

Analiza korzyści zastosowania uzwojeń 6-fazowych w silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi

Streszczenie. Współcześnie do zasilania silników elektrycznych o liczbie faz ($m > 3$) stosowane są dedykowane falowniki. Artykuł dotyczy silników z magnesami trwałymi z uzwojeniem 2 x 3-fazowym z przesunięciem fazowym 30°. Uzwojenia zasilane są napięciem 2 x 3-fazowym przesuniętym czasowo względem siebie o kąt $\pi/6 \approx 30^\circ$. Silniki w stosunku do uzwojenia symetrycznego fazy 3 i 6 osiągają wyższy znamionowy moment obrotowy i kompensację harmonicznych obwodowych siły magnetomotorycznej (SMM) twornika θ_μ dla $\mu = 5, 7, 17, 19, 29, 31$, co skutkuje mniejszymi stratami mocy, niższymi pulsacjami momentu elektromagnetycznego, niższym hałasem magnetycznym i niższymi wibracjami. Takie silniki polecane są przede wszystkim do stosowania w serwonapędach.

Abstract: The electric motors with the number of phases ($m > 3$) are dedicated to power supply from inverters. The article concerns permanent magnet motors with a 2 x 3-phase winding with a phase shift of 30°. The windings are supplied with 2 x 3-phase voltage temporarily shifted in relation to each other by the angle $\pi/6 = 30^\circ$. Motors, in relation to the 3rd and 6th phase symmetrical winding, achieve a higher rated torque and compensation of harmonics of magnetomotive force (MMF) of the armature θ_μ for $\mu = 5, 7, 17, 19, 29, 31$, which results in lower power losses, lower pulsations of the electromagnetic torque, lower magnetic noise and lower vibrations. Such motors are recommended primarily for use in servo drives. **(Analysis of the benefits of using 6-phase windings in motors excited with permanent magnets)**

Słowa kluczowe: silniki 6-cio fazowe, silniki z magnesami trwałymi, 6-cio fazowe uzwojenia, niesymetryczne uzwojenie 6-ciofazowe.

Keywords: 6-phase motors, permanent magnet synchronous motors, 6-phase windings, non-symmetrical 6-phase windings

Wstęp

W maszynach elektrycznych współpracujących z falownikami można stosować dowolną liczbę faz. Na przykład uzwojenie 6-fazowe w silnikach indukcyjnych i w silnikach z magnesami trwałymi stosowane jest głównie ze względów na falownik. Końcówki uzwojenia przyłączone do skrzynek zaciskowych w silniku 6-fazowym, mają o połowę mniejszy przekrój niż w silniku 3-fazowym o tej samej mocy znamionowej i tym samym napięciu znamionowym, bądź też w silniku o tej samej mocy znamionowej i tym samym prądzie znamionowym napięcie znamionowe w silniku 6-fazowym jest o połowę niższe niż w silniku 3-fazowym. Zawory energoelektroniczne w falowniku zasilającym mają mniejszy prąd znamionowy lub niższe napięcie znamionowe.

W silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi występują trzy rodzaje harmonicznych:

- harmoniczne obwodowe indukcji magnetycznej $B_\eta(x)$ i strumienia magnetycznego Φ_η w szczelinie, wzbudzone przez magnesy trwałe, które oznaczają się indeksem η ,

- harmoniczne obwodowe siły magnetomotorycznej SMM $\theta_\mu(x)$ uzwojenia twornika skupionego w żłobkach, oznaczane indeksem μ ,

- harmoniczne czasowe napięcia zasilania $U_v(t)$ i prądu $I_v(t)$ generowane przez falownik oraz napięcia rotacji $E_v(t)$, oznaczane indeksem v .

Generacja harmonicznych obwodowych indukcji magnetycznej $B_\eta(x)$ i SMM $\theta_\mu(x)$ w szczelinie pochodzi od:

- usytuowania magnesów trwałych w obwodzie magnetycznym,

- żłobków stojana,

- uzwojenia stojana skupionego w żłobkach.

Generację momentu obrotowego determinują tylko pierwsze harmoniczne: $\Phi_{\eta=1}(x)$, $\theta_{\mu=1}(x)$, $I_{v=1}(t)$, pozostałe harmoniczne $\Phi_{\eta>1}(x)$, $\theta_{\mu>1}(x)$, $I_{v>1}(t)$, zakłócają pracę silnika, powiększają straty mocy i generują hałas.

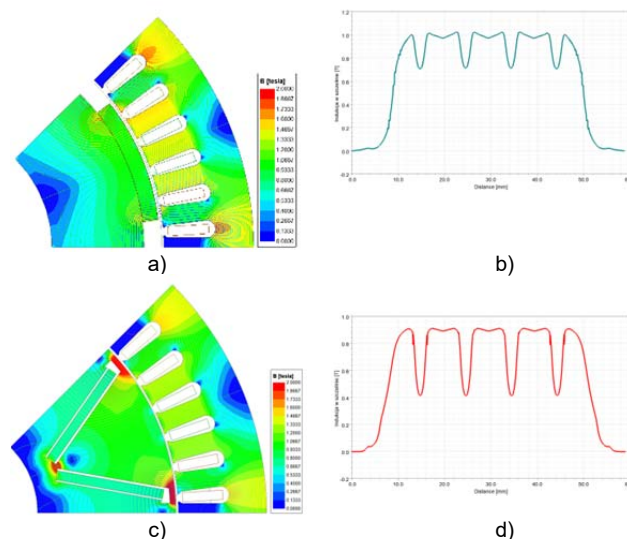
W artykule pokazano jak poprzez sytuowanie magnesów trwałych oraz rodzaju zastosowanego uzwojenia można ograniczyć wpływ wyższych harmonicznych na pracę silnika.

Rozkład indukcji w szczelinie wzbudzonej magnesami trwałymi

Magnesy trwałe mogą być umieszczone na powierzchni

wirnika SPM (ang. *Surface Permanent Magnet*), bądź wewnątrz jarzma wirnika IPM (ang. *Inset Permanent Magnet*). Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie, wzbudzonej przez magnesy trwałe, zostanie przedstawiony na przykładzie maszyny o wielkości mechanicznej 132. Przyjęto następujące założenia do obliczenia obwodu magnetycznego:

- Parametry znamionowe silnika: 20 kW, 96 VDC, 220 A, 1500 obr/min;
- Średnice pakietu blach stojana: wewnętrzna $D = 151$ mm, zewnętrzna $D_1 = 208$ mm;
- Średnica wirnika: zewnętrzna $d_1 = 148,5$ mm (SPM), $d_1 = 149,5$ mm (IPM), wewnętrzna $d_2 = 48$ mm;
- Długość czynna pakietów blach: $L_{Fe} = 130$ mm;
- Magnesy trwałe typu N33SH;
- Liczba żłobków stojana: $Q_1 = 48$;
- Liczba par biegunów: $p = 4$.



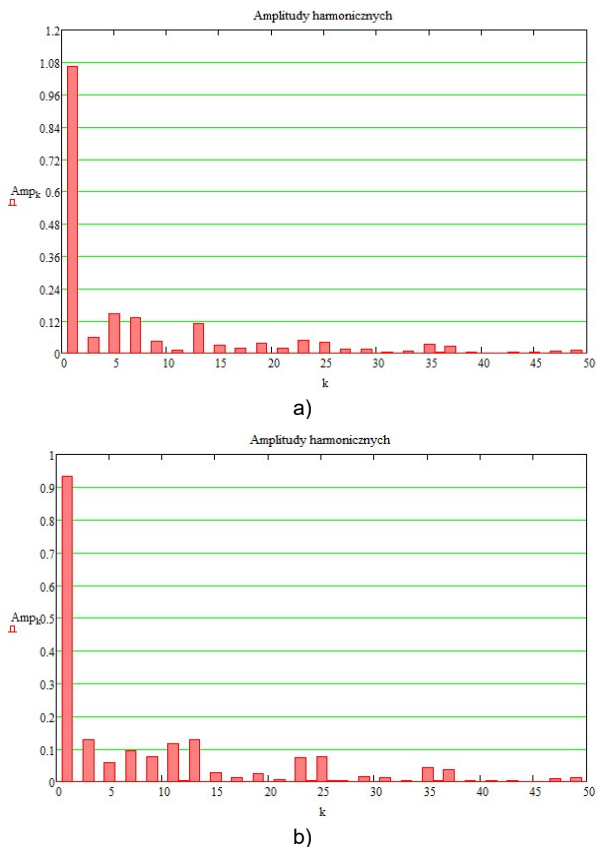
Rys.1. Rozkład indukcji magnetycznej pod jednym biegunem maszyny PM Sg132S4: a, c) jako mapa na obwodzie magnetycznym, b, d) w szczelinie w funkcji (x) , a, b) przy magnesach trwałych umieszczonych na powierzchni jarzma wirnika (*wariant I*), c, d) przy magnesach trwałych umieszczonych wewnątrz jarzma wirnika (*wariant II*)

Wykonano obliczenia dwóch wariantów rozwiązania wirnika przy tym samym obwodzie stojana. Objętość magnesów trwałych w obu wariantach jest zbliżona.

Wariant I. Magnesy trwałe o kształcie łukowym są umieszczone na zewnętrznej powierzchni jarzma wirnika (typu SPM). Wymiary magnesów trwałych: średnica zewnętrzna 148,5 mm, grubość 5 mm, kąt łuku 31,5°, długość $l_{PM} = 130$ mm.

Wariant II. Magnesy trwałe są umieszczone w szczelinach wewnątrz jarzma wirnika (typu IPM). Magnes trwałe są prostokątne o wymiarach: 35 x 43,3 x 3 mm, 0, długość $l_{PM} = 130$ mm.

Wyniki obliczeń rozkładu obwodowego indukcji magnetycznej w szczelinie przedstawiono na rysunku 1, a harmoniczne obwodowe tego rozkładu na rys. 2 i w Tabeli 1.



Rys. 2. Rozkład harmonicznych indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej a) wariant I wirnika, b) wariant II wirnika

Tabela 1. Harmoniczne rozkład obwodowego indukcji w szczelinie

Nr harmonicznej Indukcji B_{η}	132S4 Wariant I	132S4 Wariant II
	T	T
1	1,064	0,936
3	0,06	0,132
5	0,147	0,055
7	0,131	0,093
9	0,044	0,077
11	0,011	0,121
13	0,11	0,126
15	0,03	0,031

Sumaryczna zawartość wyższych harmonicznych obwodowych indukcji:

Wariant I

$$(1) \quad B_{sr(\eta=3+15)}^I = \sqrt{\sum_{\eta=3}^{15} B_{\eta}^2} = 0,240 \text{ T}$$

$$(2) \quad B_{sr(\eta=5,7,11,13)}^I = \sqrt{\sum_{\eta=5}^{13} B_{\eta}^2} = 0,226 \text{ T}$$

Wariant II

$$(3) \quad B_{sr(\eta=3+15)}^{II} = \sqrt{\sum_{\eta=3}^{15} B_{\eta}^2} = 0,259 \text{ T}$$

$$(4) \quad B_{sr(\eta=5,7,11,13)}^{II} = \sqrt{\sum_{\eta=5}^{13} B_{\eta}^2} = 0,203 \text{ T}$$

W wariacie I harmoniczne rzędu $\eta=5,7$ posiadają największe wartości, natomiast w wariacie II największą wartość ma harmoniczna rzędu $\eta = 3$.

Strumień magnetyczny harmonicznej $\eta = 1$.

Wariant I

$$(5) \quad \Phi_{I(\eta=1)} = \frac{2}{\pi} B_1 \frac{\pi d_1}{2p} l_{PM} = B_1 \frac{d_1}{2} l_{PM} = 10,3 \cdot 10^{-3}$$

Wariant II

$$(6) \quad \Phi_{II(\eta=1)} = \frac{2}{\pi} B_1 \frac{\pi d_1}{2p} l_{PM} = B_1 \frac{d_1}{2} l_{PM} = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Strumienie $\Phi_{I\eta}$ i $\Phi_{II\eta}$ zestawiono w Tabeli 2.

Wszystkie harmoniczne strumienia Φ_{η} wirują z prędkością kątową wirnika:

$$(7) \quad \omega_{m\eta} = \omega_m = \pi \frac{n}{30}$$

Prędkość kątową elektryczną harmonicznych strumienia:

$$(8) \quad \omega_{\eta} = \pi \frac{n}{30} p_{\eta} = \eta \pi \frac{n}{30} p$$

Harmoniczne strumienia Φ_{η} , przy wirowaniu wirnika, indukują w uzwojeniu napięcie rotacji, lecz tylko strumień harmonicznej $\eta = 1$ generuje moment elektromagnetyczny użyteczny.

(9)

$$E_v(t) = 4,44 N k_{uv} \Phi_{\eta} f$$

Tabela 2. Wartości poszczególnych harmonicznych strumienia wzbudzenia

Nr harmonicznej strumienia Φ_{η}	132S4- wari. I 10^{-3} Wb	132S4- wari. II 10^{-3} Wb
1	10,3	9,1
3	0,6	1,3
5	1,4	0,5
7	1,3	0,9
9	0,4	0,8
11	0,1	1,2
13	1,1	1,2
15	0,3	0,3

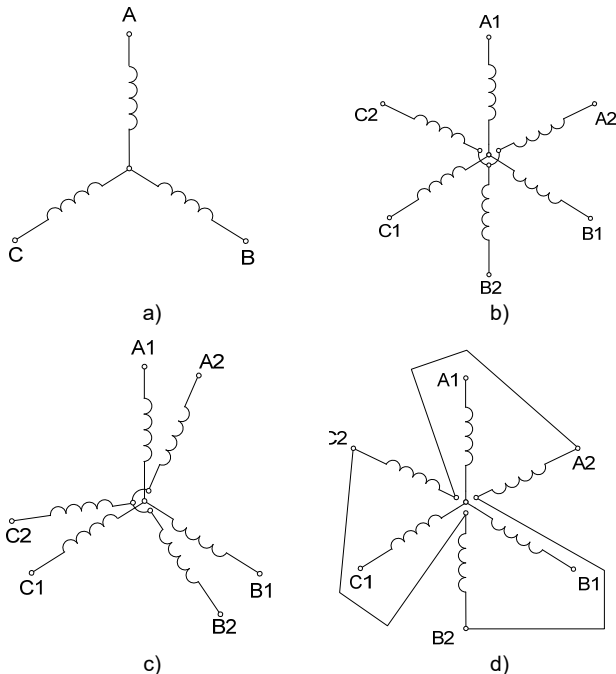
Uzwojenie twornika

Rozpatrzmy uzwojenia twornika: 3-fazowe, 6-fazowe symetryczne i 6-fazowe z niesymetrycznym układem osi faz, których schematy przedstawiono na rysunku 3.

Uzwojenia można wykonywać jako jednowarstwowe lub dwuwarstwowe. Uzwojenie jednowarstwowe standardowo wykonuje się jako średnicowe. Wykonanie uzwojenia jednowarstwowego skróconego, ze względu na ukształtowanie czoł, stwarza dodatkowe trudności technologiczne. Uzwojenie dwuwarstwowe można wykonywać jako średnicowe i jako skrócone, przy czym częściej jest wykonywane uzwojenie skrócone.

Uzwojenie 3-fazowe (rys. 3a) jest uzwojeniem standardowym i jest połączone w gwiazdę. Uzwojenie 6-fazowe symetryczne (rys. 3b) można wykonać tak, że obydwie uzwojenia leżą w tych samych żłobkach wypełniając żłobki po połowie, a przy parzystej liczbie par

biegunów, można wykonać tak, że pod jedną parą biegunów jest jedno uzwojenie, a pod drugą parą biegunów drugie uzwojenie. W obydwoch rozwiązaniach są to dwa uzwojenia 3-fazowe, w których kąt elektryczny między kolejnymi fazami wynosi 60° . Uzwojenie 6-fazowe symetryczne ma dokładnie takie same współczynniki uzwojenia grupy k_{gv} i skrótu k_{sv} co uzwojenie 3-fazowe i takie same właściwości magnetyczne, dlatego uzwojeniem tym nie zajmowano się w pracy.



Rys. 3. Schemat uzwojenia twornika: a) 3-fazowego, b) 6-fazowego symetrycznego c) 6-fazowe niesymetryczne YY, d) 6-fazowego niesymetrycznego YD

Porównując uzwojenia 6-fazowe z symetrycznym i niesymetrycznym usytuowaniem osi faz należy zwrócić uwagę na harmoniczne obwodowe siły magnetomotorycznej θ_μ generowane przez prąd sinusoidalny (1 - harmoniczna) o pulsacji ω_1 płynący w uzwojenia twornika skupionym w żłobkach. Harmoniczne te wirują z prędkością kątową mniejszą (9).

$$(10) \quad \omega_{m\mu} = \pi \frac{n}{30\mu} = \frac{\omega_1}{\mu p}$$

W układach 3-fazowych harmoniczne SMM $\theta_{\mu=3n}=0$. Największą wartości mają harmoniczne SMM $\theta_{(\mu=5)}$ i $\theta_{(\mu=7)}$. Harmoniczne SMM $\theta_{(\mu>1)}$ generują dodatkowe straty mocy w obwodzie magnetycznym. Harmoniczne SMM $\theta_{(\mu>1)}$ i harmoniczne strumienia $\Phi_{(\mu>1)}$ o tej samej biegunowości $\mu = 1/\mu$, wirują z różnymi mechanicznymi prędkościami kątowymi: $\omega_{m1} = \omega_m$, a $\omega_{m\mu} = \omega_m / \mu$, współdziałają z sobą i generują zmienny moment elektromagnetyczny $T_{\mu1}(t)$, który przy małym momencie bezwładności J układu napędowego może ujawniać się w kołysaniu prędkości obrotowej, zakłócając pracę napędzanych maszyn.

Uzwojenie 6-fazowe niesymetryczne

Uzwojenie 6-fazowe niesymetryczne ma kąty, między osiami dwóch 3-fazowych uzwojeń A1B1C1 i A2B2C2, kolejno 30° i 90° . Na obwodzie twornika (stojana) jest Q żłobków. Przy uzwojeniu 3-fazowym (rys. 3a) liczba żłobków na biegun i fazę uzwojenia wynosi:

$$(11) \quad q = \frac{Q}{3 \cdot 2p}$$

Jeśli q jest liczbą parzystą, to uzwojenie A1B1C1 zajmuje $(0,5q)$ żłobków pod biegunem i uzwojenie A2B2C2 zajmuje $(0,5q)$ żłobków pod biegunem usytuowanych obok siebie. Kąt elektryczny między napięciami żłobkowymi tych grup żłobków wynosi 30° . Obydwa uzwojenia są połączone identycznie w gwiazdę lub trójkąt (rys. 3c). Współczynnik grupy k_{gv} obydwoch uzwojeń dotyczy liczby żłobków $(0,5q)$ i jest większy niż w uzwojeniu 3-fazowym. Uzwojenia A1B1C1 i A2B2C2 mają dokładnie takie same reaktancje rozproszenia. Zatem jest to rozwiązanie korzystne.

Jeśli q jest liczbą nieparzystą, to jedno uzwojenie jest połączone w gwiazdę A1B1C1, a drugie A2B2C2 w trójkąt (rys. 3d). Uzwojenia muszą być umieszczone w tych samych żłobkach, wówczas kąt elektryczny między wektorami wirującymi SMM obydwoch uzwojeń wynosi 30° . Takie wykonanie wymaga aby uzwojenie A1B1C1 wypełniało połowę żłobków, a uzwojenie A2B2C2 wypełniało drugą połowę żłobków. Aby uzwojenia miały takie same reaktancje rozproszenia, to liczba boków zezwojów umieszczonych przy dnie żłobków jednego i drugiego uzwojenia powinna być identyczna. Warunek ten dotyczy także położenia boków zezwojów przy klinach. Technologia uzawajania jest bardziej kłopotliwa, dlatego jest to rozwiązanie mniej korzystne.

Podsumowując, uzwojenia A1B1C1 i A2B2C2 mogą być wykonane w dwóch wariantach:

- przy połączeniu obydwoch uzwojeń w gwiazdy lub trójkąty, q jest parzyste, a boki zezwojów faz jednoimiennych np. A1 i A2 są umieszczone w różnych żłobkach położonych obok siebie,
- przy połączeniu uzwojenia A1B1C1 w gwiazdę a uzwojenia A2B2C2 w trójkąt q może być parzyste bądź nieparzyste, a boki zezwojów faz jednoimiennych np. A1 i A2 są umieszczone w tych samych żłobkach.

Takie dwa uzwojenia można połączyć w szereg, wówczas otrzymuje się uzwojenie 3-fazowe. Współczynnik grupy k_{gv} uzwojenia jest wówczas identyczny jak w uzwojeniu 3-fazowym.

Uzwojenie 6-fazowe niesymetryczne można scharakteryzować na przykładzie uzwojenia o liczbie par biegunów $p = 2$, przy parzystej liczbie $q = Q/(3 \cdot 2p) = 2,4$ i 6 i liczbie nieparzystej $q = 3$ i 5. Współczynniki grupy uzwojenia k_{gv} i współczynniki skrótu k_{sv} zestawiono w Tabeli 3.

Tabela 3. Współczynniki grupy i skrótu uzwojenia

		$p = 2$						
		Q	q	1	5	7	11	13
k_{gv}	Q	24	2	0,96	0,217	-0,177	-0,177	0,217
	q	36	3	0,966	0,259	-0,259	-0,966	-0,966
		48	4	0,957	0,2	-0,149	-0,11	0,102
		60	5	0,96	0,217	-0,177	-0,177	0,217
		72	6	0,966	0,259	0,259	0,966	-0,966
k_{sv}	y/τ	5/6	0,866	-0,866	0,866	-0,866	0,866	
		2/3	1	1	1	1	1	

Współczynnik uzwojenia

$$(12) \quad k_{uv} = k_{gv} k_{sv}$$

Uzwojenie jest zasilane z dwóch falowników prądem 6-fazowym sinusoidalnym o pulsacji $(\omega_1 = 2\pi f)$ z przesunięciem fazowym między przebiegami 3-fazowymi o kąt 30° (rys. 4):

fazy k1 – A1, B1, C1 są zasilane prądem

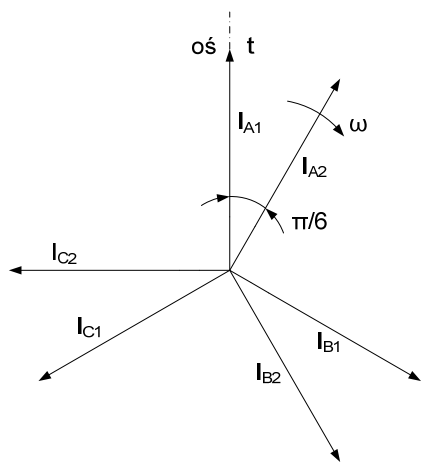
$$(13) \quad i_{k1}(t) = \sqrt{2} I_k \sin(\omega_1 t + \varphi_k)$$

fazy k2 – A2, B2, C2 są zasilane prądem

$$(14) \quad i_{k2}(t) = \sqrt{2}I_k \sin\left(\omega_1 t + \varphi_k + \frac{\pi}{6}\right)$$

Rozpatrujemy chwilę czasu ($t=0$), w której prąd w fazie A1 jest w amplitudzie. Wskaz prądu $I_{A1(t=0)}$ pokrywa się z osią czasu t (rys. 4). Kąty przesunięcia fazowego wynoszą:

$$\varphi_{k=A} = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_{k=B} = \frac{7}{6}\pi, \quad \varphi_{k=C} = \frac{11}{6}\pi$$



Rys.4. Położenie wskazów prądów I_{k1} i I_{k2} względem osi czasu t w układzie 6-fazowym niesymetrycznym

Rozpatrujemy harmoniczne $\mu=1$ i $\mu=(6n\pm 1)$ obwodowej siły magnetomotorycznej SMM, wzbudzone przez uzwojenie, przy czym n jest liczbą naturalną. Harmoniczne SMM dla $\mu=3n$ zerują się, jest to właściwość układów 3-fazowych, a obydwa układy A1B1C1 i A2B2C2 są 3-fazowe i warunek ten spełniają. Harmoniczne $\mu=(6n-1)$ wirują przeciwnie do harmonicznej $\mu=1$, a harmoniczne SMM $\mu=(6n+1)$ wirują zgodnie z harmoniczną $\mu=1$.

W chwili ($t=0$) harmoniczne SMM $\Theta_{k1\mu}(x,t)$ uzwojenia A1B1C1 zajmują położenie osi uzwojenia fazy A1 w której prąd jest w amplitudzie

$$(15) \quad \theta_{k1(\mu=1)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=1)} \sin\left(\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t\right)$$

$$(16) \quad \theta_{k1(\mu=5)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=5)} \sin\left(5\frac{x}{\tau} \pi + \omega_1 t\right)$$

$$(17) \quad \theta_{k1(\mu=7)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=7)} \sin\left(7\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t\right)$$

$$(18) \quad \theta_{k1(\mu=11)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=11)} \sin\left(11\frac{x}{\tau} \pi + \omega_1 t\right)$$

$$(19) \quad \theta_{k1(\mu=13)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=13)} \sin\left(13\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t\right)$$

Harmoniczne SMM $\Theta_{k2\mu}(x,t)$ uzwojenia A2B2C2 zajmują także położenie osi uzwojenia fazy A1.

$$(20) \quad \theta_{k2(\mu=1)}(x, t) = \theta_{k2(\mu=1)} \sin\left(\left(\frac{x}{\tau} \pi + \frac{\pi}{6}\right) - \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right)\right) = \theta_{k2(\mu=1)} \sin\left(\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t\right)$$

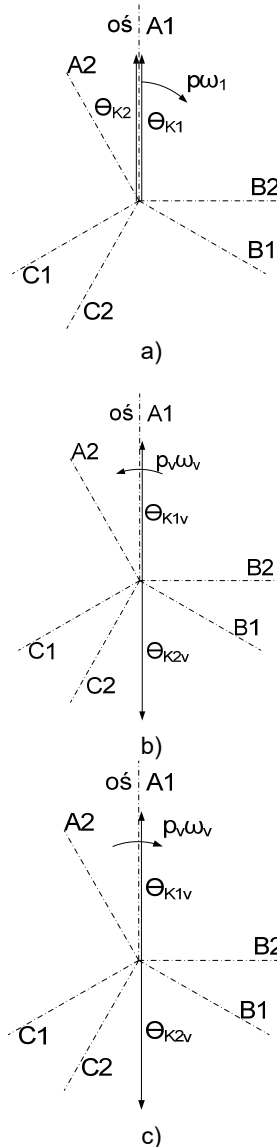
$$(21) \quad \theta_{k2(\mu=5)}(x, t) = \theta_{k2(\mu=5)} \sin\left(5\left(\frac{x}{\tau} \pi + \frac{\pi}{6}\right) + \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right)\right) = \theta_{k2(\mu=5)} \sin\left(5\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t + \pi\right)$$

$$(22) \quad \theta_{k2(\mu=7)}(x, t) = \theta_{k2(\mu=7)} \sin\left(7\left(\frac{x}{\tau} \pi + \frac{\pi}{6}\right) - \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right)\right) = \theta_{k2(\mu=7)} \sin\left(7\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t + \pi\right)$$

$$(23) \quad \theta_{k2(\mu=11)}(x, t) = \theta_{k2(\mu=11)} \sin\left(11\left(\frac{x}{\tau} \pi + \frac{\pi}{6}\right) + \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right)\right) = \theta_{k2(\mu=11)} \sin\left(11\frac{x}{\tau} \pi + \omega_1 t\right)$$

$$(24) \quad \theta_{k2(\mu=13)}(x, t) = \theta_{k2(\mu=13)} \sin\left(13\left(\frac{x}{\tau} \pi + \frac{\pi}{6}\right) - \left(\omega_1 t + \frac{\pi}{6}\right)\right) = \theta_{k2(\mu=13)} \sin\left(13\frac{x}{\tau} \pi - \omega_1 t\right)$$

Ilustracją graficzną położenia wektorów SMM harmonicznych obwodowych $\mu=1,5,7$, w chwili ($t=0$), względem osi fazy A1 (przy transformacji uzwojenia do układu 2-biegunowego, $2p=2$) przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Harmoniczne SMM: a) $\theta_{k1(v=1)}$ i $\theta_{k2(v=1)}$, b) $\theta_{k1(v=5)}$ i $\theta_{k2(v=5)}$,

Sumaryczna SMM obydwóch uzwojeń w szczelinie:

$$(25) \quad \theta_{(\mu=1)}(x, t) = \theta_{k1(\mu=1)}(x, t) + \theta_{k2(\mu=1)} = 2\theta_{k1(\mu=1)}(x, t)$$

Uzwojenie 6-fazowe niesymetryczne nie generuje harmonicznych obwodowych SMM $\Theta_{(\mu=5)}(x,t)$ i $\Theta_{(\mu=7)}(x,t)$, które dla uzwojeń 3 i 6-fazowych symetrycznych są największe.

Harmoniczna SMM $\Theta_{(\mu=1)}(x,t)$ współdziałając ze strumieniem wzbudzenia $\Phi_{(\eta=1)}$ generuje moment elektromagnetyczny T_{em} użyteczny synchroniczny, który determinuje pracę silnika.

$$(26) \quad T_{em} = 2p\Phi_{A(\eta=1)}\theta_{(\mu=11)}(x, t)$$

$$(27) \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}(T_{em} - T_{ob})$$

Synchroniczna prędkość kątowna wirnika:

$$(28) \quad \omega_m = \frac{\omega_1}{p}$$

J - moment bezwładności wszystkich mas sprzęgniętych z wałem wirnika sprowadzona na prędkość kątową ω_m wału, a T_{ob} - momentem mechanicznym obciążenia silnika. Harmoniczne obwodowe SMM $\Theta_{\mu}(x,t)$ pochodzące od uzwojenia dla $\mu \geq 1$ mają pulsację elektryczną ω_1 prądu i liczbę par biegunów (μp), zatem ich prędkość kątowa mechaniczna wynosi $\omega_{m\mu}$ i jest μ razy mniejsza od prędkości kątowej smm $\Theta_{(\mu=1)}(x,t)$.

$$(29) \quad \omega_{m\mu} = \frac{\omega_1}{\mu p} = \frac{\omega_m}{\mu}$$

Harmoniczne obwodowe SMM $\Theta_{(\mu>1)}$ (np. $\mu=11, 13$) i strumienia $\Phi_{(\mu>1)}$ o tej samej biegunowości ($I\mu=11,13$) wirują z różną prędkością mechaniczną $\omega_{m\mu} \neq \omega_{m1}$, zatem generują składową zmienną momentu elektromagnetycznego $T_{\mu\Omega}(t)$. Pulsacja momentu $T_{\mu\Omega}(t)$ jest większa, a amplituda mniejsza, niż przy uzwojeniu 3-fazowym, zatem w mniejszym stopniu wpływa na kołysanie prędkości obrotowej.

W uzwojeniu silnika powstają także wyższe harmoniczne (czasowe) prądu $I_{k1v}(t)$ i $I_{k2v}(t)$, które wzbudzają smm $\Theta_{(\mu,v>1)}$. Źródłem harmonicznym prądu są falowniki i napięcie rotacji $E_{k1(v>1)}(t)$ uzwojenia k1 i $E_{k2(v>1)}(t)$ uzwojenia k2 indukowane przez harmoniczne strumienia wzbudzenia $\Phi_{(\mu>1)}$. Częstotliwość tych harmonicznym $f_v = v f = v \omega_1 / 2\pi$. Prądy harmonicznym w uzwojeniach: fazy k1 A1, B1, C1

$$(30) \quad i_{k1v}(t) = \sqrt{2} I_{kv} \sin(v\omega_1 t + v\varphi_k)$$

i fazy k2 – A2, B2, C2

$$(31) \quad i_{k2v}(t) = \sqrt{2} I_k \sin\left(v\omega_1 t + v\varphi_k + \frac{\pi}{6}\right)$$

Każda z tych harmonicznym prądu wzbudza harmoniczne obwodowe SMM $\Theta_{\mu v} = \Theta_{k1(\mu v)} + \Theta_{k2(\mu v)}$. Pierwsza harmoniczna obwodowa $\Theta_{(\mu=1,v)}$ jest największa. Harmoniczne strumienia Φ_{μ} i harmoniczne SMM $\Theta_{\mu v}$ o tej samej biegunowości ($I\mu v = \mu v$) generują moment elektromagnetyczny zmienny $T_{\mu\Omega v}(t)$, a ponadto wzbudzają hałas magnetyczny i straty dodatkowe mocy w obwodzie magnetycznym w tym w magnesach trwałych. W silniku z uzwojeniem 6-fazowym z niesymetrycznym układem osi faz są one znacznie mniejsze niż w silniku z uzwojeniem 6-fazowym symetrycznym i uzwojeniu 3-fazowym.

Corzyści ze stosowania uzwojenia 6-fazowego w silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi

Silniki elektryczne o liczbie faz $m > 3$ są dedykowane do zasilania z falowników. W silniku m -fazowym prąd znamionowy jest mniejszy niż w silniku 3-fazowym o tej samej mocy znamionowej i tym samym napięciu znamionowym, bądź też napięcie znamionowe jest mniejsze niż w silniku 3-fazowym o tej samej mocy znamionowej i tym samym prądzie znamionowym. Zawory energoelektroniczne w falowniku $m > 3$ fazowym zasilającym mają mniejszy prąd znamionowy bądź niższe napięcie znamionowe w stosunku do falownika 3-fazowego.

W artykule rozpatruje się silniki wzbudzone magnesami trwałymi z uzwojeniem 6-fazowym. Uzwojenie 6-fazowe składa się z dwóch uzwojeń 3-fazowych A1B1C1 i A2B2C2 i może mieć symetryczny rozkład osi faz i niesymetryczny rozkład osi faz:

- w uzwojeniu 6-fazowym z symetrycznym rozkładem osi faz wszystkie kąty między osiami faz A1A2, A2B1 itd. wynoszą 60° , uzwojenie to ma wszystkie cechy uzwojenia 3-fazowego;

- w uzwojeniu 6-fazowym z niesymetrycznym rozkładem osi faz kąty między osiami faz A1A2, A2B1 itd. są różne od 60° , korzystnym rozwiązaniem uzwojenia jest gdy kąt między osiami faz A1A2 wynosi 30° , a A2B1 wynosi 90° itd.

Uzwojenie 6-fazowe z rozkładem osi faz $30^\circ, 90^\circ$, itd., zasilane dwoma napięciami 3-fazowymi czasowo przesuniętymi względem siebie o kąt $\pi/6 \approx 30^\circ$ ma w stosunku do uzwojenia 6-fazowego symetrycznego:

- 3,5% większy moment przy tym samym prądzie i tym samym strumieniu wzbudzenia, a wynikający z większej wartości współczynnika rozłożenia uzwojenia k_{g1} ;
- wyzerowane harmoniczne obwodowe SMM Θ_{μ} dla $\mu=5,7,11,13,17,19,23,25,29,31, \dots$, co skutkuje mniejszymi stratami mocy w obwodzie magnetycznym silnika, mniejszą składową zmienną momentu elektromagnetycznego, mniejszym hałasem magnetycznym i mniejszymi drganiami. Silniki z uzwojeniem 6-fazowym niesymetrycznym są polecane przede wszystkim do stosowania w serwonapędach.

Autorzy: dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. Ł-KOMEL e-mail: jakub.bernatt@komel.lukasiewicz.gov.pl;
dr inż. Stanisław Gawron, e-mail: stanislaw.gawron@komel.lukasiewicz.gov.pl;
prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, e-mail: tadeusz.glinka@komel.lukasiewicz.gov.pl;
dr inż. Tomasz Wolnik, e-mail: tomasz.wolnik@komel.lukasiewicz.gov.pl;
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice.

LITERATURA

- [1] J. Bernatt, „Silniki indukcyjne 6-fazowe z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz”, *Monografia doktorska*, 1999 r. Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej.
- [2] J. Bernatt, „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”. ISBN 978-83-910595-9-6, ss.172. Wydawnictwo BOBRME Komel 2010.
- [3] J. Bernatt, T. Glinka, „Silnik indukcyjny 6-fazowe z niesymetrycznym rozłożeniem osi faz do napędów przekształtnikowych dużych mocy” *Zeszyt Naukowe Politechniki Śląskiej*. Seria Elektryka z.170, 1999 r., ss. 79-90.
- [4] M. Darijevic, M. Jones, E. Levi: An Open-End Winding Four-Level Five-Phase Drive. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 63, nr 1/2016, ss. 538-549.
- [5] P. Drozdowski, G. A. Kostro, M. Ronkowski, „Silniki indukcyjne wielofazowe – zalety i wady w porównaniu z silnikami klasycznymi”. *Automatyka, Elektryka, Zakłócenia*. ISSN 2082-4149, nr2/2014, ss. 21-28.
- [6] M. Duran, F. Barrero, Recent Advances in the Design, Modeling and Control of Multiphase Machines – Part 2. *IEEE Trans. Ind. Electron.* Vol. 63, no. 12/2016, ss.. 459-468.
- [7] M. Jakubiec, „Energoozczędność i kompatybilność w napędach elektrycznych” ISBN 83-910585-6-5, ss.134. Wydawnictwo BOBRME Komel. 2005.
- [8] J. Kaňuch: “The analysis, advantages and uses of five-phase induction motor drives”, *Maszyny elektryczne – Zeszyty problemowe*. ISSN 0239-3646, nr 1/2021, ss. 1-7.
- [9] L. Schreier L., J. Bendl, M. Chomat, “Operation of five-phase induction motor after loss of one phase of feeding source”, *Electrical Engineering* Vol. 99, nr. 1/2017, ss. 9-18.
- [10] P. Wach, „Uzwojenia ułamkowe maszyn elektrycznych prądu przemienne” ISBN 978-83-01122317, ss. 216. PWN, 1997.
- [11] P. Wach, “Dynamics and Control of Electrical Drives”, ISBN 978-3-642-20222-3, ss.454. Springer – Verlag, Berlin. 2011.