

Krzysztof PIEŃKOWSKI ¹⁾

ANALIZA SKŁADOWYCH PRĄDÓW I MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO DWUTWORNIKOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO

Streszczenie. Przedstawiono ogólne równania wektorowe modelu matematycznego dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego. Podano zależności opisujące wektory prądów elektrycznych tworników i wirnika oraz moment elektromagnetyczny silnika. Wprowadzono rozdział prądów i momentu elektromagnetycznego na składowe zależne od wektorów napięć fazowych tworników silnika. Wyznaczono zależności analityczne opisujące składowe momentu elektromagnetycznego silnika. Przedstawiono wyznaczone obliczeniowo przebiegi charakterystyk momentów składowych i wypadkowego momentu elektromagnetycznego dla różnych grup połączeń uzwojeń tworników silnika.

ANALYSIS OF ELECTRICAL CURRENT AND ELECTROMAGNETIC TORQUE COMPONENTS OF DOUBLE ARMATURE SQUIRREL-CAGE INDUCTION MOTOR

Summary. The general vector equations of mathematical model of double armature squirrel-cage induction motor have been presented. The relations describing the vectors of armature and rotor currents and the relation of electromagnetic torque have been developed. The separation of motor currents and electromagnetic torque on appropriate components has been introduced. The analytical expressions that describe the current and torque components are given. The calculated torque-slip characteristics of torque components and resultant torque for various connections groups of armature phase windings have been presented and discussed.

Key words: double armature squirrel – cage induction motor, analysis, electromechanical characteristics

1. WSTĘP

Silnik dwutwornikowy należy do nowych, obecnie rozwijanych konstrukcji silników indukcyjnych klatkowych [1-4]. Silnik ten składa się z dwóch trójfazowych uzwojeń stojana, nazywanych twornikami, sprzężonych magnetycznie ze wspólnym uzwojeniem klatkowym wirnika. Uzwojenia fazowe tworników silnika mogą pracować przy różnej konfiguracji połączeń. W zależności od sposobu skojarzenia uzwojeń fazowych tworników oraz ich przyłączenia do sieci trójfazowej wyróżnia się różne grupy połączeń uzwojeń tworników [1].

Dwutwornikowy silnik indukcyjny jest układem elektromechanicznym, w którym występuje złożone oddziaływanie wielkości elektromagnetycznych tworników i wirnika. W pracy przeprowadzono analizę równań wektorowych silnika dwutwornikowego dla stanów statycznych. Na podstawie tych równań wyznaczono zależności określające składowe wektorów prądów tworników, wektora prądu wirnika oraz składowe momentu elektromagnetycznego i wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika dwutwornikowego.

2. RÓWNIANIA SILNIKA DWUTWORNIKOWEGO DLA STANÓW STATYCZNYCH

W analizie dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego przyjęto, że uzwojenia fazowe tworników są symetryczne i mają taką samą liczbę par biegunów. W ogólnym przypadku tworniki mogą być wykonane na różne moce, czyli parametry poszczególnych tworników mogą być różne. Wirnik klatkowy jest sprzężony magnetycznie z dwoma twornikami, natomiast nie występuje sprzężenie magnetyczne między twornikami. Uzwojenie klatkowe wirnika jest sprowadzone do zastępczego uzwojenia trójfazowego o parametrach przeliczonych na stronę uzwojeń tworników.

¹⁾ Dr inż., Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, tel.: 071 320 33 52, fax: 071 320 34 67, e-mail: kpien@imne.pwr.wroc.pl

Wszystkie wielkości wektorowe są rozpatrywane w prostokątnym układzie współrzędnych, wirującym z prędkością kątową równą pulsacji napięcia sieci zasilającej uzwojenia tworników. Poszczególne tworniki i związane z nimi wielkości oraz parametry elektromagnetyczne oznaczono odpowiednio indeksami dolnymi 1, 2.

Ogólny wektorowy układ równań napięciowo-prądowych dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego dla stanów statycznych ma następującą postać [1, 2, 4]:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{s1} \\ \underline{U}_{s2} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} + jX_{s1} & 0 & jX_{m1} \\ 0 & R_{s2} + jX_{s2} & jX_{m2} \\ jX_{m1} & jX_{m2} & R_r/s + jX_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_{s1}(s) \\ \underline{I}_{s2}(s) \\ \underline{I}_r(s) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

gdzie: \underline{U}_{s1} , \underline{U}_{s2} - wektor napięcia twornika 1 i 2; \underline{I}_{s1} , \underline{I}_{s2} , \underline{I}_r - wektor prądu twornika 1 i 2 oraz wektor prądu wirnika; R_{s1} , R_{s2} , R_r - rezystancja fazowa uzwojenia twornika 1 i 2 oraz uzwojenia wirnika; X_{s1} , X_{s2} , X_r - całkowita reaktancja uzwojenia twornika 1 i 2 oraz uzwojenia wirnika; X_{m1} , X_{m2} - reaktancja magnesowania uzwojenia twornika 1 i 2; s - poślizg silnika.

Uzwojenia twornika 1 i 2 mogą pracować przy takiej samej lub różnej konfiguracji połączeń uzwojeń fazowych oraz być przyłączone do tych samych lub różnych faz trójfazowej sieci zasilającej. Wektory napięć fazowych uzwojeń tworników można zapisać następująco:

$$\underline{U}_{s1} = U_{fm1} \cdot \exp(j\gamma_1) = \sqrt{2} U_{f1} \cdot \exp(j\gamma_1) \quad \underline{U}_{s2} = U_{fm2} \cdot \exp(j\gamma_2) = \sqrt{2} U_{f2} \cdot \exp(j\gamma_2), \quad (2)$$

gdzie: U_{fm1} , U_{fm2} - amplitudy napięć fazowych twornika 1 i 2; U_{f1} , U_{f2} - wartości skuteczne napięć fazowych twornika 1 i 2; γ_1 , γ_2 - wartości kątów fazowych napięć fazowych twornika 1 i 2.

W dalszej analizie wprowadzono stałą ϑ zdefiniowaną jako stosunek napięć fazowych tworników:

$$\vartheta = U_{fm2}/U_{fm1} = U_{f2}/U_{f1}. \quad (3)$$

W przypadku zasilania obu tworników z tej samej sieci wartości stałej ϑ wynoszą:

- $\vartheta=1$ - gdy uzwojenia twornika 1 i 2 są połączone w trójkąt (D) lub w gwiazdę (Y);
- $\vartheta=1/\sqrt{3}$ - gdy uzwojenie twornika 2 jest połączone w gwiazdę (Y), a twornika 1 w trójkąt (D);
- $\vartheta=\sqrt{3}$ - gdy uzwojenie twornika 2 jest połączone w trójkąt (D), a twornika 1 w gwiazdę (Y).

Powiązanie między wektorami napięć tworników można przedstawić następująco:

$$\underline{U}_{s2} = \vartheta \underline{U}_{s1} \cdot \exp(j\delta), \quad \delta = \gamma_2 - \gamma_1. \quad (4)$$

Kąt δ jest kątem występującym między wektorami napięć fazowych twornika 1 i 2. W oznaczeniach grup połączeń uzwojeń tworników kąt ten jest podawany za pomocą liczb od 0 do 12, analogicznie do kątów występujących między wskazówką minutową i godzinową zegara [1].

3. ANALIZA SKŁADOWYCH WEKTORÓW PRĄDÓW I MOMENTU SILNIKA DWUTWORNIKOWEGO

Z rozwiązania układu równań (1) otrzymuje się wyrażenia przedstawiające zależność poszczególnych wektorów prądów od wartości poślizgu, parametrów elektromagnetycznych silnika oraz wektorów napięć zasilających uzwojenia tworników. Z wyrażen tych wynika, że każdy wektor prądu silnika dwutwornikowego można przedstawić jako sumę dwóch wektorów składowych. Przyjęto, że składowa pierwsza każdego wektora prądu jest wymuszona działaniem wektora napięcia \underline{U}_{s1} , zasilającego uzwojenie twornika 1, a składowa druga działaniem wektora napięcia \underline{U}_{s2} zasilającego uzwojenie twornika 2. Składowe wektorów prądów oznaczono odpowiednio indeksami górnymi I i II. Wyrażenia opisujące wektory prądów silnika dwutwornikowego można zapisać wtedy następująco:

$$\underline{I}_{s1}(s) = \underline{I}_{s1}^I(s) + \underline{I}_{s1}^{II}(s) = \underline{K}_{s1}^I(s) \cdot \underline{U}_{s1} + \underline{K}_{s1}^{II}(s) \cdot \underline{U}_{s2}, \quad (5)$$

$$\underline{I}_{s2}(s) = \underline{I}_{s2}^I(s) + \underline{I}_{s2}^{II}(s) = \underline{K}_{s2}^I(s) \cdot \underline{U}_{s1} + \underline{K}_{s2}^{II}(s) \cdot \underline{U}_{s2}, \quad (6)$$

$$\underline{I}_r(s) = \underline{I}_r^I(s) + \underline{I}_r^{II}(s) = \underline{K}_r^I(s) \cdot \underline{U}_{s1} + \underline{K}_r^{II}(s) \cdot \underline{U}_{s2}. \quad (7)$$

Wartości stałych w równaniach (5)-(7) są tylko funkcją parametrów elektromagnetycznych oraz poślizgu silnika i wynoszą:

$$\underline{K}_{s1}^I(s) = \frac{(R_{s2} + jX_{s2})(R_r/s + jX_r) + X_{m2}^2}{W(s)}, \quad \underline{K}_{s2}^{II}(s) = \frac{(R_{s1} + jX_{s1})(R_r/s + jX_r) + X_{m1}^2}{W(s)}, \quad (8)$$

$$\underline{K}_{s1}^{II}(s) = \underline{K}_{s2}^I(s) = -\frac{X_{m1}X_{m2}}{W(s)}, \quad \underline{K}_r^I(s) = -\frac{jX_{m1}(R_{s2} + jX_{s2})}{W(s)}, \quad \underline{K}_r^{II}(s) = -\frac{jX_{m2}(R_{s1} + jX_{s1})}{W(s)}, \quad (9)$$

$$\underline{W}(s) = (R_{s1} + jX_{s1})(R_{s2} + jX_{s2})(R_r/s + jX_r) + X_{m1}^2(R_{s2} + jX_{s2}) + X_{m2}^2(R_{s1} + jX_{s1}). \quad (10)$$

Wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika dwutwornikowego M_e jest sumą algebraiczną składowych momentów elektromagnetycznych M_{e1} i M_{e2} . Moment M_{e1} jest wytwarzany przez wzajemne oddziaływanie wektora prądu twornika 1 i wektora prądu wirnika, a moment M_{e2} przez wzajemne oddziaływanie wektora prądu twornika 2 i wektora prądu wirnika [5]. Ogólne zależności opisujące momenty elektromagnetyczne silnika dwutwornikowego mają następującą postać:

$$M_e(s) = M_{e1}(s) + M_{e2}(s), \quad (11)$$

$$M_{e1}(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r(s) \cdot \underline{I}_{s1}^*(s) \right], \quad M_{e2}(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r(s) \cdot \underline{I}_{s2}^*(s) \right], \quad (12)$$

gdzie:

$$C_{m1} = (3/2)p_b X_{m1}/\omega_1, \quad C_{m2} = (3/2)p_b X_{m2}/\omega_1, \quad (13)$$

p_b - liczba par biegunów silnika; ω_1 - pulsacja napięć sieci zasilającej uzwojenia tworników.

Po uwzględnieniu w równaniach (12) rozdziału wektorów prądów na składowe otrzymuje się następujące wyrażenia na moment elektromagnetyczny M_{e1} wnoszony przez uzwojenie twornika 1:

$$M_{e1}(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left\{ \left[\underline{jI}_r^I(s) + \underline{I}_r^{II}(s) \right] \left[\underline{I}_{s1}^{*I}(s) + \underline{I}_{s1}^{*II}(s) \right] \right\} = M_{e1}^I(s) + M_{e1}^{II}(s) + M_{e1}^{III}(s) + M_{e1}^{IV}(s), \quad (14)$$

$$M_{e1}^I(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^I(s) \cdot \underline{I}_{s1}^{*I}(s) \right], \quad M_{e1}^{II}(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^I(s) \cdot \underline{I}_{s1}^{*II}(s) \right], \quad (15)$$

$$M_{e1}^{III}(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^{II}(s) \cdot \underline{I}_{s1}^{*I}(s) \right], \quad M_{e1}^{IV}(s) = C_{m1} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^{II}(s) \cdot \underline{I}_{s1}^{*II}(s) \right]. \quad (16)$$

Po uwzględnieniu w równaniach (12) rozdziału wektorów prądów na składowe otrzymuje się następujące wyrażenia na moment elektromagnetyczny M_{e2} wnoszony przez uzwojenie twornika 2:

$$M_{e2}(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left\{ \left[\underline{jI}_r^I(s) + \underline{I}_r^{II}(s) \right] \left[\underline{I}_{s2}^{*I}(s) + \underline{I}_{s2}^{*II}(s) \right] \right\} = M_{e2}^I(s) + M_{e2}^{II}(s) + M_{e2}^{III}(s) + M_{e2}^{IV}(s), \quad (17)$$

$$M_{e2}^I(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^I(s) \cdot \underline{I}_{s2}^{*II}(s) \right], \quad M_{e2}^{II}(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^I(s) \cdot \underline{I}_{s2}^{*I}(s) \right], \quad (18)$$

$$M_{e2}^{III}(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^{II}(s) \cdot \underline{I}_{s2}^{*II}(s) \right], \quad M_{e2}^{IV}(s) = C_{m2} \cdot \text{Re} \left[\underline{jI}_r^{II}(s) \cdot \underline{I}_{s2}^{*I}(s) \right]. \quad (19)$$

Z równań (14) i (17) wynika, że moment elektromagnetyczny wnoszony przez każdy z tworników składa się z czterech składowych, które oznaczono indeksami górnymi za pomocą kolejnych liczb rzymskich I,II,III,IV. Wypadkowy moment elektromagnetyczny silnika dwutwornikowego M_e jest zatem złożony z ośmiu składowych i opisany wyrażeniem:

$$M_e(s) = M_{e1}(s) + M_{e2}(s) = M_{e1}^I(s) + M_{e1}^{II}(s) + M_{e1}^{III}(s) + M_{e1}^{IV}(s) + M_{e2}^I(s) + M_{e2}^{II}(s) + M_{e2}^{III}(s) + M_{e2}^{IV}(s). \quad (20)$$

Przedstawione powyżej ogólne wyrażenia opisują przebiegi składowych charakterystyk elektromechanicznych oraz przebiegi wypadkowej charakterystyki elektromechanicznej silnika dwutwornikowego o dowolnych wykonaniach tworników. Wyrażenia te mogą być zastosowane do obliczeń charakterystyk silnika dla znanych wartości parametrów elektromagnetycznych oraz wartości napięć zasilających uzwojenia tworników silnika.

4. ANALIZA MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO SYMETRYCZNEGO SILNIKA DWUTWORNIKOWEGO

Silniki dwutwornikowe są najczęściej budowane jako silniki o symetrycznych twornikach wykonanych na takie same wartości mocy. Parametry elektromagnetyczne silnika spełniają wtedy następujące warunki symetrii:

$$X_s = X_{s1} = X_{s2}, \quad X_m = X_{m1} = X_{m2}, \quad X_r = X_{r0} + 2X_m, \quad C_m = C_{m1} = C_{m2} = (3/2)p_b X_m / \omega_1. \quad (21)$$

Przedstawione w poprzednim rozdziale wyrażenia opisujące składowe momentów elektromagnetycznych i moment wypadkowy symetrycznego silnika dwutwornikowego można przekształcić do podanych poniżej prostych zależności analitycznych, bardzo wygodnych do praktycznych obliczeń.

Zależności opisujące poszczególne składowe momentu elektromagnetycznego M_{e1} wynoszą:

$$M_{e1}^I(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^I(s) \cdot i_{-s1}^{*I}(s) \right] = (1 + 0.5\epsilon_s) \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (22)$$

$$M_{e1}^{II}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^I(s) \cdot i_{-s1}^{*II}(s) \right] = -0.5\epsilon_s \cdot \left(\cos \delta + \frac{X_s}{R_s} \sin \delta \right) \cdot g \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (23)$$

$$M_{e1}^{III}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^{II}(s) \cdot i_{-s1}^{*I}(s) \right] \\ = \left[\cos \delta + 0.5\epsilon_s \cdot \left(\cos \delta - \frac{X_s}{R_s} \sin \delta \right) + s \cdot \frac{X_r}{R_r} \sin \delta \right] \cdot g \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (24)$$

$$M_{e1}^{IV}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^{II}(s) \cdot i_{-s1}^{*II}(s) \right] = -0.5\epsilon_s \cdot g^2 \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}. \quad (25)$$

Wypadkowy moment elektromagnetyczny M_{e1} twornika 1 jest opisany równaniem:

$$M_{e1}(s) = M_{e1}^I(s) + M_{e1}^{II}(s) + M_{e1}^{III}(s) + M_{e1}^{IV}(s) \\ = \left[1 + g \cos \delta + 0.5\epsilon_s \cdot (1 - g^2) + s \cdot g \cdot \left(\frac{X_r}{R_r} - \epsilon \frac{X_s}{R_s} \right) \sin \delta \right] \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}. \quad (26)$$

Zależności opisujące poszczególne składowe momentu elektromagnetycznego M_{e2} wynoszą:

$$M_{e2}^I(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^{II}(s) \cdot i_{-s2}^{*II}(s) \right] = (1 + 0.5\epsilon_s) \cdot g^2 \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (27)$$

$$M_{e2}^{II}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^{II}(s) \cdot i_{-s2}^{*I}(s) \right] = -[0.5\epsilon_s \cdot \left(\cos \delta - \frac{X_s}{R_s} \sin \delta \right)] \cdot g \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (28)$$

$$M_{e2}^{III}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^I(s) \cdot i_{-s1}^{*II}(s) \right] \\ = \left[\cos \delta + 0.5\epsilon_s \cdot \left(\cos \delta + \frac{X_s}{R_s} \sin \delta \right) - s \cdot \frac{X_r}{R_r} \sin \delta \right] \cdot g \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}, \quad (29)$$

$$M_{e2}^{IV}(s) = C_m \cdot \operatorname{Re} \left[j_{-r}^I(s) \cdot i_{-s1}^{*I}(s) \right] = -0.5\epsilon_s \cdot \frac{2(1 + \epsilon_s k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon_s k}. \quad (30)$$

Wypadkowy moment elektromagnetyczny M_{e2} twornika 2 jest opisany równaniem:

$$M_{e2}(s) = M_{e2}^I(s) + M_{e2}^{II}(s) + M_{e2}^{III}(s) + M_{e2}^{IV}(s) \\ = \left[\vartheta^2 + \vartheta \cos \delta - 0.5\epsilon s \cdot (1 - \vartheta^2) - s \cdot \vartheta \cdot \left(\frac{X_r}{R_r} - \epsilon \frac{X_s}{R_s} \right) \cdot \sin \delta \right] \cdot \frac{2(1 + \epsilon s_k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon s_k} \quad (31)$$

Zależność na wypadkowy moment elektromagnetyczny M_e silnika dwutwornikowego ma następującą postać:

$$M_e(s) = M_{e1}(s) + M_{e2}(s) = \left(1 + \vartheta^2 + 2\vartheta \cdot \cos \delta \right) \cdot \frac{2(1 + \epsilon s_k) M_{ek}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2\epsilon s_k} \quad (32)$$

Wielkości s_k , ϵ i M_{ek} występujące w powyższych wyrażeniach zdefiniowane są następująco:

$$s_k = \pm R_r \cdot \frac{\sqrt{R_s^2 + X_s^2}}{\sqrt{(R_s X_r)^2 + (X_s X_r - 2X_m^2)^2}}, \quad \epsilon = \frac{R_s}{R_r} \cdot \frac{2X_m^2}{R_s^2 + X_s^2}, \quad (33)$$

$$M_{ek} = \pm (3/2) p_b \cdot \frac{X_m^2}{\omega_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_s^2 + X_s^2) \left[(R_s X_r)^2 + (X_s X_r - 2X_m^2)^2 \right]}} \cdot U_{\Omega 1}^2 \quad (34)$$

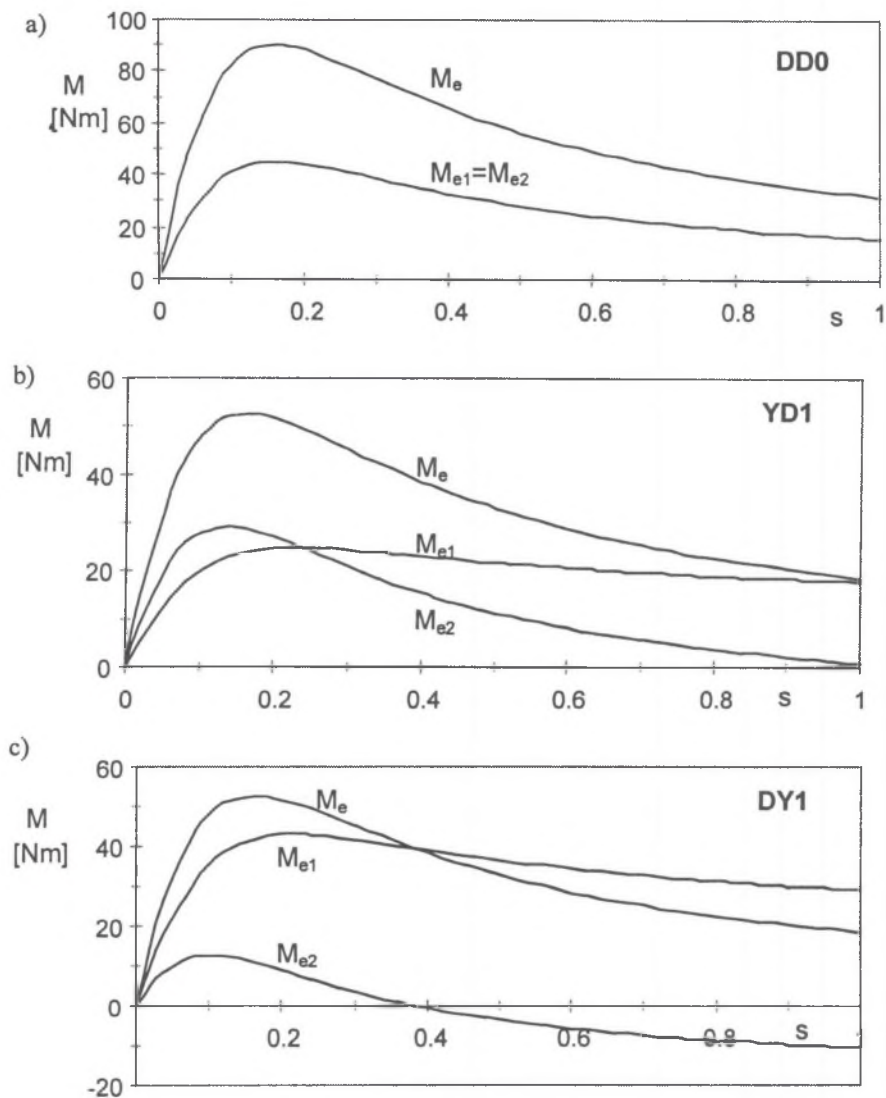
W przedstawionych wzorach znak „+” dotyczy pracy silnika dwutwornikowego przy poślizgach $s > 0$, a znak „-” przy poślizgach $s < 0$. Wielkości określone zależnościami (33) - (34) mają podobną interpretację jak dla silników indukcyjnych o konwencjonalnej konstrukcji i oznaczają odpowiednio: s_k - poślizg krytyczny silnika, ϵ - stała elektromagnetyczna, M_{ek} - moment krytyczny.

Z przedstawionej analizy wynika, że momenty składowe i moment wypadkowy silnika dwutwornikowego mogą być opisane analitycznie przez wzory podobne do wzoru Klossa stosowanego do konwencjonalnych silników indukcyjnych. Moment elektromagnetyczny silnika dwutwornikowego jest złożony z wielu składowych momentu. W wypadkowym momencie elektromagnetycznym symetrycznego silnika dwutwornikowego występują tylko trzy składowe, gdyż pozostałe składowe momentów elektromagnetycznych są wtedy sobie równe, lecz przeciwnie skierowane i suma algebraiczna tych składowych jest równa zeru.

5. OBLICZENIA CHARAKTERYSTYK MECHANICZNYCH SILNIKA DWUTWORNIKOWEGO

Obliczenia wykonano dla symetrycznego dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego o następujących parametrach elektromagnetycznych: $R_s=R_{s1}=R_{s2}=2.4 \Omega$, $R_r=3.3 \Omega$; $X_s=X_{s1}=X_{s2}=80.9 \Omega$; $X_r=76.4 \Omega$, $X_m=X_{m1}=X_{m2}=72.0 \Omega$; $p_b=1$. Przyjęto, że uzwojenia tworników są zasilane z tej samej symetrycznej sieci trójfazowej o napięciu międzyprzewodowym $U=380$ V. Wybrane wyniki obliczeń charakterystyk mechanicznych silnika dwutwornikowego przedstawiające zależność momentów składowych i wypadkowego momentu elektromagnetycznego od poślizgu przedstawiono na rys.1.

Z przedstawionych wyników obliczeń wynika, że w przypadku zastosowania grupy połączeń DD0 (rys.1a) wartości składowych momentu elektromagnetycznego $M_{e1}(s)$ i $M_{e2}(s)$ pochodzące od poszczególnych tworników są sobie równe przy wszystkich wartościach poślizgów silnika. Udział twornika 1 i twornika 2 w całkowitym momencie elektromagnetycznym silnika jest wtedy taki sam, czyli moment wypadkowy jest zawsze dwukrotnie większy od momentu wnoszonego przez każdy z tworników. Dotyczy to również przypadku zastosowania grupy połączeń YY0.



Rys.1. Przebiegi charakterystyk składowych momentu elektromagnetycznego $M_{e1}(s)$ i $M_{e2}(s)$ oraz charakterystyki wypadkowej $M_e(s)$ dla różnych grup połączeń uzwojeń tworników

Fig.1. The torque-slip characteristics of torque components $M_{e1}(s)$, $M_{e2}(s)$ and resultant torque $M_e(s)$ for various connections groups of armature phase windings

Natomiast dla innych grup połączeń tworników wartości składowych momentu elektromagnetycznego $M_{e1}(s)$ i $M_{e2}(s)$ pochodzące od poszczególnych tworników mogą znacznie różnić się między sobą. Na rys.1b,c przedstawiono wyniki obliczeń charakterystyk mechanicznych dla grup połączeń YD1 i DY1. Dla tych grup połączeń tworników uzyskuje się takie same przebiegi

charakterystyki wypadkowej momentu $M_e(s)$, czyli pod tym względem te układy połączeń tworników są sobie równoważne.

Nie dotyczy to jednak równoważności przebiegu składowych momentów $M_{e1}(s)$ i $M_{e2}(s)$, które dla tych grup połączeń są różne. Dla grupy YD1 składowe momenty $M_{e1}(s)$ i $M_{e2}(s)$ w rozpatrywanym przedziale poślizgów silnika są zawsze momentami o działaniu napędowym. Oznacza to, że oba tworniki biorą udział w przetwarzaniu energii elektrycznej na mechaniczną, ale w stopniu proporcjonalnym do względnej wartości wytwarzanego momentu elektromagnetycznego. Dla grupy połączeń DY1 występuje przypadek, że w dużym przedziale poślizgów silnika jedna ze składowych momentów jest momentem o działaniu hamującym, a druga składowa momentem o działaniu napędowym. Oznacza to, że część mocy elektrycznej pobranej przez jeden z tworników nie jest przetwarzana na moc mechaniczną, lecz jest zwracana przez drugi twornik do sieci zasilającej. Tego rodzaju przepływ energii nie jest celowy, gdyż jest związany z powstaniem w silniku dodatkowych strat mocy oraz z nadmiernym poborem mocy przez ten twornik, który wytwarza moment o działaniu napędowym.

6. PODSUMOWANIE

Silnik dwutwornikowy jest nową konstrukcją silników indukcyjnych klatkowych. Uzwojenia fazowe tworników silnika w zależności od konfiguracji ich połączeń oraz od sposobu ich przyłączenia do trójfazowej sieci zasilającej mogą pracować przy różnych grupach połączeń tworników. W stanach statycznych prądy w uzwojeniach tworników silnika składają się ze składowych wymuszonych przez napięcia sieci zasilającej uzwojenia poszczególnych tworników. Moment elektromagnetyczny silnika dwutwornikowego w stanach statycznych składa się z wielu składowych, które są określone przez wzajemne oddziaływanie poszczególnych składowych prądów tworników i wirnika. Przebiegi statycznych charakterystyk mechanicznych momentów składowych i momentu wypadkowego można przedstawić w postaci prostych zależności analitycznych wygodnych do praktycznych obliczeń. Znajomość charakterystyk składowych silnika jest przydatna przy wyborze grupy połączeń tworników.

LITERATURA

1. Herman B., Karwacki W., Pieńkowski K., Suseł M., Lisowski J.: Charakterystyki elektromechaniczne i elektrodynamiczne dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego. *Górnictwo Odkrywkowe*, XLI, Nr 6, 1999, s.22-39.
2. Herman B., Karwacki W., Lisowski J., Pieńkowski K., Suseł M.: Dwutwornikowy silnik asynchroniczny klatkowy do napędu agregatów pompowych o regulowanej wydajności. *Zeszyt Specjalny*, Wydawnictwo: Redakcja Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław 2000.
3. Munoz-Garcia A., Lipo T.A.: Dual Stator Winding Induction Machine Drive. *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, St. Louis, Oct.1998, pp. 601-608.
4. Pieńkowski K., Herman B., Karwacki W., Lisowski J., Suseł M.: Model matematyczny dwutwornikowego silnika indukcyjnego klatkowego. *Materiały Konferencji: XXXVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME2000, Szklarska Poręba, 13-17 czerwca 2000*, s.28-36.
5. Paszek W.: *Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1986

Recenzent: Dr hab. inż. Włodzimierz Przyborowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

Abstract

In the paper a new double armature squirrel-cage induction motor is described. The proposed induction machine consists of a stator with two separate no-coupled magnetically three-phase windings wound for the same number of poles. The stator windings are coupled magnetically with a common, standard squirrel-cage rotor. The three-phase stator windings of the motor can be connected and supplied in various ways. The all ways of connections and supplying can be considered as the groups of connections of stator armature windings. The reconnections of stator windings for various groups offer flexibility to manipulate the resultant torque-slip curves of the motor.

The general voltage system of vector equations of the mathematical model of a double armature squirrel-cage induction motor for steady-state operation is given by the system of equations (1). From the solution of this system the detailed expressions (5)-(10) determining the vectors of stator and rotor currents are developed. All vectors of motor currents can be divided in two components. The first component of each vector current is caused by the vector of phase voltage of stator 1. The second component of each vector current component is caused by the vector of phase voltage of stator 2.

The resultant electromagnetic torque of the double armature squirrel-cage induction motor consists of two basic components: the first torque component is produced by armature 1 of the stator and the second torque component is produced by armature 2 of the stator. These basic torque components are described by general expressions (11)-(13). After including the vector current components in these expressions the detailed relationships (14)-(19) determining the electromagnetic torque components are developed. The obtained expression (20) shows that the resultant electromagnetic torque can contain in general case eight components.

In the further analysis the symmetrical double armature squirrel-cage induction motor is considered. The analytical expressions describing the electromagnetic torque components are developed and presented in equations (22)-(31). It has been shown that in the case of motor armature symmetry the resultant electromagnetic torque of the double armature squirrel-cage induction motor can include three basic components. The simple analytical relationship describing the resultant torque-slip curve is developed (Eq.32).

The results of calculations of the torque-slip curves of a double armature squirrel-cage induction motor are presented in Fig.1. It has been shown that by the change of groups of connections of stator armature windings it is possible to manipulate the resultant torque-slip curves of the motor. The share of electromagnetic torque components in the resultant electromagnetic torque is different for various groups of connections of stator armature windings. For some groups of connections all torque components are motor components. For other groups of connections some torque components are braking components. It indicates that the nature of electromechanical conversion in the double armature squirrel-cage induction motor is more complex in comparison to classical squirrel-cage induction motor.