

Piotr Paplicki

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

WPŁYW KONSTRUKCJI WIRNIKA NA CHARAKTERYSTYKĘ ODWZBUDZANIA MASZyny ECPMSM

EFFECT OF ROTOR STRUCTURE ON FLUX WEAKENING CHARACTERISTICS OF ECPM SYNCHRONOUS MACHINE

Streszczenie: Artykuł przedstawia wpływ konstrukcji wirnika na napięcie indukowane w uzwojeniach twornika maszyny ECPMSM wzbudzonej hybrydowo. Na podstawie analizy polowej MES-3D pokazano wpływ zmiany materiału wirnika na rozkład pola i charakterystykę odwzbudzenia maszyny. Zaproponowano nowe rozwiązanie konstrukcyjne wirnika dla polepszenia zakresu odwzbudzenia maszyny.

Abstract: The paper presents an effect of rotor design on armature winding back-EMF of ECPMSM hybrid machine. On the basis of 3D-FEM analysis effects of different solid-rotor materials on the magnetic field distribution and a field-weakening characteristics of the machine are shown. A new rotor design for improving field-weakening range of the machine is proposed.

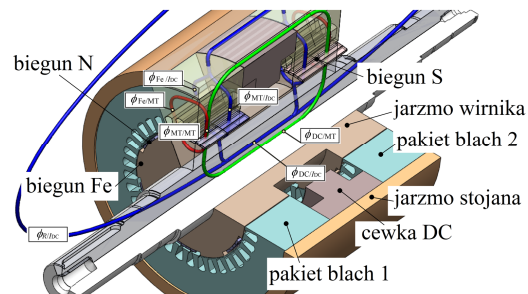
Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, magnes trwały, osłabianie pola, analiza polowa

Keywords: electrical machine, permanent magnet, field weakening, finite-element analysis

1. Wstęp

Od dwóch dekad obserwuje się wzrost zainteresowania maszynami elektrycznymi wzbudzonymi hybrydowo stosowanych m.in. w napędach trakcyjnych. Charakteryzują się one możliwością regulacji pola wzbudzenia pochodzącego od magnesów trwałych (MT), szczególnie w zakresie jego osłabiania. Jest to bardzo istotne z punktu widzenia możliwości pracy napędu przy stałej mocy w zakresie dużych prędkości obrotowych i przy ograniczonym napięciu zasilania. Poszukuje się zatem takich rozwiązań konstrukcyjnych maszyn, które spełnią wysokie wymagania, głównie w zakresie utrzymania stałej mocy, powyżej prędkości bazowej silnika, przy jak najmniejszej stracie energii. Mają one stanowić alternatywę dla napędów z silnikami indukcyjnymi, SRM czy bezszczotkowymi silnikami z magnesami trwałymi, w których, dla uzyskania efektu osłabienia pola magnetycznego maszyny, steruje się prądem stojana w osi podłużnej. W artykule przedstawiono wpływ zmiany materiału magnetycznego oraz koncepcję nowej struktury wirnika dla maszyny ECPMSM (ang. *Electric Controlled Permanent Magnet Synchronous Machine*) będącej przedmiotem wielu prac badawczych, których wyniki zamieszczono m.in. w publikacjach [1-5]. Cechą charakterystyczną proponowanej konstrukcji (nazwanej w artykule V1) było wykonanie części jarzma z masy proszkowej (Somaloy 500) w

połączeniu z żywicą epoksydową, która umożliwiła ukształtowanie, na każdej z dwóch części wirnika, po sześć biegunów żelaznych (biegun Fe) i pozostałą część jego magneto-wodu.



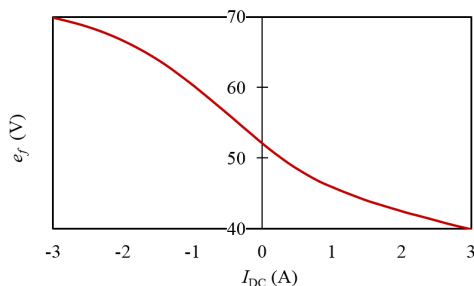
Rys. 1. Zarys konstrukcji maszyny ECPMSM

Pomiędzy biegunami żelaznymi umocowane zostały grupy neodymowych magnesów płaskich N38SH, które utworzyły, na jednej części wirnika, bieguny MT o jednej polaryzacji (biegun N). Druga część wirnika posiada bieguny (biegun S) o przeciwnej polaryzacji w stosunku do biegunów strony pierwszej.

Taka budowa umożliwia regulację wzbudzenia maszyny w zakresie $\pm 30\%$ prądem cewki DC $I_{DC} \pm 3A$ (3900 amperozwojów) (rys. 2) [6].

Wyniki potwierdziły prawidłowe działanie maszyny i możliwość jej skutecznego zastosowania np. jako generator synchroniczny o regulowanym wzbudzeniu. Niestety wyniki

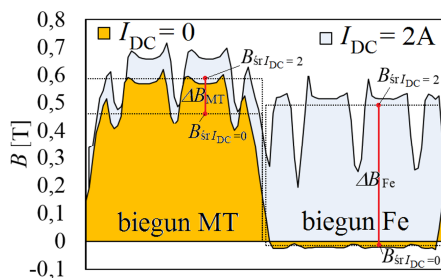
pokazały również, że w zakresie osłabiania pola regulacja może być niewystarczająca w kontekście zastosowania maszyny, wykonanej w tej technologii, w napędach samochodowych o wysokich wymaganiach. To skłoniło autora artykułu do zbadania wpływu zmiany materiału jarzma i bieguna Fe wykonanego wirnika oraz podjęcia prób ulepszenia konstrukcji maszyny ECPMSM w kierunku poprawy właściwości regulacyjnych.



Rys. 2. Napięcie (rms) fazowe indukowane na zaciskach maszyny ECPMSM (model V1) w funkcji prądu I_{DC} , przy prędkości 1000 obr/min

2. Analiza rozkładu pola magnetycznego

W stanie bezprądowym rozkład pola w maszynie jest uwarunkowany głównie kształtem i rodzajem magnetowodu oraz rozmieszczeniem źródeł sił magnetomotorycznych. Wartość i zwrot prądu cewki DC wpływa na stan nasycenia obwodu magnetycznego oraz na skierowanie wektora indukcji w rozkładzie pola i wielkość pola rozproszenia maszyny. Pomijając nasycenie oraz reakcję twornika i stosując zasadę superpozycji, wektor indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyny powstaje od pola MT oraz pola wzbudzanego prądem cewki DC.



Rys. 3. Rozkład składowej radialnej indukcji pola magnetycznego w szczelinie maszyny ECPMSM (model M1)

W procesie osłabiania pola prądem I_{DC} , który wytwarza strumień cewki DC (ϕ_{DC}), zachodzi zmiana strumienia nad biegunem MT (ϕ_{MT}) o wartość $\Delta\phi_{MT}$, wynikająca ze zmiany indukcji w szczelinie nad magnesem ΔB_{MT} (rys.3). Analogicznie, zmiana strumienia nad biegunem żelaznym (ϕ_{Fe}) o wartość $\Delta\phi_{Fe}$, wynikająca ze zmiany indukcji w szczelinie nad biegunem żelaznym ΔB_{Fe} . W uproszczonym modelu liniowym można zapisać zależności na strumienie maszyny dla jednej pary biegunów w postaci:

$$\phi_{MT} = \phi_{MT/MT} + \phi_{MT/DC} \quad (1)$$

$$\phi_{Fe} = -\phi_{Fe/MT} + \phi_{Fe/DC} \quad (2)$$

$$\phi_{DC/p} = \phi_{DC/MT} + \phi_{DC/DC} \quad (3)$$

$$\phi_{R/DC} = \phi_{DC/p} - \phi_{MT/DC} - \phi_{Fe/DC} \quad (4)$$

$$\phi_{DC/MT} = \phi_{MT/MT} + \phi_{Fe/MT} \quad (5)$$

gdzie:

$\phi_{MT/MT}$, $\phi_{MT/DC}$ – składowa strumienia nad magnesem (w tym wypadku biegunem N) od odpowiednio MT i prądu I_{DC} ,

$\phi_{Fe/MT}$, $\phi_{Fe/DC}$ – składowa strumienia nad biegunem Fe od odpowiednio MT i prądu I_{DC} ,

ϕ_{DC} – całkowity strumień cewki DC,

$\phi_{DC/MT}$, $\phi_{DC/DC}$ – składowa strumienia cewki DC od odpowiednio MT i prądu I_{DC} ,

$\phi_{R/DC}$ – składowa strumienia rozproszenia cewki DC od prądu I_{DC} ,

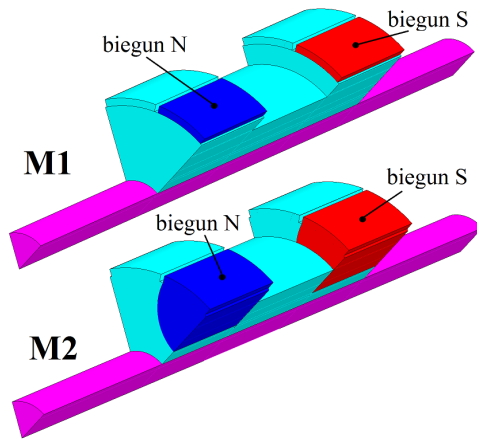
p – liczba par biegunów.

Istota zmniejszenia strumienia skojarzonego z pasmami stojana polega na skutecznym zrównaniu wartości strumieni ϕ_{MT} oraz ϕ_{Fe} . Zatem należy poszukiwać takiej struktury wirnika, w której pole od cewki DC skutecznie zwiększy $\Delta\phi_{Fe}$ przy jak najmniejszej zmianie $\Delta\phi_{MT}$.

Osiągnięcie tego celu może być zrealizowane na kilka sposobów. Jeden z nich polega na różnicowaniu reluktancji przyszczelinowej dla bieguna MT i bieguna Fe. W uproszczeniu, polega to na oddalaniu magnesów od powierzchni stojana zwiększając w ten sposób szczelinę powietrzną, co zostało zbadane [7,8] i zastosowane w prototypie V1. Inny, nowy sposób może polegać na budowie bieguna MT z wykorzystaniem magnesu o przekroju ćwierćwałka, który w koncepcji konstrukcyjnej całego wirnika pokazany został na modelu M2 (rys.4).

Należy zauważyć, że wirnik w takiej koncepcji wymaga zastosowania magnesów o znacznych wymiarach. Dodatkowo, mając na uwadze cenę magnesów wysokoenergetycznych, stan nasycenia obwodu magnetycznego oraz wymaganą regulację wzbudzenia maszyny, analizowane rozwiązanie konstrukcyjne zawierało magnesy ferrytowe. W celu sprawdzenia proponowanej koncepcji opracowano w programie Flux3D trójwymiarowy model połowy (M2), którego wyniki symulacyjne porównano z wynikami otrzymanymi na modelach M1 i M1_{SMC} oraz modelu eksperymentalnym V1.

Parametry materiałów tworzących obwód magnetyczny wirnika ECPMSM dla wszystkich modeli zestawiono w tabeli 1. Wszystkie modele posiadały wał stalowy.



Rys. 4. Wirniki maszyny ECPMSM

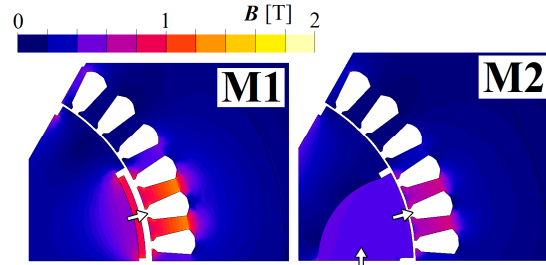
Tabela 1. Dane materiałów użytych na budowę wirnika

model	jarzmo wirnika biegun Fe	magnesy na biegunie MT
V1	proszek SMC+żywica	neodymowe N38SH, $B_r=1,2$ T
M1	blacha 3GZF	
M1 _{SMC}	Somaloy 500	
M2	blacha 3GZF	ferrytowe F30, $B_r=0,4$ T

3 Wyniki badań

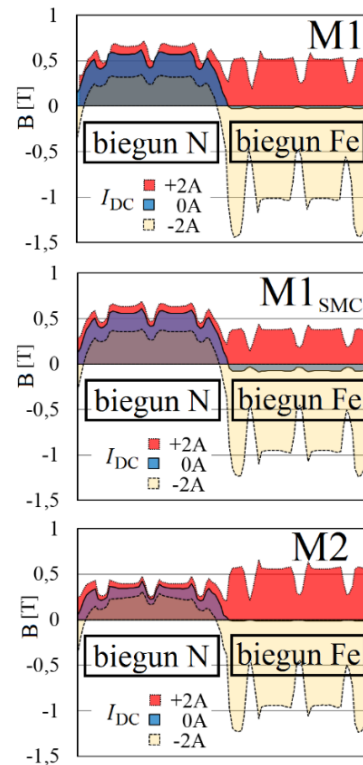
Analizie poddano rozkład pola magnetycznego w trzech modelach maszyny i jej otoczeniu. Na rysunku 5 przedstawiono rozkład indukcji na powierzchni modelu M1 i M2 (w widoku od strony bieguna N), natomiast na rysunku 6 przedstawiono rozkład składowej radialnej indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej

nad biegunem MT i biegunem Fe dla trzech przypadków obciążenia prądowego cewki DC.



Rys. 5. Rozkład pola w modelu M1, M2

Wyniki pokazały, że efekt osłabiania pola nad biegunem Fe w modelu M2, przy prądzie $I_{DC}=2A$, daje średnią wartość składowej radialnej indukcji magnetycznej nad biegunem Fe równą $B_{FeM2_{sr}}=0,5T$, która jest większa od wartości indukcji nad biegunem MT równej $B_{MTM2_{sr}}=0,38T$. Takiego efektu nie udaje się osiągnąć zarówno w modelu M1 jak i M1_{SMC} (rys.6). Ponadto należy zauważyć, że podczas dowzbudzenia bieguna Fe prądem $I_{DC}=-2A$ we wszystkich modelach zauważa się podobną zmianę indukcji nad biegunem Fe. Natomiast nad biegunem MT, największa zmiana widoczna jest w modelu M1 i jest to efekt niekorzystny.



Rys. 6. Rozkład składowej radialnej indukcji magnetycznej w szczelinie w modelu M1, M2 przy trzech wartościach prądu cewki DC

W tabeli 2 zestawiono wybrane średnie wartości indukcji w szczelinie oraz strumień magnetyczny wyznaczone nad biegunem MT i Fe oraz ich zmiany, w stanie bezprądowym $I_{DC}=0A$, a także przy osłabianiu pola bieguna Fe prądem $I_{DC}=2A$.

Na rysunku 7 porównano charakterystyki zmian napięcia (wartość skuteczna) indukowanego w uzwojeniach fazowych przy prędkości obrotowej wirnika 1000 obr/min w zależności od prądu cewki DC. Wyniki obliczeń pokazały, że wykonanie magnetowodu wirnika z materiału SMC we właściwej technologii (M1_{SMC}), przy odzwbudzeniu prądem $I_{DC}=2A$ obniży napięcie indukowane w stosunku $\Delta e = e_{I_{DC}=0} / e_{I_{DC}=2A} = 2,7$. Dla wirnika wykonanego z blachy prądnicowej (model M1) $\Delta e = 4,6$.

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że wirnik wykonany w nowej koncepcji (M2) posiada znakomite zdolności osłabiające strumień wzbudzenia maszyny, który może zostać osłabiony praktycznie do zera. Taka struktura wirnika pozwoliła więc na skuteczne barierowanie strumienia $\phi_{MT/DC}$ a w konsekwencji regulację strumienia $\phi_{Fe/DC}$ w szerokim zakresie i ponadto obniżyła strumień rozproszenia $\phi_{R/DC}$.

Tabela 2. Wyniki analizy polowej

	M1		M1 _{SMC}		M2	
I_{DC} (A)	0	2	0	2	0	2
B_{Fe} śr (T)	-0,02	0,46	-0,06	0,34	-0,01	0,5
B_{MT} śr (T)	0,49	0,59	0,48	0,56	0,3	0,38
ϕ_{Fe} (mWb)	-0,05	1,6	-0,21	1,2	-0,03	1,7
ϕ_{MT} (mWb)	1,6	2,0	1,6	1,9	0,98	1,2
$\Delta\phi_{Fe}$ (mWb)	1,6		1,4		1,7	
$\Delta\phi_{MT}$ (mWb)	0,4		0,3		0,2	
$\phi_{R/DC}$ (mWb)	-	1,9	-	1,7	-	1,3

Model M2 wykazuje również nietypową dla większości maszyn elektrycznych z MT własność związaną z możliwością osiągnięcia takiego stanu magnetycznego, przy którym następuje zwrot (w kierunku przeciwnym) wektora SEM powstającej w uzwojeniach maszyny

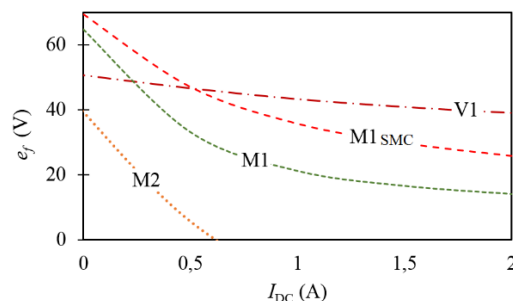


Fig. 7. Charakterystyki odzwbudzenia

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można zauważyć, że na zakres regulacji pola wzbudzenia maszyny ECPMSM prezentowanej konstrukcji, wpływa wiele czynników. Zasadniczą rolę odgrywa struktura obwodu magnetycznego wirnika i rodzaj materiału magnetycznego, z którego został obwód wykonany. Ponadto, duże znaczenie odgrywa rozkład pola magnetycznego w szczelinie, szczególnie nad biegunem MT. Wartości indukcji i jej rozkład w szczelinie oraz skuteczność barierowania strumienia $\phi_{MT/DC}$ będą wpływały na efektywność zrównania strumieni ϕ_{MT} oraz ϕ_{Fe} . Należy więc dążyć do opracowania takich struktur magnetycznych obwodu wirnika, dla których pole od cewki DC wpływa na pole w szczelinie wyłącznie nad biegunem Fe. Jest to również ważne w kontekście dowzbudzenia maszyny, ponieważ, jak zostało to pokazane na rysunkach 3 i 6, indukcja nad biegunem Fe, w stanie bezprądowym cewki DC, posiada małą wartość. Zatem, np. w celu poprawy dynamiki napędu przy niskich prędkościach obrotowych, podniesienia gęstości mocy maszyny w zakresie pracy przy stałym momencie lub pracy na wysoką sprawność [9], zasadne jest ciągle dowzbudzenie prądem I_{DC} .

5. Literatura

- [1] Bonisławski M., Pałka R., Paplicki P., Wardach M., *Analiza pracy maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi o regulowanym wzbudzeniu*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, 100/2013, s. 155-160
- [2] Putek P., Paplicki P., Pałka R., *Low cogging torque design of Permanent-Magnet machine using modified multi-level set method with total variation regularization*, IEEE Trans. Magn. vol. 50, no. 2, 2014, article no. 7016204, DOI: 10.1109/TMAG.2013.2286297

- [3] Putek P., Paplicki P., Pałka R., *Topology Optimization of rotor poles in a Permanent-Magnet machine using Level Set method and Continuum Design Sensitivity Analysis*, COMPEL, vol. 33, no. 3, 2014, <http://dx.doi.org/10.1108/COMPEL-09-2013-0286>
- [4] Di Barba P., Bonislawski M., Pałka R., Paplicki P., Wardach M., *Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles*, IEEE Trans. Magn., 2015, DOI:10.1109/TMAG.2015.2424392
- [5] Kupiec E., Przyborowski W., *Magnetic equivalent circuit model for unipolar hybrid excitation synchronous machine*, Archives of Electrical Engineering, vol. 64, no. 1, pp. 107–117, 2015, DOI: 10.1515/ae-2015-0010
- [6] Paplicki P., Wardach M., Bonisławski M., Pałka R., *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, DOI: 10.1515/ae-2015-0005
- [7] Paplicki P., *Maszyna ECPMSM-wybrane wyniki badań symulacyjnych i prac projektowych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, 103/2014, s. 109-114
- [8] Paplicki P., *Optimization of the electrically controlled permanent magnet excited synchronous machine to improve flux control range*, Elektronika ir electrotechnika, vol. 20, no. 10, pp. 17-22, 2014, <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.10.5934>
- [9] Paplicki P., Piotuch R., *Improved Control System of PM Machine with Extended Field Control Capability for EV Drive*, Mechatronics - Springer International Publishing, Ideas for Industrial Application, vol. 317. pp. 125-132, 2015, DOI:10.1007/978-3-319-10990-9_12

Autor

dr inż. Piotr Paplicki, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: piotr.paplicki@zut.edu.pl.