

Sebastian SZKOLNY<sup>1</sup>

## **IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW SYNCHRONICZNYCH MASZYN WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI BAZUJĄCYCH NA METODZIE ODPOWIEDZI W DZIEDZINIE CZASU**

*Podstawową trudnością przy identyfikacji parametrów modelu matematycznego maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi jest niemożliwość regulacji pola wzbudzenia. W wyniku tego znane w literaturze metody wyznaczania parametrów, stosowane dla klasycznych maszyn synchronicznych, nie mogą być wykorzystane. W artykule przedstawiono propozycję nowej metodyki eksperymentalnego określania parametrów maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi.*

### **1 WSTĘP**

Przestrzenny charakter zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w maszyn wzbudzonych wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi sprawia, że parametry reaktancyjne modeli obwodowych nie mają stałego charakteru. Wartości tych parametrów zmieniają się w zależności od kąta położenia wirnika, a także od wartości prądu. Jednak wybór odpowiedniego modelu może wyeliminować część tych niekorzystnych zjawisk utrudniających opis matematyczny maszyn elektrycznych. W tej sytuacji najkorzystniejsze jest zastosowanie opisu wektorowego, który jest najbardziej uniwersalnym modelem matematycznym maszyny prądu przemiennego. Pozwala on na uproszczenie i usystematyzowanie postaci równań; wielkości wektorowe mają przy tym określony sens fizyczny, dzięki czemu można je mierzyć i odwzorowywać w konkretnych układach napędowych. Wektorowy zapis równań pozwala na analizę maszyny elektrycznej w dowolnym układzie współrzędnych związanych ze stojanem, wirnikiem lub wektorami napięć, strumieni skojarzonych czy prądów. Pozwala również, dzięki transformacji do wspólnego dla stojana i wirnika układu współrzędnych wirujących z dowolną prędkością, na wyeliminowanie reaktancji wzajemnej zależnej od kąta obrotu wirnika.

### **2 MODEL MATEMATYCZNY**

Przy identyfikacji parametrów silnika synchronicznego z magnesami trwałymi wybrano model matematyczny silnika w jednostkach względnych [1, 2, 3]:

---

<sup>1</sup> Politechnika Szczecińska Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, 091 449 41 29, sebastian.szkolny@ps.pl

$$\frac{d\psi_{sd}}{d\tau} = u_{sd} + \omega \cdot \psi_{sd} - r_s \cdot i_{sd} \quad \frac{d\psi_{sq}}{d\tau} = u_{sq} - \omega \cdot (\psi_{sd} + \psi_o) - r_s \cdot i_{sq} \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_{ed}}{d\tau} = -r_{ed} \cdot i_{ed} \quad \frac{d\psi_{eq}}{d\tau} = -r_{eq} \cdot i_{eq} \quad (2)$$

$$m_e = (\psi_{sd} - \psi_o) \cdot i_{sq} - \psi_{sq} \cdot i_{sd} \quad (3)$$

$$\frac{d\omega}{d\tau} = H_j^{-1} \cdot (m_e - m_T) \quad (4)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= i_{sd} \cdot x_{sd} + \psi_o + i_{ed} \cdot x_{ad} & \psi_{ed} &= i_{ed} \cdot x_{ed} + \psi_o + i_{sd} \cdot x_{ad} \\ \psi_{sq} &= i_{sq} \cdot x_{sq} + i_{eq} \cdot x_{aq} & \psi_{eq} &= i_{eq} \cdot x_{eq} + i_{sq} \cdot x_{aq} \end{aligned}$$

### 3 IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW NA PODSTAWIE BADANIA ODPOWIEDZI W DZIEDZINIE CZASU

Podstawą wyznaczenia parametrów modelu matematycznego proponowaną metodą są równania modelu matematycznego (1) i (2) oraz krzywa zaniku prądu podczas zwarcia uzwojeń stojana dla położenia wirnika względem osi  $d$  oraz  $q$ . Podobnie jak w metodach przedstawionych w [3, 4] konieczne jest przyjęcie założenia  $\omega_m = 0$  co jest konsekwencją przeprowadzania badań przy nieruchomym wirniku. Wykorzystując koncepcję przedstawioną w pracy [5] dla nieskończonej liczby obwodów tłumiących oraz uwzględniając przyjęte założenia, przy rozważaniu pojedynczego zastępczego obwodu tłumiącego można zapisać zależności określające admitancję w osi  $d$  w jednostkach względnych:

$$y_{sd}(p) = \frac{p(x_{\sigma ed} + x_{ad}) + r_{ed}}{p^2(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed}) + p[r_{ed} x_{sd} + r_s(x_{\sigma ed} + x_{ad})] + r_s r_{ed}} \quad (5)$$

Wykorzystując wzór Heaviside'a można przekształcić admitancji (5) na funkcje w dziedzinie czasu. W przypadku przeprowadzania badania wykorzystującego odpowiedź układu na skok napięcia, zależności (5) przyjmują następującą postać czasową:

$$y_{sd}(\tau) = I_{d1} + I_{d2} - I_{d1} e^{-\alpha_{d1} \tau} - I_{d2} e^{-\alpha_{d2} \tau} \quad (6)$$

gdzie:

$$I_{d1,2} = \frac{\pm r_{ed} \mp (x_{\sigma ed} + x_{ad}) [r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}}{2(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})} + \frac{2 \sqrt{\frac{[r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}^2}{4(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})^2} - \frac{r_s r_{ed}}{x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed}}}}{2 \sqrt{\frac{[r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}^2}{4(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})^2} - \frac{r_s r_{ed}}{x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed}}}} + \frac{\sqrt{\frac{(x_{\sigma ed} + x_{ad})^2 [r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}^2}{4(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})^2} - \frac{(x_{\sigma ed} + x_{ad})^2 \cdot r_s r_{ed}}{x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed}}}}{2 \sqrt{\frac{[r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}^2}{4(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})^2} - \frac{r_s r_{ed}}{x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed}}}} \quad (7)$$

$$\alpha_{d1,2} = -\frac{r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})}{2(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})} \pm \sqrt{\frac{[r_{ed} x_{sd} + r_s (x_{\sigma ed} + x_{ad})] \hat{g}^2}{4(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})^2} - \frac{r_s r_{ed}}{(x_{\sigma} x_{ad} + x_{sd} x_{\sigma ed})}} \quad (8)$$

Przedstawione powyżej zależność można wykorzystać do wyznaczenia parametrów obwodów tłumiących na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądów.

Zarejestrowane podczas badania przebiegi aproksymujemy zależnościami (6). W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymujemy współczynniki  $\alpha_{d1}$ ,  $\alpha_{d2}$ ,  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  dla osi  $d$ . Wartości otrzymanych współczynników uzależnione są od parametrów modelu matematycznego maszyny wzbudzonej wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi (7)-(8). Te cztery współczynniki  $\alpha_{d1}$ ,  $\alpha_{d2}$ ,  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  dla osi  $d$  uzależnione są od sześciu parametrów modelu matematycznego  $r_s$ ,  $x_{sd}$ ,  $x_{ad}$ ,  $x_{\sigma}$ ,  $x_{\sigma ed}$ ,  $r_{ed}$ . Wyznaczenie sześciu niewiadomych na podstawie czterech równań jest niemożliwe. W celu rozwiązania zagadnienia należy wyznaczyć wartości przynajmniej dwóch parametrów innymi metodami.

Określanie tych parametrów na podstawie zależności (7)-(8) może okazać się bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do przeprowadzenia ze względu na dość skomplikowaną postać zależności. W sytuacji, gdy nie wymagana jest znajomość wartości poszczególnych parametrów można na podstawie zarejestrowanych przebiegów prądów wyznaczyć zależność opisujące reaktancje synchroniczne wraz z parametrami obwodów tłumiących w postaci transmitancji jak zostało to zaproponowane w pracy [5] dla nieskończonej ilości obwodów tłumiących.

Podstawą wyznaczenia tej transmitancji jest równanie (6) w przypadku rozpatrywania zwarcia. Równanie w postaci czasowej należy przekształcić do postaci operatorowej wykorzystując transformację Laplace'a. W wyniku tej operacji otrzymujemy:

$$y_{sd}(p) = I_{d1} + I_{d2} - \frac{I_{d1} \cdot p}{p + \alpha_{d1}} - \frac{I_{d2} \cdot p}{p + \alpha_{d2}} \quad (9)$$

Przekształcając równania (9) a następnie odejmując rezystancję  $r_s$  otrzymuje się reaktancji:

$$px_{sd}(p) = \frac{p^2 + [\alpha_{d1}(1 - r_s I_{d2}) + \alpha_{d2}(1 - r_s I_{d1})] \hat{g} \cdot p + \alpha_{d1} \cdot \alpha_{d2} [1 - r_s (I_{d1} + I_{d2})] \hat{g}}{(I_{d1} \alpha_{d2} + I_{d2} \alpha_{d1}) \cdot p + \alpha_{d1} \cdot \alpha_{d2} \cdot (I_{d1} + I_{d2})} \quad (10)$$

Otrzymane zależności (10) uwzględniają sytuację, gdy rozpatrywany jest model matematyczny z uwzględnieniem pojedynczego zastępczego obwodu tłumiącego. Gdy

konieczne jest rozpatrzenie większej liczby obwodów tłumiących zależności te znacznie się komplikują. W wielu przypadkach poszukiwanie większej ilości parametrów obwodów tłumiących może okazać się zbędne ze względu na niewielki ich wpływ na wyniki obliczeń. Z tego powodu autor ograniczył się do wyznaczenia zależności uwzględniających pojedynczy zastępczy obwód tłumiący. Przedstawione w pracy zależności obowiązują również przy wyznaczeniu parametrów w osi  $q$ , w tym przypadku do analizy należy wykorzystać krzywa zaniku prądu podczas zwarcia uzwojeń stojana dla położenia wirnika względem osi  $q$ .

#### 4 WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy zaproponowano metodę identyfikacji parametrów obwodów tłumiących wykorzystując do tego metodę polegającą na analizie prądów przy niesymetrycznym dwufazowym zasilaniu uzwojeń, poprzedzonym pozycjonowaniem wirnika względem osi  $d$  oraz  $q$ . Opracowane zostały zależności analityczne niezbędne do przeprowadzenia identyfikacji parametrów zastępczego obwodu tłumiącego, otrzymując równania z sześcioma niewiadomymi parametrami, dla których określenia wykorzystana jest krzywa zaniku prądu podczas zwarcia uzwojeń stojana.

#### 5 LITERATURA

1. Szkolny S.: *Metody określania parametrów silników synchronicznych wzbudanych magnesami trwałymi.*, IV Ogólnopolskie Warsztaty Doktoranckie, OWD'02, Istebna-Zaolzie 19-23 października 2002r., pp. 313-318.
2. Szkolny S.: *Identyfikacja parametrów silnika tarczowego wzbudzanego wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi.* XLI International Symposium on Electrical Machines SME'2005, 14 - 17 June, Jarnołtówek, Poland, pp. 390÷397
3. Szkolny S.: *Identyfikacja parametrów, modelowanie i analiza stanów pracy silnika tarczowego wzbudzanego wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi.* Rozprawa doktorska, Szczecin 2007.
4. Cavagnino A., Lazzari M., Profumo F., Tenconi A.: *Axial Flux Interior PM Synchronous Motor: Parameters Identification and Steady-State Performance Measurements.* IEEE Trans. on Indu. Appli., vol. 36, no. 6, Nov/Dec 2000, pp. 1581-1588
5. Сидельников Б.В. *Операторные параметры вентиляного двигателя с магнитноэлектрическим возбуждением.* Vestnik. Nacionalnogo tehničeskogo universiteta "Charkovskij politehničeskij institut". Problemy avtomati-zirovannogo elektropivoda, teorija i praktika. Charkov 2003. Vypusk 10, tom 1, s. 406÷408

## **PARAMETERS IDENTIFICATION OF PERMANENT MAGNETS SYNCHRONOUS MACHINES BASED ON TIME RESPONSE METHOD**

The major problem arisen at parameter identification of mathematical models of permanent magnet synchronous machines (PMSM) is an impossibility to change field excitation and as a result to apply well known methods used for classical synchronous machines. The paper describes a new methodological approach for experimental parameter identification based on time response method.