

Henryk Banach
 Politechnika Lubelska, Lublin

OPTIMALIZACJA SPRAWNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO Z ZASTOSOWANIEM KRYTERIUM MINIMALNEGO PRĄDU STOJANA

EFFICIENCY OPTIMIZATION OF AN INDUCTION MOTOR USING THE CRITERION OF MINIMAL STATOR CURRENT

Abstract: Control strategy which optimized efficiency of induction motor can function using many different criteria. One of them is the criterion of minimal stator current. On the basis of laboratory tests as well as theoretical analysis it was proven that an equivalent criterion of the minimum of total losses was a criterion of the minimal stator current. Laboratory tests were conducted with using the squirrel-cage induction motor about the power $P_N = 1,1 \text{ kW}$ and the rotation speed $n_N = 1415 \text{ rev/min}$. Control strategy of efficiency optimization which use the criterion of minimal stator current would be straightest in the technical realization. Unfortunately, time of investigation would be for minimal value of stator current enough rather long. This process would be disturbed and extended by stochastic changes of supplying parameters and stochastic changes of motor load.

1. Wstęp

Optimalizacja sprawności rozumiana jest tutaj jako poprawa sprawności silników indukcyjnych pracujących ze zmiennym obciążeniem. Poprzez dobór odpowiednich parametrów zasilania takich jak napięcie bądź składowe prądu stojana można minimalizować straty w silniku indukcyjnym dla każdej wartości obciążenia. Strategie sterowania optymalizujące sprawność silnika mogą być oparte na różnych kryteriach. Jednym z nich jest kryterium minimalnego prądu stojana [1,2].

Jeżeli założy się liniowość obwodu magnetycznego silnika, to minimum prądu stojana dla założonej wartości momentu elektromagnetycznego i prędkości kątovej wystąpi przy równości prądu magnesującego I_m i sprowadzonego prądu wirnika I_r [2]:

$$I_m = I_r \quad (1)$$

Jeżeli uwzględni się nieliniowość obwodu magnetycznego maszyny, to wówczas dla założonej wartości mocy na wale silnika i częstotliwości napięcia zasilającego, minimum prądu stojana I_s wystąpi dla następujących relacji pomiędzy składowymi;

$$I_m = I_r I_r'' \quad (2)$$

Prąd wirnika wyrażony jest zależnością

$$I_r = \frac{3U_i - \sqrt{9U_i^2 - 12R_r(P + P_m)}}{6R_r} \quad (3)$$

gdzie:

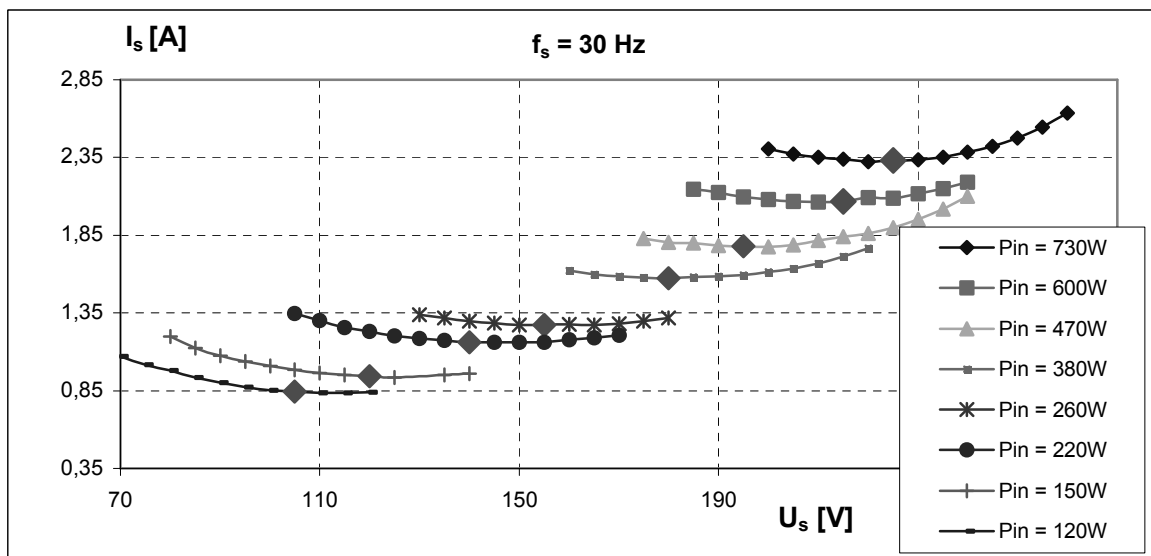
- U_i – napięcie indukowane wyrażone jako funkcja prądu magnesującego,
- R_r – sprowadzona na stronę stojana rezystancja uzwojenia wirnika,
- P – założona wartość mocy na wale,
- P_m – straty mechaniczne silnika przyjęte jako stałe dla założonej częstotliwości napięcia zasilającego,
- I_r' – pochodna prądu wirnika po prądzie magnesującym.

Wyprowadzenie na podstawie którego dochodzi się do zależności (2) zostało tutaj pominięte ze względu na jego obszerność i dość skomplikowany charakter. Ponieważ zastosowanie kryterium minimalnego prądu w procesie optymalizacji sprawności może budzić pewne wątpliwości co do dokładności tego procesu, uznano za słuszne sprawdzenie tego kryterium przez przeprowadzenie odpowiednich badań laboratoryjnych.

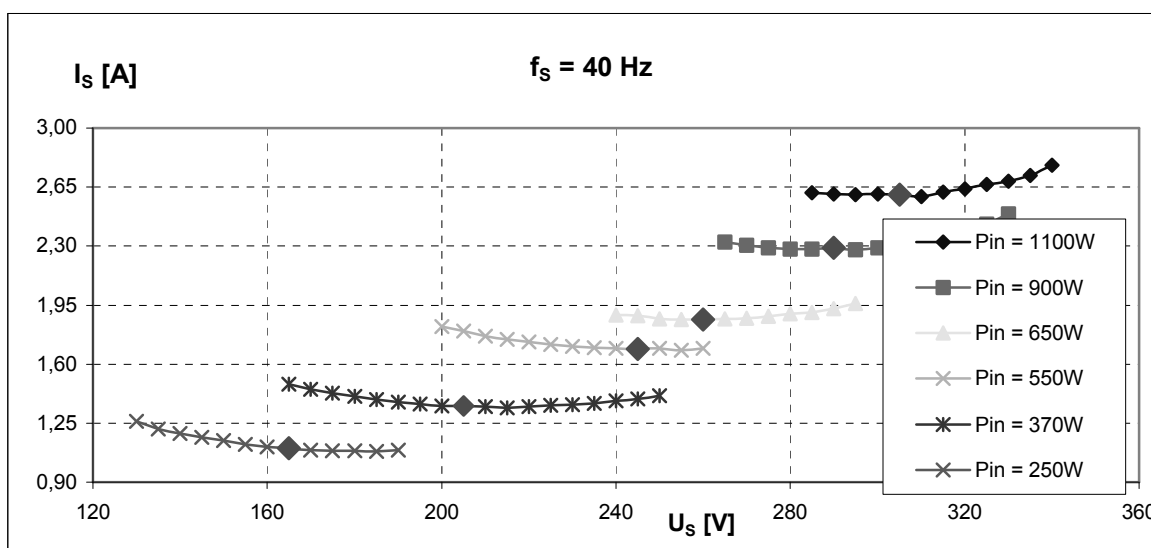
2. Badania laboratoryjne

Do badań użyto silnika klatkowego małej mocy produkcji firmy „Tamel” o następujących danych znamionowych:

- Typ Sg 90 S4
- $P_N = 1,1 \text{ kW}$
- $U_N = 220/380 \text{ V}$
- $I_N = 4,9/2,8 \text{ A}$
- $n_N = 1415 \text{ obr/min.}$
- $\cos \varphi = 0,8$
- praca *SI*



Rys. 1. Prąd stojana silnika klatkowego I_s w funkcji zmian napięcia zasilającego U_s dla $f_s = 30$ Hz



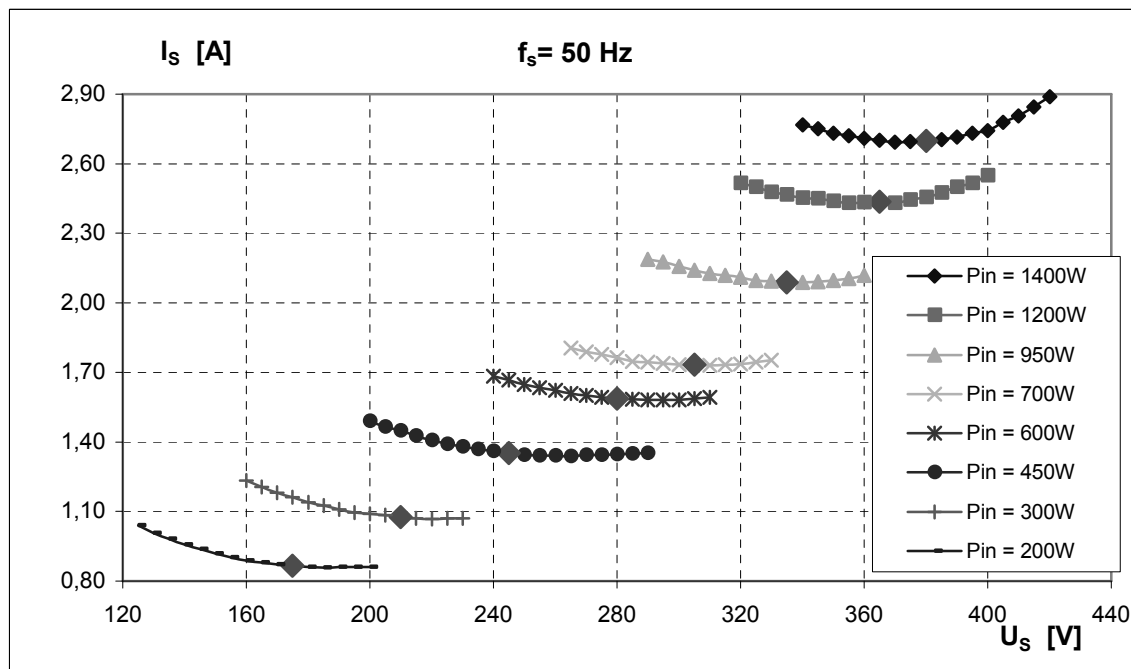
Rys. 2. Prąd stojana silnika klatkowego I_s w funkcji zmian napięcia zasilającego U_s dla $f_s = 40$ Hz

Badania sprawności silnika klatkowego przeprowadzono dla kilku wybranych częstotliwości napięcia zasilającego $f_s = 50, 40, 30$ Hz. Zmianę częstotliwości uzyskiwano przez zastosowanie układu zasilającego w postaci zespołu maszynowego: prądnica synchroniczna - silnik prądu stałego. Powyżej i poniżej przedstawiono kilka wykresów prądu stojana w funkcji napięcia zasilającego przy założonych wartościach mocy pobieranej. Przez zastosowanie miernika parametrów sieci N10 możliwy był pomiar mocy pobieranej przez silnik i możliwość utrzymywania stałej mocy pobieranej

przez nastawianie obciążenia hamownicy prądu stałego [7].

Na przedstawionych wykresach prądu stojana zaznaczono rombem wartości prądu dla których silnik osiągnął maksymalną sprawność dla założonej mocy pobieranej.

Stwierdza się, że wartości minimalne prądu pokrywają się w większości z wartościami prądu dla których występuje maksymalna sprawność silnika. Dla pewnych wartości mocy pobieranej występują niewielkie rozbieżności odnośnie wartości prądu stojana.



Rys. 3. Prąd stojana silnika klatkowego I_s w funkcji zmian napięcia zasilającego U_s dla $f_s = 50$ Hz

Potwierdza to tezę, że ogólnie minimalnej wartości prądu stojana uzyskiwanej przez zmianę napięcia zasilającego przy założonej stałej wartości mocy pobieranej odpowiada maksymalna sprawność silnika klatkowego.

W literaturze brak dowodu tej tezy, a korzystanie z takiego kryterium przy badaniach sprawności maksymalnej silnika indukcyjnego wyniknęło przypuszczalnie ze spostrzeżeń przy prowadzeniu badań laboratoryjnych.

W sposób pośredni można to wykazać przez analizę warunku na występowanie minimum strat silnika przy zadanej mocy na wale [3,4].

$$3(R_s + R_r)I_r^2(\ln I_r)' = 3R_s I_m^2(\ln I_m)' + \frac{1}{2}P_{Fe}(\ln P_{Fe})' \quad (4)$$

gdzie:

R_r - rezystancja uzwojenia wirnika sprowadzona na stronę stojana,

$(R_s + R_r)I_r^2$ - straty na rezystancjach uzwojeń od sprowadzonego na stronę stojana prądu wirnika I_r ,

$3R_s I_m^2$ - straty w uzwojeniu stojana od prądu magnesującego I_m ,

P_{Fe} - straty w żelazie.

Zależność pomiędzy prądami składowymi (2) może być przekształcona do postaci

$$I_r^2(\ln I_r)' = I_m^2(\ln I_m)' \quad (5)$$

Z przedstawionego równania (5) wynika, że prąd stojana osiągnie wartość minimalną, jeżeli jego prądy składowe będą w takiej relacji jak powyżej. Jeżeli porówna się wyrażenie (4) stanowiące warunek na minimum strat przy zadanej mocy obciążenia, to prądy występujące w tym równaniu również pozostają w takiej samej relacji, jak w zależności (5) wyprowadzonej powyżej. Wynikiem tych teoretycznych porównań jest wniosek, że zachowanie tych samych relacji pomiędzy prądami jest równoznaczne z zachowaniem takich samych relacji strat warunkujących otrzymanie maksymalnej sprawności silnika.

Strategia sterowania wg minimum prądu stojana byłaby najprostszą w technicznej realizacji. Zbudowany układ kontrolowałby tylko jedną wielkość jaką byłby prąd stojana. Poprzez zastosowanie strategii poszukiwawczej polegającej na stopniowych, niewielkich zmianach napięcia zasilającego układ optymalizacyjny dochodziłby do minimum prądu stojana. Niestety to tak proste rozwiązanie ma poważną wadę. Wadą tą jest stosunkowo mała wrażliwość prądu stojana na zmiany napięcia zasilającego.

jącego w otoczeniu minimum tego prądu. Mimo relatywnie dużych zmian napięcia zasilającego towarzyszące im zmiany prądu są minimalne. Widoczne jest to na przedstawionych wykresach, rys.1, rys.2, rys.3. To niekorzystne zjawisko pogłębia się wraz ze zmniejszaniem częstotliwości napięcia zasilającego czyli ze zmniejszaniem mocy wydawanej. Przy technicznej realizacji układu proces dochodzenia do minimalnej wartości prądu stojana mógłby się bardzo wydłużyć, a dodatkowo zakłócałyby ten proces fluktuacje prądu związane ze stochastycznymi zmianami parametrów zasilania i obciążenia silnika [6].

3. Wnioski

Przedstawione rozważania dotyczące oceny strategii optymalizującej sprawność silnika klatkowego opartej na kryterium minimalnego prądu stojana prowadzą do następujących wniosków:

- kryterium minimalnego prądu stojana można uznać za równoważne kryterium minimalnych strat całkowitych,
- techniczna realizacja układu optymalizującego sprawność byłaby bardzo prosta ze względu na konieczność śledzenia przez układ tylko jednej wielkości jaką byłby prąd stojana ,
- skuteczna praca powyższego układu z zastosowaniem strategii poszukiwawczej polegającej na stopniowych zmianach napięcia zasilającego wydaje się być bardzo wątpliwa ze względu na fakt, że w otoczeniu minimum prądu stojana jego wartość zmienia się nieznacznie, mimo stosunkowo dużych zmian napięcia zasilającego,
- w przypadku pojawiających się w układzie napędowym stochastycznych zmian parametrów zasilania oraz stochastycznych zmian obciążenia proces dochodzenia do minimum prądu mógłby trwać bardzo długo, uniemożliwiając tym samym sprawne działanie układu.

4. Literatura

- [1]. Krygier J.: *Zagadnienia energooszczędnej pracy trójfazowych silników asynchronicznych klatkowych*. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 494, Szczecin 1992.
- [2]. Gruszczyński P.: *Wybrane zagadnienia optymalizacji statycznej sterowania napędów przekształtnikowych*. Zeszyty Naukowe PG nr 499, Elektryka, Gdańsk 1993.

[3]. Banach H.: *Metoda doboru wartości napięcia zasilającego minimalizującego straty mocy w indukcyjnym silniku klatkowym*. Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne nr 78/2007, wyd. BOBRME Komel str.91-94.

[4]. Banach H.: *Wyznaczanie optymalnych parametrów zasilania dla minimalizacji strat mocy w silniku indukcyjnym*. Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne nr 84/2009, wyd. BOBRME Komel str. 107-112.

[5]. Banach H.: *Optimal operation of a small squirrel-cage induction motor*. Proceedings of XLIII International Symposium on Electrical Machines SME 2007, 2-5 July, Poznań, pp.143-146.

[6]. Kusko A., Galler D.: *Control Means for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-19, No.4, July/August 1983, pp.561-570.

[7]. Banach H.: *Pomiarowe wyznaczanie charakterystyk sterowania silników indukcyjnych pracujących z minimalnymi stratami*. *Pomiary, Automatyka, Kontrola* 2010 (artykuł przyjęty do druku).

Autor

Dr inż. Henryk Banach
Katedra Maszyn i Napędów Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul.Nadbystrzycka 38 A, 20-618 Lublin
tel.(0-81) 538-46-06,
e-mail:h.banach@pollub.pl