

Wirnik maszyny elektrycznej o wzbudzeniu hybrydowym

Przedmiotem wynalazku jest wirnik maszyny elektrycznej o wzbudzeniu hybrydowym umożliwiający sposób kształtowania obwodu magnetycznego w celu uzyskania szerokiego zakresu regulacji napięcia indukowanego, a w konsekwencji znacznego zwiększenia maksymalnej prędkości obrotowej wirnika.

Obecne rozwiązania wykorzystujące silniki z magnesami trwałymi (MT) charakteryzują się wysoką sprawnością i dobrym stosunkiem masy/objętości do momentu/mocy, dlatego chętnie wykorzystywane są w napędach samochodowych. Posiadają one jednak wadę, która związana jest z brakiem możliwości regulacji pola wzbudzenia od MT. W kontekście zastosowania takich maszyn w napędach trakcyjnych/samochodowych, fakt ten jest szczególnie istotny, gdyż możliwość pracy napędu przy dużych prędkościach obrotowych i stałym napięciu zasilania ściśle związana jest ze skutecznością osłabiania wzbudzenia maszyny. Przy dużych prędkościach obrotowych silnika, napięcie indukowane na zaciskach maszyny osiąga wartości, które uniemożliwiają właściwe zasilanie i sterowanie maszyny, przy ograniczonym napięciu zasilania. Konwencjonalne sposoby rozwiązania problemu odwzbudzenia pola magnetycznego silnika z MT sprowadzają się do odpowiedniego sterowania maszyny prądem stojana w osi podłużnej, co komplikuje układ sterowania i wprowadza konieczność przewymiarowania przekształtników energoelektronicznych, obniżając tym sprawność całego układu napędowego. Innymi sposobami, jako rozwiązania alternatywne problemu odwzbudzenia pola maszyny znanymi w literaturze, są propozycje konstrukcji wysokoobrotowych maszyn z MT o wzbudzaniu hybrydowym, które umożliwiają regulację wzbudzenia sterowanego prądem dodatkowych uzwojeń maszyny.

W artykule: Canders W.-R. , Tareilus G., Koch I. , May H., *New Design and Control Aspects for Electric Vehicle Drives*, Proc. of EPE-PEMC 2010, Ohrid, Macedonia, autorzy przedstawili m.in. konstrukcję oraz wyniki badań maszyny elektrycznej z wirnikiem z magnesami trwałymi oraz dodatkową nieruchomą cewką regulującą strumień wzbudzenia, która znajduje się w obszarze wirnika. Podobnego rozwiązania dotyczy publikacja: May H., Meins J., Canders W.-R., Palka R., *New permanent magnet excited synchronous machine with extended, stator fixed auxiliary excitation coil*, Proc. of ISEF 2009, Arras, France, w którym przedstawiono wyniki

badań wykonanego modelu eksperymentalnego maszyny hybrydowej z cewką regulującą wzbudzenie zamontowaną w obszarze wirnika.

Publikacja: Tapia J. A., Leonardi F., Lipo T. A., *Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability*, IEEE Transactions on Industry Applications, 39, 2003, 1704-1709, pokazuje konstrukcję maszyny hybrydowej, jednak cewka regulacyjna znajduje się w obszarze stojana, co znacznie upraszcza budowę maszyny. Podobne rozwiązania technicznie przedstawione jest w artykule P. Paplicki, M. Wardach, M. Bonisławski, and R. Pałka, *Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy*, Archives of Electrical Engineering, vol. 64, no. 1, pp. 37–51, 2015. Przedstawiono tam wyniki badań symulacyjnych i wstępnych eksperymentalnych maszyny hybrydowej, w której magnesy trwałe o przeciwnych biegunowościach umieszczone na wirniku znajdują się naprzeciw siebie na sąsiednich częściach wirnika, patrząc wzdłuż osi wału, natomiast między magnesami każdej z części wirnika znajdują się wydadne bieguny ferromagnetyczne.

W występujących w literaturze rozwiązaniach konstrukcyjnych maszyny elektrycznej z MT i dodatkową cewką regulującą wzbudzenie, MT umieszczone są powierzchniowo na wirniku, a sam rdzeń wirnika jest zbudowany z materiału o dużej przenikalności magnetycznej.

W niniejszym wynalazku proponuje się zastosowanie odpowiednich barier dla strumieni magnetycznych, czyli obszarów o małej przenikalności magnetycznej, w celu skutecznego odwzbudzenia, a więc uzyskania szerokiego zakresu regulacji momentu/prędkości obrotowej maszyny.

Wirnik maszyny elektrycznej o wzbudzeniu hybrydowym, według wynalazku zawierający wał, tuleję rdzenia i dwa rdzenie wirnika, charakteryzuje się tym, że każdy z rdzeni wirnika ma na obwodzie rozmieszczone równomiernie bieguny zagłębione na przemian z biegunami wydattymi. Ilość biegunów zagłębionych i biegunów wydattych jest taka sama. W każdym obszarze bieguna zagłębionego ma co najmniej trzy przelotowe otwory: pierwszy otwór styczny do okręgu, którego środek jest w osi wirnika, a drugi i trzeci otwór rozmieszczone są wzdłuż promienia tego okręgu, pomiędzy pierwszym otworem, a biegunem zagłębionym, przy czym w co najmniej jednym z trzech otworów znajdują się magnesy trwałe. Bieguny zagłębione pierwszego

rdzenia wirnika są naprzeciwko biegunów zagłębionych drugiego rdzenia wirnika, zaś bieguny wydadne pierwszego rdzenia wirnika są naprzeciwko biegunów wydatnych drugiego rdzenia wirnika. W innej wersji wirnika bieguny zagłębione pierwszego rdzenia wirnika są naprzeciwko biegunów wydatnych drugiego rdzenia wirnika, zaś bieguny wydadne pierwszego rdzenia wirnika są naprzeciwko biegunów zagłębionych drugiego rdzenia wirnika.

Korzystnie wał wirnika składa się z trzech części: środkowej wykonanej z materiału o dużej przenikalności magnetycznej np. stali konstrukcyjnej, stali węglowej, i dwóch zewnętrznych wykonanych z materiału o małej przenikalności magnetycznej, np. poliamidu, stopu aluminium, przy czym części w miejscach ich łączenia mają kształt stożka o wierzchołku skierowanym do środka części.

Zastosowane w rozwiązaniu bieguny zagłębione oraz otwory tworzą bariery magnetyczne dla strumienia wytwarzanego przez magnesy trwałe i cewkę regulującą strumień wzbudzenia maszyny w postaci otwarcia obwodu magnetycznego. Bariere promieniową wewnętrzną tworzy pierwszy otwór, bariere promieniową zewnętrzną tworzą bieguny zagłębione oraz bariery równoległe do osi poprzecznej maszyny utworzone przez drugi i trzeci otwór. W barierach mogą być umieszczone magnesy. Dzięki takiej konstrukcji prąd w cewce regulującej strumień wzbudzenia maszyny w znikomym stopniu wpływa na strumień magnetyczny w obszarze biegunów zagłębionych, natomiast silnie oddziałuje w obszarze biegunów wydatnych powodując pożądany efekt dobrej regulacji strumienia maszyny. Istotne znaczenie, z punktu widzenia parametrów elektromagnetycznych maszyny, odgrywają mosty magnetyczne oddzielające wszystkie bariery magnetyczne, które powinny być możliwie najcieńsze przy spełnieniu wymagań wytrzymałościowych.

Rozwiązanie według wynalazku przedstawione jest w przykładach wykonania i na rysunku, na którym fig.1 przedstawia wirnik w widoku izometrycznym, fig.2 przedstawia rdzeń wirnika w widoku z przodu z biegunami zagłębionymi i biegunami wydattymi i z trzema otworami w każdym obszarze bieguna zagłębionego, z magnesem trwałym w obszarze nad biegunem zagłębionym, fig.3 przedstawia ten sam rdzeń z magnesem trwałym w pierwszym otworze, fig.4 przedstawia ten sam rdzeń wirnika z magnesem trwałym w obszarze nad biegunem zagłębionym i w pierwszym otworze, fig.5 przedstawia ten sam rdzeń wirnika z magnesem trwałym w drugim i trzecim

otworze, fig.6 przedstawia ten sam rdzeń wirnika z magnesem trwałym w obszarze nad biegunem zagłębionym oraz drugim i trzecim otworze, fig.7 przedstawia ten sam rdzeń wirnika z magnesem trwałym we wszystkich otworach, fig.8 przedstawia ten sam rdzeń wirnika z magnesem trwałym w obszarze nad biegunem zagłębionym i we wszystkich otworach, fig.9 przedstawia ten sam rdzeń wirnika, w którym w każdym obszarze bieguna zagłębionego jest pięć otworów z magnesami trwałymi, fig. 10 przedstawia ten sam rdzeń wirnika, w którym magnes trwały znajduje się w obszarze nad biegunem zagłębionym oraz w drugim, trzecim, czwartym i piątym otworze, fig. 11 przedstawia ten sam rdzeń, w którym magnes trwały znajduje się w obszarze nad biegunem zagłębionym oraz we wszystkich pięciu otworach, fig.12 przedstawia wał wirnika w widoku izometrycznym rozstrzelonym, fig.13 przedstawia przekrój podłużny wału wirnika.

Przykład 1

Wirnik maszyny elektrycznej o wzbudzeniu hybrydowym, zawiera wał 12, tuleję 3 i dwa rdzenie wirnika 1 i 2. Każdy rdzeń wirnika 1, 2 ma na obwodzie rozmieszczone równomiernie bieguny zagłębione 4 na pierwszym rdzeniu wirnika 1 i bieguny zagłębione 5 na drugim rdzeniu wirnika 2, na przemian z biegunami wydawnymi odpowiednio 6 i 7. Ilość biegunów zagłębionych 4 i 5 i biegunów wydawnych 6 i 7 jest taka sama. W każdym obszarze bieguna zagłębionego są trzy przelotowe otwory pierwszy otwór 8 styczny do okręgu, którego środek jest w osi wirnika, a drugi otwór 9 i trzeci otwór 10 rozmieszczone są wzdłuż promienia tego okręgu, pomiędzy pierwszym otworem 8 a biegunem zagłębionym 4, 5. Bieguny zagłębione 4 i 5 oraz otwory 8, 9, 10 tworzą bariery magnetyczne dla strumienia wytwarzanego przez cewkę regulującą strumień wzbudzenia maszyny w postaci otwarcia obwodu magnetycznego. Bariery promieniową wewnętrzną tworzy pierwszy otwór 8, barierą promieniową zewnętrzną tworzą bieguny zagłębione 4 i 5, a bariery równoległe do osi poprzecznej maszyny utworzone są przez drugi 9 i trzeci 10 otwór. Zastosowanie barier magnetycznych w postaci obszarów nad biegunami zagłębionymi 4 i 5 oraz otworów 8, 9 i 10 powoduje, że strumień magnetyczny wytwarzany przez cewkę regulującą strumień wzbudzenia kierowany jest głównie do biegunów wydawnych 6 i 7. Dzięki temu strumień magnetyczny w obszarze biegunów zagłębionych 4, 5 w niewielkim stopniu zależy od pola magnetycznego wytwarzanego od prądu cewki regulującej strumień

wzbudzenia, natomiast w obszarze biegunów wydatnych 6 i 7 zależność ta jest bardzo silna, co wpływa na dobre właściwości regulacyjne maszyny. W obszarze nad biegunami zagłębionym 4, 5 znajduje się magnes trwały 11. Istotnymi elementami konstrukcji rdzeni wirnika 1, 2 są mosty magnetyczne 15, których grubość musi być na tyle duża, aby spełnić wymagania konstrukcyjne – wytrzymałościowe i na tyle mała, aby w obszarze mostów 15 materiał magnetyczny, z którego są wykonane rdzenie wirnika, był zawsze nasycony. Dzięki nasyceniu mostów magnetycznych 15 strumień rozproszenia jest minimalizowany.

Przykład 2

Wirnik jak w przykładzie pierwszym z tym, że w obszarze nad biegunami zagłębionymi 4 i 5 i w otworach 8, 9, 10 umieszczone są magnesy trwałe 11. Magnesy te wzbudzają maszynę elektryczną, a regulacja wzbudzenia maszyny dokonywana jest za pomocą prądu cewki regulującej strumień wzbudzenia. Rozwiązanie to pozwala zwiększyć strumień wzbudzenia w maszynie.

Przykład 3

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że magnesy trwałe 11 znajduje się tylko w pierwszym otworze 8.

Przykład 4

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że w obszarze nad biegunami zagłębionymi 4 i 5 i w pierwszym otworze 8 umieszczone są magnesy trwałe 11. Umieszczenie magnesów zwiększa strumień wzbudzenia w maszynie, a regulacja wzbudzenia maszyny dokonywana jest za pomocą prądu cewki regulującej strumień wzbudzenia.

Przykład 5

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że w obszarze nad biegunami zagłębionymi 4 i 5 oraz w drugim 9 i trzecim 10 otworze umieszczone są magnesy trwałe 11.

Przykład 6

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że magnesy trwałe 11 umieszczone są w otworze drugim 9 i trzecim 10.

Przykład 7

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że są magnesy trwałe 11 umieszczone są w pierwszym 8, drugim 9 i trzecim 10 otworze.

Przykład 8

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że w każdym obszarze bieguna zagłębionego 4, 5 jest pięć otworów. Pierwszy 8, drugi 9 i trzeci 10 otwór rozmieszczone są jak opisano w przykładzie pierwszym, zaś czwarty otwór 13 i piąty otwór 14 są rozmieszczone ukośnie pomiędzy pierwszym 8, drugim 9 i trzecim 10 otworem. W obszarach 4, 5 i we wszystkich otworach 8, 9, 10, 13, 14 znajdują się magnesy trwałe 11. Rozwiązanie to pozwala zwiększyć strumień wzbudzenia maszyny.

Przykład 9

Wirnik jak w przykładzie pierwszym, z tym, że wał 12 wirnika składa się z trzech części: środkowej 12a wykonanej z materiału o dużej przenikalności magnetycznej - stali konstrukcyjnej, i dwóch zewnętrznych 12b wykonanych z materiału o małej przenikalności magnetycznej – poliamidu, przy czym części 12a i 12b w miejscach ich łączenia mają kształt stożka o wierzchołku skierowanym do środka części 12a.