

doi:10.15199/48.2017.02.04

Kształtowanie charakterystyk mechanicznych dwufazowego silnika reluktancyjnego poprzez dobór kątów sterowania

Streszczenie. W niniejszym artykule przedstawione są badania wpływu parametrów sterowania przełączalnego silnika reluktancyjnego na kształt jego charakterystyk mechanicznych. Silnik zasilano z konwertera energii, umożliwiającego niezależną regulację wartości prądu pasma fazowego oraz kątów załączenia, i odłączenia uzwojeń fazowych od źródła napięcia. Otrzymano rodziny charakterystyk mechanicznych oraz sprawności. Stwierdzono znaczący wpływ wartości kątów sterowania na kształt charakterystyk mechanicznych.

Abstract. The results of double phase switched reluctance motor tests were presented in this paper. The energy converter allows to control phase current and switching angles independently. Torque versus speed characteristics were executed for different control parameters. It is found, that the shape of motor characteristics heavily depends of the switching angles and maximum phase current. (**Control parameters impact on mechanical characteristics of double-phase switched reluctance motor**)

Słowa kluczowe: sterowanie przełączalnego silnika reluktancyjnego, charakterystyki mechaniczne,

Keywords: switched reluctance motor, torque-speed curve

Wprowadzenie

Przełączalne silniki reluktancyjne (ang.: Switched Reluctance Motor) stosowane są w napędach o regulowanej prędkości obrotowej. Charakteryzują się prostą budową i łatwą produkcją jednostkową lub małoseryjną z uwagi na brak potrzeby stosowania skomplikowanych procesów technologicznych. Stojan i wirnik SRM zbudowane są z pakietów blach elektrotechnicznych z równomiernie rozłożonymi na obwodzie biegunami wydatnymi. Liczba biegunów stojana musi się różnić od liczby biegunów wirnika [1, 2, 4]. Na biegunach stojana umieszczone są uzwojenia skupione w postaci koncentrycznych cewek. Cewki leżące na przeciwległych biegunach łączone są szeregowo, tworząc pasma fazowe. Poszczególne pasma fazowe załączane są w odpowiedniej sekwencji do źródła napięcia za pośrednictwem konwertera energii. Zmiana położenia biegunów wirnika względem biegunów stojana powoduje zmianę reluktancji obwodu magnetycznego. Po wzbudzeniu danego pasma fazowego, wirnik dąży do położenia, w którym reluktancja jest najmniejsza. Jedną z najprostszyc struktur geometrycznych SRM jest struktura 4/2 [1]. Znajduje ona zastosowanie w prostych napędach o wentylatorowej charakterystyce obciążenia (rys.1).

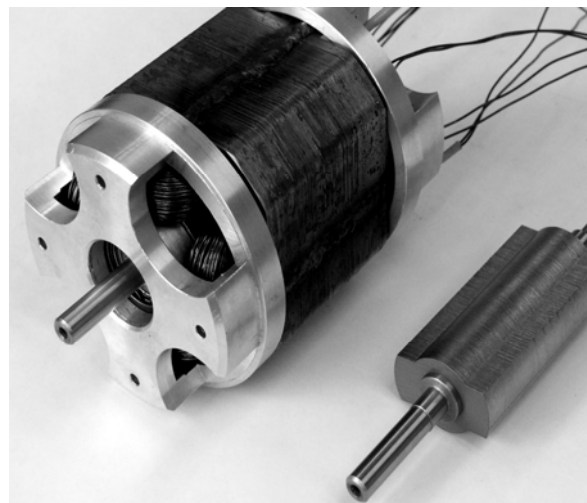


Rys. 1. Widok dwufazowego silnika reluktancyjnego o czterech biegunach stojana i dwóch biegunach wirnika

Charakterystyki statyczne momentu oraz sposób sterowania mają decydujący wpływ na właściwości eksploatacyjne napędu z silnikiem SRM. Charakterystyki

statyczne momentu są ustalone dla danej konstrukcji silnika. Można je kształtować przez odpowiedni dobór parametrów geometrycznych rdzeni stojana i wirnika oraz dobór materiałów magnetycznych [3,5]. Charakterystyki ruchowe całego napędu zależą od właściwości magnetostacyjnych danej struktury geometrycznej silnika oraz od struktury konwertera energii i metod sterowania jego pracą.

W literaturze spotyka się wiele odmian konwerterów energii stosowanych do zasilania silników SRM. Konwertery różnią się od siebie ilością elementów łączeniowych, układem połączeń oraz zastosowaniem elementów dodatkowych [1,2,3,4]. Jako elementy przełączające w konwerterach najczęściej stosowane są tranzystory IGBT lub MOS.



Rys. 2. Widok dwufazowego silnika reluktancyjnego z widocznym dwubiegunowym wirnikiem.

Konstrukcja silnika

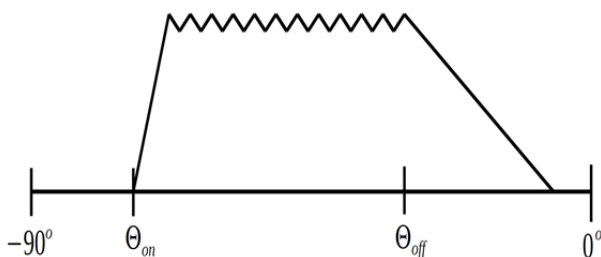
Dwufazowy silnik reluktancyjny zaprojektowany został przez autorów, jako napęd wentylatora (rys.2). Silnik o czterech biegunach stojana i dwóch biegunach wirnika, przy średnicy wewnętrznej stojana 41 mm i długości pakietu 80 mm, rozwija moc ok. 600 W, przy projektowanej prędkości bazowej 8000 obr./min. Silnik zasilany jest napięciem 320 VDC poprzez konwerter energii. Obwód mocy oparty jest na dedykowanym układzie scalonym (IPM – zintegrowany moduł mocy) zawierającym trzy półmostki typu H, składające się z tranzystorów mocy typu IGBT. Schemat

obwodu mocy konwertera przedstawia rysunek 4. Tranzystory T_1 i T_4 załączają uzwojenie fazy pierwszej, tranzystory T_3 i T_6 załączają uzwojenie fazy drugiej. Pozostałe tranzystory uczestniczą w procesie wyłączenia i kontroli prądu, umożliwiając zwrot energii do źródła zasilania. Środkowy półmostek jest wspólny dla obu pasm fazowych z uwagi na to, że w silniku dwufazowym prąd nigdy nie płynie przez oba pasma fazowe jednocześnie.

Tryb pracy silnika i jego parametry eksploatacyjne zależą od tego, w jakim położeniu wirnika uzwojenia są dołączane do źródła zasilania i w jakim położeniu są od źródła odłączane. Do określenia położenia wirnika, w których pasma są dołączane i odłączane dogodnie jest posłużyć się wartościami kąta załączenia, i kąta wyłączenia. Położenie kątowne wirnika θ określone jest względem osi symetrii biegunów stojana zasilanego pasma fazowego. Położenie zerowe wirnika odpowiada najmniejszej reluktancji układu (biegun wirnika znajduje się wtedy pod biegunem stojana aktualnie zasilanego pasma fazowego). Położenie -90° odpowiada największej reluktancji układu (bieguny wirnika są wtedy ustawione poprzecznie do biegunów stojana aktualnie zasilanego pasma fazowego) Kąty załączenia θ_{on} i wyłączenia θ_{off} określają odpowiednio położenie kątowne wirnika w chwili dołączenia i odłączenia pasma fazowego od źródła zasilania (rys.3). Wartość bezwzględna różnicy kątów θ_{on} i θ_{off} określa przedział przyłączenia danego pasma fazowego do źródła zasilania:

$$(1) \quad \beta = |\theta_{on} - \theta_{off}|$$

W zakresie pracy silnikowej maszyny reluktancyjnej załączenie i wyłączenie pasma fazowego powinno nastąpić przy malejącej reluktancji układu, a więc przed osiągnięciem położenia zerowego przez wirnik. Kąty θ_{on} i θ_{off} dla pracy silnikowej są więc ujemne. Odłączenie pasma fazowego (wyłączenie obu tranzystorów – położenie θ_{off}) powinno nastąpić odpowiednio wcześniej aby umożliwić zanik prądu w uzwojeniu przed osiągnięciem przez wirnik położenia zerowego. Przepływ prądu przez uzwojenie po przekroczeniu przez wirnik położenia zerowego powoduje wytworzenie ujemnego momentu obrotowego. Sytuacja taka jest niekorzystna ponieważ powoduje zwiększenie pulsacji momentu obrotowego.

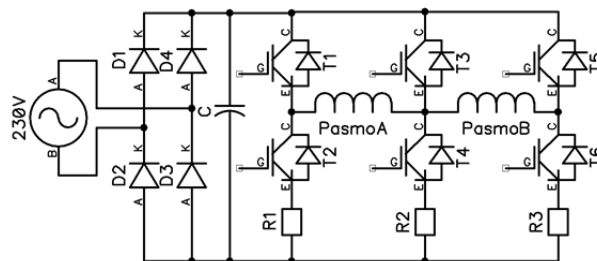


Rys. 3. Kąty załączenia θ_{on} i odłączenia θ_{off}

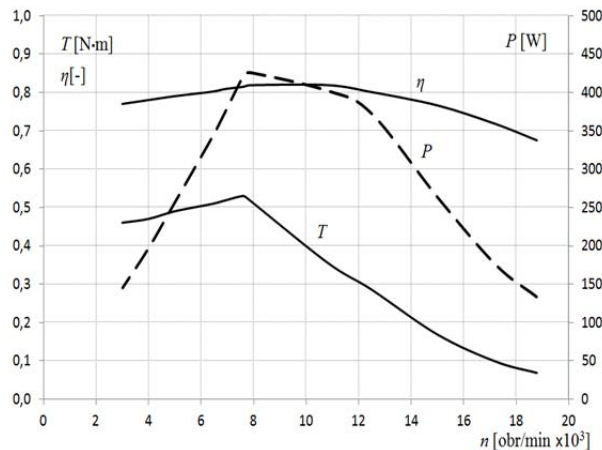
Schemat obwodu mocy zaprojektowanego konwertera energii przedstawiono na rysunku 4. Konwerter energii sterowany jest przez mikrokontroler na podstawie sygnałów położenia wirnika i wartości prądów w pasmach fazowych. Sygnał położenia wirnika dostarczany jest przez inkrementalny czujnik obrotowo-impulsowy o rozdzielczości 512 imp/obr. Czujnik scalony zawiera 64 hallotrony, które reagują na pole magnetyczne wirującego magnesu zamieszczonego na wale silnika. Zebrane dane są następnie przekazywane do mikrokontrolera sterującego w postaci impulsów. Mikrokontroler zliczając impulsy oblicza aktualne położenie wirnika. Informacja o wartości prądu w uzwojeniach uzyskiwana jest poprzez pomiar spadku

napięcia na rezystorach $R_1 - R_3$ o wartości $0,05 \Omega$. W czasie, gdy dane pasmo fazowe jest załączone (wirnik znajduje się pomiędzy θ_{on} a θ_{off}) prąd przez nie płynący analizowany jest przez mikrokontroler. Aktualna wartość prądu porównywana jest z ustawionym ograniczeniem prądowym z częstotliwością 20 kHz. Jeżeli wartość prądu nie przekracza ograniczenia, aktywne są oba tranzystory i energia dostarczana jest do uzwojenia (np. dla pasma A tranzystory T_1 i T_4). W przeciwnym przypadku konwerter energii pracuje w trybie „wolnego wybiegu” (ang. freewheeling) wyłączając górny tranzystor. Prąd płynie wtedy przez diodę zwrotną tranzystora T_2 , uzwojenie i tranzystor T_4 z pominięciem zewnętrznego źródła napięcia dzięki czemu wartość prądu zmniejsza się.

Silnik został sprzęgnięty z hamownicą indukcyjną, która posiada ułożyskowany stojan i umożliwia pomiar momentu obrotowego przy pomocy ramienia, i siłomierza tensometrycznego. Prędkość obrotowa obliczana jest przez mikrokontroler na podstawie sygnału położenia wirnika. Program sterujący umożliwia zadawanie maksymalnej wartości prądu pasma fazowego oraz regulację kątów sterujących. Prąd regulowany jest metodą histerezyowa a maksymalna częstotliwość przełączeń jest ograniczona do 20 kHz.



Rys. 4. Schemat obwodu mocy konwertera energii



Rys. 5. Charakterystyki mechaniczne silnika dla: $I_{max}=6$ A, $\theta_{on}=-85^\circ$, $\theta_{off}=-40^\circ$

Wyniki badań

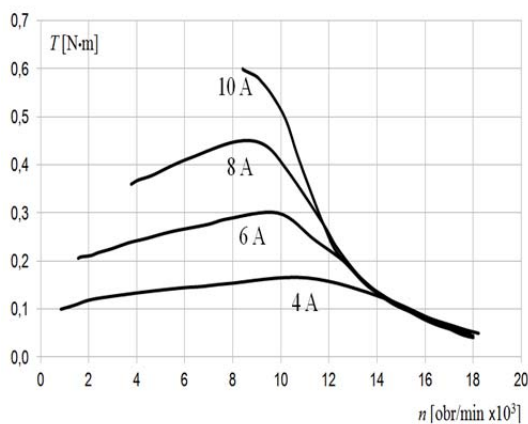
Charakterystyki mechaniczne silnika

Na rysunku 5 przedstawiono zależność momentu, mocy mechanicznej i sprawności silnika od prędkości obrotowej, dla maksymalnych wartości prądu fazowego ograniczonych do 8 A. Kąty załączenia i odłączenia są stałe i wynoszą odpowiednio: $\theta_{on} = -85^\circ$ i $\theta_{off} = -40^\circ$. Zauważyć można, że naturalne charakterystyki silnika (przy stałych parametrach sterowania) nie wykazują ściśle, opisywanych w literaturze [1, 2], rejonów stałego momentu i stałej mocy. Moment łagodnie narasta w zakresie poniżej prędkości bazowej, a moc nieznacznie maleje w rejonie powyżej prędkości bazowej. Utrzymanie stałego momentu i stałej mocy w odpowiednich zakresach prędkości obrotowej wymaga

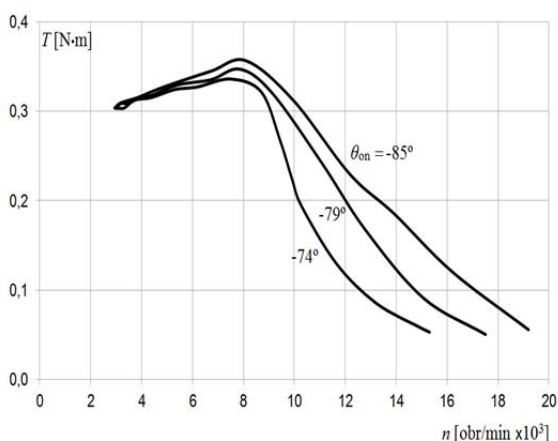
regulacji wartości maksymalnej prądu i kątów sterowania. Sprawność silnika w rejonie "stałej mocy" utrzymuje się na poziomie 82%, co uznać można za wartość stosunkowo wysoką, jak na silnik małej mocy wydający 400-450 W. Praca silnika przy prędkości poniżej 1500 obr./min. staje się niestabilna i odznacza się dużymi pulsacjami momentu powodującymi drgania i hałas. Zjawisko to związane jest z przebiegiem charakterystyki momentu statycznego w funkcji położenia wirnika. Silnik typu 4/2 praktycznie nie wytwarza momentu dla kątów θ od -90° do -60° .

Wpływ ograniczenia prądu fazowego na charakterystyki mechaniczne silnika

Na rysunku 6 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych dla maksymalnych wartości prądu fazowego ograniczonych do 4, 6, 8 i 10 A. Kąty załączenia i odłączenia są dla wszystkich charakterystyk stałe i wynoszą odpowiednio: $\theta_{on}=-79^\circ$ i $\theta_{off}=-45^\circ$. Poprzez ograniczanie maksymalnego prądu pasma fazowego można sterować momentem obrotowym silnika w zakresie prędkości mniejszej od prędkości bazowej. Dla większych prędkości obrotowych wpływ ograniczenia prądu jest mniejszy, a dla najwyższych prędkości w ogóle może nie występować, ze względu to, że prąd w paśmie fazowym nie zdąży narosnąć do wartości kontrolowanej przez sterownik silnika.



Rys. 6. Charakterystyki mechaniczne silnika dla prądów 4 - 10 A, $\theta_{on}=-79^\circ$, $\theta_{off}=-45^\circ$



Rys. 7. Ch-ki mechaniczne silnika dla kątów $\theta_{on}=-85^\circ$, -79° i -74° , $I_{max}=6\text{ A}$, $\theta_{off}=-45^\circ$

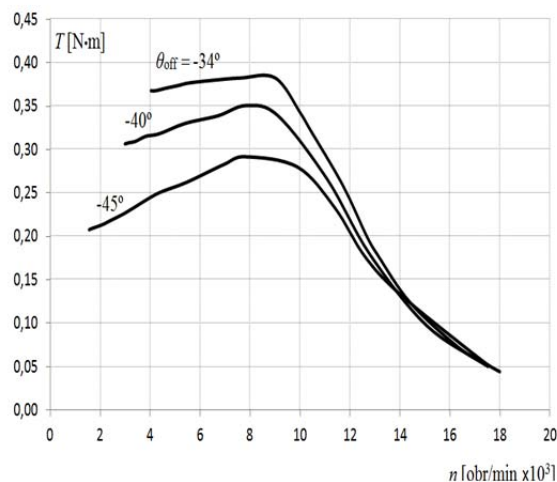
Wpływ kąta załączenia na charakterystyki mechaniczne silnika

Na rysunku 7 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych dla trzech wartości kątów załączenia $\theta_{on}=-85^\circ$, -79° i -74° . Maksymalna wartość prądu fazowego

ograniczona jest do 6 A. Kąt odłączenia $\theta_{off}=-50^\circ$. W tym przypadku mamy różne przedziały przyłączenia $\beta = 35^\circ$, 29° i 24° . Wydłużenie czasu, w którym pasmo fazowe jest przyłączone do źródła napięcia umożliwi dostarczenie do silnika większej ilości energii i wytworzenie większego momentu obrotowego przy prędkościach wyższych od prędkości bazowej. Wpływ wartości kąta załączenia θ_{on} na przebieg charakterystyk mechanicznych w zakresie prędkości niższych od prędkości bazowej jest znikomy z uwagi na działanie w tym zakresie ograniczenia prądowego.

Wpływ kąta odłączenia na charakterystyki mechaniczne silnika

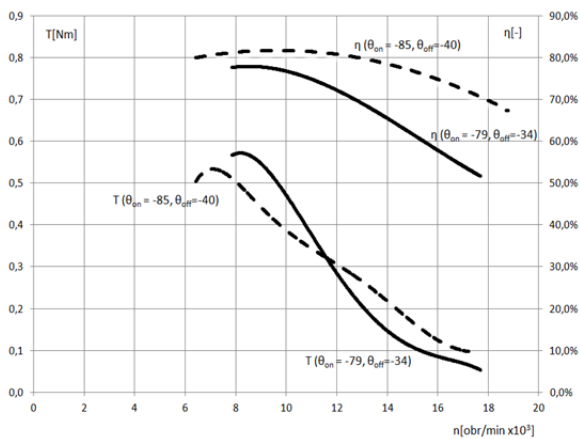
Na rysunku 8 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych dla trzech wartości kątów odłączenia $\theta_{off}=-45^\circ$, -40° i -34° . Maksymalna wartość prądu fazowego ograniczona jest do 6 A. Kąt załączenia $\theta_{on}=-79^\circ$. W tym przypadku także mamy różne przedziały przyłączenia: $\beta = 34^\circ$, 39° i 45° . Poniżej prędkości bazowej, późniejsze odłączanie uzwojenia praktycznie nie wpływa na wartość momentu, gdyż w tym zakresie działa ograniczenie prądu. Natomiast przy prędkościach większych, gdy prąd nie osiąga wartości ograniczenia, dłuższy przedział przyłączenia pozwala na dłuższe narastanie prądu i wytwarzanie większego momentu przez silnik.



Rys. 8. Ch-ki mechaniczne silnika dla kątów $\theta_{off}=-45^\circ$, -40° i -34° , $I_{max}=6\text{ A}$, $\theta_{on}=-79^\circ$

Wpływ położenia kątów przewodzenia na charakterystyki mechaniczne i sprawność silnika

Na rysunku 9 przedstawiono rodzinę charakterystyk mechanicznych oraz sprawności silnika dla maksymalnych wartości prądu fazowego ograniczonego do 8A. Kąty załączenia oraz odłączenia różnią się pomiędzy charakterystykami, jednak w obu przypadkach stała jest wartość przedziału przyłączenia β która wynosi 45° ($85^\circ-40^\circ$, $79^\circ-34^\circ$). Analizując przebieg charakterystyk można zauważyć, że wpływ położenia kątów sterowania przy jednakowym kącie przyłączenia jest znaczący. Dla wcześniejszego załączenia i odłączenia silnik charakteryzuje się wyższą sprawnością, szczególnie w zakresie wyższych prędkości obrotowych, niż w przypadku późniejszych kątów sterowania. Wpływ na uzyskiwany moment obrotowy zależny jest od prędkości obrotowej. W zakresie niskich prędkości obrotowych, wcześniejsze załączenie i odłączenie powoduje wytworzenie mniejszego momentu obrotowego. Wraz ze wzrostem prędkości obrotowej sytuacja ulega zmianie i moment obrotowy silnika wytwarzany przy wcześniejszym załączeniu i odłączeniu staje się większy niż w przypadku późniejszego sterowania.



Rys. 9. Ch-ki mechaniczne oraz sprawności silnika dla $\beta=45^\circ$, $I_{\max}=8$ A

Podsumowanie

W niniejszym artykule zaprezentowane zostały rodziny charakterystyk mechanicznych silnika oraz wpływ czterech sterujących na ich przebieg: wartości maksymalnej prądu w uzwojeniu, kąta załączenia, kąta odłączenia oraz położenia kątów sterujących. Z przeprowadzonych badań można wysnuć następujące wnioski:

- Ograniczanie prądu pasma fazowego ogranicza moment silnika w zakresie mniejszych prędkości, tam gdzie czas przyłączenia uzwojenia do źródła napięcia jest na tyle długi, że prąd może narosnąć do wartości maksymalnej.
- Kąt załączenia pasma fazowego wpływa na wartość momentu dla prędkości większych od prędkości bazowej.
- Kąt odłączenia pasma fazowego wpływa na wartość momentu dla prędkości mniejszych od prędkości bazowej.
- Położenie kątów sterowania przy stałej wartości kąta przyłączenia β wpływa na sprawność silnika. Wpływ tego parametru na wartość momentu obrotowego zależy od zakresu prędkości obrotowej.

W artykule zamieszczono także zależność mocy mechanicznej i sprawności w funkcji prędkości obrotowej. Zauważono, że w postulowanym w literaturze rejonie "stałej mocy", moc mechaniczna silnika maleje o około 10% w miarę zwiększania prędkości. Przyczyn takiego stanu rzeczy upatrywać należy w większym skomplikowaniu zjawisk elektromechanicznych, niż w rozpatrywanych modelach matematycznych oraz stosunkowo małej mocy silnika.

Mnogość parametrów sterujących i ich znaczący wpływ na uzyskiwane charakterystyki eksploatacyjne silnika pozwala na stosowanie strategii sterowania zorientowanych pod kątem różnych wymagań, np. maksymalizacja momentu obrotowego, maksymalizacja sprawności.

Silnik osiąga sprawność przekraczającą 80% w zakresie prędkości od 6000 do 12000 obr./min., co można uznać za satysfakcjonującą wartość dla maszyny o projektowanej mocy 600 W.

Autorzy dr inż. Krzysztof Bieńkowski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Maszyn Elektrycznych, Gmach Elektrotechniki, klatka B, pok. 314, 312 ul. Koszykowa 75 00-662 Warszawa, E-mail: krzysztof.bienkowski@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Krzysztof Jackiewicz, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, Zakład Maszyn Elektrycznych, Gmach Elektrotechniki, klatka B, pok. 314, 312 ul. Koszykowa 75 00-662 Warszawa, E-mail: jjkrzys@gmail.com.

LITERATURA

- 1 Krishan R. Switched Reluctance Motor Drives. CRC Press London, 2001
- 2 Miller T.J.I. Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Oxford, 2001
- 3 Dong-Hee L., Trung H.P., Jin-Woo A.: Design and Operation Characteristics of Four-Two Pole High-Speed SRM for Torque Ripple Reduction, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2013, Vol. 60, 3637-3643
- 4 Kyohei K., Takeo K., Akira C.: Comparison of Test Result and Design Stage Prediction of Switched Reluctance Motor Competitive With 60-kW Rare-Earth PM Motor, *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2014, Vol. 61, 5712-5721
- 5 Hao C., Jason J.G.: Switched Reluctance Motor Drive With External Rotor for Fan in Air Conditioner, *IEEE Trans. on Mechatronics*, 2013, Vol. 18, 1448-1458