

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

OPRACOWANIE ALGORYTMÓW REGULACJI NAPIĘCIA ZASILANIA WYSOKOOBROTOWYCH SILNIKÓW KLATKOWYCH CELEM ZAPEWNIENIA ZADANEGO MOMENTU KRYTYCZNEGO LUB ROZRUCHOWEGO

DEVELOPING ALGORITHMS FOR REGULATING THE SUPPLY VOLTAGE OF SQUIRREL-CAGE HIGH-SPEED MOTORS IN ORDER TO OBTAIN THE GIVEN BREAKDOWN OR STARTING TORQUE

Abstract: Obtaining a high value of the breakdown or starting torque in an asynchronous motor is a very important issue from the point of view of improving its operational properties. These values can be determined based on data of a typical equivalent scheme. This refers to motors without the skin effect in the cage bar or those in which the phenomenon has been omitted.

In a high-speed motor, the phenomena of core saturation and skin effect influence the parameters of the equivalent scheme, which are not constant values and depend on the frequency of supply voltage and the value of the current in the bar of the rotor's cage. In consequence, an equivalent scheme valid for classic motors should not be used for analysis of the performance of a high-speed motor.

Based on an equivalent scheme which takes into account the influence of frequency on its parameters, the article describes how supply voltage was selected in order to guarantee the preservation of the given breakdown or starting torque. The calculations were made for three motors representing low, medium and high power machines.

1. Wstęp

Zapewnienie dużej wartości momentu krytycznego i rozruchowego jest dla silnika asynchronicznego bardzo ważnym zagadnieniem ze względu na polepszenie jego własności eksploatacyjnych. Powiększenie momentu krytycznego zwiększa przeciążalność silnika i umożliwia obciążenie go dużym momentem w ustalonym stanie pracy. Moment rozruchowy większy od momentu obciążenia umożliwia przeprowadzenie rozruchu silnika.

Analiza dotycząca silników klatkowych pokazuje, że zmieniając parametry źródła zasilania należy tak regulować napięcie i częstotliwość aby zachować proporcjonalny warunek zmian tych parametrów. Zapewni to jednak utrzymanie momentu krytycznego lub rozruchowego na stałym poziomie tylko w pewnym zakresie częstotliwości. Dla małych częstotliwości i dużych prądów silnika regulacja proporcjonalna nie zapewnia stałości momentu, gdyż w takich warunkach moment maleje.

Określenie wartości momentu krytycznego i rozruchowego silników indukcyjnych możliwe jest w oparciu o dane typowego schematu zastępczego. Dotyczy to silników bez wypiera-

nia prądu w przecie klatki lub tych, w których pominięto to zjawisko [1], [2], [3].

Prowadząc taką analizę zakłada się, że parametry schematu zastępczego są stałe i nie zależą od temperatury, zjawiska nasycenia, czy też wypierania prądu.

Moment krytyczny można wyznaczyć z dość dużą dokładnością na podstawie pomiarów w stanie zwarcia i przy biegu jałowym, natomiast moment rozruchowy przy zablokowanym wirniku.

W silnikach klatkowych wysokoobrotowych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości występuje zjawisko wypierania prądu w prętach klatki wirnika. Oczywiście zjawisko to występuje również w silnikach zasilanych częstotliwością sieciową i związane jest głównie z kształtem linii pola strumienia rozproszenia żłobkowego, czyli od kształtu żłobka i jego wymiarów.

Zastosowanie zamkniętego okrągłego żłobka w wirniku tylko wzmaga występowanie zjawiska nasycenia rdzenia dla strumienia rozproszenia żłobkowego i nie jest szczególną cechą silników wysokoobrotowych. Stan nasycenia w omawianych silnikach jest zmienny i zależy

od wartości prądu płynącego przez pręt wirnika.

Zjawisko nasycenia rdzenia i wypierania prądu wpływają na to, że parametry schematu zastępczego nie są wielkościami stałymi i zależą od częstotliwości napięcia zasilającego oraz od wartości prądu.

Świadczą o tym wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych w stanie zwarcia, które potwierdzają, że impedancja silnika jest wielkością zmienną [5].

W artykule w oparciu o schemat zastępczy opracowano algorytmy regulacji napięcia zasilania celem zapewnienia zadanego momentu krytycznego lub rozruchowego. Obliczenia przeprowadzono dla trzech silników reprezentujących maszyny o małej średniej i dużej mocy.

2. Moment elektromagnetyczny dla silnika zasilanego napięciem o dużej częstotliwości

Analizę przeprowadzono w oparciu o schemat zastępczy silnika indukcyjnego klatkowego zakładając, że:

1. napięcie zasilania stojana wynosi $U_1 = U_{phn} u_r$,
2. częstotliwość tego napięcia jest równa $f_1 = f_{ln} f_{1r}$,
3. względna częstotliwość w obwodzie wirnika wyraża się w postaci $f_{2r} = \frac{f_2}{f_{1n}}$,
4. reaktancja od strumienia rozproszenia w stojanie X_{s1} ,
5. reaktancja od strumienia rozproszenia w wirniku sprowadzona na stronę stojana określona jako X'_{s2} ,
6. rezystancja w wirniku uwzględnia zmiany częstotliwości źródła zasilania w postaci: $\frac{R'_2}{s} = R'_2 \frac{f_{1r}}{f_{2r}}$,
7. równoległe połączenie parametrów R_{Fe} i X_μ gałęzi poprzecznej zastąpiono połączeniem szeregowym elementów R_b oraz X_b .

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} uwzględniono w dalszych obliczeniach przez wprowadzanie rzeczywistych wartości tych parametrów otrzymanych na drodze doświadczalnej [5].

Moment elektromagnetyczny T_e silnika opisany jest zależnością (1):

$$T_e = \frac{m_1 p_b R'_2}{2\pi f_{ln}} \frac{A}{f_{2r} (B^2 + C^2)} \quad (1)$$

gdzie:

$$A = \left(U_{phn} \frac{u_r}{f_{1r}} \right)^2 \left[\left(\frac{R_b}{f_{1r}} \right)^2 + X_b^2 \right],$$

$$B = \frac{R_l R_b}{f_{1r}^2} + \frac{R'_2}{f_{1r} f_{2r}} (R_l + R_b) - X_l X_2 \sigma,$$

$$C = \frac{R_b}{f_{1r}} (X_{s1} + X'_{s2}) + \frac{R_2 X_2}{f_{1r}} + \frac{R'_2 X_l}{f_{2r}},$$

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

$$X_l = X_{s1} + X_b, \quad X_2 = X'_{s2} + X_b,$$

$$\sigma = 1 - \frac{X_b^2}{X_l X_2}.$$

3. Określenie momentu krytycznego i rozruchowego

Ze wzoru (1) wynika, iż moment krytyczny silnika otrzymuje się przy takiej względnej częstotliwości wirnika, dla której wyrażenie $D = f_{2r} (B^2 + C^2)$ osiąga minimum.

Funkcja D osiąga minimum gdy $\frac{dD}{df_{r2}} = 0$.

Po rozwiązaniu tej zależności otrzymuje się

względną wartość częstotliwości wirnika przy której moment elektromagnetyczny osiąga największą wartość czyli $T_e = T_b$.

W związku z powyższym formułę określającą moment krytyczny można przedstawić w postaci (2):

$$T_b = \frac{m_1 p_b}{4\pi f_{1n} X_2} \left(\frac{U_{phn} u_r}{f_{1r}} \right)^2 E \quad (2)$$

$$\sqrt{F(G^2 + H^2) + I + J}$$

przy czym:

$$E = \left(\frac{R_b}{f_{1r}} \right)^2 + X_b,$$

$$F = \left(\frac{R_l + R_b}{f_{1r}} \right)^2 + X_l, \quad G = \frac{R_l R_b}{f_{1r}^2 X_2},$$

Wyrażenie określające moment rozruchowy T_l otrzymuje się podstawiając $f_{1r} = f_{2r}$ w wyrażeniu (1).

Otrzymuje się więc zależność (3):

$$T_l = \frac{m_1 p_b R_2'}{2\pi f_{1n} f_{2r}^3} \frac{U_{phn}^2 u_r^2 H}{(I^2 + J^2)} \quad (3)$$

przy czym:

$$H = \left(\frac{R_b}{f_{1r}} \right)^2 + X_b^2,$$

$$I = \frac{R_l R_b}{f_{1r}^2} + \frac{R_2'}{f_{1r}^2} (R_l + R_b) - X_l X_2 \delta,$$

$$J = \frac{R_b}{f_{1r}} (X_{s1} + X_{s2}') + \frac{R_l X_2}{f_{1r}} + \frac{R_2' X_l}{f_{1r}}.$$

4. Algorytm zmian względnego napięcia zasilania przy zadanych parametrach

Dobór napięcia zasilania zależy od tego, który ze wspomnianych parametrów jest najistotniejszy przy pracy danego silnika. Najczęściej wymaga się, aby silnik charakteryzował się zadaną przeciążalnością momentem, zadanym

momentem krytycznym oraz odpowiednio dużym momentem rozruchowym.

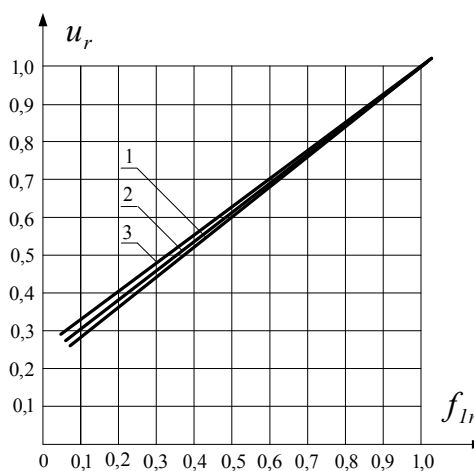
Analiza została przeprowadzona dla trzech silników o danych znamionowych zamieszczonych w tabelicy 1:

Tablica 1

L.p	U_n	P_n	f_{1n}	p_b
	V	kW	Hz	--
1	245	9	800	2
2	153	2,7	500	1
	183	3,3	600	
3	191	1,65	1250	1
	230	2	1500	

Względne napięcie zasilania u_r , przy którym uzyskuje się wymagany stały moment krytyczny wyznacza się z zależności (2).

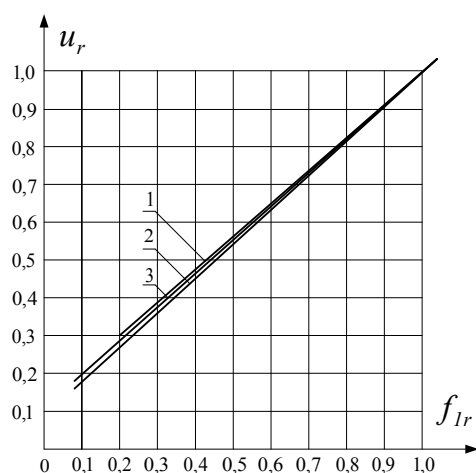
Przy założeniu, że moment krytyczny dla dowolnej częstotliwości jest równy momentowi krytycznemu przy znamionowych warunkach zasilania opracowano algorytm regulacji napięcia (rys.1.).



Rys. 1. Względne napięcie zasilania w funkcji względnej częstotliwości przy utrzymaniu znamionowego momentu krytycznego silnika

Jak wynika z rys. 1 względne napięcie zasilania przy $f_{1r} < 1$ i zachowaniu niezmienną przeciążalności maleje przy powiększaniu mocy silników o tej samej liczbie par biegunów.

Względne napięcie zasilania u_r , przy którym uzyskuje się wymagany stały moment rozruchowy wyznaczono z zależności (3), przebieg tego napięcia w funkcji częstotliwości względnej pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Względne napięcie zasilania w funkcji względnej częstotliwości przy zachowaniu znamionowego momentu rozruchowego silnika

Na podstawie rys. 2 stwierdzono, iż dla utrzymania momentu rozruchowego silnika równego momentowi przy znamionowych warunkach zasilania obniżaniu częstotliwości odpowiada zwiększanie wartości napięcia w stosunku do jego wartości wynikającej ze zmian proporcjonalnych do zmiany częstotliwości.

5. Wnioski końcowe

Utrzymanie momentu rozruchowego lub krytycznego na odpowiednio dużym poziomie jest dla silnika asynchronicznego bardzo ważne ze względu na jego własności eksploatacyjne.

W celu zapewnienia utrzymania wartości momentu rozruchowego bądź krytycznego na stałym poziomie, zmianom częstotliwości napięcia zasilającego silnik powinny odpowiadać w przybliżeniu proporcjonalne zmiany napięcia. Zasada ta obowiązuje tylko w pewnym zakresie częstotliwości. Dla małych częstotliwości i dużych prądów silnika regulacja proporcjonalna nie zapewnia stałości momentu, gdyż w takich warunkach moment maleje.

Zastosowanie zamkniętego okrągłego żłobka w wirniku zwiększa występowanie zjawiska nasycenia rdzenia dla strumienia rozproszenia żłobkowego i nie jest szczególną cechą silników wysokoobrotowych. Stan nasycenia w omawianych silnikach jest zmienny i zależy od wartości prądu płynącego przez pręt wirnika.

Zjawiska nasycenia rdzenia dla strumienia rozproszenia żłobkowego i wypieranie prądu w prętach klatki wirnika wpływają na to, że parametry schematu zastępczego nie są wielko-

ściami stałymi i zależą od częstotliwości napięcia zasilającego.

Wpływ zmian warunków źródła zasilania na parametry schematu zastępczego uwzględniono przez wprowadzanie rzeczywistych wartości tych parametrów otrzymanych na drodze doświadczalnej.

Względne napięcie zasilania przy zmianach częstotliwości poniżej jej wartości znamionowej i zachowaniu niezmięnionej przeciążalności maleje przy powiększaniu mocy silników o tej samej liczbie par biegunów.

Celem utrzymania zadanego momentu rozruchowego silnika równego momentowi, przy znamionowych warunkach zasilania przy obniżaniu częstotliwości napięcia zasilającego poniżej wartość znamionową, należy zwiększać wartość tego napięcia w stosunku do zmian proporcjonalnych do częstotliwości.

6. Literatura

- [1]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.
- [2]. Latek W.: *Badanie maszyn elektrycznych w przemyśle*. WNT, Warszawa 1987.
- [3]. Śliwiński T., Głowacki A.: *Parametry rozruchowe silników indukcyjnych*, PWN, Warszawa 1982.
- [4]. Zielińska M, Zieliński W.: *Chosen electromagnetic parametrs of asynchronous high-speed motors of reduced noise level*. Electromagnetic Devices and Processes in Environment Protection the Second International Conference. Naęczów 1997.
- [5]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.
- [6]. Zielińska M., Zieliński W.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME Komel. Katowice 2001.
- [7]. PN – 72/E – 04272. *Maszyny elektryczne wirujące. Silniki indukcyjne trójfazowe. Metody badań*.