

Tadeusz GLINKA
Jakub BERNATT

SILNIK INDUKCYJNY 6-FAZOWY Z NIESYMETRYCZNYM ROZŁOŻENIEM OSI FAZ DO NAPĘDÓW PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH DUŻYCH MOCY

Streszczenie. Artykuł zawiera rozważania dotyczące silników 6-fazowych z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz. Prezentowane są zalety takich silników, szczególnie widoczne, gdy są to silniki dużej mocy przeznaczone do zasilania z przekształtników częstotliwości. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych silnika prototypowego 3/6-fazowego o mocy 50 kW, poprzedzone analizą celowości stosowania uzwojenia 6-fazowego.

SIX-PHASE INDUCTION MOTOR WITH NONSYMMETRIC PHASE AXIS DISTRIBUTION FOR HIGH POWER CONVERTER FED DRIVES

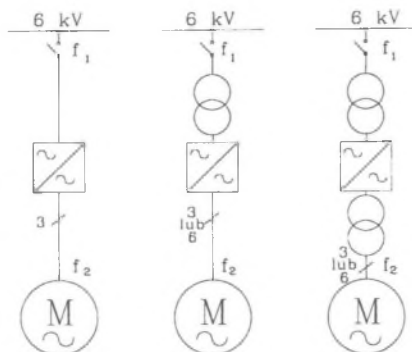
Summary. The paper presents analysis of the 6-phase induction motors designed for frequency converters supply. The advantages of low voltage motors are shown and the advantages of nonsymmetric-axis distribution are given as well. Results of laboratory tests of the 3/6-phase motor rated at 50 kW and the analysis of the advisability of using such motors are presented.

1. WSTĘP

1.1. Charakterystyka układu napędowego dużej mocy o regulowanej prędkości obrotowej z silnikiem indukcyjnym klatkowym

Zmniejszenie zużycia energii elektrycznej przez układ napędowy uzyskać można poprzez realizację pracy napędu przy minimalnej, dopuszczalnej jeszcze ze względów technologicznych prędkości obrotowej. W tym celu napęd, który nie musi pracować przy stałej prędkości obrotowej, wyposaża się w układ regulujący prędkość obrotową. Obecnie standardowym rozwiązaniem takiego napędu jest przemiennik częstotliwości i silnik indukcyjny klatkowy. W zakresie napędów dużej mocy możliwe są trzy warianty rozwiązania: rys. 1.1. Najczęściej stosowanym układem jest ten przedstawiony na rys. 1.1b (przekształtniki o napięciu znamionowym 6 kV nie są jeszcze produkowane na skalę przemysłową). W układzie tym zarówno przemiennik częstotliwości, jak i silnik mają niskie napięcie znamionowe ($U_N < 800$ V). Przy napięciu $U_N < 800$ V nie zachodzi potrzeba szeregowego łączenia elementów energoelektronicznych. Aby uniknąć równoległego łączenia zaworów, można budować przemiennik czę-

stotliwości m-fazowy i zastosować silnik m-fazowy. W zależności od mocy napędu stosuje się układy 3-fazowe ($m = 3$) bądź 6-fazowe ($m = 6$).



Rys.1.1. Różne warianty rozwiązania układu napędowego o regulowanej prędkości obrotowej z silnikiem indukcyjnym klatkowym

Fig.1.1. High power induction motor supplied from frequency converter

Zastosowanie silnika niskonapięciowego jest korzystne, gdyż:

- w tym samym wykoju blachy stojana można zmieścić większy przekrój miedzi w stosunku do uzwojenia wysokonapięciowego,
- większa objętość miedzi to mniejsza gęstość prądu i mniejsze straty mocy czynnej,
- mniejsza grubość izolacji to lepsza wymiana ciepła między uzwojeniem a pakietem blach stojana i między czołami uzwojenia i powietrzem chłodzącym,
- zmniejszenie strat mocy i poprawa odbioru ciepła z uzwojenia obniża temperaturę uzwojenia podczas pracy silnika.

2. PORÓWNANIE WŁASNOŚCI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH NISKIEGO I WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Silniki indukcyjne wykonuje się na napięcia znamionowe niskie (NN - w kraju są to napięcia 220, 380, 500, 660, 690 i 800 V) oraz na napięcia znamionowe wysokie (WN - w kraju 6 kV oraz dla silników najwyższych mocy 10 kV). Umowną granicę między standardowymi silnikami NN i WN stanowi moc 200 - 250 kW. Obecnie jednak, właśnie w związku z coraz powszechniej stosowanym zasilaniem silników dużej mocy z układów przekształtnikowych (realizowanych według wariantu oznaczonego na rys. 1.1 jako „b”), silniki NN wykonywane są aż do mocy 1000 kW i powyżej.

Wielkość napięcia znamionowego decyduje o doborze rodzaju i grubości materiałów izolacyjnych uzwojenia stojana, odstępach izolacyjnych w czołach uzwojeń, a także o rodzaju i przekroju drutu nawojowego.

Silnik WN musi mieć większe wymiary (i większą masę) w porównaniu z silnikiem NN lub przy tych samych wymiarach, silnik WN będzie mieć niższy współczynnik sprawności. W tabeli poniżej podano porównanie wielkości strat w miedzi stojana, strat w żelazie oraz znamionowych współczynników sprawności (wg IEC) dla silników trójfazowych NN-WN tej samej mocy i o tej samej objętości żelaza czynnego.

Tabela 2.1

Porównanie wybranych parametrów silników niskiego i wysokiego napięcia o tych samych wymiarach zewnętrznych

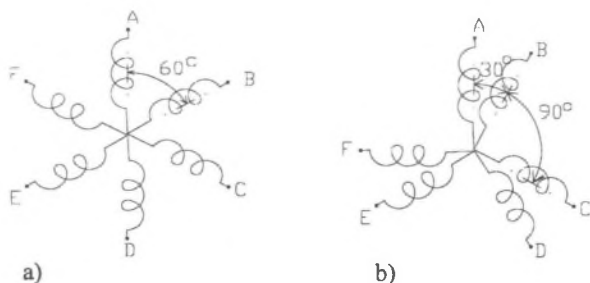
| Typ silnika ⇒ Wielkość | Sf 355 | | Sf 355 spec | Sf 560 | | Sf 560 spec |
|--|-----------------------------------|------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|
| | Napięcie znamion. [V] U = 6000 | U = 800 | U = 380 | U = 6000 | U = 800 | U = 800 |
| Moc znamionowa [kW] | 200 | 200 | 200 | 1400 | 1400 | 1400 |
| ΔP_{Cu1} [W] | 4180 | 2360 | 2021 | 11030 | 7600 | 8230 |
| ΔP_{Fe} [W] | 4400 | 4700 | 2423 | 16320 | 18580 | 14680 |
| η [%] | 92.3 | 93.1 | 95.0 | 96.3 | 96.5 | 96.7 |
| Współczynnik zapętnienia żłobka k_z | 0.28 | 0.46 | 0.60 | 0.43 | 0.55 | 0.58 |
| Kształt żłobka stojana | prostokąt- ny | prostokąt- ny | owalny | prostokąt- ny | prostokąt- ny | prostokąt- ny |

3. UZWOJENIA

3.1. Porównanie uzwojenia 6-fazowego z symetrycznym i niesymetrycznym rozkładem osi

Przebiegi częstotliwości umożliwiają, oprócz regulacji napięcia i zmiany częstotliwości, także zwiększenie liczby faz - na przykład do sześciu. Uzwojenie 6-fazowe można wykonać z symetrycznym rozkładem osi faz na obwodzie, przy kącie elektrycznym między osiami faz 60° (rys. 3.1a), lub też z rozkładem niesymetrycznym - przy kącie między osiami faz uzwojenia wynoszącymi na przemian 30° i 90° (rys 3.1b).

Można wykazać, że w szczelinie silnika z uzwojeniem 6-fazowym o rozkładzie osi faz niesymetrycznym, jak na rys. 3.1b, znikają harmoniczne przestrzenne $v = 6n \pm 1$ dla n nieparzystych, w tym harmoniczne o największej amplitudzie $v = 5$ i $v = 7$, natomiast rozkład symetryczny (rys. 3.1a) nie eliminuje żadnej harmonicznej układu 3-fazowego.



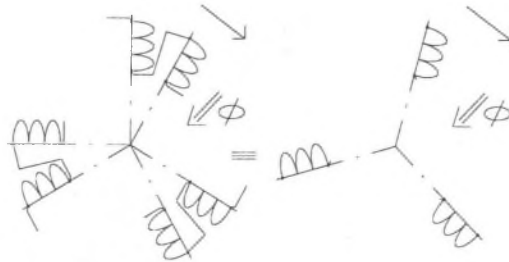
Rys.3.1. Rozkład faz uzwojenia w silniku 6-fazowym: a - symetryczny, b - niesymetryczny
Fig. 3.1. Phase axis distribution in a 6-phase motor: a - symmetric distribution, b - nonsymmetric distribution

4. METODYKA I ALGORYTM OBLICZEŃ ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Metodyka projektowych obliczeń elektromagnetycznych silników 6-fazowych z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz zaprezentowana artykule bazuje na algorytmie i programie obliczeń projektowych silników indukcyjnych 3-fazowych istniejącym w Branżowym Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Maszyn Elektrycznych Komel. Metodyka ta zostanie przedstawiona na przykładzie uzwojenia skróconego o liczbie zębów $Z_1 = 72$ i liczbie biegunów $2p = 4$.

Uzwojenie 6-fazowe można połączyć w układ 3-fazowy poprzez połączenie szeregowo dwóch sąsiednich faz przesuniętych względem siebie o kąt $\frac{\pi}{6}$ (rys 4.1).

Parametry znamionowe projektowanego silnika 6-fazowego są podstawą do określenia parametrów wejściowych do programu obliczeń silników 3-fazowych.



Rys. 4.1. Przejście z układu 6-fazowego na 3-fazowy

Fig. 4.1. Transformation from 6-phase winding into 3-phase winding

Można wykazać, że silnik 6-fazowy może być w przybliżeniu liczony jako silnik 3-fazowy o napięciu znamionowym:

$$U_{jN}^{(3)} = U_{jN}^{(6)} \frac{E_{jN}^{(3)}}{E_{jN}^{(6)}} = 2U_{jN}^{(6)} \frac{k_g^{(3)}}{k_g^{(6)}} \quad (4.1)$$

5. SILNIKI MODELOWE

Zaprojektowano i wykonano dwa silniki 6-fazowe o niesymetrycznym rozkładzie osi faz. W pierwszej kolejności wykonano silnik modelowy o mocy 50 kW, a po przeprowadzeniu jego badań i weryfikacji założeń konstrukcyjnych, silnik w wykonaniu przemysłowym o mocy 1400 kW.

5.1. Silnik modelowy 3/6-fazowy o mocy 50 kW

Aby obniżyć koszty wykonania silnika modelowego, jego konstrukcję oparto na silniku 3-fazowym indukcyjnym klatkowym o mocy 50 kW produkowanym w Zakładach EMIT w Żychlinie. Wybrano silnik, który posiada wykrój blachy stojana z parzystą (dla uzwojenia 3-fazowego) liczbą zębów na biegun i fazę, co pozwala uniknąć kłopotliwego w wykonaniu uzwojenia ułamkowego ($Z_1 = 72$).

Silnik modelowy o mocy 50 kW został wykonany na bazie produkowanych seryjnie silników typu Sgm 280 S6. Nowe, 2-warstwowe uzwojenie stojana zostało wykonane jako 4-biegunowe.

Na specjalną tablicę zaciskową wyprowadzono początki i końce każdej z cewek uzwojenia stojana - umożliwia to przełączanie uzwojenia w układy 3-fazowy symetryczny i 6-fazowe niesymetryczne. W szczelinie silnika umieszczono 3 cewki służące do pomiaru indukcji.

Tabela 5.1

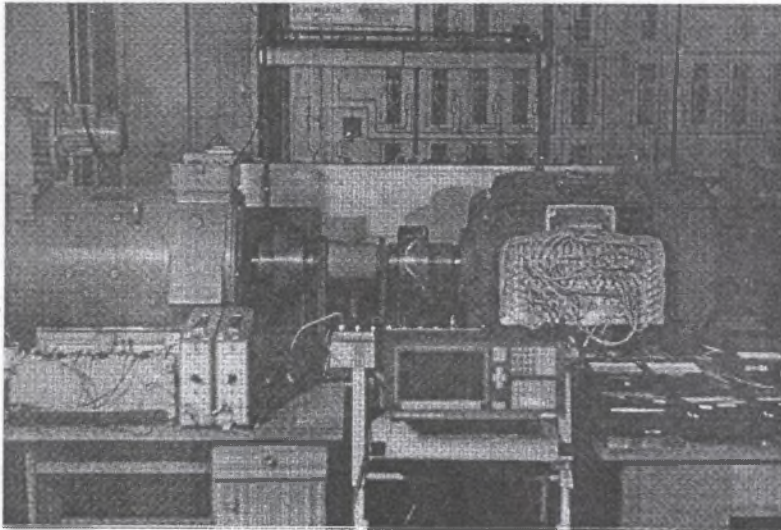
Zestawienie podstawowych obliczonych parametrów silnika modelowego 3/6-fazowego

| Parametr | | Uzwojenie połączone w układ 3-fazowy | Uzwojenie połączone w układ 6-fazowy |
|-----------------|---------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| P_n | kW | 50 | 50 |
| U_n | V | 380 | 196.6 |
| I_n | A | 89.4 | 89.4 |
| ukł połąc. | - | D | 2x D |
| η_n | % | 92,0 | 92.0 |
| $\cos\varphi_n$ | - | 0,92 | 0.92 |
| n_n | obr/min | 1478 | 1478 |
| M_t/M_n | - | 1,39 | 1.39 |
| I_t/I_n | - | 6,6 | 6.6 |
| I_o | A | 19.7 | 18.0 |
| Z_f | - | 96 | 48 |

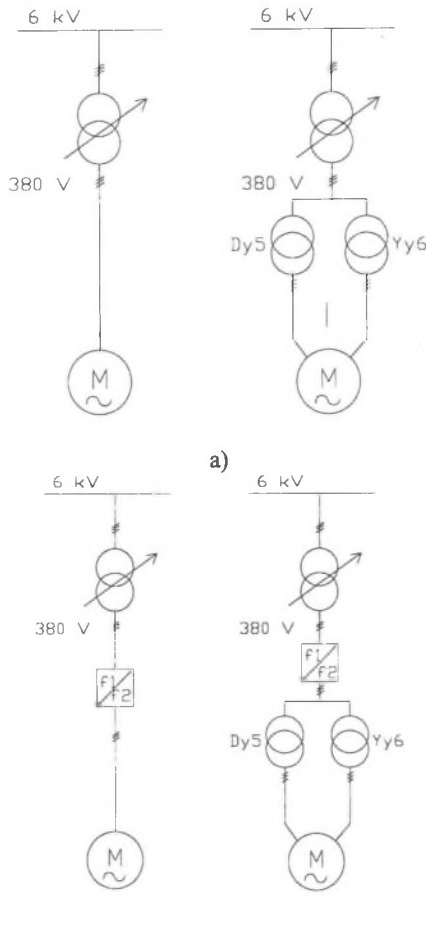
6. BADANIA LABORATORYJNE SILNIKA

6.1. Opis modelu i programu badań

Przygotowany silnik poddano badaniom laboratoryjnym. Badania te w głównym stopniu mają charakter porównawczy przy zasilaniu silnika napięciem 3 i 6-fazowym. Przeprowadzono próby w stanie biegu jałowego, stanie zwarcia oraz badania ruchowe.



Rys. 6.1. Widok stanowiska pomiarowego. Silnik badany znajduje się po prawej stronie
Fig. 6.1. Six-phase induction motor (at right side) during laboratory tests



Rys. 6.2. Schemat układu zasilania: a) - zasilanie sinusoidalne, b) - zasilanie przekształtnikowe

Fig. 6.2. Supply sytem for: a) - grid fed, b) - converter fed

6.2. Wyniki pomiarów

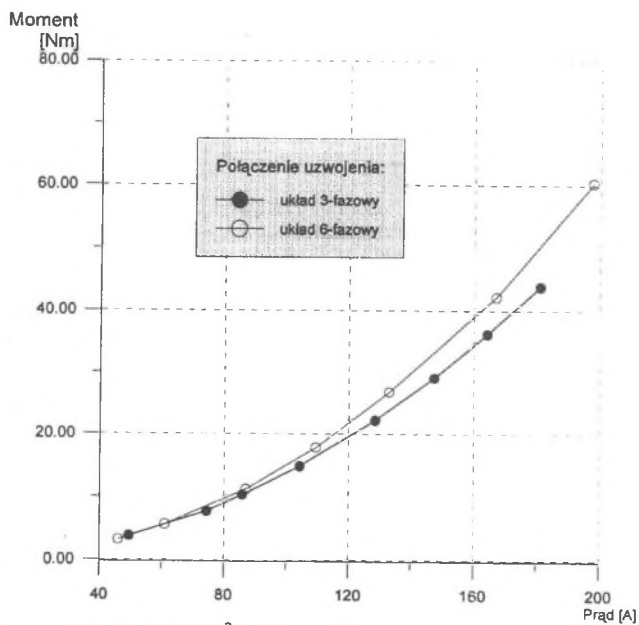
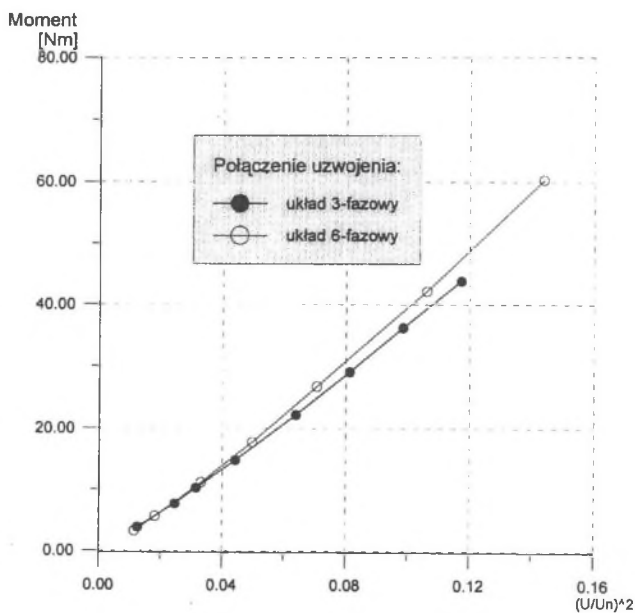
Bieg jałowy

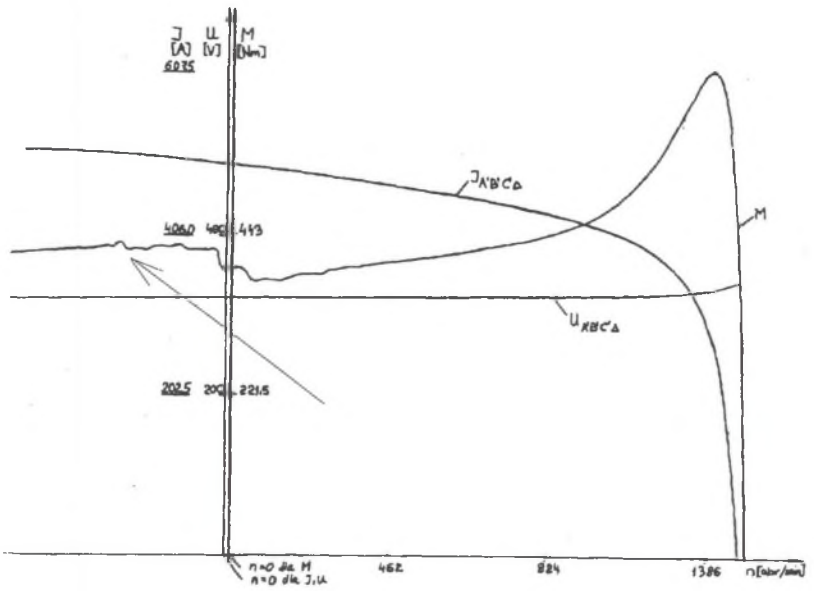
Tabela 6.1

Zestawienie strat biegu jałowego

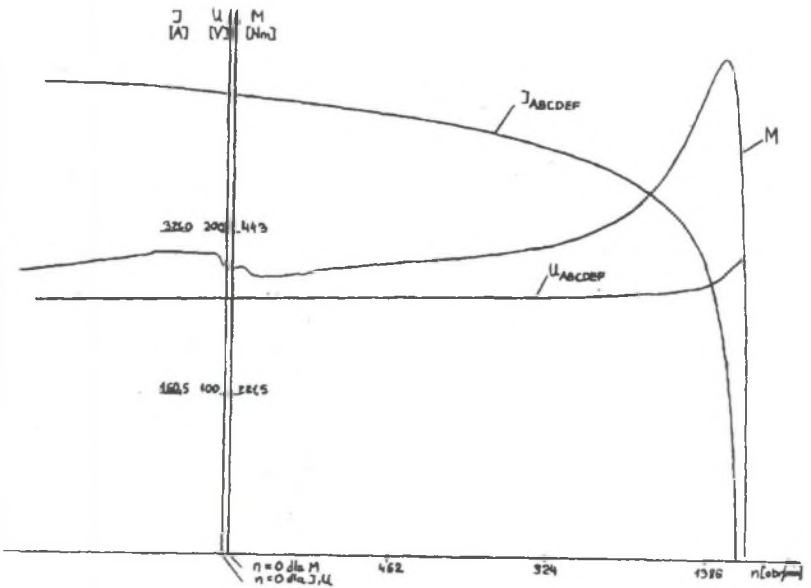
| Układ zasilania | 3-fazowy „pełny” zasilane fazy A'B'C' | 6-fazowy zasilane fazy ABCDEF | Uwagi |
|--|---|-------------------------------------|-----------------|
| Wielkość | | | |
| Napięcie znamion. [V] | 380 | 196.7 | |
| $\Delta P_m + \Delta P_{fe} + \Delta P_{do}$ [W] | 1680 | 1670 | z wentylatorem |
| $\Delta P_m + \Delta P_{fe} + \Delta P_{do}$ [W] | 1010 | 990 | bez wentylatora |

Stan zwarcia

Rys.6.3. Charakterystyka zwarcia $M_L f(U/U_n)^2$ i $M_L = f(I)$ Fig.6.3. Locked rotor characteristics $T_L f(U/U_n)^2$ and $T_L = f(I)$



a)



b)

Rys.6.4. Charakterystyka $M = f(n)$: a) przy pracy 3-fazowej silnika (strzałka wskazuje zniekształcenie powodowane 5-harmoniczną), b) przy pracy 6-fazowej silnika
Fig.6.4. Recorded torque and current as a function of rotation speed: a) during 3-phase operation (the arrow indicates the deformation caused by 5-th space harmonic), b) during 6-phase operation

Tabela 6.2
Parametry silnika podczas stanu zwarcia przy zasilaniu
napięciem znamionowym

| Wielkość | Rodzaj pracy silnika | 3-fazowa | 6-fazowa |
|-----------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | Napięcie znamion. [V] | | 380 |
| Moment rozruch. M_L [N·m] | | 481 | 499 |
| Prąd rozruchowy I_L [A] | | 583 | 579 |

Badania podczas stanu obciążenia silnika przy zasilaniu sinusoidalnym i przekształtnikowym

Wyniki próby nagrzewania i obciążenia przy wyznaczaniu sprawności metodą strat poszczególnych (wg PN-89/E-06702) przy pomiarze strat dodatkowych (projekt PN-E-06741) przedstawiono na rysunku 6.5 i w tabeli 6.3.

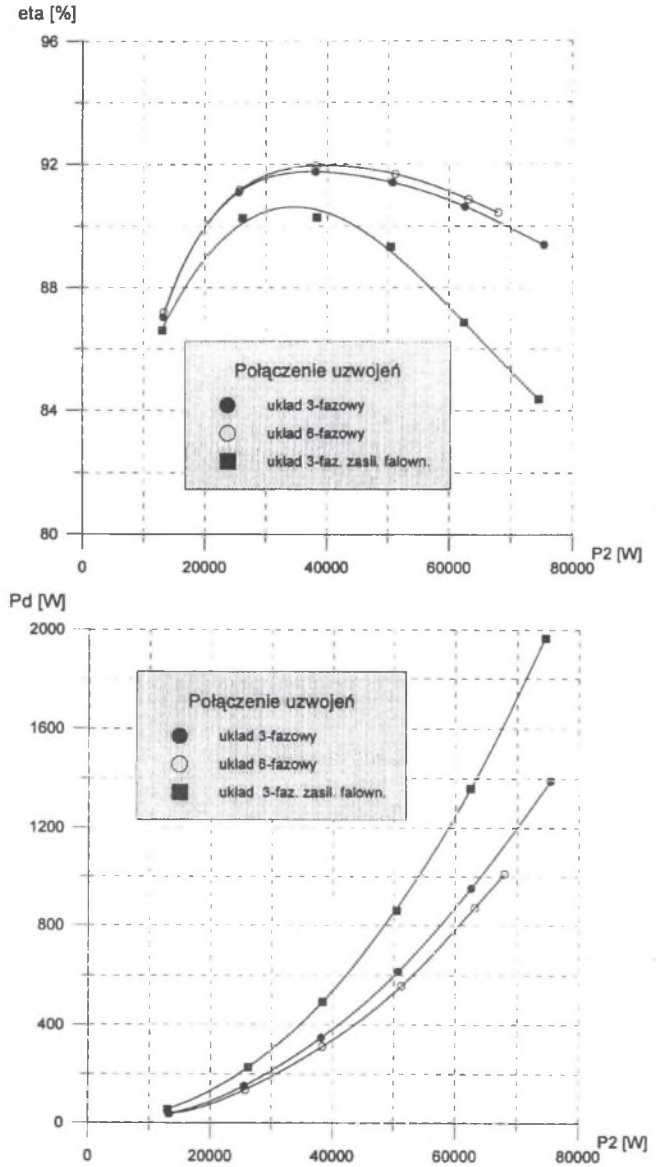
Tabela 6.3

Wyniki prób obciążenia i nagrzewania

| Lp. | Parametry pod koniec próby nagrzewania | Oznaczenie wielkości mierzonej | Jednostka | Układ 3-fazowy zasil. sinusoidalne | Układ 6-fazowy zasil. sinusoidalne | Układ 3-fazowy zasil. przekształtnikowe |
|-----|--|--------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | Rodzaj pracy | - | - | S1 | S1 | S1 |
| 2 | Czas trwania próby nagrzew. | t | godz. | 5 | 5 | 5 |
| 3 | Paramtry silnika | I_{sr} | V | 380 | 196.6 | 380 |
| | | P_2 | A | 90 | 85 | 104 |
| | | f | kW | 50 | 50 | 50 |
| | | n | Hz | 49.98 | 50.0 | 50.02 |
| | | η | obr/min | 1478 | 1479 | 1466.5 |
| | | $\cos\varphi$ | % | 91.3 | 91.7 | 89.3% |
| | | $\Delta PCu1$ | - | 0.9225 | 0.9224 | 0.782 ⁽¹⁾ |
| | | $\Delta PCu2$ | W | 1640 | 1580 | 2370 |
| | | ΔPFe | W | 720 | 720 | 1160 |
| | | ΔPm | W | 740 | 730 | 740 ⁽²⁾ |
| | | ΔPd (mierzone) | W | 940 | 940 | 940 |
| | | $\Sigma \Delta P$ (mierzone) | W | 600 | 525 | 850 |
| | | | W | 4640 | 4495 | 6060 |
| 4 | Przyrost temp. uzw. stojana | $\Delta \theta_{Cu}$ | K | 60 | 60 | 85 |

$$(1) - \cos \varphi = \frac{\sum |P|}{\sum |S|}$$

(2)- straty w żelazie założone na poziomie strat przy zasilaniu sinusoidalnym.



Rys. 6.5. Sprawność i straty dodatkowe zmierzone silnika 3/6-fazowego 50 kW
Fig. 6.5. Efficiency rate and measured stray losses of the 3/6-phase motor, power 50 kW

7. WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Badania porównawcze silnika modelowego 3/6-fazowego o mocy znamionowej 50 kW przeprowadzono w Laboratorium Maszyn Elektrycznych Branżowego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn Elektrycznych Komel w Katowicach. Podczas badań szczególną uwagę zwracano na dokładność pomiarów - jako przyrządów pomiarowych używano wyłącznie atestowanego analizatora D6100 firmy NGI Austria (który może być traktowany jako przyrząd wzorcowy) oraz częściowo, legalizowanych wskazówkowych mierników klasy 0.2. Po szczególne próby były wielokrotnie powtarzane, celem sprawdzenia wiarygodności otrzymanych wyników.

Przeprowadzone na silniku modelowym badania potwierdzają zalety silników 6-fazowych. W stosunku do odpowiedników 3-fazowych cechuje je:

- **wyższa sprawność,**
 - **większy moment rozruchowy,**
 - **mniejszy prąd rozruchowy,**
 - **niższe straty mocy w żelazie,**
 - **wyższa wartość współczynnika mocy $\cos\varphi$,**
 - **niższa wartość prądu magnesującego,**
 - **mniejsze zniekształcenie charakterystyki momentu wyższymi harmonicznymi (szczególnie 5 i 7) pola magnetycznego.**
- w przypadku identycznego napięcia zwojowego w silniku 3 i 6-fazowym

Sprawność silnika wyznaczono w stanie termicznie ustalonym, przy pracy silnikowej po sprzęgnięciu go z maszyną obciążającą, metodą strat poszczególnych wg PN-B9/E-06702 oraz metodą strat poszczególnych z pomiarem strat dodatkowych wg pr. PN-E-06741. Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 6.4, sprawność badanego silnika przy zasilaniu 6-fazowym jest o 0.4% wyższa niż przy 3-fazowym (odpowiednio 91.7 i 91.3%). Dla silnika o mocy znamionowej 1400 kW takie zwiększenie sprawności daje po roku eksploatacji - przy 8000 godzin pracy rocznie - oszczędności energii rzędu 40.000 kWh, czyli około 10.000 zł. Należy jednak zwrócić uwagę, że przy zastosowaniu maszyny 6-fazowej niskonapięciowej w miejsce 3-fazowej wysokonapięciowej, oprócz zwiększenia sprawności o wymienione 0.4%, uzyskuje się dalsze zwiększenie sprawności o około 0.4÷2.5%.

W przebadanym silniku, dzięki eliminacji niektórych wyższych harmonicznych przestrzennych rozkładu pola magnetycznego, w tym harmonicznych o największej amplitudzie $v=5$ i 7 , przy zasilaniu 6-fazowym w stosunku do 3-fazowego, uzyskano zmniejszenie wartości strat dodatkowych ΔP_d o około 13%. Straty dodatkowe wyznaczone były metodą pomiarową według projektu normy pr. PN-E-06741 opartej na IEEE Std 112 met. B. Zmniejszenie wartości strat jest potwierdzeniem zależności teoretycznych dotyczących eliminacji niektórych harmonicznych przestrzennych rozkładu pola.

Przy zasilaniu 6-fazowym korzystniej kształtuje się również charakterystyka mechaniczna silnika. Na skutek eliminacji niektórych wyższych harmonicznych pola zmniejszają się wartości momentów pasożytniczych (por. rys. 6.4). Wprawdzie w badanym silniku momenty te nie miały dużych wartości i nie zniekształcały charakterystyki w sposób znaczący, jednak badania potwierdziły tezę o "wygładzeniu" charakterystyki mechanicznej. Uzwojenie 6-fazowe z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz umożliwia również uzyskanie wyższej wartości momentu rozruchowego, przy tej samej wartości prądu rozruchowego co dla silnika z uzwojeniem 3-fazowym (rys. 6.2 i tabela 6.2).

Wyniki przeprowadzonych badań silnika 3/6-fazowego w stanie biegu jałowego, stanie zwarcia i obciążenia są potwierdzeniem słuszności przyjętych założeń oraz poprawności opra-

cowanej metody i programu komputerowego inżynierskich obliczeń elektromagnetycznych takich silników.

Silniki 6-fazowe instalowane do tej pory w kraju pochodziły z importu. Były to silniki o mocach od 1300 do 4500 kW zasilane z falowników dwunastopulsowych firmy AEG.

Obecnie w kraju uruchomiono produkcję takich silników opartych na projektach BOBRME Komel. Pierwszy z silników, o mocy 1400 kW, został wyprodukowany w Zakładach EMIT w Żychlinie i przeszedł pomyślnie badania na stacji prób u producenta. Ma on być przekazany do eksploatacji do jednej z krajowych elektrociepłowni.

Istnieje również możliwość opracowania i podjęcia produkcji 6-fazowych falowników MSI przeznaczonych do zasilania tych silników.

LITERATURA

1. Bernatt J.: Silniki indukcyjne 6-fazowe z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz. Rozprawa doktorska. Pol. Śląska, Gliwice 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz, prof. Politechniki Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji 23.06.1999 r.

Abstract

The paper presents analysis of the 6-phase induction motors designed for frequency converters fed. The advantages of low voltage motors as well as of nonsymmetric-axis distribution are shown. A method of electromagnetic calculations of 6-phase motor using computer software for 3-phase motors is proposed. Results of laboratory tests of the 3/6-phase motor power 50 kW are published.

Chapter 1 presents the general overview of high power induction motors supplied from frequency converters. The feed system shown in Fig. 1.1b is the most commonly implemented due to costs of installation and working costs. The low voltage motor used in such a system has got higher efficiency rate than the high voltage motor having the same cubature.

The frequency converter allows to multiply the number of phases - for example to 6 phases. The 6-phase motor can have symmetric or nonsymmetric phase axis distribution (Fig. 3.1). In the motor having nonsymmetric phase axis distribution there are not space harmonics $\nu = 6n \pm 1$ for the odd value of n . For electromagnetic calculation six phases can be transformed into 3-phase winding (Fig. 4.1).

The 3/6-phase induction motor 50 kW was manufactured. The motor shown in Fig. 6.1 was tested in a laboratory during 3 and 6-phase operation. The results are shown in Figs 6.3 - 6.5. The results of the tests confirm the advantages of the 6-phase induction motors having nonsymmetric phase axis distribution. In a comparison with conventional 3-phase motors they have:

- higher efficiency rate
- diminished stray losses
- higher starting torque
- lower deformation of the torque characteristics caused by the 5-th and 7-th space harmonics.