

Henryk Banach
Politechnika Lubelska

PRACA OPTYMALNA INDUKCYJNEGO SILNIKA KLATKOWEGO DUŻEJ MOCY

OPTIMAL OPERATION OF HIGH POWER INDUCTION CAGE MOTOR

Streszczenie: Praca optymalna indukcyjnego silnika klatkowego związana jest z procesem minimalizacji strat mocy dla danego obciążenia. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. Badania te przeprowadzono w oparciu o zmodyfikowany schemat zastępczy z uwzględnieniem nieliniowości obwodu magnetycznego i dodatkowych strat obciążeniowych. Wyniki symulacji przedstawiono w postaci wykresów obrazujących napięcie optymalne, prądy optymalne, sprawność optymalną, optymalny współczynnik mocy oraz poszczególne straty mocy w funkcji mocy wydawanej na wale silnika.

Abstract: The optimal operation means that an induction cage motor operates with minimum losses for given output power. In the article results of an optimal operation of the simulation research are shown. The simulation was made on the basis of modified nonlinear equivalent circuit in which stray losses were taken into account. The simulation results are illustrated in form of several characteristics like optimal voltage, optimal currents, optimal efficiency, optimal power factor and particular losses in function of output power.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, praca optymalna, minimalizacja strat mocy

Keywords: induction cage motor, optimal operation, losses minimization

1. Wstęp

W silnikach indukcyjnych pracujących w warunkach zmiennego obciążenia istnieje możliwość poprawy sprawności przez dobór wartości napięcia zasilającego odpowiednio do aktualnego obciążenia. Ta wartość napięcia zasilającego zwana napięciem optymalnym powoduje, że straty całkowite w maszynie dla danej wartości obciążenia osiągają minimum maksymalizując tym samym sprawność silnika.

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych indukcyjnego silnika klatkowego dużej mocy w funkcji obciążenia dla częstotliwości 50 Hz. W przypadku silnika o tak dużej mocy przeprowadzenie badań symulacyjnych jest znacznie łatwiejsze niż badań laboratoryjnych, które wymagałyby zastosowania źródła napięcia o regulowanej wartości i dużej mocy. Poprzez porównanie sprawności silnika zasilanego napięciem znamionowym oraz napięciem optymalnym wykazano korzyści wynikające z minimalizacji strat mocy.

2. Obliczenia wstępne

Obliczenia te są niezbędne dla sporządzenia schematu zastępczego i zostały przeprowadzone dla silnika o danych:

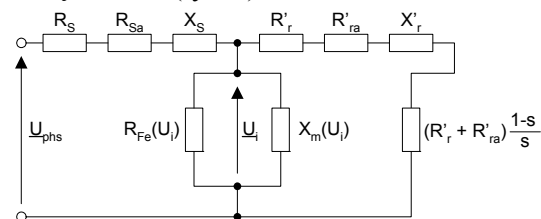
Typ: 2SGPk 315-4,
 $P_N = 132$ kW,
 $U_N = 1000$ V,
 $I_N = 95$ A,

$$n_N = 1465 \text{ min}^{-1},$$

$$\cos\varphi_N = 0,86,$$

rodzaj pracy: S1, S3 – 60%

W celu wyznaczenia parametrów schematu zastępczego skorzystano z wyników próby biegu jałowego i próby zwarcia przedstawionych w [5,8]. Obliczenia przeprowadzono w oparciu o klasyczny schemat zastępczy, wzbogacony zgodnie z sugestiami autorów publikacji [1,4] o dodatkowe rezystancje R_{Sa} oraz R'_{ra} reprezentujące straty dodatkowe obciążeniowe (rys. 1).



Rys. 1. Zmodyfikowany schemat zastępczy silnika indukcyjnego

Reaktancje rozproszenia uzwojeń stojana X_S i wirnika X'_r obliczono na podstawie pomierzonej reaktancji zwarcia X_K , zakładając, że:

$$X_S = X'_r = \frac{X_K}{2} \quad (1)$$

Uwzględnienie dodatkowych strat obciążeniowych nastąpiło przez wprowadzenie do obwodu stojana rezystancji R_{Sa} a do obwodu wirnika rezystancji R'_{ra} . Założono, że straty te rozkładają się po połowie na stojan i wirnik.

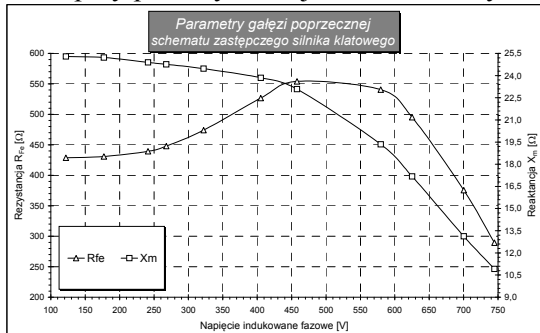
Przyjęto, zgodnie z [3], że znamionowe dodatkowe straty obciążeniowe wynoszą 1,5% mocy znamionowej silnika. Związane z nimi rezystancje wyznaczono następująco:

$$R_{Sa} = \frac{1}{2} \frac{P_{aLN}}{I_{SN}^2} \quad (2)$$

$$R'_{ra} = \frac{1}{2} \frac{P_{aLN}}{(I'_{rN})^2} \quad (3)$$

gdzie I_{SN} – znamionowy prąd stojana, I'_{rN} – znamionowy sprowadzony prąd wirnika.

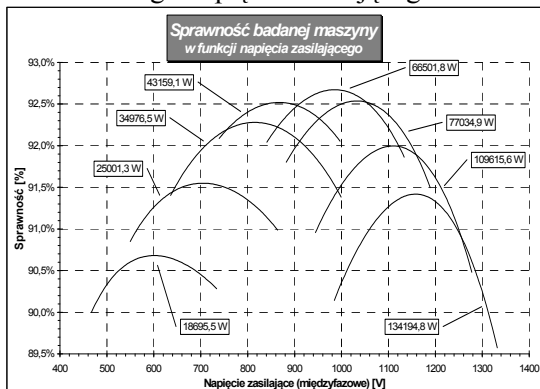
Na podstawie wyników z próby biegu jałowego określono zmiany rezystancji R_{Fe} reprezentującej straty w żelazie, jak również zmiany reaktancji magnesującej X_m w funkcji napięcia indukowanego U_i (rys. 2). Punkty otrzymane na podstawie pomiarów i obliczeń interpolowano przy pomocy funkcji wielomianowych.



Rys. 2. Zmiany rezystancji R_{Fe} i reaktancji X_m w funkcji napięcia indukowanego

3. Badania strat i sprawności

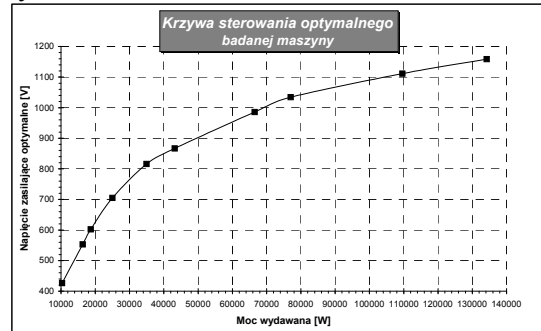
W oparciu o zaprezentowany schemat zastępczy dokonano obliczeń symulacyjnych dla sinusoidalnego napięcia zasilającego.



Rys. 3. Zmiany sprawności silnika w funkcji napięcia zasilającego dla stałej wartości mocy wydawanej

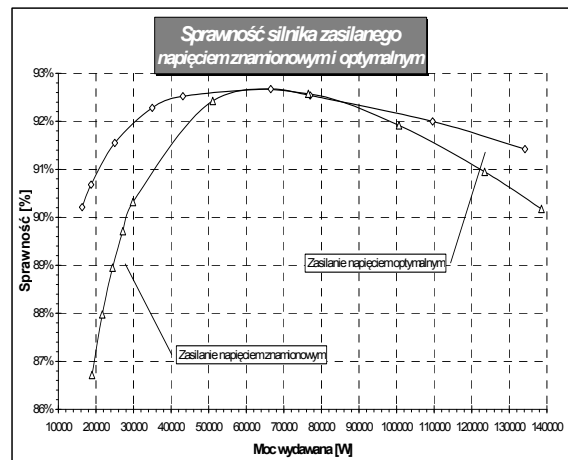
Dla wybranych kilku wartości mocy wydawanej P wyznaczono sprawność silnika w funkcji napięcia zasilającego. Wartość napięcia od-

powiadająca maksymalnej sprawności była określana jako napięcie optymalne. Na podstawie powyższych charakterystyk sporządzono wykres charakterystyki sterowania czyli napięcia optymalnego w funkcji mocy wydawanej na wale silnika. Przedstawiono ją na rys. 4.



Rys. 4. Krzywa sterowania $U_{opt} = f(P)$ dla pracy optymalnej silnika

Aby móc ocenić poprawę sprawności silnika w warunkach pracy optymalnej, na rys. 5 dokonano porównania sprawności silnika zasilanego napięciem znamionowym oraz sprawności przy pracy z poślizgiem optymalnym.

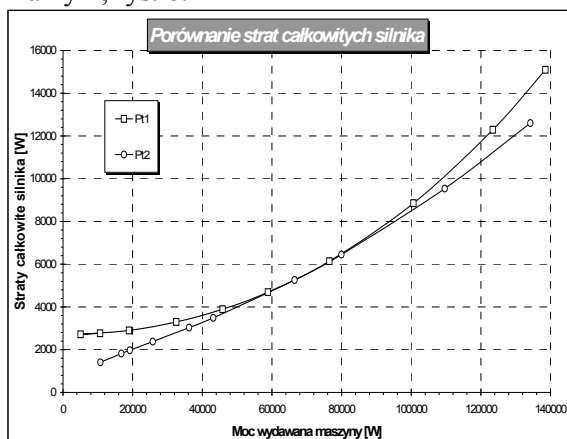


Rys. 5. Sprawność silnika zasilanego napięciem znamionowym oraz napięciem optymalnym

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że w przypadku obciążeń leżących w zakresie 50 - 85 kW możliwości zmniejszenia strat przez regulację napięcia są praktycznie znikome. Korzystniejszą sytuację uzyskuje się dla obciążeń niewielkich jak również obciążeń bliskich mocy znamionowej

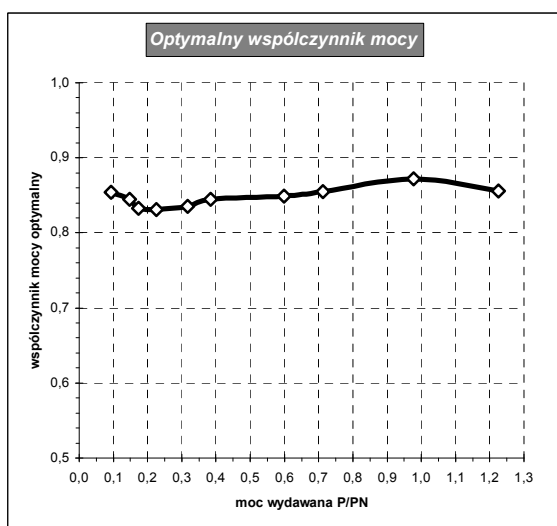
Poprawa sprawności silnika wiąże się ze zmniejszeniem strat. W celu obiektywnej oceny możliwości wpływania na ich wartość, przedstawiono straty całkowite silnika w funkcji obciążenia dla silnika zasilanego

napięciem znamionowym i napięciem optymalnym, rys. 6.



Rys. 6. Straty całkowite silnika zasilanego napięciem znamionowym P_{11} i napięciem optymalnym P_{12}

W obu granicznych przypadkach istnieje potencjalna możliwość obniżenia strat całkowitych o maksymalną wartość bliską 1,7 kW. Zbadano również wartości współczynnika mocy przy pracy optymalnej. Okazało się, że współczynnik mocy w warunkach pracy optymalnej, przy zmianach obciążenia od biegu jałowego aż po obciążenie znamionowe zmienia się w niewielkich granicach, rys. 7

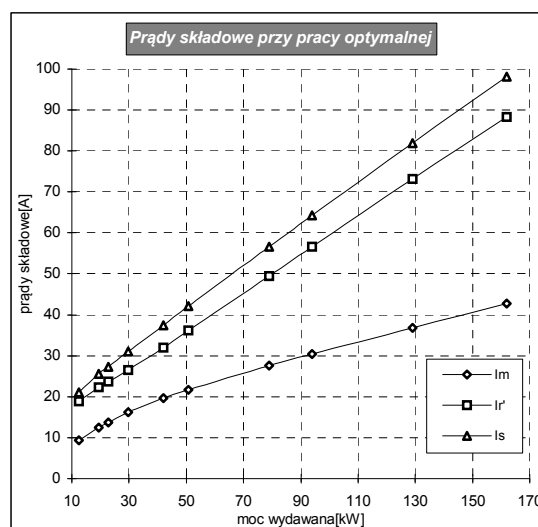


Rys. 7. Współczynnik mocy silnika zasilanego napięciem optymalnym

Jego uśredniona wartość dla całego zakresu obciążeń jest bliska wartości znamionowej $\cos\varphi_N=0,86$. Podobnie zachowuje się współczynnik mocy w małych silnikach indukcyjnych. Zmiany $\cos\varphi$ przy pracy optymalnej są niewielkie i praktycznie niezależne od częstotliwości [6]. Analogicznie zachowuje się też

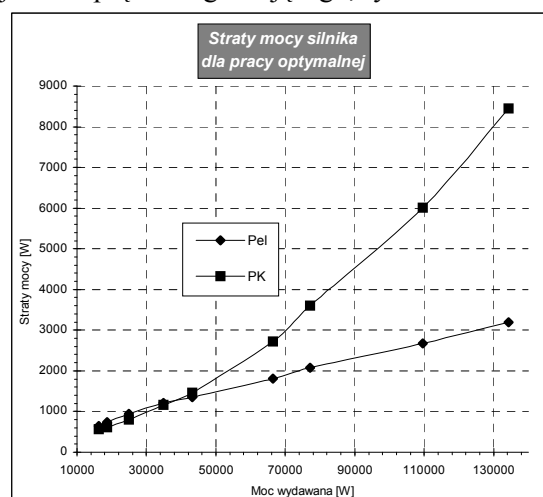
współczynnik mocy w trójfazowym silniku reluktancyjnym. Jego stała wartość jest niezależna od częstotliwości [7].

Interesującym jest, jak zmieniają się wartości prądów w silniku zasilanym napięciem optymalnym dla całego zakresu obciążeń. Dotyczy to prądu wirnika, prądu magnesującego oraz prądu stojana, rys. 8.



Rys. 8. Prąd wirnika I_r' , prąd magnesujący I_m oraz wypadkowy prąd stojana I_s w warunkach pracy optymalnej

Dla silnika tego można również dokonać porównania strat wywołanych prądem wirnika w uzwojeniach oraz strat które można nazwać elektromagnetycznymi, na które składają się straty w rdzeniu oraz straty w uzwojeniu stojana od prądu magnesującego, rys. 9.



Rys. 9. Straty elektromagnetyczne P_{el} i straty w uzwojeniach od prądu wirnika P_K

Straty od prądu wirnika będą równe:

$$P_K = 3I_r'^2(R_s + R_r'), \quad (4)$$

natomiast straty elektromagnetyczne:

$$P_{el} = 3R_s I_m^2 + P_{Fe} \quad (5)$$

Analiza tych strat wskazuje na to, że ich stosunek zmienia się wraz ze zmianami obciążenia. Dla niewielkich obciążeń stosunek ten jest praktycznie równy jedności, natomiast dla obciążenia znamionowego P_K/P_e przekracza dwa.

4. Wnioski

Przeprowadzone badania symulacyjne dla silnika dużej mocy $P_N = 132 \text{ kW}$ w warunkach pracy optymalnej, pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Mimo płaskiego przebiegu charakterystyk sprawności dla silników dużej mocy istnieje możliwość pewnej niewielkiej poprawy ich sprawności przez odpowiednie sterowanie napięciem zasilającym stosownie do aktualnego obciążenia.
2. Z przedstawionych charakterystyk sprawności i strat wynika, że dla obciążeń większych od $0,5 P_N$ można realizować pracę optymalną przez zasilanie silnika napięciem większym niż napięcie znamionowe $U_N = 1 \text{ kV}$. Praktycznie nie powinno się dopuszczać pracy przy napięciu wyższym od znamionowego ze względu na narażenie izolacji maszyny. Wobec tego niemożliwa jest minimalizacja strat mocy dla obciążeń bliskich obciążeniu znamionowemu.
3. Gdyby badany silnik był tak skonstruowany, że dla obciążenia i napięcia znamionowego posiadałby sprawność optymalną, to wówczas możliwy byłby proces minimalizacji strat w całym zakresie obciążeń.
4. W silniku indukcyjnym dużej mocy współczynnik mocy dla pracy optymalnej zmienia się w niewielkim zakresie przy zmianach obciążenia i wydaje się to być cechą charakterystyczną dla maszyn indukcyjnych [6].
5. Prąd wirnika, prąd magnesujący jak również prąd stojana zmieniają się praktycznie liniowo w zakresie średnich i dużych obciążeń.
6. Badany silnik wykazuje sprawność optymalną, gdy relacja strat P_K/P_e przekracza dwa. Taką relację strat można osiągnąć w badanym silniku dopiero przy napięciu w przybliżeniu równym $U=1170 \text{ V}$.

5. Literatura

- [1] Kirschen D. S., Novotny D. W., Suwanwisoot W.: *Minimizing Induction Motor Losses by Excitation Control in Variable Frequency Drives*. IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-20, No 5, 1984 p. 1244-1250
- [2] Kioskeridis I., Marqaris N.: *Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives*. IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 43, No 1, 1996, p. 226 – 231
- [3] Jakubiec M.: Efektywność energetyczna silników indukcyjnych, Wiadomości Elektrotechniczne, 1999 nr 6, s. 286 – 292.
- [4] Jian T. W., Schmitz N. L. Novotny D. W.: *Characteristic Induction Motor Slip Values for Variable Voltage Part Load Performance Optimization*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-102, No 1, 1983, p. 38 – 45
- [5] [-] Sprawozdanie nr TL/04/98 z przeprowadzonych prób pełnych silnika typu: 2SGPk 315-4 o parametrach 132 kW, 1000 V, 50 Hz, Przedsiębiorstwo Remontowo-Produkcyjne Górniczych Maszyn Elektrycznych „Damel”
- [6] Banach H.: *Współczynnik mocy indukcyjnego silnika klatkowego pracującego z minimalnymi stratami*. Proceedings of XL International Symposium on Electrical Machines SME 2004, Hajnówka 15-18.06.2004, s.56-57
- [7] Banach H.: *Minimalizacja strat mocy w trójfazowym synchronicznym silniku reluktancyjnym*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne, Nr 94/2012, wyd. BOBRME Komel, s.139-143
- [8] Banach H., Drob M.: *Poślizg optymalny indukcyjnego silnika klatkowego dużej mocy*. Zeszyty Problem.-Maszyny Elektryczne, Nr 64/2002, wyd. BOBRME Komel, s.15-17

Autor

Dr inż. Henryk Banach
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul.Nadbystrzycka 38 A
20-618 Lublin
tel. 81 / 538-46-06 e-mail:h.banach@pollub.pl

Recenzent

dr hab. inż. Piotr Gnaciński