

Identyfikacja parametrów maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi metodą częstotliwościową

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę identyfikacji parametrów maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi w oparciu o pomiary charakterystyk częstotliwościowych w stanie postoju. Jako schemat zastępczy maszyny przyjęto modele Parka z obwodami tłumiącymi w wirniku kolejno do trzeciego rzędu. Identyfikację parametrów przeprowadzono przy użyciu metody najmniejszych kwadratów, porównując obliczone charakterystyki amplitudowo-fazowe z wynikami eksperymentu.

Abstract. In this paper an identification method of electromagnetic parameters of the permanent magnet synchronous machine (PMSM) has been described. The identification is based on standstill frequency response (SSFR) tests applied to the Park's two-axis PMSM model with multiple rotor damper circuits. Parameter identification by curve-fitting has been calculated solving the nonlinear least squares problem. (**Frequency-domain parameter identification of permanent magnet synchronous machine**).

Słowa kluczowe: maszyna synchroniczna z magnesami trwałymi, identyfikacja parametrów, metoda częstotliwościowa, SSFR.

Keywords: Permanent magnet synchronous machine, parameter identification, frequency method, SSFR.

Wstęp

Maszyny synchroniczne z magnesami trwałymi o wysokiej sprawności i niezawodności pracy są coraz szerzej wykorzystywane jako silniki i generatory w pojazdach samochodowych, w trakcji elektrycznej, w awionice. Różnorodność konstrukcji obwodów wzbudzenia magnesami trwałymi stwarza zapotrzebowanie na dynamiczne modele maszyn powiązane z parametrami projektowymi oraz metodami ich identyfikacji [4], [5].

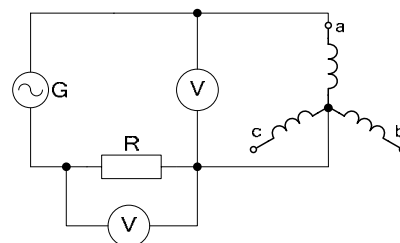
Identyfikację parametrów elektromagnetycznych można, w pewnym zakresie, przeprowadzić metodą odpowiedzi częstotliwościowych w stanie postoju (ang. standstill frequency response - SSFR) [3]. Obowiązujące dla takich testów normy odnoszą się do maszyn synchronicznych o wzbudzeniu obcym [1]. Przedmiotem niniejszej pracy jest przeprowadzenie systematycznych testów identyfikacji częstotliwościowej parametrów SSFR dla maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi. Na podstawie pomierzonych charakterystyk częstotliwościowych określono impedancje schematów zastępczych maszyny w osiach d i q przy uwzględnieniu obwodów tłumiących w wirniku do trzeciego rzędu. W identyfikacji parametrów wykorzystano algorytm najmniejszych kwadratów pomiędzy punktami pomiarowymi i estymowanymi amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej. Analiza rozkładu strumienia oraz składowej normalnej indukcji w szczelinie umożliwia interpretację wyników eksperymentalnych.

Układ pomiarowy

Badania przeprowadzono dla maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi o wydatnobiegunowej konstrukcji wirnika [2], [5]. Koncepcję maszyny opracowano i zbudowano na bazie seryjnie produkowanego silnika asynchronicznego klatkowego typu Sg100L-4A ($P_n=2,2$ kW; $U_n=3 \times 380$ V; $I_n=5,2$ A; $nn=1420$ obr/min; $f_n=50$ Hz). Nabiegunnik i jarzmo wirnika wykonane jest z litej stali. Wzbudzenie stanowią magnesy o dużej gęstości energii, typu BM 35 ($B_r=1,18-1,2$ T, $H_c=795-875$ kA/m, o gęstości energii $260 - 285$ kJ/m³).

Układ pomiarowy (rys.1) składa się z generatora funkcyjnego G typu HP33120A oraz oscyloskopu Tektronix TDS420, rejestrującego przebiegi napięcia w uzwojeniu fazy a stojana oraz prądu na bocznikowym rezystorze bezindukcyjnym R . Współrzędna oś pola magnetycznego wirnika d została zorientowana poprzez zasilanie fazy a napięciem stałym i samo-ustaleniem się położenia kąтового wirnika, który został w takiej pozycji zablokowany.

Oś q natomiast wyznaczono poprzez obrót wirnika o 90 stopni elektrycznych.

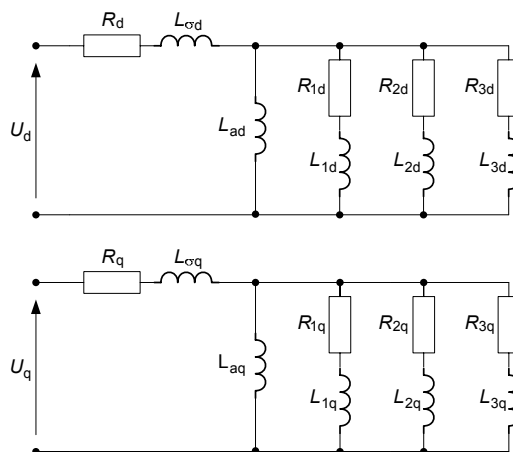


Rys.1. Schemat układu pomiarowego

Charakterystyki częstotliwościowe pomierzono przy zasilaniu określonej fazy a uzwojenia stojana napięciem sinusoidalnym. Poprzez regulację amplitudy napięcia, prąd utrzymywany był na poziomie 0,5% prądu znamionowego maszyny (~ 25 mA). Na podstawie zarejestrowanych przebiegów napięcia i prądu obliczono charakterystyki impedancji i przesunięcia fazowego w funkcji częstotliwości (dla zakresu od 0,1 Hz do 2 kHz).

Identyfikacja parametrów

Identyfikacja parametrów została przeprowadzona dla trzech różnych schematów zastępczych, rzędu 1, 2 oraz 3. Rysunek 2 przedstawia przykładowo schemat rzędu 3.



Rys.2. Schemat zastępczy maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi w stanie postoju

Na ich podstawie otrzymano następujące modele impedancji dla osi d (analogicznie dla osi q)

$$(1) \quad Z_d = R_d + j\omega L_{\sigma d} + \frac{j\omega L_{ad} \cdot Z_d'}{j\omega L_{ad} + Z_d'}$$

gdzie: Z_d' – impedancja zastępcza obwodów RL schematu drabinkowego.

Przykładowo dla rzędu 1 i 2

$$(2) \quad Z_d^1 = R_{1d} + j\omega L_{1d}$$

$$(3) \quad Z_d^2 = \frac{(R_{1d} + j\omega L_{1d})(R_{2d} + j\omega L_{2d})}{(R_{1d} + j\omega L_{1d}) + (R_{2d} + j\omega L_{2d})}$$

Do identyfikacji wektora parametrów $\underline{a}=[R_i, L_i, \dots]$ ze schematu zastępczego jak na rysunku 2. przyjęto metodę najmniejszych kwadratów. Funkcją celu $J(\underline{a})$ zdefiniowano jako sumę kwadratów odchyłek między wartościami impedancji uzyskanymi z pomiarów $Y_i(\omega)$, a wyliczonymi $Z_i(\underline{a}, \omega)$ na podstawie wzoru (1)

$$(4) \quad J(\underline{a}) = \min \sum_{i=1}^m [Z_i(\underline{a}, \omega) - Y_i(\omega)]^2$$

Do minimalizacji funkcji celu zastosowano dyrektywę *lsqnonlin* z przybornika Optimization Toolbox programu Matlab [6].

Wyniki

Po identyfikacji otrzymano następujące parametry maszyny w osiach d i q

Tabela 1. Parametry schematu zastępczego dla osi d

Parametr	Model 1	Model 2	Model 3
R_d [Ω]	2,960	2,96	2,96
$L_{\sigma d}$ [mH]	2,713	2,713	2,713
L_{ad} [mH]	13,682	13,682	15,277
R_{1d} [Ω]	225,95	451,910	163,53
L_{1d} [mH]	43,188	86,376	13,431
R_{2d} [Ω]	-	451,910	163,53
L_{2d} [mH]	-	86,376	13,431
R_{3d} [Ω]	-	-	471,87
L_{3d} [mH]	-	-	50,081

Tabela 2. Parametry schematu zastępczego dla osi q

Parametr	Model 1	Model 2	Model 3
R_q [Ω]	3,010	3,010	3,010
$L_{\sigma q}$ [mH]	2,713	2,713	2,713
L_{aq} [mH]	25,332	25,332	30,843
R_{1q} [Ω]	146,790	293,570	520,000
L_{1q} [mH]	25,327	50,653	54,396
R_{2q} [Ω]	-	293,570	520,000
L_{2q} [mH]	-	50,653	54,396
R_{3q} [Ω]	-	-	79,798
L_{3q} [mH]	-	-	60,813

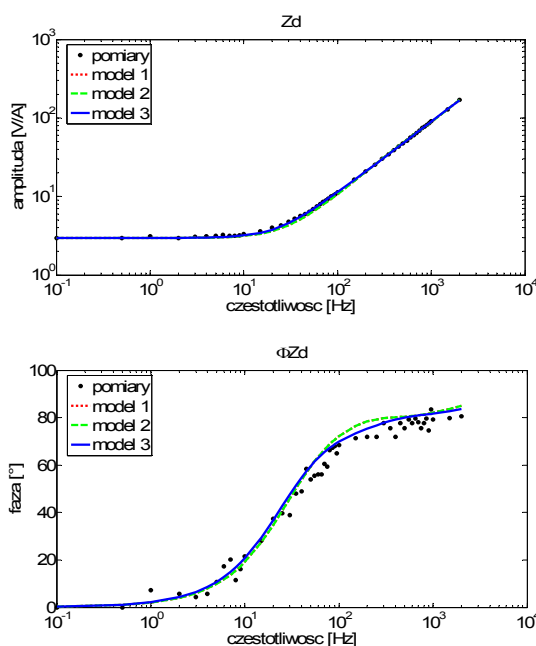
Parametry R_d oraz R_q nie są identyfikowane, gdyż ich wartości można z góry oszacować na podstawie zachowania układu dla zakresu niskich częstotliwości, dla których impedancja ma dominujący charakter rezystancyjny. Natomiast indukcyjności rozproszenia $L_{\sigma d}$ i $L_{\sigma q}$ zostały wyznaczone z obliczeń analitycznych. W procedurze identyfikacji, zakresy zmienności pozostałych parametrów RL nie zostały ograniczone.

Tabela 3. Sumaryczny błąd średniokwadratowy

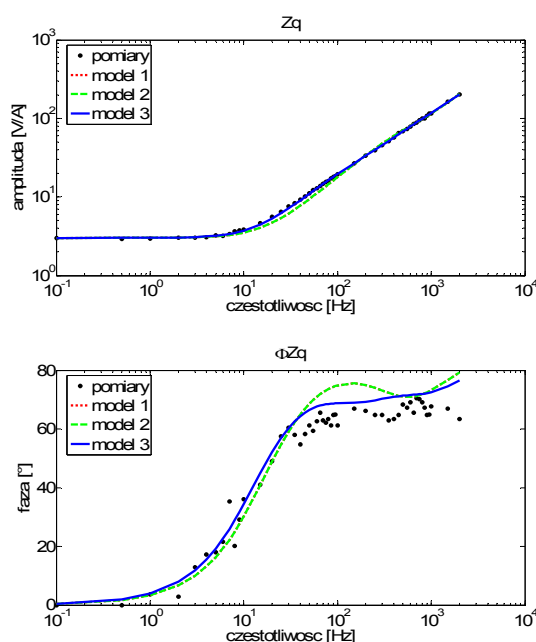
	Oś d		Oś q	
	Amplituda [V/A]	Faza [$^\circ$]	Amplituda [V/A]	Faza [$^\circ$]
Model 1	0,291	20,377	2,539	54,298
Model 2	0,291	20,377	2,539	54,298
Model 3	0,106	16,059	0,781	29,159

Tabela 3 zawiera całkowity zminimalizowany błąd średniokwadratowy funkcji celu (4) dla charakterystyki amplitudowej badanych modeli maszyny różniących się rzędem obwodów tłumiących w osiach d i q . Podobnie, wartości w kolumnie fazy pokazują miarę zgodności jej charakterystyki z pomiarami.

Otrzymane charakterystyki częstotliwościowe



Rys.3. Charakterystyka amplitudowa i fazowa w osi d

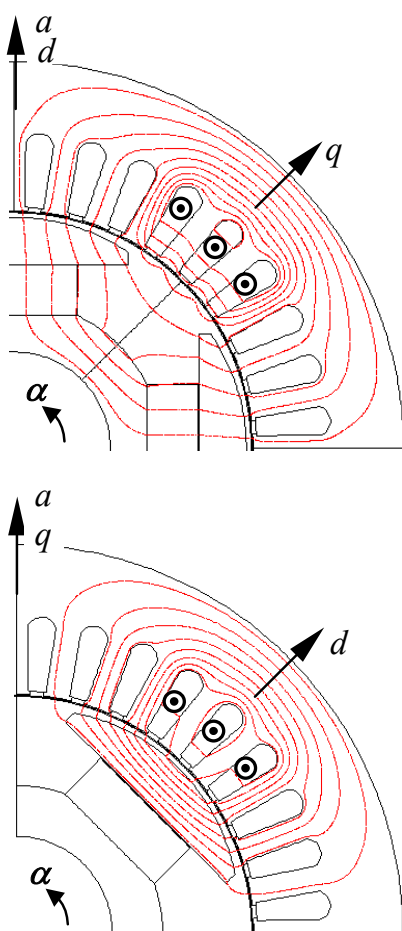


Rys.4. Charakterystyka amplitudowa i fazowa w osi q

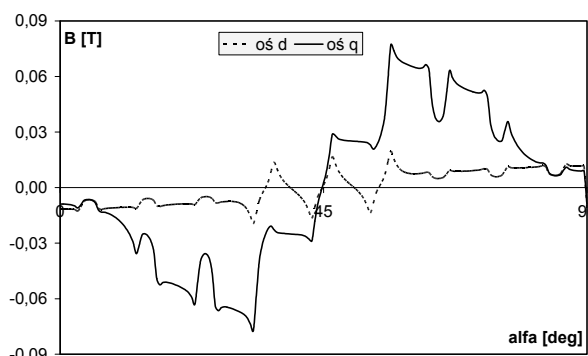
Interpretacja fizyczna

Wyznaczenie impedancji w osi q przy zastosowaniu modelu 3 (o trzech obwodach tłumiących) powoduje znaczne zmniejszenie błędu średniokwadratowego (tab.3). Wskazuje to na istnienie obwodów zwartych dla przepływu prądów wirowych w wirniku, które można zidentyfikować w obszarze nabiegownika, magnesów trwałych oraz litego jarzma wirnika (rys.5).

Zastosowanie modelu 3, w przypadku osi d , również prowadzi do poprawy dokładności identyfikacji parametrów jednak w mniejszym stopniu niż w osi q (tab. 3). Na drodze strumienia wzbudzonego przepływem twornika w osi d występuje znacznie większa szczelina powietrzna wynikająca z obecności magnesów trwałych. Strumień w osi d przebiega głównie po drogach rozproszenia (żłobek), a jego niewielka część zamyka się przez nabiegownik, magnesy i jarzmo wirnika. W osi d obserwuje się więc mniejszy wpływ obwodów wirowych niż w osi q .



Rys.5. Pole twornika, rozkład strumienia magnetycznego w osi d i q



Rys.6. Pole twornika, rozkład przestrzenny składowej normalnej indukcji w szczelinie w osi d i q

Stosowanie modelu 2 nie jest uzasadnione – prowadzi do powstania obwodu rezystancji połączonych równolegle (tab.1). Dokładność identyfikacji parametrów jest więc taka sama jak w przypadku stosowania modelu 1.

Pole twornika w osi q zamyka się przez nabiegownik. Szczelina wypadkowa w tym przypadku jest znacznie mniejsza, co przekłada się na większe wartości indukcji w szczelinie roboczej (rys.6).

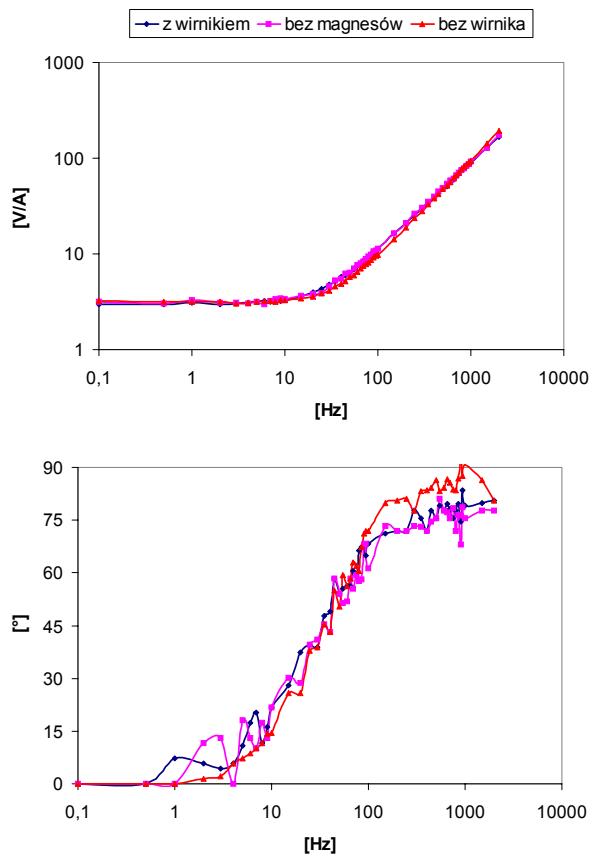
Wnioski

W wyniku identyfikacji badanej maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi o wydatnobiegunowej konstrukcji wirnika stwierdzono, że optymalne dopasowanie rzędu impedancji do pomierzonych częstotliwościowych charakterystyk amplitudowo-fazowych jest uzależnione od kierunku osi magnetycznej układu.

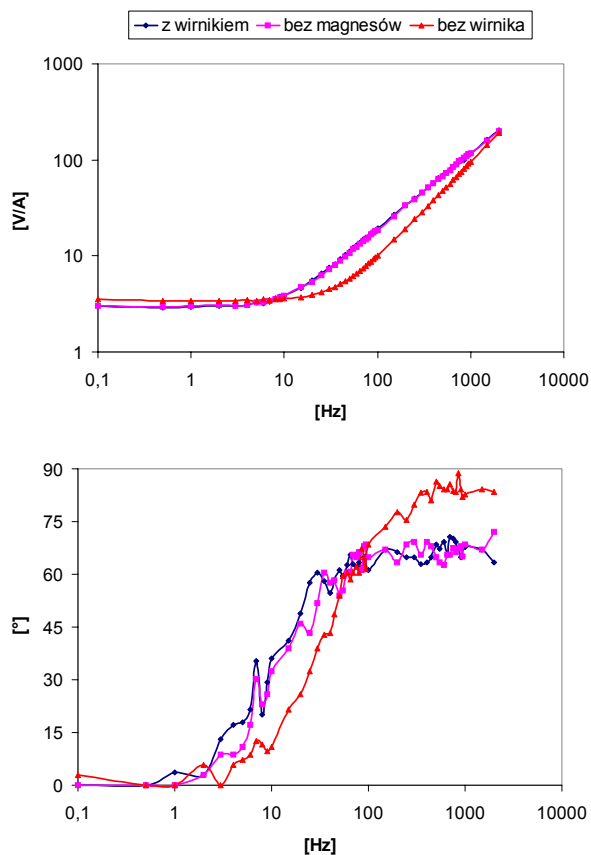
W osi d , z uwagi na znacznie większą wypadkową szczelinę powietrzną, schemat zastępczy impedancji może być odwzorowany bez obwodów tłumiących gdyż dokładność odwzorowania jest mimo wszystko większą niż w osi q z uwzględnieniem obwodów tłumiących (tab.3). Co więcej, w przypadku osi d charakterystyka częstotliwościowa pozostaje prawie niezmienna, nawet w przypadku usunięcia wirnika (rys.7).

Natomiast w kierunku osi magnetycznej q , najlepsze dopasowanie otrzymuje się przy zastosowaniu modelu 3 o maksymalnie uwzględnionych trzech obwodach tłumiących. Jak potwierdziły obliczenia rozkładu strumienia, linie pola koncentrują się wówczas w nabiegniku z litej stali, wskazując na istnienie w tym obszarze obwodów zwartych dla prądów wirowych. Również pomiary wykazały, że w osi q występuje wtedy znaczny przyrost impedancji w okolicach częstotliwości odcięcia (od ok. 10 Hz) niezależnie od obecności magnesów trwałych na wirniku (rys.7 i 8).

Wartości indukcyjności rozproszenia $L_{\sigma d}$ i $L_{\sigma q}$ uzyskuje się zazwyczaj od producenta maszyny, bądź wyznacza się je metodami analitycznymi, gdyż z przyjętego modelu częstotliwościowego impedancji (1) okazać się może niejednoznaczne wydzielenie składowej indukcyjności rozproszenia od indukcyjności magnesującej.



Rys.7. Pomiary amplitudy i fazy w osi d



Rys.8. Pomiary amplitudy i fazy w osi q

LITERATURA

- [1] IEEE Guide, Test procedures for synchronous machines, *IEEE Standards Board*, IEEE Std, 115-1995
- [2] Michna M., Ronkowski M., Wilk A., Dobrowolski P., Kostro G., Adaptacja silnika indukcyjnego do budowy maszyny synchronicznej z magnesami trwałymi, *39th Int Symp. on Electrical Machines*, SME'03 Gdańsk-Jurata Poland 2003, CDrom, 1-3
- [3] Cavagnino A., Lazzari M., Profumo F., Tenconi A., Axial flux interior PM synchronous motor: Parameters identification and steady-state performance measurement, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 36 no 6 Nov/Dec. 2000, 1581-1588
- [4] Weisgerber S., Proca A., Keyhani A., Estimation of permanent magnet motor parameters, *IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting, IAS'97 New Orleans USA 1997*, 29-34
- [5] Michna M. Wpływ struktury obwodów magnetycznych na wybrane parametry silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi, *Praca doktorska*, WEiA Politechnika Gdańska 2004
- [6] Boboń A., Kudła J. Wyznaczanie parametrów generatorów synchronicznych na podstawie przebiegów dynamicznych zmierzonych po wyłączeniu obciążenia, *41th Int Symp. on Electrical Machines*, SME'05 Jarnołtówek Poland 2005, CDrom, 519-524

Autorzy: mgr inż. Szymon Racewicz, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11, 80-952 Gdańsk, E-mail: s.racewicz@ely.pg.gda.pl
 dr Michał Michna, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11, 80-952 Gdańsk, E-mail: m.michna@ely.pg.gda.pl
 Delphine M. Riu, Institut National Polytechnique de Grenoble, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, UMR 5529 INPG/UJF, CNRS, ENSIEG, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, France, delphine.riu@leg.ensieg.inpg.fr
 dr hab. inż. Piotr J. Chrzan, prof. PG, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11, 80-952 Gdańsk, E-mail: pchrzan@ely.pg.gda.pl