

Maria Jolanta Zielińska, Wojciech Grzegorz Zieliński
Politechnika Lubelska, Lublin

OCENA OSZCZĘDNOŚCI ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZY SKOKOWEJ REGULACJI NAPIĘCIA W SILNIKU ASYNCHRONICZNYM KLATKOWYM

EVALUATION OF ELECTRICAL ENERGY SAVINGS AT STEP REGULATION OF VOLTAGE IN AN ASYNCHRONOUS SQUIRREL-CAGE MOTOR

Abstract: In order to enhance energy indices and obtain electrical energy savings for an asynchronous squirrel-cage motor operating on a long-time basis at a load lower than the rated load it needs to reduce its supply voltage. Efficient operation obtained that way can apply to a single motor or a set of motors driving the same machines.

Motor load can vary within a wide range depending on the operation kind. Particularly disadvantageous is operation at little load or at idling, when energy indices of the motor are very low. In such a case it is necessary to apply voltage that can be varied depending on the load factor. When voltage is changed simultaneously with a load change the motor runs at higher values of the indices that decide over electrical energy consumption. At the rated load a motor should be supplied with rated voltage and when the load gets reduced the supply voltage should also be adequately decreased. The lowest voltage is required at the idle run. Relative value of the voltage is then of ca 0.3. Voltage reduction brings about a decrease of voltage-dependent energy losses and an increase of efficiency and the power factor, which leads to the power input reduction and consequently to electrical energy savings.

The paper presents motor operation conditions that should be met at a sudden voltage change and rules for enhancing energy indices on the basis of algorithms that maintain such parameters as: minimal current, maximal power factor and maximum efficiency at a preset level.

Additionally, runs of the basic motor quantities such as: current input, power factor, efficiency, and slip at step-regulated supply voltage have been determined.

1. Wstęp

W celu poprawy wskaźników energetycznych oraz oszczędności energii elektrycznej silnika asynchronicznego klatkowego pracującego przez dłuższy czas przy obciążeniu niższym od znamionowego można obniżyć napięcie zasilające. Praca racjonalna uzyskana w ten sposób może dotyczyć pojedynczego silnika lub grupy silników napędzających takie same maszyny robocze. W tym przypadku mogą być one zasilane z tego samego źródła. Ze względu na rodzaj pracy obciążenie silnika może zmieniać się w dużym zakresie. Szczególnie niekorzystna jest praca przy niewielkim obciążeniu lub biegu jałowym, kiedy to wskaźniki energetyczne silnika są bardzo niskie. W tym przypadku konieczne jest więc zasilanie silnika napięciem zmieniającym się w zależności od stopnia obciążenia. Dlatego też równoczesna zmiana napięcia 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, natomiast w miarę jak zmniejsza się obciążenie napięcie powinno być odpowiednio obniżane. Najmniejsze napięcie wymagane jest przy pracy w stanie jałowym. Względna wartość tego napięcia wynosi wówczas zwykle około 0,3.

Obniżenie napięcia powoduje zmniejszenie zależnych od niego strat energii oraz wzrost sprawności i współczynnika mocy. Prowadzi to do zmniejszenia poboru mocy i w konsekwencji do oszczędności energii elektrycznej. W artykule przedstawiono warunki pracy silnika które należy spełnić podczas skokowej zmiany napięcia oraz zasady poprawy wskaźników energetycznych w oparciu o określone algorytmy, które utrzymują na zadanym poziomie takie parametry jak: minimalny prąd, maksymalny współczynnik mocy oraz maksymalną sprawność. Ponadto wyznaczono przebiegi podstawowych wielkości silnika: prąd pobierany przez silnik, współczynnik mocy, sprawność,

poślizg przy skokowo regulowanym napięciu zasilania.

2. Warunki pracy silnika przy skokowym obniżaniu napięcia

Przy skokowym obniżaniu napięcia należy spełnić następujące warunki pracy [4], [5]:

1. nie może wystąpić wzrost strat mocy w silniku, a tym samym mocy czynnej pobieranej z sieci,
2. wskaźniki energetyczne, a w szczególności współczynnik mocy powinny wzrosnąć.

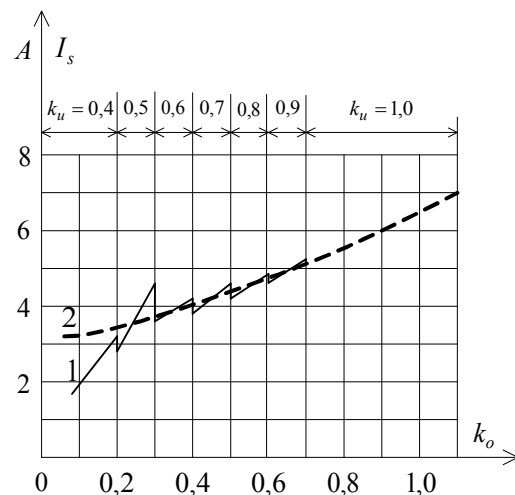
Po niewłaściwym obniżeniu napięcia zmniejszają się zależnie od niego straty w rdzeniu ale jednocześnie rosną straty w uzwojeniach, które nie tylko mogą skompensować zmniejszenie strat w rdzeniu, ale spowodować dalszy wzrost strat całkowitych. Przy określonym obciążeniu silnika napięcie powinno być obniżone o taką wartość, by zmalały straty w rdzeniu co spowoduje zmniejszenie strat całkowitych. W tym przypadku wzrośnie przede wszystkim współczynnik mocy. Liczbę stopni obniżania napięcia dobiera się na podstawie czasowego przebiegu obciążenia silnika. Nie powinna być jednak zbyt duża. Może ona wynosić $5 \div 7$, gdyż uzyskane przebiegi wskaźników energetycznych (prąd pobierany z sieci, współczynnik mocy, sprawność) zbliżone są wówczas do uzyskanych przy ciągłej regulacji napięcia [6]. Wartość napięcia na danym stopniu zależy z jednej strony od obciążenia silnika a z drugiej od założonej liczby stopni.

Przedmiotem analizy był silnik indukcyjny typu SZUe 44a o danych znamionowych: $P_N = 3kW$, $U_N = 380V$, $I_N = 6,6A$,

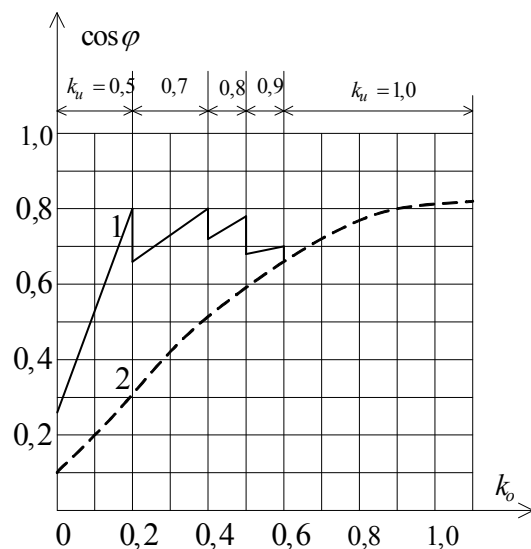
$$n_N = 1420 \frac{\text{obr}}{\text{min}}, \quad \cos \varphi_N = 0,81, \quad \eta_N = 85\%, \\ f_N = 50\text{Hz}.$$

Na rysunkach 1, 2, 3 przedstawiono przebiegi prądu pobieranego z sieci I_s , współczynnika mocy $\cos \varphi$ oraz sprawności η w zależności od względnego obciążenia k_o dla zmieniającego się w sposób skokowy względnego napięcia zasilania k_u .

Współczynnik mocy w dużym stopniu zależy od napięcia, dlatego też przy obniżaniu tego napięcia następuje znaczny skok wartości $\cos \varphi$.

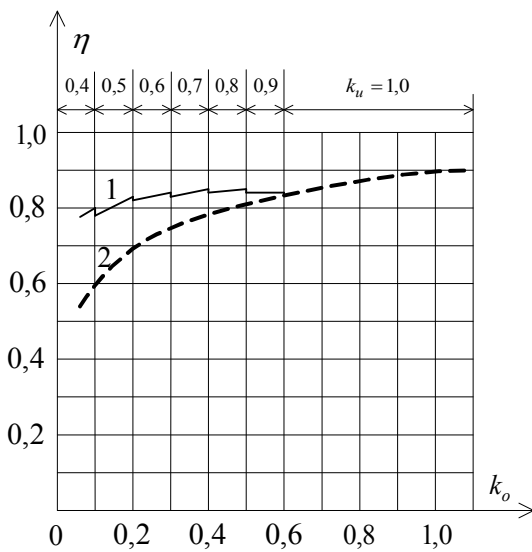


Rys. 1. Przebiegi prądu pobieranego przez silnik I_s przy skokowo regulowanym napięciu – krzywa 1 oraz przy napięciu znamionowym – przebieg 2



Rys. 2. Zależność współczynnika mocy $\cos \varphi$ od wartości względnego obciążenia k_o (przebieg 1 odpowiada napięciu regulowanemu skokowo oraz napięciu znamionowemu – przebieg 2)

Jak wynika z zamieszczonych powyżej przebiegów współczynnik mocy osiąga największą wartość przy obciążeniu $k_o = 0,2$, natomiast dla wartości obciążenia $k_o > 0,2$ współczynnik mocy maleje.



Rys.3. Zmiana sprawności η w funkcji względnego obciążenia k_o dla 7 zakresów zmian napięcia (przebieg 1) oraz przy napięciu znamionowym (przebieg 2)

Przedstawione przebiegi wskaźników energetycznych świadczą o tym, że obniżanie napięcia w miarę zmniejszania obciążenia powoduje ich znaczny wzrost oraz zmniejszenie wartości prądu pobieranego przez silnik.

3. Określenie zakresu pracy energooszczędnej

Przy obliczaniu spodziewanej oszczędności energii elektrycznej w przypadku silnika zasilanego skokowo zmieniając się napięciem, podstawowym kryterium jest bilans mocy [1], [3], [5].

Określa się moc pobraną przy napięciu znamionowym oraz każdorazowo dla napięcia obniżonego. Różnica tych wartości ΔP odniesiona do mocy pobranej przy napięciu znamionowym P_1 jest oszczędnością energii S_p (1):

$$S_p = \frac{\Delta P}{P_1} = \frac{k_{Fe}(1 - k_u^2) + k_r k_0^2 \left(1 - \frac{1}{k_u^2}\right)}{k_0 + k_{Fe} + k_r k_0^2 + k_m} \quad (1)$$

We wzorze (1) współczynniki: $k_{Fe} = \frac{P_{FeN}}{P_N}$,

$k_r = \frac{P_{UN}}{P_N}$, $k_m = \frac{P_m}{P_N}$ wyrażają odpowiednio

straty mocy w rdzeniu przy napięciu zna-

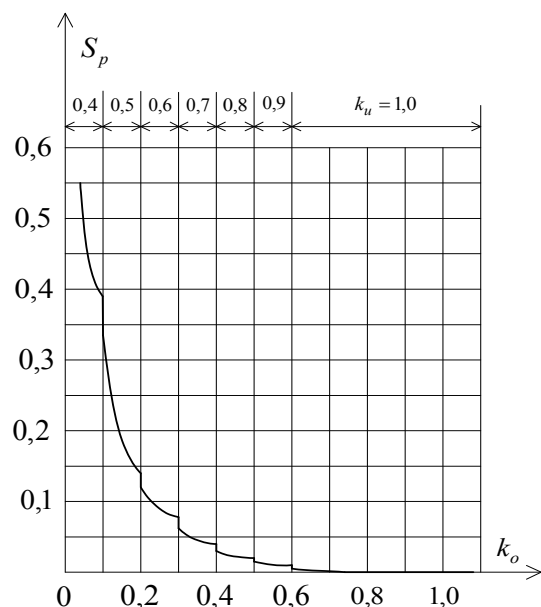
mionowym P_{FeN} , znamionowe straty w uzwojeniach P_{UN} oraz straty mechaniczne P_m odniesione do mocy znamionowej P_N .

Zakres pracy energooszczędnej dla danego silnika ($S_p = 0$) stanowi przedział obciążeń $0 \leq k_0 \leq k_{o,max}$ w którym jest możliwa praca energooszczędna, natomiast $k_{o,max}$ jest największym obciążeniem dla którego kończy się ten rodzaj pracy.

Związek pomiędzy znamionowymi stratami w uzwojeniach i stratami jałowymi określony jest wyrażeniem (2):

$$k_s = \frac{P_{UN}}{P_{FeN} + P_m} = \frac{k_r}{k_{Fe} + k_m} \quad (2)$$

Pozwala on na wyznaczenie największej wartości obciążenia $k_{o,max}$. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń największy zakres pracy energooszczędnej $0 \leq k_{o,max} \leq 0,7$ można uzyskać dla silników w których $k_s \approx 1,25$. Pierwszy stopień regulacji skokowej napięcia stanowi zasilanie silnika napięciem znamionowym $k_u = 1$ i powinien on obejmować zakres obciążeń $k_{o,max} \leq k_o \leq 1$.



Rys. 4. Zmiana oszczędności mocy dla różnych wartości obciążeń silnika przy regulowanym skokowo napięciu

W pozostałym zakresie $0 \leq k_o \leq k_{o\max}$ liczba stopni regulacji napięcia może być różna w zależności od zmian obciążenia i czasu ich trwania. Rysunek 4 obrazuje zmianę oszczędności energii elektrycznej dla omawianego silnika przy skokowo zmieniającym się napięciu. Przebieg oszczędności mocy charakteryzuje się tym, że przy obniżaniu napięcia następuje skokowy wzrost oszczędności.

Zmiana oszczędności mocy jest większa przy mniejszych obciążeniach, dlatego też celowym jest obniżanie napięcia przy mniejszych obciążeniach.

4. Wnioski

Współczynnik mocy w odróżnieniu od sprawności w większym stopniu zależy od napięcia, dlatego też przy obniżaniu napięcia następuje większy skok wartości tego współczynnika. Przedstawione przebiegi oszczędności mocy, wskaźników energetycznych świadczą o tym że obniżanie napięcia w miarę zmniejszania obciążenia powoduje ich znaczny wzrost.

Racjonalna praca silnika indukcyjnego przy skokowej regulacji napięcia jest celowa i możliwa o ile nie następuje wówczas wzrost mocy czynnej pobieranej z sieci.

Liczbę stopni obniżania napięcia dobiera się na podstawie czasowego przebiegu obciążenia silnika. Nie powinna ona być jednak zbyt duża i powinna wynosić $5 \div 7$. W przypadku gdy zakres pracy energooszczędnej nie jest zbyt duży ($k_o = 0 \div 0,4$) to obniżanie napięcia można rozpocząć przy obciążeniu np. $k_o = 0,6$. Obniżanie napięcia zasilającego silnik pracujący w ciągu technologicznym powoduje racjonalizację jego pracy oraz oszczędność energii całej grupy maszyn.

5. Literatura

- [1]. Dubicki B.: *Maszyny Elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, PWN, Warszawa 1964r.
- [2]. Kozłowski H. S., Turowski B.: *Silniki indukcyjne*, WNT Warszawa 1968r.
- [3]. Krygier J.: *Zagadnienia energooszczędnej pracy trójfazowych silników asynchronicznych klatkowych*, Prace naukowe Politechniki Szczecińskiej, Nr 494, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1992r.
- [4]. Krygier J.: *Zasady pracy optymalnej silnika asynchronicznego*, Przegląd Elektrotechniczny, 1992 r., nr 8, s. 169-174.
- [5]. Zielińska M.J., Szewc M., Zieliński W., Jahółkowski K.: *Wybrane zagadnienia pracy energooszczędnej silników indukcyjnych*, IV Symposium Naukowe: Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM 2001 r., Lublin 9-10 maja 2001 r., s. 59-64.

[6]. Zielińska M.J., Zieliński W.G.: *Wybrane algorytmy regulacji napięcia zastosowane przy energooszczędnej pracy silników indukcyjnych*. XIII Seminarium Techniczne BOBRME Komel, Ustroń 2004, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Katowice 69/2004.