

Wpływ podwojenia liczby faz uzwojenia na wybrane parametry 3-fazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, na przykładzie silnika napędu eKIT dla pojazdów elektrycznych

Robert Rossa, Petr Bogatyrev - Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

1. Wstęp

W roku 2020 przystąpiono do realizacji projektu POIR, pt. „Uniwersalny elektryczny zestaw napędowy do pojazdów elektrycznych z modułowym zasobnikiem baterii (eKIT)”. Celem projektu jest opracowanie i wdrożenie do produkcji wysokosprawnego napędu elektrycznego eKIT, przeznaczonego do zastosowania w elektrycznie napędzanych pojazdach dostawczych, użytkowych i maszynach specjalnych o masie do 3.5 t. W artykule przedstawiono najpierw w skrócie ogólną konstrukcję mechaniczną i przyjęty sposób sterowania pracą prototypowego silnika elektrycznego zaprojektowanego dla napędu eKIT. Następnie opisano szczegółowo zastosowane w silniku 3-fazowe uzwojenie twornika. Dalej wskazano, jak 3-fazowe uzwojenie symetryczne twornika, o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 2$, można w silniku napędu eKIT przeprojektować na 6-fazowe asymetryczne uzwojenie o układzie dwugwiazdowym i liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 1$. Po opisanu obu wariantów uzwojenia twornika, przedstawiono wyniki obliczeń elektromagnetycznych silnika wykonanych dla obu tych wariantów i opisano wpływ zastosowanego wariantu uzwojenia na wybrane parametry elektryczne i mechaniczne prototypowego silnika napędu eKIT.

2. Opis ogólny konstrukcji silnika napędu eKIT

W opracowywanym napędzie elektrycznym eKIT zastosowano silnik synchroniczny z magnesami trwałymi zagłębionymi, tzn. zamontowanymi wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika. W literaturze angielskojęzycznej silniki takie określane są jako Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, skrót IPMSM. Zastosowanie silnika IPMSM w napędzie eKIT wynika z licznych zalet tychże silników [1, 2], predysponujących je do stosowania w elektrycznie napędzanych pojazdach drogowych czy małych statkach powietrznych.

Prototypowy silnik IPMSM dla napędu eKIT zaprojektowano w wielkości mechanicznej 132 mm. Zastosowano konstrukcję z wirnikiem wewnętrznym. Pakietowany rdzeń obwodu elektromagnetycznego silnika, zarówno po stronie stojana jak i wirnika, wykonano z blach elektrotechnicznych prądnicowych o grubości 0.27 mm, z uwagi na wysokie częstotliwości podstawowej harmonicznej prądu zasilania (do 670 Hz) i wynikającą stąd (lecz nie tylko) konieczność ograniczenia strat ciepłych w rdzeniu magnetycznym. Przekrój poprzeczny obwodu elektromagnetycznego silnika pokazano na rysunku 1.

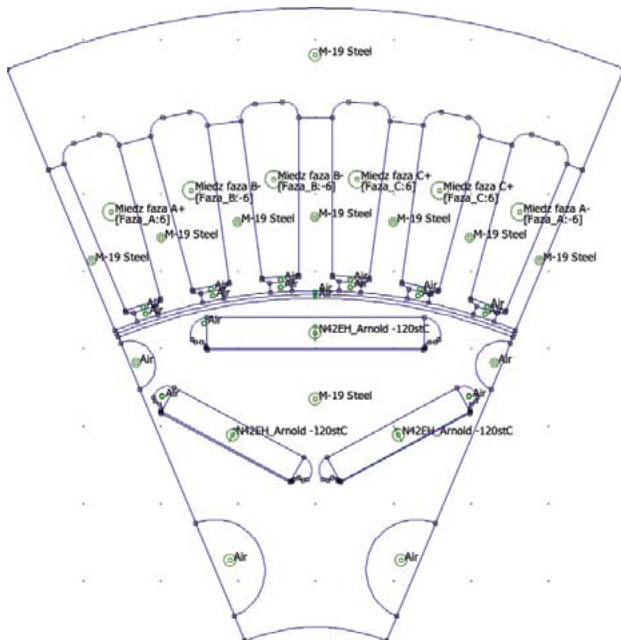
Streszczenie: W artykule opisano wpływ podwojenia liczby faz w silniku synchronicznym z magnesami trwałymi na wybrane parametry elektryczne i mechaniczne silnika, na przykładzie silnika napędu eKIT przeznaczonego dla elektrycznie napędzanych pojazdów dostawczych o dopuszczalnej masie całkowitej do 3.5 t i mobilnych maszyn specjalnych. Szczegółowo przedstawiono konstrukcję uzwojenia w wariantcie 3-fazowym i sposób przekształcenia 3-fazowego uzwojenia symetrycznego w dwugwiazdowe asymetryczne uzwojenie 6-fazowe. Następnie przedstawiono wyniki obliczeń elektromagnetycznych i porównano wybrane parametry elektryczne i mechaniczne silników w wariantach z 3- i 6-fazowym uzwojeniem twornika.

Słowa kluczowe: Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, dwugwiazdowe asymetryczne uzwojenie 6-fazowe

Abstract: The article describes the effect of doubling the number of phases in a permanent magnet synchronous motor on selected electrical and mechanical parameters of the motor, based on the example of an eKIT drive motor intended for electrically driven delivery vehicles with a total weight of up to 3.5 t and special mobile machines. The construction of the winding in the 3-phase variant and the method of transforming a 3-phase symmetrical winding into a double-star asymmetric 6-phase winding are presented in detail. Then, the results of electromagnetic calculations are presented and selected electrical and mechanical parameters of motors in variants with 3- and 6-phase armature windings are compared.

Keywords: Permanent magnet synchronous motor, double-star asymmetric 6-phase winding

Obwód elektromagnetyczny stojana, w zakresie konstrukcji rdzenia pakietowanego i typu uzwojenia, jest bardzo zbliżony do obwodów elektromagnetycznych stosowanych w 3-fazowych silnikach indukcyjnych niskiego napięcia. W obwodzie elektromagnetycznym wirnika zastosowano magnesy trwałe NdFeB, rozmieszczone w ten sposób, że magnesy współtworzące jeden biegun magnetyczny są ułożone w kształcie odwróconej litery Δ (rys. 1). Dla ograniczenia tzw. momentu zaczepowego, w wirniku silnika zastosowano skos schodkowy rdzenia magnetycznego [3]. Kadłub silnika jest chłodzony cieczą.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny obwodu elektromagnetycznego prototypowego silnika IPMSM dla napędu eKIT (pokazano jeden biegun magnetyczny z uwagi na symetrię magnetyczną). W wirniku zastosowano rozmieszczenie magnesów w kształcie odwróconej litery Δ

Silnik napędu eKIT jest zasilany z falownika energoelektronicznego przeznaczonego dla zastosowań motoryzacyjnych. Oprogramowanie wewnętrzne falownika,

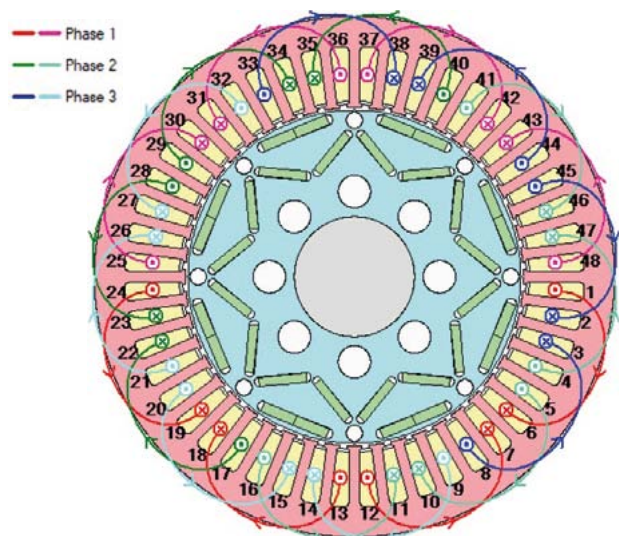
z zaimplementowanym algorytmem wektorowego sterowania silnikiem IPMSM, odpowiednio sparametryzowano pod silnik napędu eKIT, z wykorzystaniem tablic przeglądowych (ang. look-up table, LUT). Algorytm sterowania zapewnia trójstrefową regulację prędkości obrotowej silnika: strefa 1 – sterowanie napędem z zachowaniem maksimum momentu na wale do prądu zasilania (ang. skrót MTPA control), strefa 2 – osłabianie strumienia głównego w silniku (ang. flux weakening control), strefa 3 – sterowanie z zachowaniem maksimum momentu przy danym napięciu zasilania (ang. skrót MTPV control) [4 ÷ 7]. W celu zapewnienia koniecznej przy sterowaniu silnikiem informacji o aktualnym położeniu wirnika względem twornika, silnik wyposażono w enkoder absolutny, zamontowany na zewnętrznej stronie tarczy łożyskowej od strony przeciwnapędowej.

Napęd elektryczny eKIT projektowano pod zasilanie z baterii trakcyjnej o napięciu z zakresu 350 do 400 VDC (znamionowo 375 VDC).

3. Uzwojenie w wariacie 3-fazowym

Prototypowy silnik IPMSM napędu eKIT jest silnikiem o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 8$. Uzwojenie twornika zaprojektowano jako typowe uzwojenie rozłożone quasi-sinusoidalnie, jednowarstwowe, o liczbie faz $m = 3$, z fazami uzwojenia połączonymi w układ gwiazdy. Zastosowano liczbę żłobków twornika $Q_s = 48$, co skutkuje liczbą żłobków na biegun i fazę $q = 2$. Liczbę zwojów szeregowych uzwojenia twornika dobrano

tak, by prędkość obrotowa bazowa napędu (prędkość, przy której następuje przejście z pierwszej do drugiej strefy sterowania prędkością $[5 \div 8]$) wynosiła ok. 3600 obr/min. Na rysunku 2 pokazano schemat rozmieszczenia 3-fazowego uzwojenia twornika na przekroju poprzecznym silnika, a na rysunku 5 pokazano ten sam schemat w postaci rozwiniętej. W 3-fazowym wariantcie uzwojenia zastosowano liczbę gałęzi równoległych w paśmie fazowym $a_g = 2$. Zastosowano dzielone grupy fazowe uzwojenia (zezwoje tej samej fazy są nawijane w dwie strony, tak by obejmowały oba różnoimienne bieguny magnetyczne) i zezwoje o poskoku mechanicznym $w = 5$. Uzwojenie 3-fazowe prototypowego silnika napędu eKIT można wykonać także ze średnicowym poskokiem mechanicznym zezwojów $w = 6$, jednak skutkuje to zwiększoną długością połączeń czołowych zezwojów oraz zwiększonym wysięgiem czoł uzwojeń, co jest niekorzystne z uwagi na sprawność, wymiary gabarytowe



Rys. 2. Schemat połączeń uzwojenia 3-fazowego na przekroju poprzecznym silnika napędu eKIT, $m = 3, 2p = 8, Q_s = 48, q = 2, w = 5, a_g = 2$

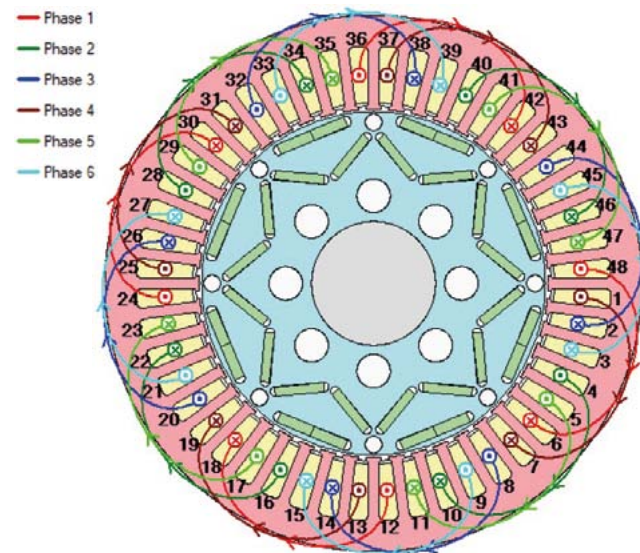
i masę silnika. Należy zauważyć, że poskok elektryczny uzwojenia jak na rysunkach 2 i 5 wynosi $w_{el} = 6$.

4. Uzwojenie w wariantcie 6-fazowym

Dla potrzeb niniejszej analizy założono, że quasi-sinusoidalne uzwojenie twornika w wariantcie 6-fazowym zostanie wykonane w układzie dwugwiazdowym asymetrycznym $[9 \div 12]$, z przesunięciem kątowym między obiema gwiazdami o 30° el. i z oddzielnymi, izolowanymi punktami neutralnymi. Uzwojenie takie można uzyskać poprzez prostą modyfikację uzwojenia 3-fazowego, opisanego wyżej (rys. 2, 5). Wystarczy zauważyć, że podziałka żłobkowa twornika przy $2p = 8$ i $Q_s = 48$ wynosi 30° el. 3-fazowe uzwojenie symetryczne o liczbie $q = 2$ można więc tu przekształcić w 6-fazowe uzwojenie asymetryczne o liczbie $q = 1$, poprzez podział każdej z 24 dwuzewojowych grup fazowych uzwojenia 3-fazowego (po 8 na fazę) na dwie grupy jednozewojowe, wzajemnie przesunięte o 30° el. Wyodrębnione jednozewojowe grupy fazowe należy następnie przydzielić do dwóch gwiazd asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego, w taki sposób, że:

- poskok mechaniczny (i elektryczny) wszystkich zezwojów uzwojenia 6-fazowego wynosi $w = 6$;

- w gwieździe pierwszej pozostają wyłącznie boki zezwojów leżące w żłobkach nieparzystych, a w gwieździe drugiej boki zezwojów leżące w żłobkach parzystych (lub odwrotnie);
- w sąsiednich żłobkach twornika przynależnych w uzwojeniu 3-fazowym do tej samej grupy fazowej, po utworzeniu uzwojenia 6-fazowego znajdują się boki zezwojów przynależne do różnych gwiazd, przesunięte fazowo o 30° el. (stąd przesunięcie kątowe gwiazd o 30° el.);



Rys. 3. Schemat połączeń dwugwiazdowego, asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego na przekroju poprzecznym silnika napędu eKIT, $m = 6, 2p = 8, Q_s = 48, q = 1, w = 6, a_g = 1$

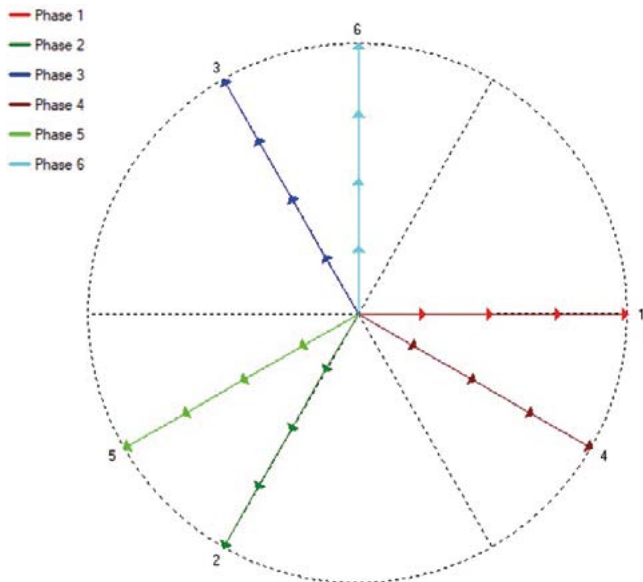
- przesunięcie faz w obrębie każdej z dwóch gwiazd uzwojenia 6-fazowego wynosi 120° el.;

Właściwy schemat połączenia opisywanego 6-fazowego uzwojenia twornika w układzie dwugwiazdowym asymetrycznym pokazano na rysunkach 3 i 6, a na rysunku 4 pokazano wykres fazorowy sił magnetomotorycznych (SMM) pojedynczych cewek w każdej z faz tego uzwojenia.

W uzwojeniu 6-fazowym pozostawiono te same nawojowe jak w wariantcie 3-fazowym (ta sama średnica i liczba drutów na żłobek, ta sama liczba przewodów szeregowych na

Tabela 1. Dane konstrukcyjne uzwojeń $m=3, m=6$

Dane uzwojenia	$m = 3$	$m = 6$
liczba biegunów, $2p$	8	8
liczba żłobków, Q_s	48	48
liczba żłobków na biegun i fazę, q	2	1
liczba warstw uzwojenia	1	1
poskok mech. zezwoju uzwoj., w	5	6
poskok elektryczny uzwojenia, w_{el}	6	6
zapełnienie żłobka miedzią	0.517	0.517
liczba zwojów w cewce, N_c	6	6
liczba gałęzi równoległych, a_g	2	1
zwojów szeregowych/fazę, $z1$	24	24
wsp. uzwojenia dla 1 harm.	0.966	1



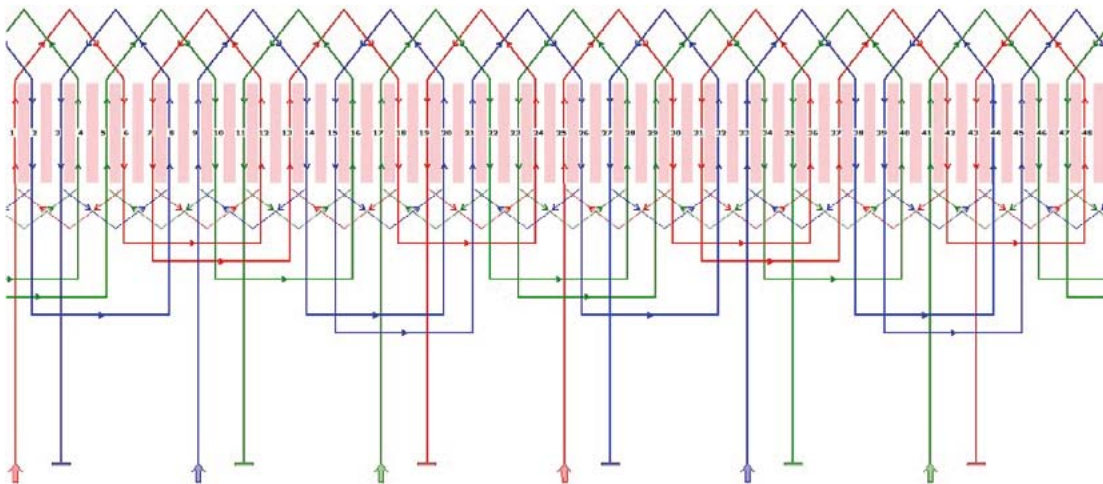
Rys. 4. Wykres fazorowy SMM pojedynczych cewek w każdej z faz dwugwiazdowego, asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego w silniku napędu elektrycznego eKIT, $m = 6$, $2p = 8$, $Q_s = 48$, $q = 1$, $w = 6$, $a_g = 1$

złobek). Ponieważ w uzwojeniu 6-fazowym następuje zmniejszenie liczby złobków na biegun i fazę, z $q = 2$ na $q = 1$, zatem dla utrzymania w uzwojeniu 6-fazowym takiej samej liczby zwojów szeregowych uzwojenia na fazę z1 oraz zbliżonych wartości napięć fazowych i międzyfazowych, w wariantcie 6-fazowym zrezygnowano ze stosowania gałęzi równoległych.

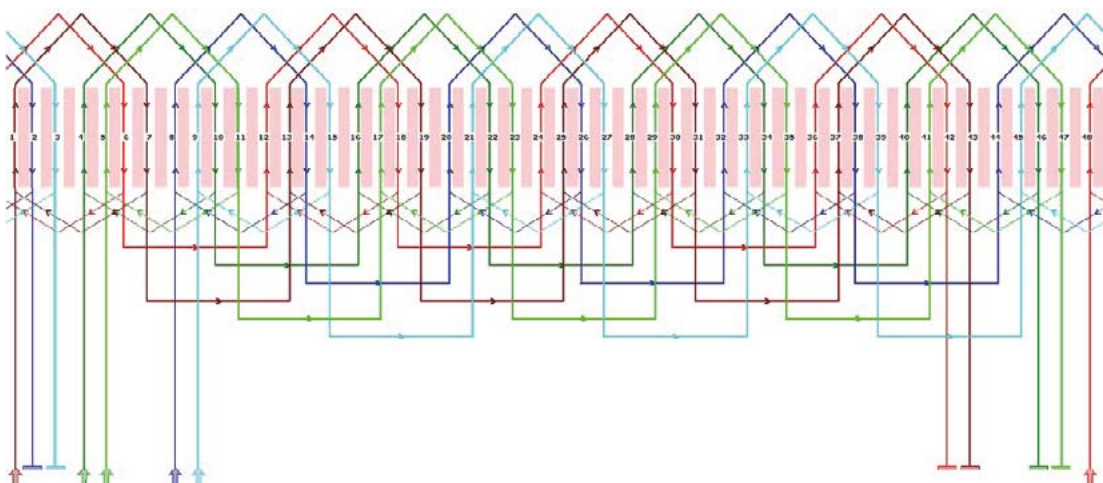
5. Porównanie wybranych parametrów silnika napędu eKIT przy zastosowaniu uzwojenia 3- i 6-fazowego

Obliczenia elektromagnetyczne dla obu wariantów uzwojenia wykonano z wykorzystaniem analizy MES rozkładu pola magnetycznego w silniku. Wykorzystano analizę MES 2D dla stanów przejściowych, dostępną w oprogramowaniu Ansys Motor-CAD. Obliczenia elektromagnetyczne przeprowadzono równoległe z obliczeniami cieplnymi, przy zachowaniu identycznej konstrukcji kadłuba silnika oraz identycznych warunków chłodzenia cieczą. Uwzględniono zatem wpływ temperatury na parametry pracy silnika.

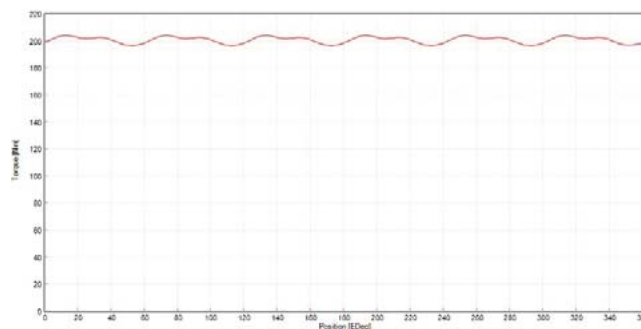
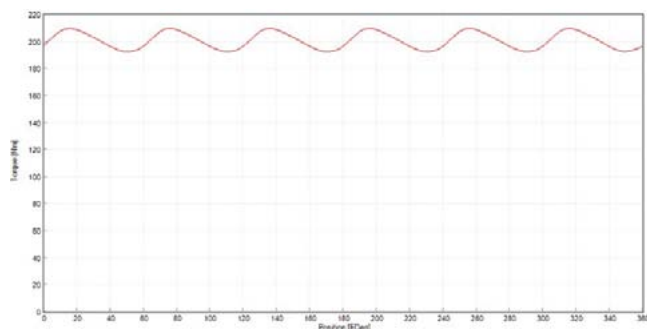
Do porównania parametrów elektrycznych oraz mechanicznych silnika napędu eKIT, przy zastosowaniu obu opisanych wyżej uzwojeń, 3- i 6-fazowego, wybrano punkt pracy znamionowej silnika:



Rys. 5. Rozwinięty schemat połączeń uzwojenia 3-fazowego w silniku napędu eKIT, $m = 3$, $2p = 8$, $Q_s = 48$, $q = 2$, $w = 5$, $a_g = 2$



Rys. 6. Rozwinięty schemat połączeń dwugwiazdowego, asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego w silniku napędu eKIT, $m = 6$, $2p = 8$, $Q_s = 48$, $q = 1$, $w = 6$, $a_g = 1$



Rys. 7. Obliczone przebiegi czasowe momentu na wale silnika eKIT w wariancie z uzwojeniem 3- i 6-fazowym

$P_N = 75 \text{ kW}$, $T_N = 199 \text{ N.m}$, $n_N = 3600 \text{ obr/min}$. Ważniejsze wyniki obliczeń elektromagnetycznych dla tego punktu pracy zestawiono w tabeli 2.

Na rysunku 7 pokazano obliczone przebiegi czasowe momentu na wale silnika w wariancie z uzwojeniem 3- i 6-fazowym.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono, w jaki sposób 3-fazowe uzwojenie symetryczne silnika, o danych nawojowych: $2p = 8$, $q = 2$,

Tabela 2. Wybrane wyniki obliczeń elektromagnetycznych silnika napędu eKIT dla punktu pracy znamionowej, przy zastosowaniu opisanych uzwojeń 3- i 6-fazowych

Parametr elektryczny lub mech.	m = 3	m = 6
prąd znam. zasilania, I_N [Arms]	210.2	100.6
gęstość prądu, [A/mm ²]	8.563	8.197
kąt faz. wskazu prądu, β [°el]	129	129
moment na wale, T [Nm]	198.9	198.9
moc na wale, P [kW]	75	75
sprawność, η [-]	96.46	96.5
wsp. mocy, $\cos \phi$ [-]	0.888	0.893
tętnienia momentu, [Nm]	15.64	6.32
tętnienia momentu, [%]	7.81	3.16
napięcie biegu jał., LL, 20 °C, [Vrms]	198.9	206.4
napięcie międzyfaz., U_{LL} [Vrms]	239	248.2
napięcie fazowe, U_{ph} [Vrms]	138.8	145
THD napięcia międzyfaz., [%]	5.15	4.93
strumień skojarzony (1h), [mVs]	127.26	132.19
THD napięcia fazowego, [%]	12.14	16.47
THD napięcia LL biegu jał., [%]	1.837	6.975
straty w miedzi DC, [W]	1694	1650
straty w miedzi AC, [W]	487.4	500.4
straty w magnesach, [W]	8.5	8.4
straty w rdzeniu stojana, [W]	514	511
straty w rdzeniu wirnika, [W]	41.1	39.5
straty mechaniczne, [W]	7.7	7.7
suma strat cieplnych, [W]	2753	2717
moment zaczepowy p-p 20 °C, [Nm]	6.2	6.2
temp. uzwojenia, [°C]	123.7	122.4
temp. magnesów trwałych, [°C]	122.4	120.5

można zastąpić dwugwiazdowym, asymetrycznym uzwojeniem 6-fazowym, o liczbie $q = 1$, z przesunięciem kątowym między gwiazdami o 30°el .

Z uzyskanych wyników obliczeń elektromagnetycznych można wnioskować, że niewątpliwą zaletą zastosowania asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego jest znaczne zmniejszenie tętnienia momentu na wale w stanie obciążenia silnika, co predysponuje takie uzwojenie do zastosowania np. w serwonapędach, gdzie wymagana jest wysoka precyzja pozycjonowania wirnika względem stojana.

Kolejną zaletą zastosowania asymetrycznego uzwojenia 6-fazowego w miejsce symetrycznego 3-fazowego jest zmniejszenie gęstości prądu obciążenia silnika, przy utrzymaniu tej samej wartości momentu na wale (poprawiony osiągnięty iloraz momentu na wale T do prądu I). Zmniejszona gęstość prądu obciążenia przekłada się na mniejsze straty ciepłe w uzwojeniu i niższe temperatury pracy silnika, jednak ten korzystny efekt, w opisanym przypadku silnika napędu eKIT, jest niwelowany przez konieczność zwiększenia poskoju zezwojów uzwojenia 6-fazowego, co skutkuje wydłużeniem połączeń czołowych.

Wadą zastosowania opisanego tu asymetrycznego, dwugwiazdowego uzwojenia 6-fazowego jest konieczność doboru do napędu specjalnie zaprojektowanego falownika energoelektronicznego 6-fazowego. Falownik taki musi mieć zaimplementowany algorytm generowania odpowiednio zsynchronizowanych modulowanych impulsowych fal napięcia, tak by znaczne indukcyjności wzajemne występujące pomiędzy fazami obu gwiazd uzwojenia nie powodowały niepożądanych napięć zakłócających na tranzystorach stopnia wyjściowego falownika i tym samym nie zakłócały prawidłowej pracy falownika. Tego typu falowniki są obecnie trudno dostępne komercyjnie na rynku. Zastosowanie do zasilania opisanego uzwojenia 6-fazowego dwóch niezależnych, typowych falowników 3-fazowych, z modulacją impulsowych fal napięcia wyjściowego typu SV-PWM (Space Vector - Pulse Width Modulation), skutkuje wzajemnym zakłócaniem pracy falowników i nieprawidłową pracą napędu. Prawidłowa współpraca silnika 6-fazowego o uzwojeniu asymetrycznym z dwoma niezależnymi falownikami jest możliwa, lecz konieczne jest stosowanie specjalnych strategii generowania impulsowych fal napięcia [12].

Opisana w artykule zmiana uzwojenia z 3-fazowego symetrycznego na 6-fazowe asymetryczne nie była związana z jakąkolwiek zmianą w wykroju blach twornika (stojana). Wirnik w wariancie 6-fazowym także pozostawiono bez zmian. Dlatego zmiana typu uzwojenia nie powinna mieć żadnego wpływu

na niepożądany moment zaczepowy silnika, co potwierdziły wyniki obliczeń.

Literatura

- [1] E. Król, T. Wolnik: Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych - właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2021 (126), str. 147-151, ISSN 0239-3646.
- [2] T. Wolnik, E. Król: Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych - czy moc znamionowa silnika decyduje o jego gabarycie i masie?, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2019 (122), str. 155-160, ISSN 0239-3646.
- [3] R. Rossa, Napęd elektryczny eKIT - kształtowanie charakterystyk elektromechanicznych wybranymi zabiegami konstrukcyjnymi, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2021 (126), str. 153-161, ISSN 0239-3646.
- [4] V. Manzolini, D. Da Rù and S. Bolognani: An effective voltage control loop for a deep flux-weakening in IPM synchronous motor drives, 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2017, pp. 3979-3985.
- [5] L. Sepulchre, M. Fadel, M. Pietrzak-David and G. Porte: MTPV Flux-Weakening Strategy for PMSM High Speed Drive, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 54, No. 6, pp. 6081-6089, Nov.-Dec. 2018.
- [6] S. Jung, J. Hong and K. Nam: Current Minimizing Torque Control of the IPMSM Using Ferrari's Method, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 28, No. 12, pp. 5603-5617, Dec. 2013.
- [7] M. Fadel, L. Sepulchre, M. Pietrzak-David: Deep Flux-Weakening Strategy with MTPV for High-Speed IPMSM for Vehicle Application, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, Issue 28, 2018, pages 616-621, ISSN 2405-8963.
- [8] R. Rossa, E. Król: Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „e-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 4/2012 (97), str. 75-80.
- [9] T. J. E. Miller and M. I. McGilp: Analysis of multi-phase permanent-magnet synchronous machines, 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382988.
- [10] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. Toliyat, S. Williamson: Multi-phase induction motor drives - A technology status review, *IET Electric Power Appl.*, Vol. 4, No. 1, pp. 489 - 516, Jul. 2007.
- [11] J. Karttunen, S. Kallio, P. Peltoniemi, P. Silventoinen and O. Pyrhönen: Decoupled Vector Control Scheme for Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Machines, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 5, pp. 2185-2196, May 2014.
- [12] F. Cheng, H. Yang, R. Zhao and M. Zhu: A PWM strategy for six-phase dual stator induction motor fed by two identical voltage source inverters, 2009 International Conference on Electrical Machines and Systems, 2009, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382857.

Autorzy

dr inż. Robert Rossa

mgr inż. Petr Bogatyrev

Sieć Badawcza Łukasiewicz - Górnośląski Instytut Technologiczny

Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych

41-209 Sosnowiec, ul. Moniuszki 29

Informacje dodatkowe

Projekt „Uniwersalny elektryczny zestaw napędowy do pojazdów elektrycznych z modułowym zasobnikiem baterii (eKIT)”, współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego, na podstawie Umowy o dofinansowanie z dnia 16-07-2020 nr POIR.01.01.01-00-1245/19.

artykuł recenzowany