

Maria Jolanta Zielińska, Wojciech Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

OPTYMALNA PRACA SILNIKÓW INDUKCYJNYCH PRZY ZMIANACH NAPIĘCIA ŹRÓDŁA ZASILANIA

OPTIMAL OPERATION OF INDUCTION MOTORS AT VARIED VOLTAGE OF THE FEEDING SOURCE

Abstract: Most of induction motors operate at a load that is considerably lower than the rated load. It brings about a change in such energy indicators as power factor and efficiency that decide over electrical energy consumption. Economic efficiency of a drive system operation depends on those indicators and therefore optimum conditions for the motor operation should be created. If the motor load is lower than the rated load, voltage should be reduced or frequency should be changed to such a value that can ensure maximum values of the energy indicators.

Possibilities of energy-saving operation of an induction motor with the regulation of voltage and feeding voltage frequency have been considered. Rules for the enhancement of such energy indicators as current input to the motor, power factor, and efficiency have been given. It is advantageous to feed a motor with voltage and feeding-voltage frequency that vary depending on the load degree as then energy consumption gets reduced. At the rated load a motor has to be fed with rated voltage and rated frequency but with decreasing load the voltage should be adequately reduced and the frequency adequately adjusted. Minimal feeding-voltage values are required at the open-circuit operation

Additionally, algorithms of voltage regulation that can ensure maintaining energy indicators at an adequate preset level have been presented. The indicators have been enhanced and electrical energy savings for various algorithms of voltage and frequency adjustment have been calculated.

1. Wstęp

Ekonomiczna efektywność pracy układu napędowego zależy od wskaźników energetycznych silników. Ze względu na rodzaj pracy silnika obciążenie może zmieniać się w dużym zakresie.

Większość silników indukcyjnych pracuje przy obciążeniu znacznie niższym od znamionowego. Wpływa to na zmianę wskaźników energetycznych takich jak: współczynnik mocy oraz sprawność, które decydują o zużyciu energii elektrycznej. Istnieje więc potrzeba poprawy tych wskaźników i stworzenia warunków optymalnej pracy silnika. Jeżeli obciążenie silnika jest mniejsze od znamionowego to należy obniżyć napięcie lub zmienić częstotliwość do takiej wartości aby wskaźniki energetyczne był jak najwyższe.

Możliwa jest praca energooszczędna silnika indukcyjnego przy regulacji napięcia oraz częstotliwości napięcia zasilającego. Podjęto próbę poprawy współczynników energetycznych takich jak: prąd pobierany przez silnik, współczynnik mocy oraz sprawność.

Celem poprawy wskaźników energetycznych korzystne jest zasilanie silnika zmieniającym

się w zależności od stopnia obciążenia napięciem i częstotliwością napięcia zasilającego. Dlatego też równoczesna zmiana napięcia i częstotliwości wraz ze zmianą obciążenia powoduje, że praca silnika odbywa się przy wyższych wartościach wskaźników, które decydują o zużyciu energii elektrycznej. Przy obciążeniu znamionowym silnik musi być zasilany napięciem znamionowym i znamionową częstotliwością, natomiast w miarę jak zmniejsza się obciążenie napięcie powinno być odpowiednio obniżane i regulowana wartość częstotliwości.

Obniżenie napięcia powoduje zmniejszenie zależnych od niego strat energii oraz wzrost sprawności i współczynnika mocy. Prowadzi to do mniejszego poboru mocy i w konsekwencji do oszczędności energii elektrycznej.

W artykule przedstawiono algorytmy regulacji napięcia, które zapewniają utrzymanie wskaźników energetycznych na odpowiednim zadanym poziomie.

Dokonano również poprawy tych wskaźników oraz obliczono oszczędność energii elektrycznej dla różnych algorytmów regulacji napięcia i częstotliwości.

2. Wybrane algorytmy regulacji napięcia zasilającego

Dla uzyskania pracy optymalnej i energooszczędnej, napięcie zasilające powinno zmieniać się według algorytmu opisanego w postaci ogólnej za pomocą wyrażenia (1) [1], [5]:

$$k_u = k_x \sqrt{k_o} \quad (1)$$

gdzie: k_u jest względną wartością napięcia, k_o względną wartością obciążenia, natomiast współczynnik k_x przyjmuje wartości $k_1 \div k_4$ w zależności od wyboru algorytmu.

Przy regulacji napięcia według minimalnego prądu współczynnik k_x określony jest przez zależność (2), dla regulacji z maksymalnym współczynnikiem mocy jako wyrażenie (3), przy utrzymaniu stałej znamionowej wartości współczynnika mocy (4), natomiast dla regulacji z zapewnieniem maksymalnej sprawności przez formułę (5).

$$k_1 = \sqrt[4]{\frac{I'_{2N}}{2I_{0N}} \left(I'_{2N} + \frac{I_{1N}}{t_b} + \sqrt{I'^2_{2N} + \frac{2I_{0N}I'_{2N}}{t_b} + \frac{4I'^2_{0N}}{t_b^2}} \right)} \quad (2)$$

$$k_2 = \sqrt[4]{\frac{I'_{2N}}{2I_{0N}t_b}} \quad (3)$$

$$k_3 = 1 \quad (4)$$

$$k_4 = \sqrt[4]{\frac{k_r}{k_{Fe}}} \quad (5)$$

Powyższe współczynniki zależą od następujących wielkości charakteryzujących określony silnik poddany regulacji: t_b - przeciążalność momentem, I_{1N} - znamionowy prąd silnika, I_{0N} - prąd biegu jałowego, I'_{2N} - prąd wirnika sprowadzony na stronę stojana przy znamionowym obciążeniu.

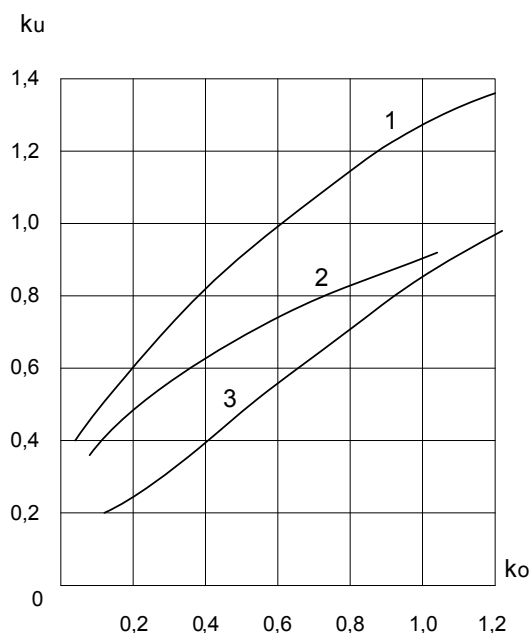
W powyższych zależnościach wprowadzono dodatkowo współczynniki: k_r - straty obciążeniowe przy znamionowych warunkach zasilania odniesione do mocy znamionowej oraz k_{Fe} - straty w rdzeniu przy znamionowych warunkach zasilania odniesione do mocy znamionowej.

Na rys.1 przedstawiono przebiegi algorytmów regulacji napięcia w zależności od obciążenia dla silnika klatkowego typu 2Sg 90 S4 o następujących parametrach znamionowych:

$$P_N = 1,1kW,$$

$$U_N = 220/380V, I_N = 4,9/2,8A,$$

$$n_N = 1450obr/min, \cos \varphi_N = 0,8.$$



Rys.1. Zakresy zmian napięcia dla różnych algorytmów: 1 – według minimalnego prądu, 2 – według maksymalnej sprawności, 3 – celem utrzymania znamionowego współczynnika mocy oraz według maksimum współczynnika mocy

Z wykresów zamieszczonych na rys.1 wynika iż zmiany napięcia dla utrzymania znamionowego współczynnika mocy oraz maksymalnej wartości tego współczynnika (przebieg 3) są praktycznie jednakowe. Najniższe napięcie jakim można zasilac silnik wynosi $k_{u,min} \approx 0,25$ i odpowiada ono wartości minimalnej prądu biegu jałowego.

Wszystkie obliczenia napięcia przeprowadzono dla wartości względnej obciążenia należącej do przedziału $k_o \in]k_{o,min}, 1$.

Przedstawione algorytmy regulacji napięcia nie wyczerpują wszystkich możliwości dotyczących energooszczędnej pracy silnika które nie zawsze można przedstawić w postaci prostych zależności.

3. Oszczędność mocy i energii elektrycznej

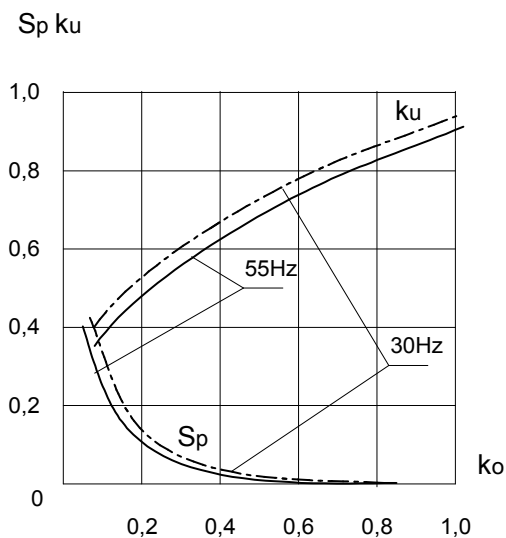
Celem obliczenia oszczędności energii elektrycznej badanego silnika należy przedstawić jego bilans mocy [2].

Po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń oszczędność energii opisuje zależność (6) [5]:

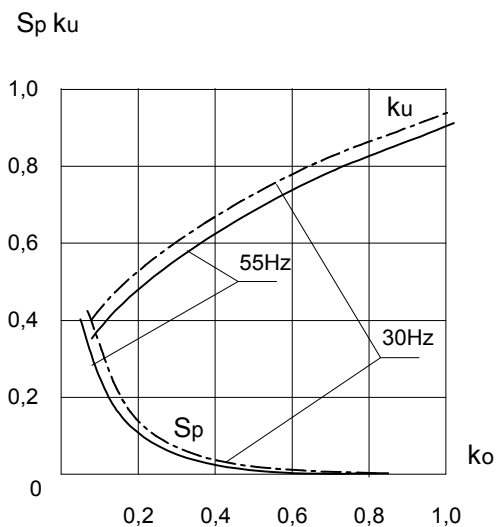
$$S_p = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{k_{Fe}(1 - k_u^2) + k_r k_o^2 \left(1 - \frac{1}{k_u^2}\right)}{k_o + k_{Fe} + k_r k_o + k_m} \quad (6)$$

We wzorze (6) współczynnik k_m określa straty mechaniczne odniesione do mocy znamionowej silnika. Występują tu dwie zmienne: względna wartość obciążenia k_o jako zmienna niezależna oraz względne napięcie k_u które zależy od obciążenia.

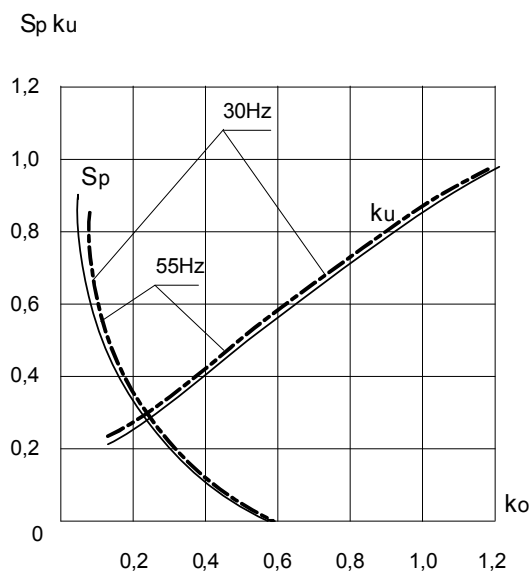
Na podstawie zależności (6) obliczono przebiegi oszczędności mocy dla przedstawionych powyżej algorytmów regulacji napięcia i różnych częstotliwościach: 55Hz, 50Hz, 45Hz i 30Hz (rys.2 – 5).



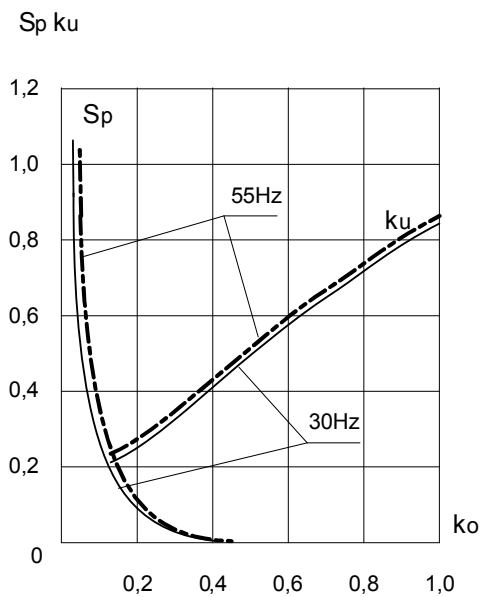
Rys.2 Przebieg oszczędności energii w zależności od obciążenia k_o i częstotliwości przy regulacji napięcia k_u według minimalnego prądu



Rys.3 Przebieg oszczędności energii w zależności od obciążenia k_o i częstotliwości przy regulacji napięcia k_u według maksymalnej sprawności



Rys.4. Przebieg oszczędności energii w zależności od obciążenia k_o i częstotliwości przy regulacji napięcia k_u oraz utrzymania znamionowego współczynnika mocy



Rys.5. Przebieg oszczędności energii w zależności od obciążenia k_o i częstotliwości przy regulacji napięcia k_u według maksimum współczynnika mocy

Na podstawie zamieszczonych powyżej przebiegów charakterystyk (rys. 2 – 5) można zauważyć, że największą oszczędność mocy uzyskuje się przy pracy silnika bez obciążenia, czyli dla przypadku gdy $k_o = 0$.

W miarę wzrostu obciążenia oszczędność maleje i należy wówczas obniżyć napięcie i częstotliwości do około połowy obciążenia znamionowego.

Charakter przebiegów jest podobny, różnice polegają jedynie na zakresach pracy energooszczędnej.

4. Wnioski końcowe

Na podstawie przeprowadzonych w artykule rozważań wynikają następujące wnioski:

- celem uzyskania możliwie najwyższych wskaźników energetycznych silnika przy zmianach jego obciążenia, napięcie zasilające lub jego częstotliwość powinno być odpowiednio regulowane,
- zakres pracy optymalnej zależy głównie od przyjętych algorytmów regulacji napięcia, natomiast zmiana częstotliwości w rozpatrywanym zakresie nie wpływa w znaczący sposób na oszczędność energii,
- zmniejszenie wartości częstotliwości napięcia zasilającego jest w praktyce rów-

noważne zwiększeniu napięcia w celu zapewnienia stałej wartości strumienia magnesującego,

- osiągnięcie warunków pracy energooszczędnej jest możliwe w całym zakresie zmian obciążenia gdy zostanie zastosowany odpowiedni algorytm regulacji napięcia,
- największa oszczędność mocy występuje przy biegu jałowym,
- praca optymalna silnika przy regulacji napięcia i zmianie częstotliwości jest możliwa wówczas gdy nie następuje wzrost poboru mocy z sieci.

5. Literatura

- [1]. Krygier J.: *Praca energooszczędna silników asynchronicznych*. Gospodarka paliwami i energią, 1992, nr 8.
- [2]. Krygier J.: *Zasady pracy optymalnej silnika asynchronicznego*. Przegląd Elektrotechniczny, 1992, nr 8.
- [3]. Krygier J.: *Silniki energooszczędne, właściwości, oszczędność energii*. XXX Sympozjum Maszyn Elektrycznych. Współczesne problemy maszyn indukcyjnych. Kazimierz Dolny 13 – 17 VI 1994 r.
- [4]. Zielińska M.J., Szewc M., Zieliński W., Jahołkowski K.: *Wybrane zagadnienia pracy energooszczędnej silników indukcyjnych*. IV Sympozjum naukowe. Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM 2001, Lublin 9-10 Maja 2001r.
- [5]. Zielińska M.J., Zieliński W.: *Wybrane algorytmy regulacji napięcia zastosowane przy energooszczędnej pracy silników indukcyjnych*. Zeszyty Problemowe, BOBRME „Komel” nr 69; 2004, str. 145 – 149.