługując się schematem zastępczym obowiązującym dla silników indukcyjnych.

Napięcie zasilania wyrażono w postaci zależności: $U_{In} = U_{ph}u_r$, natomiast częstotliwość napięcia zasilającego jako: $f_l = f_n f_{lr}$, przy czym u_r , f_{lr} są względnymi wartościami napięcia i częstotliwości źródła zasilania.

Wartość rezystancji reprezentującej straty w rdzeniu R_{Fe} oraz reaktancję magnesującą X_μ zastąpiono szeregowym połączeniem R_b oraz reaktancji X_b które określono według zależności (1):

$$R_b = \frac{R_{Fe}}{1 + \left(\frac{R_{Fe}}{X_\mu}\right)^2} \quad (1)$$

$$X_b = \frac{X_\mu}{1 + \left(\frac{X_\mu}{R_{Fe}}\right)^2}$$

Impedancje schematu zastępczego określa formuła (2):

$$\begin{aligned} Z_{11} &= R_l + jf_{1r}X_{s1} \\ Z_0 &= R_b + jf_{1r}X_b \end{aligned} \quad (2)$$

$$Z'_{22} = R'_2 \frac{f_{1r}}{f_{2r}} + jf_{1r}X'_{s2}$$

przy czym względna częstotliwość w obwodzie wirnika wynosi:

$$f_{2r} = \frac{f_2}{f_{1n}} = sf_{1r}. \quad (3)$$

Prąd w uzwojeniu stojana określa się zależnością (4):

$$I_l = U_{phn}u_r \frac{Z'_{22} + Z_0}{Z_0(Z_{11} + Z'_{22}) + Z'_{22}Z_{11}} \quad (4)$$

Uwzględniając powyższe zależności prąd pobrany przez silnik można wyrazić w postaci wyrażenia (5):

$$I_l = \frac{U_{phn} \frac{u_r}{f_{1r}} \sqrt{A^2 + X_2^2}}{\sqrt{B^2 + C^2}} \quad (5)$$

przy czym:

$$A = \frac{R_b}{f_{1r}} + R'_2 \frac{1}{f_{2r}},$$

$$B = \frac{R_1 R_b}{f_{1r}} + \frac{\alpha}{f_{1r} f_{2r}} - X_1 X_2 \sigma,$$

$$C = \frac{\beta}{f_{1r}} + \frac{R_1 X_2}{f_{1r}} + \frac{R_2' X_1}{f_{2r}},$$

$$X_1 = X_{s1} + X_b,$$

$$X_2 = X_{s2}' + X_b,$$

$$\sigma = 1 - \frac{X_b^2}{X_1 X_2},$$

$$\alpha = R_2' (R_1 + R_b),$$

$$\beta = R_b (X_{s1} + X_{s2}').$$

3. Doświadczalna metoda wyznaczenia poślizgowej charakterystyki admitancji

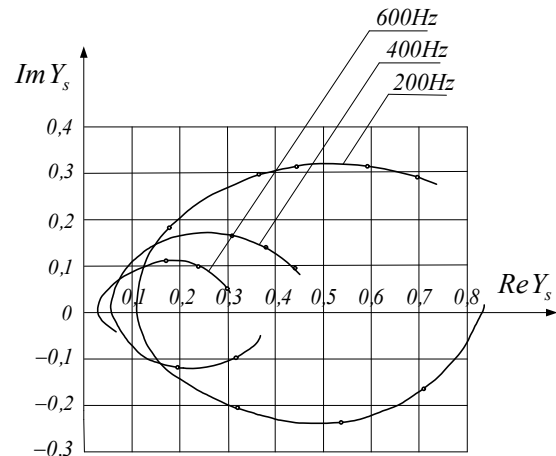
Przedmiotem badań i analizy był silnik wyso-koobrotowy typu PTShPp30-36KM120 o danych znamionowych:

$$P_n = 2,7 / 3,3 \text{ kW}, U_n = 153 / 183 \text{ V},$$

$$n_1 = 500 / 600 \frac{1}{s}, p_b = 1.$$

Wpływ częstotliwości źródła zasilania na wartość rezystancji reprezentującej straty w rdzeniu R_{Fe} , reaktancji magnesującej X_μ , reaktancji rozproszenia uzwojenia stojana X_{s1} i wirnika X_{s2}' w dalszych obliczeniach uwzględniono wprowadzając rzeczywiste wartości tych parametrów otrzymanych na drodze doświadczalnej dla parametrycznie zmiennej częstotliwości [5]. Charakterystyki admitancji silnika Y_s wyznaczono pomiarowo realizując pracę: silnikową, prądnicową oraz hamulcową w granicach dopuszczalnych względami mechanicznymi dla różnych częstotliwości: 600, 400, 200 Hz i przedstawiono je na rysunku 1.

Dzięki zasilaniu silnika napięciem obniżonym wykonano pomiary w całym zakresie zmian poślizgu.



Rys. 1. Rodzina poślizgowych charakterystyk admitancji silnika wyznaczona dla różnych częstotliwości napięcia zasilania

Następstwem zjawiska nasycenia rdzenia wokół zamkniętego żłobka wirnika oraz wypierania prądu w przecie klatki są zmiany głównie rezystancji i reaktancji rozproszenia wirnika w zależności od wartości prądu w wirniku oraz od jego częstotliwości.

Poślizgowa charakterystyka jest okręgiem tylko w warunkach gdy:

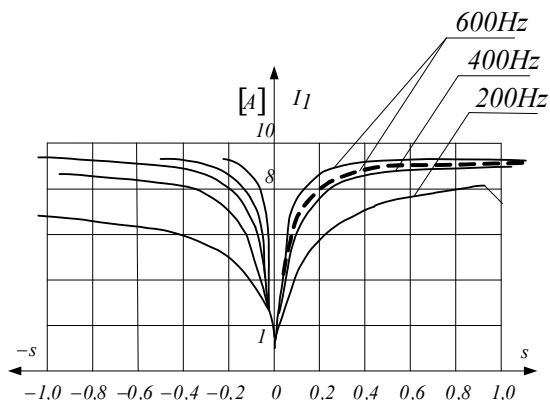
$$U_1 = \text{const.},$$

$$X_{s1} + X_{s2}' = \text{const.},$$

$$R_1 + R_2' = \text{const.}$$

Na podstawie poślizgowych charakterystyk admitancji sporządzono zależności zmian prądu stojana I_1 w funkcji poślizgu i przedstawiono je na rysunku 2.

Wpływ zmian częstotliwości napięcia zasilającego na charakterystyki $I_1 = f(s)$ uwidacznia się tym, że dla tej samej wartości poślizgu prąd pobierany przez silnik maleje w miarę zmniejszania częstotliwości. Sytuacja taka jest typowa również dla silników zasilanych napięciem o częstotliwości 50 Hz. Spowodowane jest to zmniejszaniem się głównie indukcyjności rozproszenia wirnika.



Rys. 2. Zależność prądu pobranego przez silnik od poślizgu przy różnych częstotliwościach napięcia zasilania (---- oznacza charakterystykę otrzymaną na podstawie obliczeń)

Linia przerywana na rysunku 2 pokazano przebieg prądu obliczonego według zależności 5 dla częstotliwości 600Hz . Różnica pomiędzy wartością obliczoną i pomierzoną przy poślizgu $s = 1$ wynosi około $4,3\%$.

4. Wnioski końcowe

W miarę zwiększania częstotliwości napięcia zasilającego, kształt otrzymanych charakterystyk admitancji silnika odbiega od wykresu kołowego. Jest to spowodowane zmianą parametrów elektromagnetycznych silnika głównie reaktancji rozproszenia wirnika. Ponadto pręty klatki wirnika umieszczone są w żłobkach zamkniętych, dlatego też zjawisko nasycenia się przesmyku nad prętem klatki pod wpływem strumienia rozproszenia należy uwzględnić przy analizie pracy silnika.

Na podstawie przedstawionych charakterystyk admitancji można stwierdzić, że wartość współczynnika mocy jest mała szczególnie dla poślizgów większych od znamionowego.

Wpływ zmian częstotliwości napięcia zasilającego na przebieg charakterystyki prądu pobieranego przez silnik dla tej samej wartości poślizgu świadczy o tym, że maleje on w miarę zmniejszania częstotliwości. Podobnie zachowuje się silnik asynchroniczny zasilany ze źródła o napięciu 50Hz . Zjawisko to spowodowane jest zmniejszaniem się indukcyjności rozproszenia wirnika.

Wartość prądu obliczonego na podstawie zależności matematycznej otrzymanej z przeprowadzonej analizy niewiele różni się od wartości otrzymanej doświadczalnie.

5. Literatura

- [1]. Dąbrowski M., Rudeński A. *Oprogramowanie do projektowania silników indukcyjnych wysokoobrotowych*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy KOMEL, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 80/2008, Katowice – maj 2008.
- [2]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.
- [3]. Zielińska M., Zieliński W.: *Chosen electromagnetic parameters of asynchronous high-speed motors of reduced noise level*. Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection the Second Conference, str 261-264, Nałęczów 1997.
- [4]. Zielińska M.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME Komel. Katowice 2001.
- [5]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.
- [6]. Zielińska M., Zieliński W.: *Metoda określenia parametrów elektromagnetycznych szybkoobrotowych silników asynchronicznych uwzględniająca zjawisko nasycenia rdzenia*. Materiały III Sympozjum Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM'99, Kazimierz Dolny.
- [7]. Zielińska M.: *The determination of supply conditions for high-speed motors AT selected terms of operations*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych, Współczesne problemy maszyn elektrycznych. Kazimierz Dolny 1994.