

Wpływ doboru liczby żłobków stojana do liczby biegunów magnetycznych na straty w wirniku w silnikach PMSM o cewkach skupionych

Tomasz Wolnik

1. Wstęp

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o cewkach skupionych cieszą się zainteresowaniem oraz znajdują coraz szersze zastosowanie ze względu na szereg zalet, jakimi się cechują. Należą do nich [1, 2, 3]:

- mniejsza długość połączeń czołowych w stosunku do maszyn z uzwojeniem rozłożonym, a tym samym mniejsze zużycie materiału, mniejsza masa miedzi oraz mniejsze straty Joule'a;
- możliwość wykonywania maszyn o dużej liczbie biegunów magnetycznych i relatywnie małej liczbie żłobków stojana;
- mniejszy moment zaczepowy (*cogging torque*) oraz pulsacje momentu pod obciążeniem (*torque ripple*).

Poza wymienionymi zaletami silniki te cechują się niestety również kilkoma znaczącymi wadami, w tym przede wszystkim wyższą zawartością harmonicznych przestrzennych w sile magnetomotorycznej (MMF) twornika. Harmoniczne te powodują powstawanie strat w wirniku i magnesach trwałych, które mogą powodować nadmierne nagrzewanie się elementów wirnika [3, 4, 5, 6, 7]. Jedną z głównych przyczyn zwiększonej zawartości wyższych harmonicznych w rozkładzie przestrzennym MMF jest nieodpowiednio dobrana konfiguracja liczby żłobków stojana do danej liczby biegunów magnetycznych wirnika. Ponadto, w zależności od dobranej liczby żłobków do liczby biegunów, zmianom ulega współczynnik uzwojenia, mający bezpośrednie przełożenie na uzyskiwaną wartość momentu elektromagnetycznego.

W konsekwencji prawidłowy dobór liczby żłobków stojana do liczby biegunów magnetycznych jest niezwykle istotny na etapie projektowania, ze względu na uzyskiwane parametry oraz prawidłową pracę silnika.

W artykule przedstawiono wyniki badań analitycznych, analizy wpływu konfiguracji liczby żłobków stojana do liczby biegunów magnetycznych na straty w rdzeniu wirnika i magnesach trwałych dla silnika PMSM z wirnikiem zewnętrznym o cewkach skupionych ($Y = 1$), o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 20$ chłodzonego wodą. Porównania dokonano dla czterech wersji (Q_s – liczba żłobków stojana; $2p$ – liczba biegunów magnetycznych):

1. $Q_s = 18, 2p = 20$;
2. $Q_s = 21, 2p = 20$;
3. $Q_s = 24, 2p = 20$;
4. $Q_s = 30, 2p = 20$.

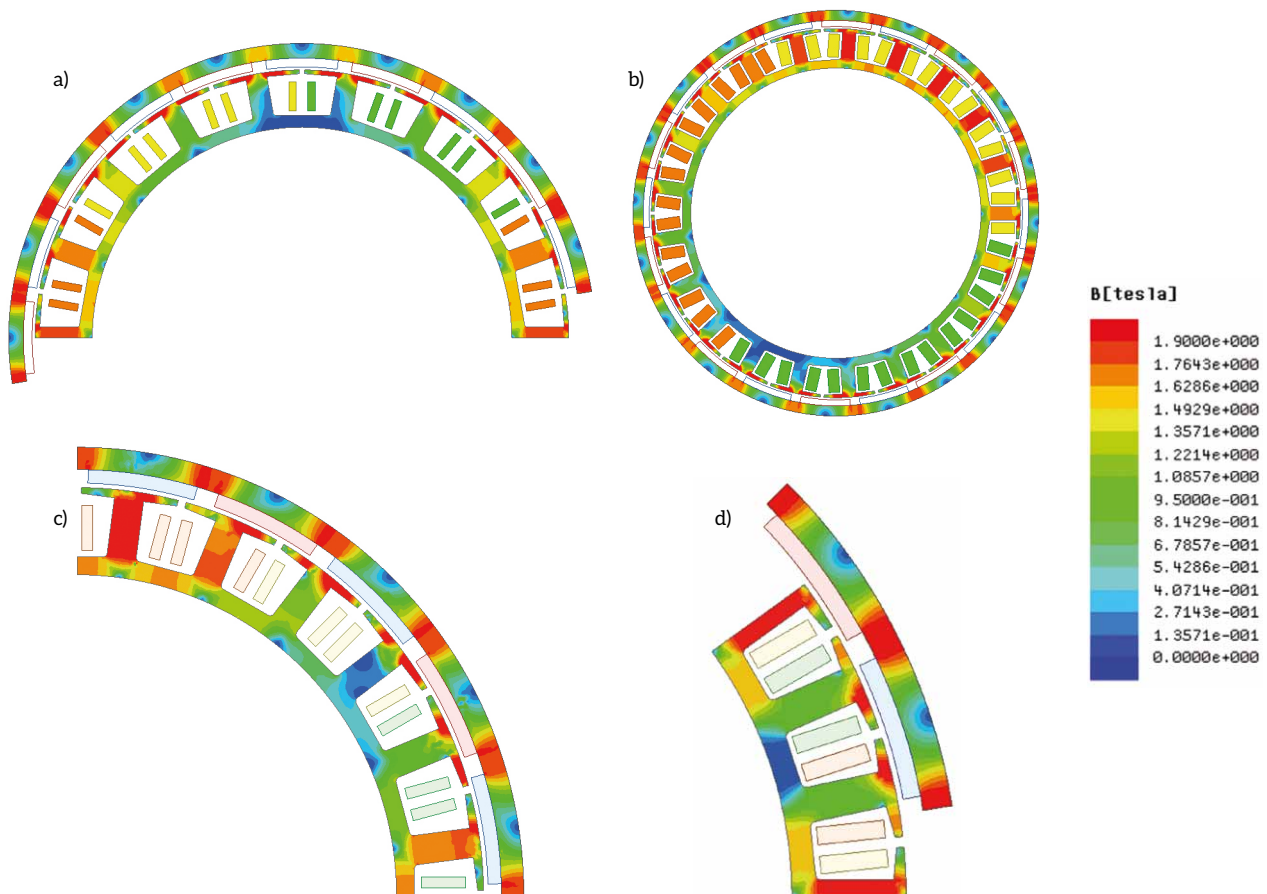
Streszczenie: Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o cewkach skupionych cieszą się zainteresowaniem między innymi ze względu na możliwość wykonywania maszyn o dużej liczbie biegunów magnetycznych i relatywnie małej liczbie żłobków stojana. W wielu przypadkach, często na skutek rutynowego przyzwyczajenia, silniki synchroniczne z magnesami trwałymi analizowane są przy całkowitym pominięciu lub uznaniu za nieistotne strat w wirniku, jako że wirnik wiruje synchronicznie z podstawową harmoniczną pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. W przypadku maszyn o cewkach skupionych, w których liczba żłobków przypadająca na biegun i fazę nie jest wartością całkowitą, przeznaczonych do pracy w warunkach zasilania wysokimi częstotliwościami, zjawiska powstawania strat w wirniku nie można pominąć, gdyż może powodować problem jego nadmiernego nagrzewania się. Jedną z głównych przyczyn powstawania tych strat może być niewłaściwy dobór liczby żłobków stojana do liczby biegunów magnetycznych wirnika.

Słowa kluczowe: silniki PMSM, cewki skupione, straty w wirniku, straty wiropądowe

INFLUENCE OF CHOOSING THE NUMBER OF STATOR'S SLOT TO THE NUMBER OF MAGNETIC POLES ON ROTOR LOSSES IN PMSM MOTORS WITH CONCENTRATED WINDING

Abstract: PMSM motors with concentrated winding are popular among others due to the possibility of making machines with a large number of magnetic poles and a relatively small number of stator slots. In many cases, often as a result of routine habits, permanent magnet synchronous motors are analyzed when the rotor losses are neglected, as the rotor rotates synchronously with the basic harmonic of the magnetic field in the air gap. In the case of machines with fractional-slot, in which the number of slots per pole and phase is not an integer value, intended for operation in high frequency power supply, the phenomenon of rotor loss cannot be ignored. One of the main reasons for these losses may be incorrect selection of the number of stator slots to the number of magnetic rotor poles.

Keywords: PMSM motors, concentrated winding, rotor losses, eddy current losses



Rys. 1. Rozkład indukcji magnetycznej od magnesów trwałych w poszczególnych modelach obwodu elektromagnetycznego o liczbie biegunów $2p = 20$ oraz a) $Q_s = 18$; b) $Q_s = 21$; c) $Q_s = 24$; d) $Q_s = 30$

2. Modele obliczeniowe

Analizę obliczeniową przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych na modelach opracowanych w programie ANSYS Maxwell. Przyjęto generalne założenie, że poszczególne wersje zasadniczo różnią się między sobą jedynie

dobraną liczbą zębów. W celu zapewnienia porównywalnych warunków magnetycznych szerokość zęba każdego rdzenia stojana została dobrana tak, aby dla wszystkich przypadków zachować zbliżoną wartość indukcji magnetycznej w zębie.

Tabela 1. Właściwości uzwojeń poszczególnych konfiguracji obwodów elektromagnetycznych modeli obliczeniowych

	$2p = 20$ $Q_s = 18$	$2p = 20$ $Q_s = 21$	$2p = 20$ $Q_s = 24$	$2p = 20$ $Q_s = 30$
Liczba warstw uzwojenia	2	2	2	2
Współczynnik uzwojenia	0,945	0,953	0,933	0,866
Liczba żłobków na biegun/fazę	0,3	0,35	0,4	0,5
Liczba zwojów fazowych	27	28	28	30
Liczba symetrii magnetycznych	2	1	4	10

Liczba zwojów fazowych dla poszczególnych modeli również jest w miarę możliwości zbliżona. Podobnie szerokość otwarcia żłobka dla każdego przypadku jest taka sama. Założono, że rdzeń wirnika wykonany jest z materiału litego.

Rozkład indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym poszczególnych wariantów rozwiązań z uwzględnieniem liczby symetrii magnetycznych przedstawiono na rys. 1.

W tabeli 1 zestawiono najważniejsze właściwości uzwojeń dla poszczególnych konfiguracji.

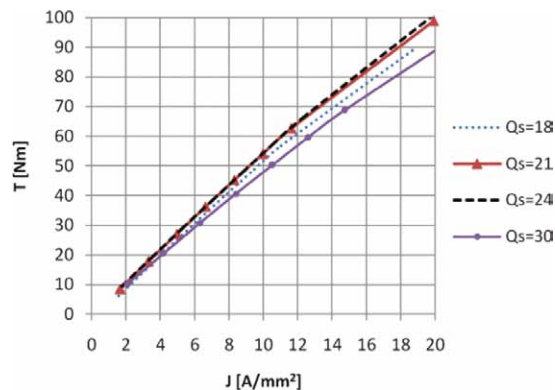
Dla analizowanych wariantów rozwiązania obliczono charakterystykę momentu elektromagnetycznego T w funkcji gęstości prądu w uzwojeniu J . Wyniki przedstawiono na rysunku 2.

Najlepszym stosunkiem T/J charakteryzuje się rozwiązanie z liczbą żłobków $Q_s = 24$, natomiast najgorszym rozwiązanie z liczbą żłobków $Q_s = 30$. Przyjmując jako wartość znamionową gęstość prądu w uzwojeniu $J = 10 \text{ A/mm}^2$, dla rozwiązania z liczbą żłobków $Q_s = 24$ otrzymujemy wartość momentu elektromagnetycznego ok. $T = 55 \text{ Nm}$, natomiast dla rozwiązania z liczbą żłobków $Q_s = 30$ otrzymujemy $T = 48 \text{ Nm}$. Wynika to w głównej mierze z wartości współczynnika uzwojenia poszczególnych konfiguracji podanego w tabeli 1.

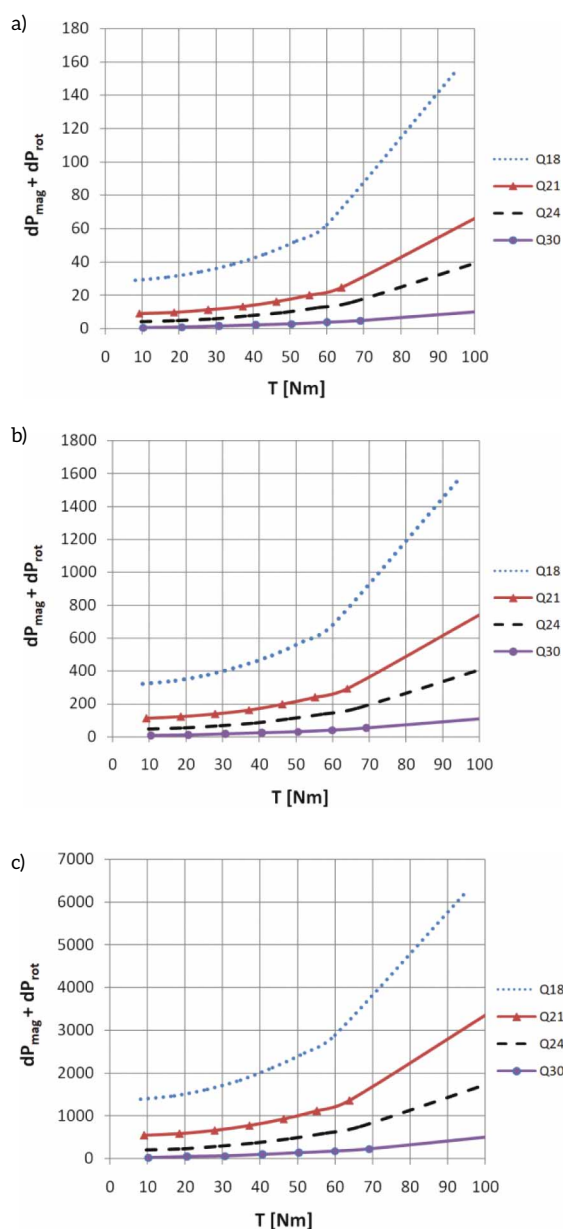
3. Analiza strat w wirniku

Dla analizowanych przypadków przeprowadzono analizę strat wiropędowych w litym rdzeniu wirnika oraz magnesach trwałych. Wyniki przedstawiono na rysunku 3 oraz rysunku 4.

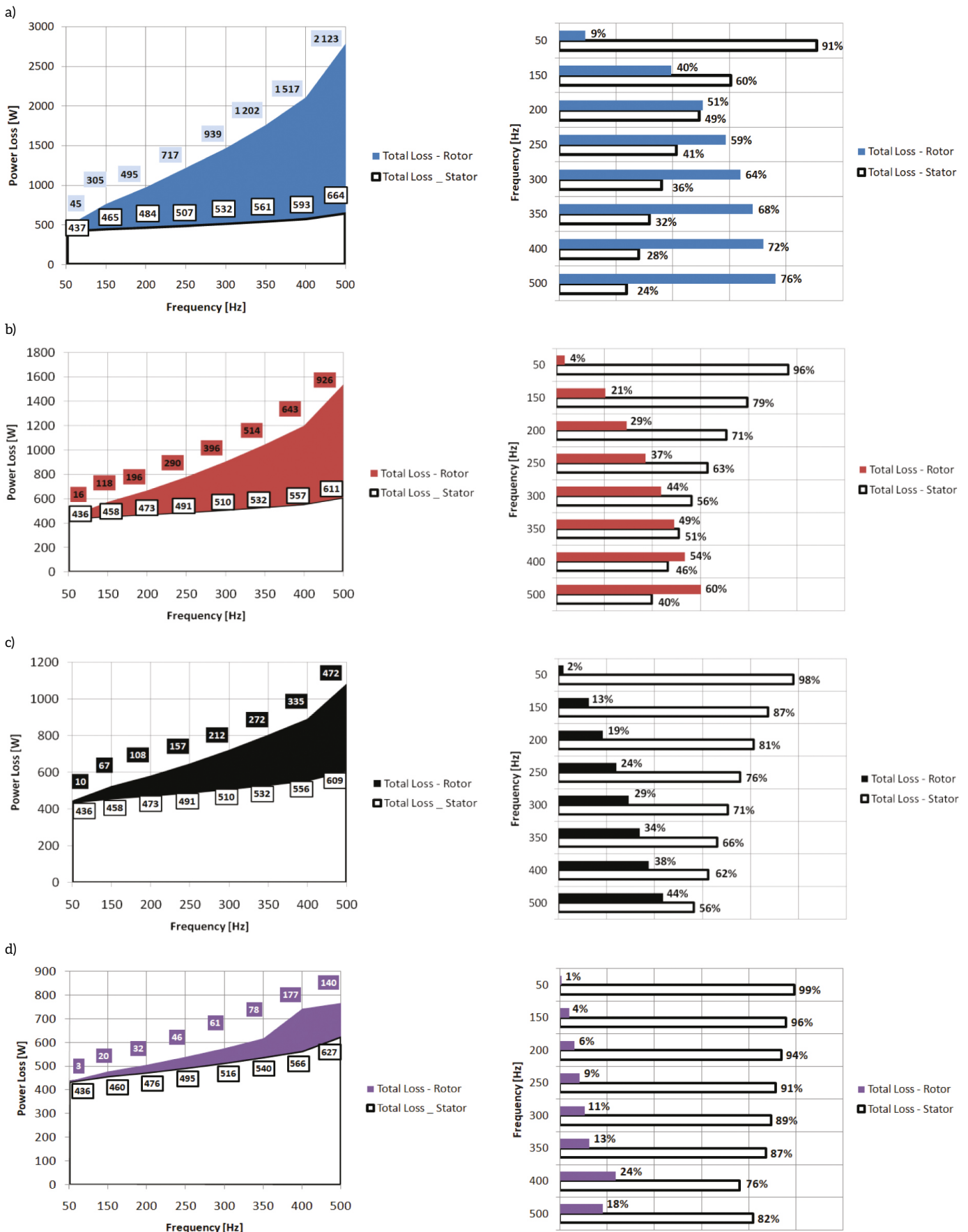
Na rysunku 2 przedstawiono charakterystyki strat wiropędowych w funkcji obciążenia dla trzech wybranych częstotliwości: 50 Hz, 200 Hz oraz 500 Hz. Można zauważyć, że dla każdej częstotliwości rozwiązanie z liczbą żłobków stojana $Q_s = 18$ cechuje się największą wartością strat wiropędowych w wirniku, natomiast rozwiązanie z liczbą żłobków $Q_s = 30$ najmniejszą. Różnice wartości bezwzględnych są bardzo duże, szczególnie dla wyższych częstotliwości zasilania. Dla częstotliwości 500 Hz i obciążenia znamionowego $T = 50 \text{ Nm}$ straty w wirniku dla wersji $Q_s = 18$ wynoszą ok. 2100 W, podczas gdy dla wersji $Q_s = 30$ zaledwie 150 W. Przypadek ten dobrze obrazuje potencjalne konsekwencje złego doboru liczby żłobków stojana do danej liczby biegunów magnetycznych bez uprzedniej analizy wpływu określonej konfiguracji na straty wiropędowe w wirniku. Należy również zauważyć, że wartość



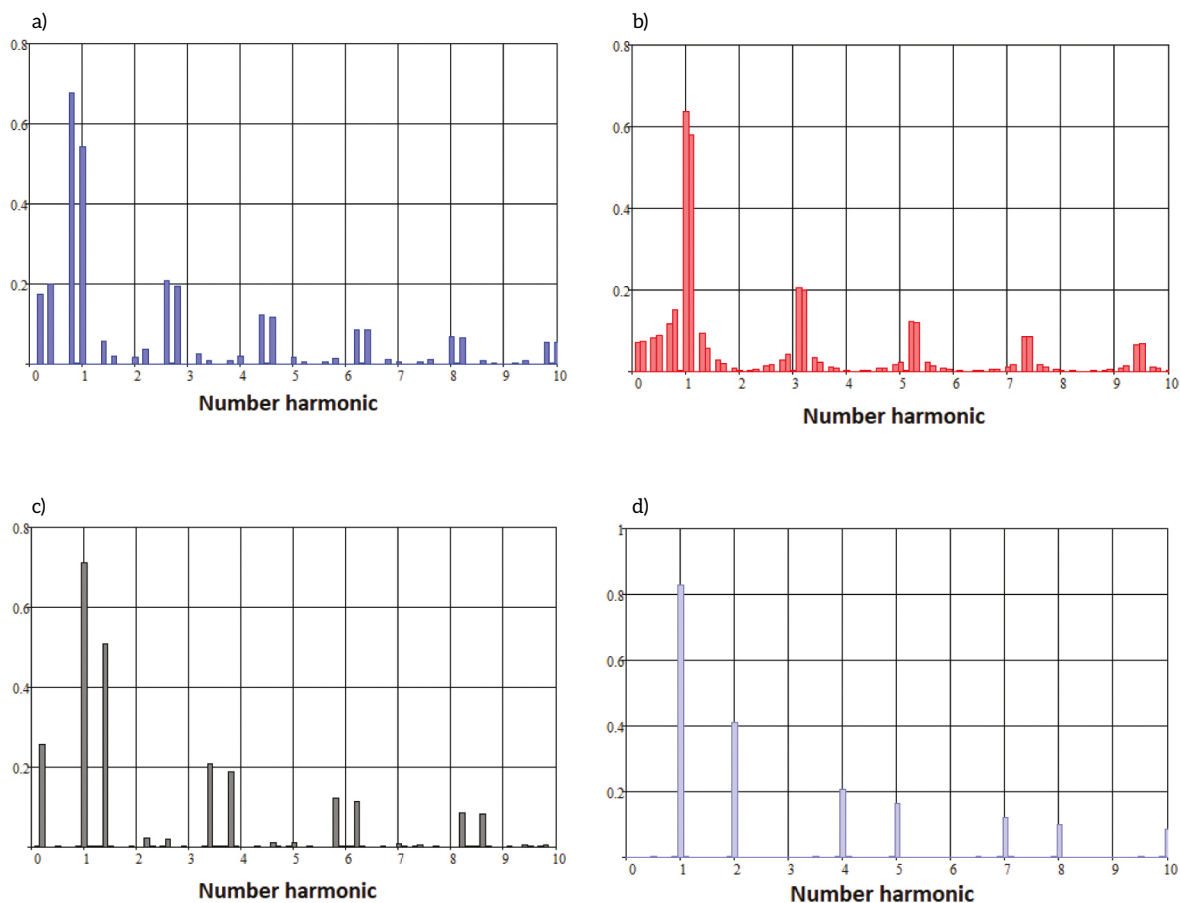
Rys. 2. Charakterystyka momentu elektromagnetycznego w funkcji gęstości prądu w uzwojeniu dla poszczególnych wariantów rozwiązania



Rys. 3. Charakterystyki strat wiropędowych w rdzeniu wirnika i magnesach trwałych dla poszczególnych konfiguracji w funkcji momentu obciążenia dla: a) 50 Hz; b) 200 Hz; c) 500 Hz



Rys. 4. Porównanie udziału całkowitych strat wirnika oraz stojana w stratach całkowitych w funkcji częstotliwości zasilania dla znamionowego obciążenia: a) $Q_s = 18$; b) $Q_s = 21$; c) $Q_s = 24$; d) $Q_s = 30$



Rys. 4. Rozkład harmoniczných przestrzenných síly magnetomotorycznej twornika: a) $Q_s = 18$; b) $Q_s = 21$; c) $Q_s = 24$; d) $Q_s = 30$

strat wiropądowych w wirniku silnie zależy od wartości momentu obciążenia. Wraz ze wzrostem obciążenia straty te rosną wykładniczo [7].

Na rysunku 4 przedstawiono natomiast rozdział udziału strat w wirniku oraz w stojanie w stratach całkowitych silnika dla każdego z analizowanych wariantów dla znamionowego obciążenia w funkcji częstotliwości zasilania. Szczególnie interesujące jest zestawienie procentowe udziału poszczególnych strat w stratach całkowitych. Można zaobserwować, że dla dwóch pierwszych przypadków, tj. $Q_s = 18$ oraz $Q_s = 21$, dla częstotliwości zasilania ok. 200–350 Hz następuje zrównanie wartości strat w wirniku ze stratami w stojanie. Uwzględniając, że w przeciwieństwie do stojana wirnik nie jest chłodzony, można założyć, że dla tych przypadków nastąpiłoby przegrzanie wirnika. Dla wariantu $Q_s = 30$ dla częstotliwości zasilania 500 Hz wartość strat wiropądowych w wirniku stanowi jedynie 18% udziału w stratach całkowitych silnika, podczas gdy dla wariantu $Q_s = 18$ jest to aż 79%. Wartość strat w stojanie dla poszczególnych częstotliwości zasilania dla każdego z analizowanych przypadków jest niemalże jednakowa, co stanowi dobrą podstawę porównawczą.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono zagadnienie strat wiropądowych powstałych w rdzeniu wirnika oraz magnesach trwałych w silnikach PMSM o cewkach skupionych. Szczególną uwagę

zwrócono na kwestię prawidłowego doboru liczby żłobków rdzenia stojana do liczby biegunów magnetycznych wirnika. Konfiguracja ta ma zasadniczy wpływ na wartość strat wiropądowych powstałych w litych elementach wirnika [3, 4]. Przeanalizowano i zestawiono cztery warianty rozwiązania silnika o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 20$: $Q_s = 18$; $Q_s = 21$; $Q_s = 24$; $Q_s = 30$. Zauważono znaczące różnice w wartości strat powstałych w elementach wirnika. Dla silnika zasilanego częstotliwością 500 Hz i obciążonego znamionową wartością momentu wartość strat w wirniku dla wariantu $Q_s = 18$ wynosiła ok. 2100 W, podczas gdy dla wariantu $Q_s = 30$ jedynie ok. 150 W.

Przyczyną powstawania tak znaczących różnic strat wiropądowych w wirniku w zależności od liczby żłobków stojana są subharmoniczne rozkładu przestrzennego siły magnetomotorycznej twornika [3]. Należy zauważyć, że dobrana liczba żłobków stojana, przy założeniu, że uzwojenie o cewkach skupionych z poskokiem $Y = 1$ jest uzwojeniem dwuwarstwowym, narzuca konkretny schemat uzwojenia. Na rysunku 5 przedstawiono porównanie rozkładu przestrzennego siły magnetomotorycznej twornika dla 4 analizowanych wariantów rozwiązania. Widać wyraźnie, że dla pierwszych dwóch przypadków $Q_s = 18$, $Q_s = 21$ subharmoniczne mają znaczący udział w rozkładzie przestrzennym siły magnetomotorycznej. Ponadto dla tych przypadków amplituda wybranych subharmonicznych jest większa niż amplituda podstawowej harmonicznej.

Subharmoniczne w rozkładzie przestrzennym siły magneto-motorycznej powstają wtedy, gdy liczba symetrii magnetycznych maszyny, rozumiana jako największy wspólny dzielnik pomiędzy liczbą żłobków oraz liczbą par biegunów magnetycznych p , jest mniejsza od liczby par biegunów p [3, 7]. Z tego względu przed doбором konfiguracji żłobków stojana do liczby biegunów magnetycznych w silnikach PMSM o cewkach skupionych należy wyznaczyć rozkład harmonicznym siły magneto-motorycznej twornika oraz ocenić zawartość potencjalnych subharmonicznym. Kwestia ta ma kluczowe znaczenie dla poprawnego zaprojektowania tego rodzaju silników.

Literatura

- [1] GIERAS J., WING M.: *Permanent magnet motor technology. Design and Applications*. Marcel Dekker, Inc, New York, Basel, 2002.
- [2] ROSSA R., WOLNIK T.: *Porównanie dwóch konstrukcji silników synchronicznych z magnesami trwałymi do pojazdu terenowego typu Quad z napędem elektrycznym*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 100/2012.
- [3] BIANCHI N., BOLOGNANI S., FORNASIERO E.: *A general approach to determine the rotor losses in three-phase fractional-slot PM Machine*. IEEE International Electric Machines & Drives Conference, Antalya, Turkey 2007.
- [4] ISHAK D., ZHU Q.: *Eddy-Current Loss in the Rotor Magnets of Permanent-Magnet Brushless Machines having a fractional number of slot per Pole*. IEEE Transaction on Magnetics, vol. 41, no. 9, September 2005.
- [5] TODA H., XIA Z., WANG J.: *Rotor Eddy-Current Loss in Permanent Magnet Brushless Machines*. IEEE Transaction on Magnetics, vol. 40, no. 4, July 2004.
- [6] ATALLAH K., HOWE D., MELLOR P., STONE D.: *Rotor loss in permanent-magnet brushless AC machines*. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(6), November/December 2000.
- [7] BIANCHI N., BOLOGNANI S., PRÉ M.D.: *Magnetic loading of fractional-slot three-phase PM motors with non-overlapped coils*. Conference Record of the IEEE 41st Industry Applications Society Annual Meeting (IAS'05), CD-ROM, Tampa, FL, October 8–12, 2006.



dr inż. Tomasz Wolnik

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn

Elektrycznych KOMEL

e-mail: t.wolnik@komel.com.pl

artykuł recenzowany