

DAUGIAFAZIŲ VARIKLIŲ NAUDOJIMO SRITYS IR PERSPEKTYVOS

Benas Kundrotas

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas
El. paštas benas.kundrotas@vgtu.lt*

Santrauka. Nagrinėjamos daugiafazių variklių naudojimo sritys, pabrėžiami pagrindiniai jų privalumai lyginant su trifazių varikliais. Nurodomos daugiafazių variklių teigiamos savybės, lemiančios jų naudojimą šiuolaikinėse elektros pavarose. Nagrinėjamas šešiafazis asinchroninis variklis. Jo statoriuje yra dvi vienodos trifazės apvijos, kurių magnetinės ašys skiriasi 30 erdvinių laipsnių kampu, o rotoriuje yra trifazė apvija. Pateikiamos tokio variklio dinamikos lygtys, transformuotos į dq sinchroniškai besisukančią koordinačių sistemą. Transformuotos lygtys užrašomos matricos pavidalu ir sprendžiamos MATLAB programiniu paketu taikant Dormand-Prince (ode45) metodą. Gautos ir iširtos šešiafazio asinchroninio variklio greičio, momento ir srovių dinaminės charakteristikos.

Reikšminiai žodžiai: daugiafaziai varikliai, modelis, dinaminės charakteristikos.

Įvadas

Daugiafazės reguliuojamo greičio pavaros pradėtos tirti 1960 m., kai kintamosios srovės pavaros buvo maitinamos naudojant žemojo dažnio inverterius (Levi 2008). Pastebėta, kad žemasis dažnis sukelia dideles momento pulsacijas, todėl ir prieita prie išvados, kad norint išspręsti šią problemą geriausia yra didinti mašinos fazių skaičių. Tolesnę daugiafazių pavarų plėtrą lėmė ir kiti jų privalumai: atsparumas gedimams ir didesnis daugiafazių variklių momentas, lyginant su trifazių varikliais, esant mažesnei fazinei srovei. Pastarasis privalumas ir šiuo metu iš esmės lemia daugiafazių variklių naudojimą pramonėje.

Nuolatinės srovės daugiafazių (žingsninių) variklių plėtrą paskatino skaičiavimo mašinų atsiradimas. Pradėjus naudoti daugiafazių variklius skaičiavimo įrenginiuose buvo pasiektas didesnis įrenginių valdymo tikslumas.

Vis dažniau naudojant daugiafazių variklius pavarose pastebėta ir daugiau jų privalumų. 1990 m. ypač suaktyvėjo daugiafazių variklių tyrimas pradėjus juos naudoti laivuose. Tyrimais nustatyta, kad daugiafazių variklių yra mažesni statoriaus nuostoliai, mažesnės rotoriaus srovių harmonikos, mažesnės momento pulsacijos, daugiafazis variklis gali dirbti dingus statoriaus fazei (Gregor *et al.* 2008). Pastebėti privalumai paskatino juos naudoti ne tik laivuose, bet ir elektrinėse (1 pav.), hibridinėse elektrinėse transporto priemonėse, orlaivių koncepciniuose modeliuose, lokomotyvuose, vandens aparatuose, erdvėlaiviuose ir didelės galios įrenginiuose (Miranda *et al.* 2009; Rata *et al.* 2007).



1 pav. Troleibusas, varomas daugiafazio asinchroninio variklio pavara

Fig. 1. A trolleybus driven by the multiphase induction motor

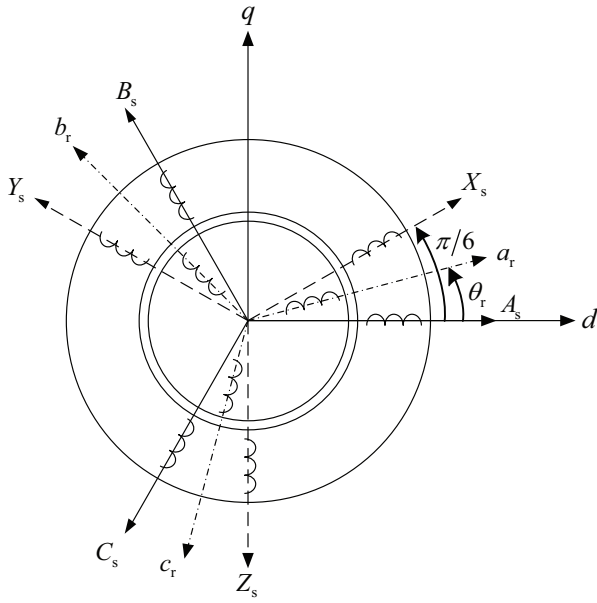
Šešiafazio asinchroninio variklio dinaminis modelis

Akivaizdu, kad šešių fazių asinchroninis variklis statoriuje turi šešias fazines apvijas. Rotoriuje kai kurie tyrėjai naudoja tris apvijas (Munoz-Garcia, Lipo 1998; Singh *et al.* 2005; Ojo, Davidson 1999), kiti – šešias (Bojoi *et al.* 2003).

Šiame darbe modeliuojamas variklis, kuris statoriuje turi šešias fazines apvijas, o rotoriuje – tris (2 pav.).

Šešiafazio asinchroninio variklio modeliui sudaryti daromos prielaidos:

- oro tarpas yra pastovus,
- neatsižvelgiama į magnetinį įsotinimą,
- neatsižvelgiama į šerdies nuostolius,
- įtampos ir srovės kinta sinuso dėsnium.



2 pav. Šešiafazio asinchroninio variklio statoriaus ir rotoriaus apvijos

Fig. 2. Stator and rotor windings of the six-phase induction motor

Šešiafazio ir trijų fazių asinchroninių variklių analizei ir valdymui atliekama dq transformacija. Šešiafazis variklis modeliuojamas naudojant sinchroniškai besisukančioje koordinatinių sistemoje užrašytas tokių įtampų lygtis:

$$\begin{aligned}
 u_{qs1} &= r_s i_{qs1} + s \Psi_{qs1} + \omega \Psi_{ds1}, \\
 u_{ds1} &= r_s i_{ds1} + s \Psi_{ds1} - \omega \Psi_{qs1}, \\
 u_{qs2} &= r_s i_{qs2} + s \Psi_{qs2} + \omega \Psi_{ds2}, \\
 u_{ds2} &= r_s i_{ds2} + s \Psi_{ds2} - \omega \Psi_{qs2}, \\
 u'_{qr} &= r'_r i'_{qr} + s \Psi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \Psi'_{dr}, \\
 u'_{dr} &= r'_r i'_{dr} + s \Psi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \Psi'_{qr},
 \end{aligned} \quad (1)$$

čia Ψ_{qs1} , Ψ_{qs2} – statoriaus susietųjų srautų projekcijos į q ašį; Ψ_{ds1} , Ψ_{ds2} – statoriaus susietųjų srautų projekcijos į d ašį; Ψ'_{qr} , Ψ'_{dr} – rotoriaus susietųjų srautų projekcijos į q ir d ašis; i_{qs1} , i_{qs2} – statoriaus srovių projekcijos į q ašį; i_{ds1} , i_{ds2} – statoriaus srovių projekcijos į d ašį; i'_{qr} , i'_{dr} – rotoriaus srovių projekcijos į q ir d ašis; s – Laplaso operatorius, ω – vienos polių poros sinchroninis variklio greitis, lygus sukamojo magnetinio lauko greičiui; r_s – statoriaus varža; u_{ds1} , u_{ds2} , u_{qs1} , u_{qs2} ir u'_{dr} , u'_{qr} – statoriaus ir rotoriaus apvijų įtampas; ω_r – rotoriaus greitis.

Susietųjų srautų išraiškos pateiktos (Kundrotas *et al.* 2011). Elektromagnetiniam momentui apskaičiuoti taikoma tokia išraiška:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{L_m}{L'_r} \right) \left[\Psi'_{dr} (i_{qs1} + i_{qs2}) - \Psi'_{qr} (i_{ds1} + i_{ds2}) \right], \quad (2)$$

čia L_m – oro tarpo induktyvumas; L'_r – savasis rotoriaus apvijų induktyvumas; P – polių porų skaičius.

Pavaros judesio lygtis:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J_r} (T_e - T_L), \quad (3)$$

čia T_L – apkrovos momentas; J_r – pavaros inercijos momentas.

(1)–(3) lygtys užrašomos matricine forma (4):

$$A \cdot x = F, \quad (4)$$

čia matrica A:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 & a_{26} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & 0 & 0 & a_{35} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 & a_{46} & 0 \\ a_{51} & a_{52} & 0 & 0 & a_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{63} & a_{64} & 0 & a_{66} & 0 \\ 0 & 0 & a_{73} & a_{74} & 0 & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

jos nariai:

$$a_{11} = a_{23} = a_{32} = a_{44} = L_{ls} + L_{lm} + L_m,$$

$$a_{12} = a_{24} = a_{31} = a_{43} = L_{lm} + L_m,$$

$$a_{15} = a_{26} = a_{35} = a_{46} = a_{51} = a_{52} = a_{63} = a_{73} = a_{74} = L_m,$$

$$a_{55} = a_{66} = a_{76} = L'_r + L_m, \quad a_{77} = J_r.$$

Matrica F užrašoma:

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \\ F_7 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

čia

$$F_1 = u_{qs1} - i_{qs1} r_s - \omega \cdot i_{ds1} (L_{ls} + L_{lm} + L_m) - \omega \cdot i_{ds2} (L_{lm} + L_m) - \omega \cdot i'_{dr} L_m,$$

$$F_2 = u_{ds1} - i_{ds1} r_s + \omega \cdot i_{qs1} (L_{ls} + L_{lm} + L_m) + \omega \cdot i_{qs2} (L_{lm} + L_m) + \omega \cdot i'_{qr} L_m,$$

$$F_3 = u_{qs2} - i_{qs2} r_s - \omega \cdot i_{ds2} (L_{ls} + L_{lm} + L_m) - \omega \cdot i_{ds1} (L_{lm} + L_m) - \omega \cdot i'_{dr} L_m,$$

$$F_4 = u_{ds2} - i_{ds2} r_s + \omega \cdot i_{qs2} (L_{ls} + L_{lm} + L_m) + \omega \cdot i_{qs1} (L_{lm} + L_m) + \omega \cdot i'_{qr} L_m,$$

$$F_5 = u_{qr} - i'_{qr} r'_r - (\omega - \omega_r) \cdot i_{ds1} L_m - (\omega - \omega_r) \cdot i_{ds2} L_m - (\omega - \omega_r) \cdot i_{ds1} L_m - (\omega - \omega_r) \cdot i'_{dr} (L'_r + L_m),$$

$$F_6 = u_{dr} - i_{dr}' + (\omega - \omega_r) \cdot i_{qs1} L_m + (\omega - \omega_r) \cdot i_{qs2} L_m + (\omega - \omega_r) \cdot i_{ds1} L_m + (\omega - \omega_r) \cdot i_{qr}' (L_{lr}' + L_m),$$

$$F_7 = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_{lr}} (\psi_{dr}' (i_{qs1} + i_{qs2}) - \psi_{qr}' (i_{ds1} + i_{ds2})).$$

Kintamųjų matrica užrašoma:

$$x = \begin{bmatrix} \frac{di_{qs1}}{dt} \\ \frac{di_{ds1}}{dt} \\ \frac{di_{qs2}}{dt} \\ \frac{di_{ds2}}{dt} \\ \frac{di_{qr}'}{dt} \\ \frac{di_{dr}'}{dt} \\ \frac{d\omega_r}{dt} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Pagal (4) išraišką sudaromas MATLAB modelis. Lygtys sprendžiamos Dormand-Prince metodu (ode45).

Modeliavimo rezultatai

Modeliuojamo asinchroninio variklio parametrai pateikti lentelėje.

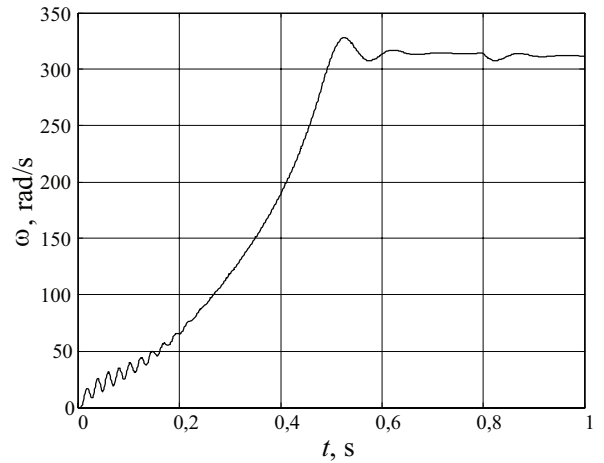
Lentelė. Asinchroninio variklio parametrai

Table. Parameters of the induction motor

$R_s,$ Ω	$R_r',$ Ω	$L_{ls},$ mH	$L_{lr}',$ mH	$L_m,$ H	$L_{lm},$ H	$U,$ V	$\omega_s,$ rad/s	$J_r,$ kg·m ²	P
3,55	1,04	5,2	9,3	0,3	0,035	220	314	0,07	1

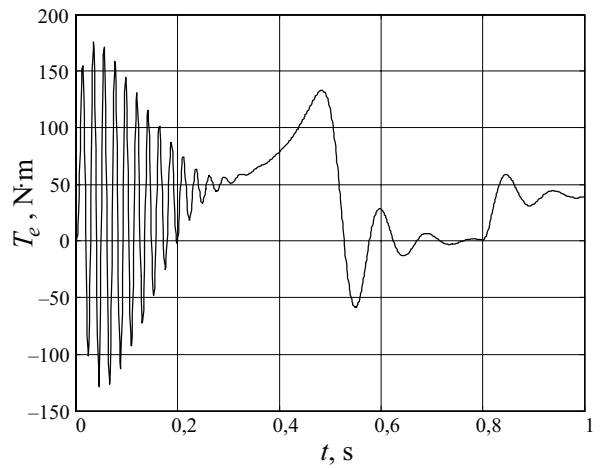
3 pav. pateikta šešiafazio asinchroninio variklio greičio laikinė charakteristika, o 4 pav. – šešiafazio asinchroninio variklio momento laikinė charakteristika. Greičio pereinamasis vyksmas trunka 0,49 s. Apkrauto variklio laiko momentu $t = 0,8$ s greitis sumažėja 0,8 %.

5–7 pav. pateikiami statoriaus A , B ir C fazių srovių pereinamieji vyksmai esant 40 N·m apkrovai. Fazinės srovės dėl apkrovos padidėja 17 %.



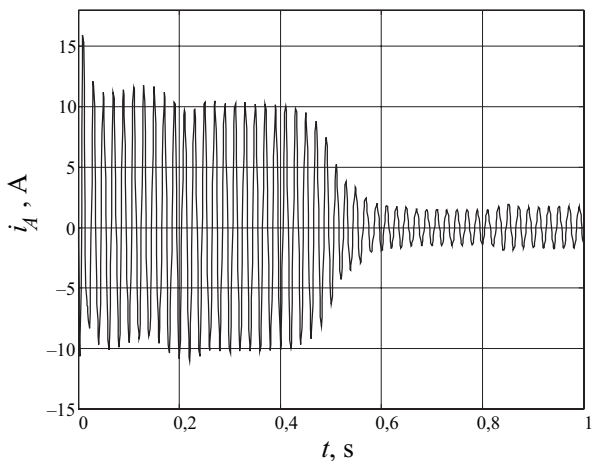
3 pav. Šešiafazio asinchroninio variklio greičio laikinė charakteristika

Fig. 3. Speed response of the six – phase induction motor



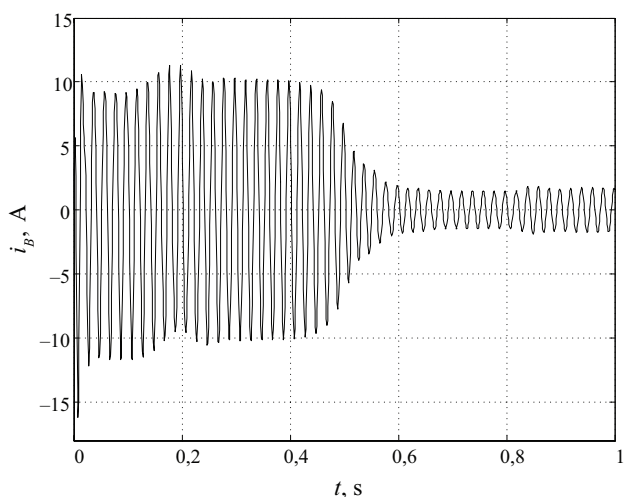
4 pav. Šešiafazio asinchroninio variklio momento laikinė charakteristika

Fig. 4. Torque response of the six – phase induction motor



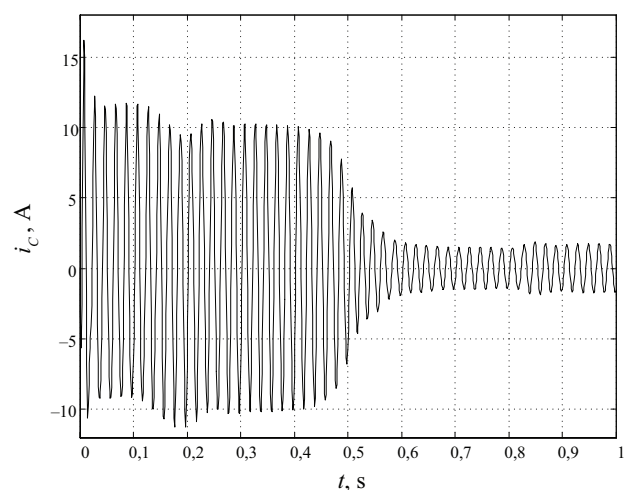
5 pav. Statoriaus A fazės srovės pereinamasis vyksmas esant 40 N·m apkrovai

Fig. 5. A phase transient current in the stator at 40 N·m load torque



6 pav. Statoriaus B fazės srovės pereinamasis vyksmas esant 40 N·m apkrovai

Fig. 6. B phase transient current in the stator at 40 N·m load torque



7 pav. Statoriaus C fazės srovės pereinamasis vyksmas esant 40 N·m apkrovai

Fig. 7. C phase transient current in the stator at 40 N·m load torque

Išvados

1. Išnagrinėtos daugiafazių variklių naudojimo sritys ir privalumai, leidžiantys juos naudoti elektros pavarose.
2. Sudarytas šešifazio asinchronio variklio matematinis ir kompiuterinis modeliai, leidžiantys tirti jo dinamines charakteristikas.
3. Gautos paleidimo momento, greičio ir srovės pereinamųjų vyksmų charakteristikos.
4. Greičio pereinamasis vyksmas trunka 0,49 s. Apkrauto variklio laiko momentu $t = 0,8$ s greitis sumažėja 0,8 %.
5. Apkrovus variklį 40 N·m statine apkrova srovė padidėja 17 %.

Literatūra

- Bojoi, R.; Lazzari, M.; Profumo, F.; Tenconi, A. 2003. Digital field – oriented control for dual three-phase induction motor drives, *Journal of Industry Applications* 39(3): 752–760. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2003.811790>
- Gregor, R.; Barrero, F.; Duran, M. J.; Arahal, M. R.; Toral, S. 2008. *Model Based Predictive Current Control of an Asynchronous Six – Phase Motor Drive* [cited 15 April 2011]. Available from Internet: <http://www.icrepq.com/icrepq-08/230-gregor.pdf>
- Kundrotas, B.; Lisauskas, S.; Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. 2011. Investigation in to six – phase induction drive dynamic characteristics, in *the 6th International Conference on “Electrical and Control Technologies ECT-2011”, Kaunas, Lithuania, 2011*. Kaunas: Technologija, 218–221.
- Levi, E. 2008. Multiphase electric machines for variable – speed applications, *Journal of Industrial Electronics* 55(5): 1893–1909. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.918488>
- Miranda, R. S.; Jacobina, C. B.; Lima, A. M. N. 2009. Modeling and analysis of six-phase induction machine under fault condition, *Journal of Power Electronics* 9(1): 824–829.
- Munoz-Garcia, A.; Lipo, T. A. 1998. Dual stator winding induction machine drive, *Journal of Industry Applications* 33(1): 601–608.
- Rata, I.; Todos, P.; Nuca, I. 2007. A review of multiphase electric machines, *Journal of Electromechanical and Power Systems* 6(1): 154–159.
- Ojo, O.; Davidson, I. E. 1999. PWM-VSI inverter assisted stand – alone dual stator winding induction generator, *Journal of Industry Applications* 34(3): 1573–1580.
- Singh, G. K.; Nam, K.; Lim, S. K. 2005. Simple indirect field – oriented control scheme for multiphase induction machine, *Journal of Industrial Electronics* 52(4): 1177–1184. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2005.851593>

APPLICATION AND PERSPECTIVES OF MULTIPHASE INDUCTION MOTORS

B. Kundrotas

Abstract

The article considers the areas of applying multiphase induction motors. Their advantages against three phase motors have become the main reason for employing them in multiphase drives. The paper deals with the six-phase induction motor having two similar three phase windings in the stator shifted by 30 degrees in space and three phase windings in the rotor. Differential equations for this motor are presented and transformed to dq synchronous reference frame. The transformed equations are expressed in a matrix form and solved by MATLAB software using the Dormand-Prince (ode45) method. The transient characteristics of the torque, speed and current of the six-phase induction motor are calculated and discussed.

Keywords: multiphase motors, model, dynamic characteristics.