

Krzysztof KLUSZCZYŃSKI

Roman MIKSIEWICZ

Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

PASOŻYTNICZE MOMENTY SYNCHRONICZNE W SILNIKU INDUKCYJNYM W OBECNOŚCI SKŁADOWEJ PRZECIWBIEŻNEJ POLA MAGNETYCZNEGO

Streszczenie. Przedstawiono ogólną zasadę, która określa, jakie nowe synchroniczne momenty pasożytnicze i przy jakich prędkościach powstają w 3-fazowych silnikach indukcyjnych w warunkach niesymetrycznego zasilania z sieci 1-fazowej. Podano wzory, które umożliwiają obliczanie pasożytniczych momentów synchronicznych w obecności składowej przeciwnej prądów stojana i wirnika. Wskazano, jakie 3-fazowe silniki nie powinny być zasilane z sieci 1-fazowej ze względu na zasadnicze pogorszenie własności rozruchowych.

PARASITIC SYNCHRONOUS TORQUES IN 3-PHASE SQUIRREL-CAGE MOTOR IN PRESENCE OF BACKWARD ROTATING MAGNETIC FIELD

Summary. General rule indicating what new synchronous torques and at what speeds arise in 3-phase squirrel-cage motor under unbalanced conditions e.g. in 3-phase motor supplied from 1-phase network has been presented in this paper. Expressions enabling us to calculate parasitic synchronous torques in presence of negative components of stator and rotor currents are derived. It is considered which 3-phase induction motors cannot be recommended for supplying from 1-phase network because of considerable deteriorating starting properties.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРОТИВОПОЛОЖНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАЗИТНЫЕ СИНХРОННЫЕ МОМЕНТЫ ИНДУКЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Резюме. Представлен общий принцип, определяющий паразитные синхронные моменты и скорости в трехфазных асинхронных двигателях в условиях подключения к несимметричной однофазной сети. Приведены зависимости, дающие возможность оценить паразитные синхронные моменты в зависимости от противоположной составляющей токов статора и ротора. Даны рекомендации по применению отдельных асинхронных двигателей при подключении к однофазной сети с точки зрения ухудшения пусковых свойств.

1. MOMENTY PASOŻYTNICZE W MASZYNIE INDUKCYJNEJ ZASILANEJ SYMETRYCZNIE

Synchroniczne momenty pasożytnicze w maszynach indukcyjnych są wynikiem elektromagnetycznego i elektrodynamicznego oddziaływania na siebie harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Wypadkowy moment synchroniczny przy danej prędkości może być przedstawiony w postaci sumy składników związanych z różnymi parami harmonicznych (ν, ρ) . Liczba par harmonicznych przestrzennych uczestniczących w danej maszynie w powstawaniu synchronicznych momentów pasożytniczych zależy od liczby par biegunów p oraz liczby żłobków wirnika Q_r , zaś to, które z nich przyjmują wartości dominujące - dodatkowo od liczby żłobków stojana Q_s , współczynnika uzwojeń stojana i skosu żłobków wirnika. Rzędy harmonicznych przestrzennych biorących udział w generowaniu momentów pasożytniczych oraz wzory pozwalające na ich obliczenie mogą być łatwo określone za pomocą graficzno-analitycznej metody obliczania momentów pasożytniczych opartej na schematach rozkładu maszyny asynchronicznej na maszyny elementarne [2].

Jeśli nie uwzględni się reakcji wtórnej uzwojeń stojana, to pasożytniczy moment związany z uporządkowaną parą harmonicznych przestrzennych przepływu (ν, ρ) może być opisany następującym wzorem:

$$T_e = a \operatorname{Re} \left\{ \pm j \frac{i_s^*}{s} \frac{i_r^{(*)}}{-r\nu} e^{\pm j(\rho \pm \nu)\varphi} \right\} \quad (1)$$

$$a = \rho L_{m\rho} \frac{\xi_{s\nu} \xi_{r\rho} \xi_{sk\rho}}{\xi_{s\rho} \xi_{r\nu} \xi_{sk\nu}}$$

gdzie:

$L_{m\rho}$ - indukcyjność magnesująca dla ρ -tej harmonicznej przestrzennej,

$\xi_{s\nu}, \xi_{r\nu}, \xi_{sk\nu}, \xi_{s\rho}, \xi_{r\rho}, \xi_{sk\rho}$ - współczynnik uzwojenia stojana, uzwojenia wirnika i skosu, odpowiednio dla ν -tej i ρ -tej harmonicznej przestrzennej przepływu,

$\frac{i_s}{s}$ - prąd stojana (wektor przestrzenny),

$\frac{i_r}{-r\nu}$ - prąd wirnika (wektor przestrzenny) dla ν -tej harmonicznej przestrzennej wyrażony w nieruchomym układzie współrzędnych (związanym ze stojanem),

φ - kąt położenia wirnika.

Tak jak ν -ta harmoniczna przestrzenna oddziałuje na ρ -tą harmoniczną przestrzenną, ρ -ta harmoniczna oddziałuje na harmoniczną ν -tą. Stąd z parą harmonicznych o odwrotnym uporządkowaniu elementów (ρ, ν) możemy związać składową momentu pasożytniczego opisaną przez wzór analogiczny do wzoru (1). Wyrażenie (1) może przyjmować różne postacie w zależności od tego, czy w stanie ustalonym przy zasilaniu maszyny symetrycznym 3-fazowym sinusoidalnym układem napięć kołowe pola magnetyczne stojana i wirnika związane odpowiednio z ν -tą i ρ -tą harmoniczną przestrzenną wirują współbieżnie, czy też przeciwbieżnie. 32 różne postacie wzoru (1) realizują się poprzez różne kombinacje znaków (\pm) oraz występowanie lub brak znaku sprzężenia. Można wykazać, że rzędy harmonicznych przestrzennych uczestniczących w generowaniu momentów pasożytniczych spełniają zawsze relację: $\rho \pm \nu = c Q_r$ (gdzie: c - liczbą całkowitą), co pozwala nadać wzorowi (1) postać:

$$T_e = a \operatorname{Re} \left\{ \pm j \frac{1}{-s} \frac{1}{-r\nu} i^{(*)} e^{\pm j c Q_r \varphi} \right\} \quad (2)$$

Dla symetrycznie zasilanej maszyny asynchronicznej hodografy wektorów przestrzennych prądów stojana i wirnika przyjmują w stanie ustalonym postać okręgów opisanych relacjami:

$$\begin{aligned} \frac{1}{-s} &= \frac{1}{-s} e^{j\omega_0 t} \\ \frac{1}{-r\nu} &= \frac{1}{-r\nu} e^{j\omega_0 t} \\ \varphi &= \omega t + \varphi_0 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

ω_0 - częstotliwość sieci zasilającej,

φ_0 - położenie wirnika w chwili $t=0$ (w chwili zaistnienia stanu ustalonego).

Prąd stojana $\frac{1}{-s}$ oraz prąd wirnika dla wyższych harmonicznych przestrzennych:

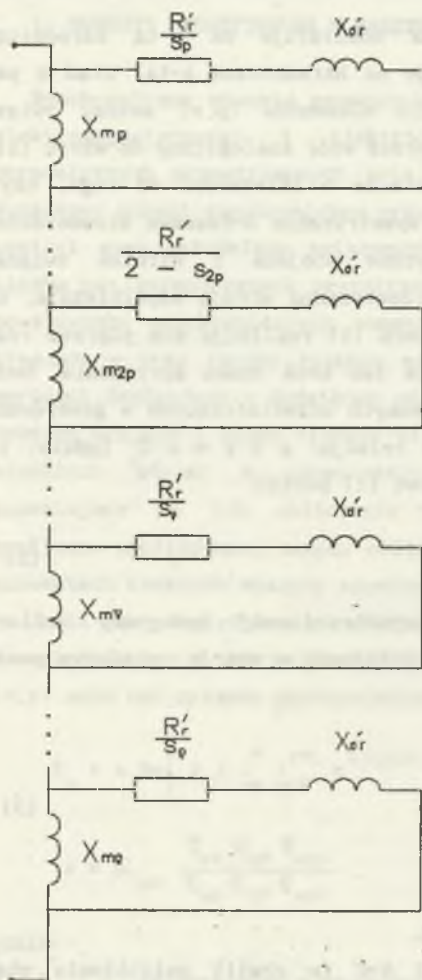
$\frac{1}{-r\nu}$, $\frac{1}{-r\rho}$, wyznacza się ze schematu zastępczego przedstawionego na rys.1.

W wyniku podstawienia (3) do (1) można otrzymać dwa różne przypadki:

$$T_e = a \operatorname{Re} \left\{ \pm j \frac{1}{-s} \frac{1}{-r\nu} e^{-2j\omega_0 t \pm c Q_r j\omega t} e^{\pm j c Q_r \varphi_0} \right\} \quad (4)$$

lub

$$T_e = a \operatorname{Re} \left\{ \pm j \frac{1}{-s} \frac{1}{-r\nu} e^{\pm c Q_r j\omega t} e^{\pm j c Q_r \varphi_0} \right\} \quad (5)$$



Pulsujący moment pasożytniczy opisany wzorem (4) przekształca się w stały w czasie moment synchroniczny przy prędkości określonej równaniem:

$$-2\omega_0 \pm c Q_r \omega = 0 \quad (6)$$

Rozwiązanie równania ma postać:

$$\omega = \pm \frac{2\omega_0}{cQ_r} \quad (7)$$

co oznacza, że synchroniczny moment pasożytniczy powstaje w zakresie pracy silnikowej albo w zakresie pracy hamulcowej.

W przypadku opisanym wzorem (5) synchroniczny moment pasożytniczy pojawia się w maszynie przy zatrzymanym wirniku ($\omega = 0$).

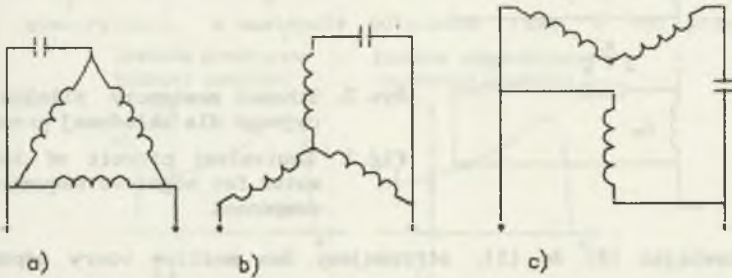
Rys.1. Schemat zastępczy dla silnika indukcyjnego zasilanego symetrycznie.

Fig.1. Equivalent circuit for symmetrically-fed induction motor

2. MOMENTY PASOŻYTNICZE W MASZYNIE ASYNCHRONICZNEJ ZASILANEJ NIESYMETRYCZNIE

Z celowym niesymetrycznym zasilaniem 3-fazowej maszyny klatkowej mamy do czynienia wówczas, gdy do dyspozycji użytkownika pozostaje wyłącznie sieć 1-fazowa. Przypadek taki wymaga specjalnego połączenia uzwojeń stojana oraz zastosowania dodatkowych elementów w postaci kondensatorów lub dławików. Typowe układy umożliwiające zasilanie 3-fazowego silnika indukcyjnego z sieci 1-fazowej przy zastosowaniu jednego kondensatora przedstawiono na

rys.2. Podczas zasilania silnika ze źródła 1-fazowego warunki przetwarzania energii elektrycznej w mechaniczną są mniej korzystne, albowiem wirujące pole magnetyczne związane z harmoniczną główną ($\nu=p$) nie jest polem kołowym, lecz eliptycznym (z wyjątkiem co najwyżej jednej wartości poślizgu). Pogarsza to znacznie własności eksploatacyjne silnika i powoduje, że w układach z jednym kondensatorem roboczym uzyskuje się moc około 70-80% jego mocy znamionowej. Eliptyczny kształt pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny jest wynikiem pojawienia się w uzwojeniach stojana i wirnika (na skutek niesymetrii zasilania i asymetrii układów połączeń) składowych przeciwnych prądu \underline{I}_s^- , \underline{I}_r^- .



Rys.2. Układy połączeń uzwojeń stojana silnika 3-fazowego umożliwiające zasilanie z sieci 1-fazowej

Fig.2. Connections of stator windings allowing to supply 3-phase motor from 1-phase network

Wektory przestrzenne, mające przy polu kołowym postać (3), przekształcają się przy polu eliptycznym do postaci:

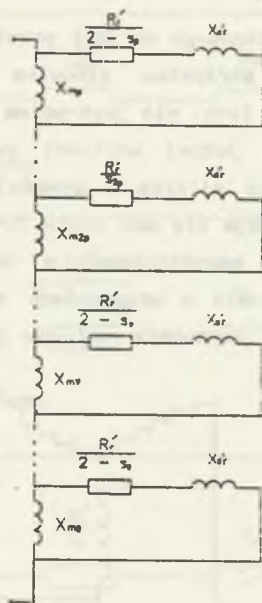
$$\underline{i}_s = \underline{I}_s^+ e^{j\omega_0 t} + \underline{I}_s^{-*} e^{-j\omega_0 t} \quad (8)$$

$$\underline{i}_r = \underline{I}_r^+ e^{j\omega_0 t} + \underline{I}_r^{-*} e^{-j\omega_0 t}$$

gdzie:

\underline{I}_s^+ , \underline{I}_s^- - składowa zgodna i przeciwna prądu stojana,
 \underline{I}_r^+ , \underline{I}_r^- - składowa zgodna i przeciwna prądu wirnika.

Składowe zgodne prądu są określone przez ten sam schemat zastępczy co prądy w maszynie zasilanej symetrycznie (rys.1), natomiast składowe przeciwne prądu przez schemat zastępczy przedstawiony na rys.3.



Rys.3. Schemat zastępczy silnika indukcyjnego dla składowej przeciwnej

Fig.3. Equivalent circuit of induction motor for negative-sequence component

Podstawiając (8) do (1), otrzymujemy dwa możliwe wzory odpowiadające przypadkom (4) i (5) przy zasilaniu symetrycznym:

$$\begin{aligned}
 T_o = & a \operatorname{Re} \left\{ \begin{aligned} & \frac{I_s^{+*}}{1-s} \frac{I_r^{+*}}{1-s} e^{-2j\omega_o t \pm cQ_r j\omega t} e^{\pm jcQ_r \varphi_o} + \\ & \left(\frac{I_s^{+*}}{1-s} \frac{I_r^-}{1-s} + \frac{I_s^-}{1-s} \frac{I_r^{+*}}{1-s} \right) e^{\pm jcQ_r \omega t} e^{\pm jcQ_r \varphi_o} + \\ & \frac{I_s^{-*}}{1-s} \frac{I_r^-}{1-s} e^{2j\omega_o t \pm cQ_r j\omega t} e^{\pm jcQ_r \varphi_o} \end{aligned} \right\} = \\
 = & T_{o(+,+) } \Big|_{\omega = \frac{2\omega_o}{cQ_r}} + T_{o(+,-) (-,+)} \Big|_{\omega = 0} + T_{o(-,-) } \Big|_{\omega = -\frac{2\omega_o}{cQ_r}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

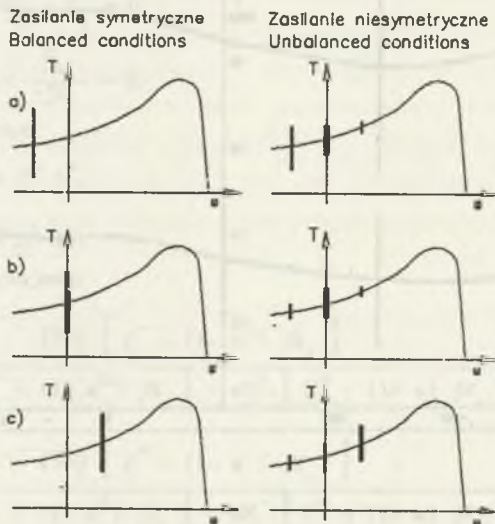
lub

$$\begin{aligned}
 T_o = & a \operatorname{Re} \left\{ \left(\frac{I_s^{+*}}{1-s} \frac{I_r^+}{1-s} + \frac{I_s^-}{1-s} \frac{I_r^{-*}}{1-s} \right) e^{\pm jcQ_r \omega t} e^{\pm jcQ_r \varphi_o} + \right. \\
 & \left. \frac{I_s^{+*}}{1-s} \frac{I_r^{-*}}{1-s} e^{-2j\omega_o t \pm cQ_r j\omega t} + \frac{I_s^-}{1-s} \frac{I_r^+}{1-s} e^{2j\omega_o t \pm cQ_r j\omega t} e^{\pm jcQ_r \varphi_o} \right\} = \\
 = & T_{o(+,+) (-,-) } \Big|_{\omega = 0} + T_{o(+,-) } \Big|_{\omega = \frac{2\omega_o}{cQ_r}} + T_{o(-,+)} \Big|_{\omega = -\frac{2\omega_o}{cQ_r}} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Jak widać, w obu przypadkach (9) i (10) synchroniczny moment pasożytniczy powstający w symetrycznie zasilanej maszynie ulega w warunkach niesymetrii rozszczepieniu na 3 składowe mające 3 różne prędkości synchroniczne.

Ogólną zasadę określającą, jakie nowe momenty synchroniczne i przy jakich prędkościach pojawią się w niesymetrycznie zasilanej maszynie w obecności składowych przeciwnych prądu, w odniesieniu do momentów synchronicznych powstających w maszynie w warunkach symetrycznych, zilustrowano graficznie na rys. 4.

W celu eksperymentalnego zweryfikowania powyższej zasady silnik 3-fazowy o danych : $P_N = 2.2 \text{ kW}$, $U_N = 380 \text{ V } (\Delta)$, $p = 4$, $Q_s = 48$, $Q_r = 44$, zasilono symetrycznie, a następnie odłączono fazę. W obu przypadkach

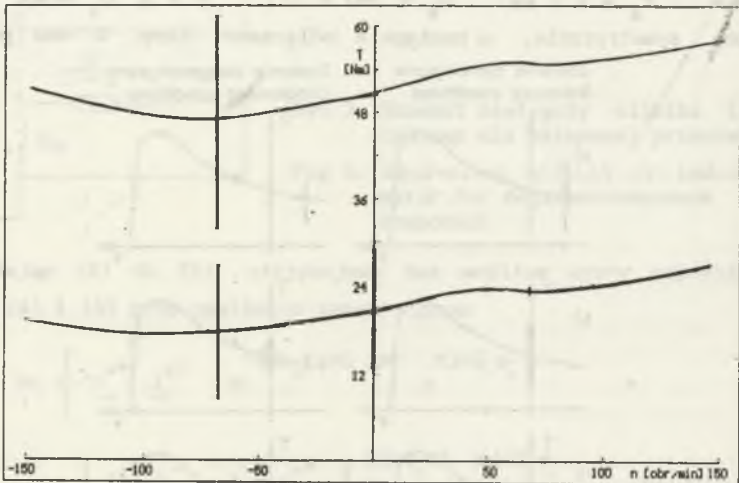


Rys. 4. Ilustracja ogólnej zasady generowania pasożytniczych momentów synchronicznych w niesymetrycznie zasilanym silniku indukcyjnym

Fig. 4. Interpretation of general rule for generating synchronous parasitic torques in asymmetrically-fed machine

zmierzone (metodą statyczną) charakterystykę mechaniczną w przedziale obejmującym występowanie pasożytniczych momentów synchronicznych (rys. 5). Dominujący pasożytniczy moment synchroniczny, występujący w maszynie zasilanej symetrycznie przy prędkości $\omega = -\frac{2\omega}{88}^\circ$, uległ przy zasilaniu niesymetrycznym rozszczepieniu na 3 składowe odpowiadające prędkościom: $\omega = -\frac{2\omega}{88}^\circ$ (zakres pracy hamulcowej), $\omega = 0$ (maszyna zatrzymana) i $\omega = \frac{2\omega}{88}^\circ$ (zakres pracy silnikowej).

Tak więc przyczyną pogorszenia się własności eksploatacyjnych silnika zasilanego niesymetrycznie jest nie tylko składowa przeciwna momentu asynchronicznego związana z harmoniczną główną ($\nu=p$), lecz również nowe dodatkowe synchroniczne momenty pasożytnicze pojawiające się w zakresie pracy silnikowej i hamulcowej oraz przy rozruchu silnika, pomimo że w maszynie zasilanej symetrycznie występowały one wyłącznie w jednym zakresie pracy.



Rys. 5. Charakterystyka mechaniczna dla symetrycznie i niesymetrycznie (odłączenie fazy) zasilanego silnika indukcyjnego (pomiar)

Fig. 5. Measured torque-speed curve for symmetrically and asymmetrically-fed induction motor (interrupted phase)

3. PASOŻYTNICZE MOMENTY SYNCHRONICZNE W SILNIKU 3-FAZOWYM INDUKCYJNYM ZASILANYM Z SIECI 1-FAZOWEJ

W praktyce znajdują zastosowanie różne układy połączeń uzwojeń fazowych stojana umożliwiające zasilanie 3-fazowego silnika indukcyjnego z sieci 1-fazowej. W każdym z powyższych przypadków można wyznaczyć wypadkową charakterystykę mechaniczną, o ile znane są składowe symetryczne prądów:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}^+ \\ \underline{I}^- \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

Relacje między składowymi symetrycznymi a napięciem 1-fazowej sieci \underline{U} wynikają z układu równań opisującego połączenia uzwojeń stojana. Przykładowo, układowi połączeń przedstawionemu na rys.2a odpowiadają następujące równania wynikające z praw Kirchhoffa:

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{U}, \\ \underline{U}_a + \underline{U}_b + \underline{U}_c &= 0, \\ \underline{I}_a - \underline{I}_c - \frac{\underline{U}_a}{-jX_c} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Podstawiając (11) oraz:

$$\begin{aligned} \underline{U}^+ &= \underline{Z}^+ \underline{I}^+, \\ \underline{U}^- &= \underline{Z}^- \underline{I}^-, \end{aligned} \quad (13)$$

do równań (12) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \underline{I}^+ &= \frac{\sqrt{3} \underline{U} \left[\underline{Z}^- - (1 - \alpha^2) jX_c \right]}{\alpha^2 \underline{Z}^+ \left[\underline{Z}^- - (1 - \alpha^2) jX_c \right] - \alpha \underline{Z}^- \left[\underline{Z}^+ - (1 - \alpha) jX_c \right]}, \\ \underline{I}^- &= \frac{-\sqrt{3} \underline{U} \left[\underline{Z}^+ - (1 - \alpha) jX_c \right]}{\alpha^2 \underline{Z}^+ \left[\underline{Z}^- - (1 - \alpha^2) jX_c \right] - \alpha \underline{Z}^- \left[\underline{Z}^+ - (1 - \alpha) jX_c \right]}, \\ \underline{I}_0 &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

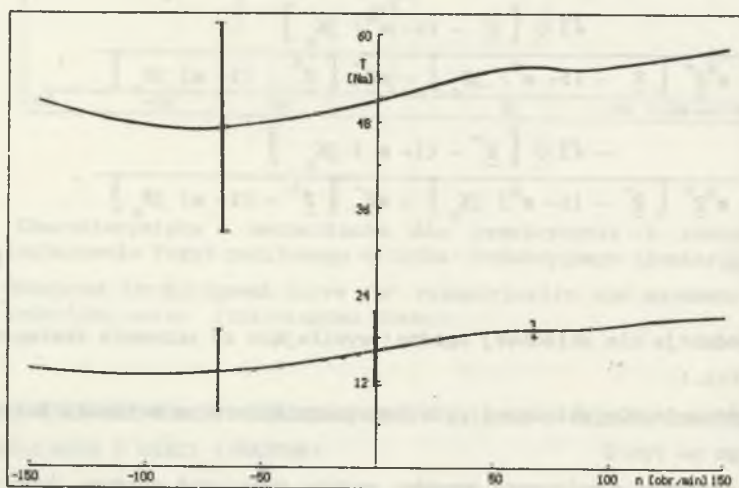
gdzie:

\underline{Z}^+ - impedancja dla składowej zgodnej wynikająca ze schematu zastępczego na rys.1,

\underline{Z}^- - impedancja dla składowej przeciwnej wynikająca ze schematu zastępczego na rys.3.

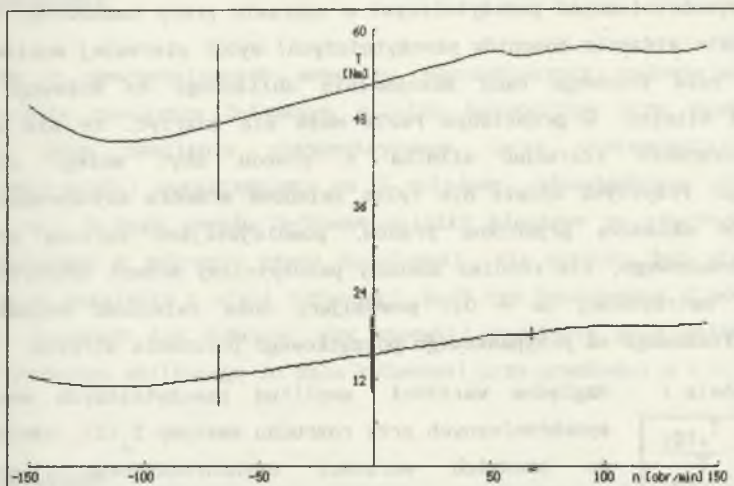
Znając składowe symetryczne prądów, możemy wyznaczyć zarówno współbieżne i przeciwbieżne składowe momentu asynchronicznego związane z harmoniczną główną oraz z wyższymi harmonicznymi przestrzennymi przepływu, jak i pasożytnicze momenty synchroniczne powstające w maszynie (wzory (9) i (10)). Silniki indukcyjne 3-fazowe projektuje się w taki sposób, aby w maszynie nie

występowały znaczące synchroniczne momenty pasożytnicze bądź też były one związane wyłącznie z hamulcowym zakresem pracy silnika. Jest oczywiste, że w silniku, w którym znaczące momenty pasożytnicze nie występują przy pracy symetrycznej, nie pojawią się również znaczące momenty synchroniczne przy zasilaniu niesymetrycznym (o ile rozważania ograniczymy do klasy niesymetrii związanych z generowaniem składowych przeciwnych prądu). Do dalszych przykładowych rozważań wybrano więc silnik, w którym dominujący pasożytniczy moment synchroniczny występuje w hamulcowym zakresie pracy. Moment ten jest związany z parą harmonicznych przestrzennych $(\nu, \rho) = (4; 92)$, gdzie: $\nu = p = 4$ - harmoniczna główna, zaś $\rho = 92$ - harmoniczna strefowa (pasmowa) stojana określona równaniem: $\rho = c Q_r + p$ dla $c=2$. Silnik ten zasilono z sieci 1-fazowej przy układzie połączeń uzwojeń fazowych stojana prezentowanym na rys.4a i zmierzono jego charakterystyki mechaniczne w zakresie występowania pasożytniczych momentów synchronicznych. Pomierzoną charakterystykę mechaniczną dla pojemności kondensatora $C = 108 \mu\text{F}$ (pojemność kondensatora dobrano tak, aby pole magnetyczne w szczelinie było zbliżone do pola kołowego przy rozruchu silnika) przedstawiono na rys.6, natomiast obliczoną na rys.7.



Rys.6. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego zasilanego symetrycznie i dla silnika zasilanego z sieci jednofazowej (pomiar)

Fig.6. Measured torque-speed curve for symmetrically-fed motor and for motor supplied from 1-phase network



Rys. 7. Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego zasilanego symetrycznie i dla silnika zasilanego z sieci jednofazowej (obliczenia)

Fig. 7. Calculated torque-speed curve for symmetrically-fed motor and for motor supplied from 1-phase network

Zgodnie z przewidywaniami opartymi na ogólnej zasadzie generowania synchronicznych momentów pasożytniczych w warunkach niesymetrii (rys. 4), dominujący moment synchroniczny przy prędkości $\omega = -\frac{2\omega}{88}^{\circ}$ rozszedł się na 3 składowe związane z prędkościami $\omega = -\frac{2\omega}{88}^{\circ}$, $\omega = 0$ i $\omega = \frac{2\omega}{88}^{\circ}$.

Powyzsze rozważania i badania laboratoryjne pozwalają na sformułowanie ogólnego wniosku dotyczącego doboru silników 3-fazowych przeznaczonych do zasilania z sieci 1-fazowej: indukcyjne silniki 3-fazowe, w których przy zasilaniu symetrycznym występuje synchroniczny moment pasożytniczy o znacznej amplitudzie przy pracy hamulcowej, nie powinny być zasilane z sieci 1-fazowej, albowiem wystąpi wówczas w nich znaczny synchroniczny moment pasożytniczy przy prędkości $\omega = 0$, pogarszający w istotny sposób właściwości rozruchowe. Amplituda synchronicznego momentu pasożytniczego w zasadniczy sposób zależy od wartości składowej przeciwnej prądu. Wartość składowych przeciwnych prądu można kształtować poprzez dobór pojemności kondensatora C. Zwykle pojemność kondensatora dobiera się w taki sposób, aby kołowe pole magnetyczne w szczelinie maszyny występowało przy rozruchu albo przy obciążeniu znamionowym. W przypadku silników 3-fazowych z dominującymi

momentami synchronicznymi pasożytniczymi w zakresie pracy hamulcowej celowy jest (z punktu widzenia momentów pasożytniczych) wybór pierwszej możliwości, a więc - pola kołowego bądź maksymalnie zbliżonego do kołowego przy zatrzymanym silniku. W przeciwnym razie może się zdarzyć, że nie będzie możliwe dokonanie rozruchu silnika z powodu zbyt małego momentu rozruchowego. Przyczyną będzie nie tylko składowa momentu asynchronicznego związana ze składową przeciwną prądów, pomniejszająca wartość średnią momentu rozruchowego, ale również znaczny pasożytniczy moment synchroniczny w maszynie zatrzymanej ($\omega = 0$), powodujący dużą zależność wypadkowego momentu rozruchowego od przypadkowego początkowego położenia wirnika.

Tabela 1 Względne wartości amplitud pasożytniczych momentów

C [μF]	$\frac{T_e(0)}{T_{ea}}$
108,0	0,33
54,3	0,67
35,8	1,05
21,7	1,78

synchronicznych przy rozruchu maszyny $T_e(0)$, odniesione do średnich wartości asynchronicznego momentu rozruchowego T_{ea} , dla różnych pojemności kondensatora zestawiono w tabeli 1. Wynika z niej, że dla $C < 36 \mu\text{F}$ spełniona jest nierówność $\frac{T_e(0)}{T_{ea}} > 1$, co oznacza, że dla pewnych położen wirnika niemożliwe jest przeprowadzenie rozruchu silnika z tego powodu, że dodatni asynchroniczny moment rozruchowy jest zrównoważony

przez ujemny pasożytniczy moment synchroniczny.

Wśród różnych możliwych połączeń uzwojeń stojana są takie, w których powstają również składowe zerowe prądu stojana. Składowa zerowa prądu generuje wyższe harmoniczne przestrzenne o rzędach $\nu = 3+6c$ (gdzie: c - liczba całkowita), które również mogą uczestniczyć w powstawaniu momentów pasożytniczych. Można wykazać, że te nowe, dodatkowe momenty synchroniczne, związane ze składową zerową, mogą wzmacniać istniejące momenty synchroniczne bądź mogą pojawić się przy nowych prędkościach. Dla większości silników 3-fazowych zasilanych z sieci 1-fazowej momenty te są jednak pomijalnie małe. Problemy, jak obliczać pasożytnicze momenty synchroniczne związane ze składowymi zerowymi prądu oraz w jakich niesymetrycznie zasilanych silnikach indukcyjnych (warunki dla liczby żłobków) mogą one osiągnąć znaczne wartości, zostaną przeanalizowane w oddzielnej pracy.

PODSUMOWANIE

Każdy z synchronicznych momentów pasożytniczych pojawiający się w symetrycznie zasilanym 3-fazowym silniku indukcyjnym przy prędkości ω_s , zostaje przy zasilaniu niesymetrycznym (przy wystąpieniu składowej przeciwnej prądu) rozszczepiony na 3 składowe, odpowiadające prędkościom: ω_s , 0, $-\omega_s$. Z tego powodu 3-fazowe silniki klatkowe ze znacznym momentem synchronicznym w zakresie pracy hamulcowej nie powinny być stosowane do pracy przy zasilaniu z sieci 1-fazowej, bądź też kondensator C powinien być w tych warunkach tak dobrany, aby zapewnić powstanie pola kołowego (bądź pola wirującego zbliżonego do pola kołowego) przy prędkości $\omega = 0$.

LITERATURA

1. Heller B., Hamata V.: Harmonic Field Effects in Induction Machine, Prague, Academia Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, 1977.
2. Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach indukcyjnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka, z.102, 1986, Gliwice.
3. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Squirrel-cage motor with additional ring in rotor, Proc. of International Conference on Electrical Machines ICEM 90, pp.504-509, MIT, Boston, USA, 12-15 August 1990.

Recenzent : prof. dr inż. Ryszard Sochocki

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 grudnia 1991 r.

PARASITIC SYNCHRONOUS TORQUES IN 3-PHASE SQUIRREL-CAGE MOTOR IN PRESENCE OF BACKWARD ROTATING MAGNETIC FIELD COMPONENT**A b s t r a c t**

The paper presents a method allowing us to find and to calculate synchronous parasitic torques arising in an asymmetrically-supplied 3-phase squirrel-cage motor. With the help of Exps.(9),(10), Fig.1, Fig.3, this

method different possible connections of stator windings enabling us to supply 3-phase squirrel-cage motor from 1-phase network are analysed (Fig.2a,b). It is shown that in a machine fed in such a way synchronous parasitic torques occur at higher number of different synchronous speeds than in the same machine supplied from 3-phase balanced network. The reason for this is that each synchronous parasitic torque generated underbalanced conditions splits in 3 parasitic torques under unbalanced conditions (Exprs.9,10). This general rule is illustrated in Fig.4. As has seen, the new parasitic torques arise at standstill and in the motor region even if in a symmetrically-fed machine they are generated only in the brake region. The amplitudes of these synchronous torques depend on the values of positive- and negative-sequence currents in the stator and rotor windings. The problem becomes even more complicated when zero-sequence current can be carried in the stator winding because in such a case an additional group of parasitic torques related to MFF space harmonics of orders $\nu=3+6n$ occur in the motor (Fig.2c).

The main conclusion included in the paper is that the reason for less favourable operating properties of 3-phase motors supplied from 1-phase network is not only asynchronous torque component connected with working magnetic-field space harmonic ($\nu=p$) and due to negative-sequence currents but also new additional synchronous parasitic torques arising at standstill and in the motor region which deteriorate starting properties of the machine. This conclusion is verified experimentally (Fig.6 and Fig.7). It results from this consideration that a 3-phase squirrel-cage motor in which large synchronous torque occurs in the brake region under balanced conditions cannot be recommended, in general, for supplying from 1-phase source.