



ERDVINIŲ VEKTORIŲ PERJUNGIMO TVARKOS ĮTAKA KOMUTAVIMO TRIUKŠMAMS DAŽNIO KEITIKLIO IŠĖJIMO ĮTAMPOJE

Tadas LIPINSKIS¹, Valerijus ZLOSNIKAS²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva
El. paštas: ¹tadas.lipinskis@vgtu.lt; ²valerijus.zlosnikas@vgtu.lt

Santrauka. Daugiafaziai elektros varikliai yra patikimesni nei trifaziai dėl jų galimybės veikti dingus vienai ar daugiau fazių. Taip pat daugiafazių variklių startinis sukimo momentas yra didesnis, todėl šie varikliai gali pradėti veikti esant didesnei apkrovai. Daugiafaziams varikliams energijai tiekti ir valdyti naudojami dažnio keitikliai. Darbe nagrinėjamas šešių fazių dažnio keitiklis, apkrautas žvaigždės jungimo simetrine apkrova su viena neutrale. Formuojant įtampą erdvinių vektorių impulsų skvarbos moduliacijos metodu, keitiklio išėjimo įtampos spektre atsiranda komutavimo triukšmų, kurie sukelia energijos nuostolių. Darbo tikslas yra ištirti erdvinių vektorių perjungimo tvarkos įtaką išėjimo įtampos harmonikoms. Darbe tiriami komutavimo triukšmai esant dvejiems erdvinio vektoriaus perjungimo tvarkos atvejams. Tyrimams naudoti *Matlab/Simulink* modeliai.

Reikšminiai žodžiai: šešių fazių dažnio keitiklis, erdvinio vektoriaus impulsų skvarbos moduliacijos metodas, komutavimo triukšmai, dažnio keitiklio įtampos harmonikos.

Įvadas

Daugiafaziai elektros varikliai dažnai naudojami laivuose ir lėktuvuose, nes, palyginti su trifaziais varikliais, jų didesnis startinis sukimo momentas, mažesnės sukimo momento pulsacijos, mažesnės apvijomis tekančios srovės tai pačiai galiai pasiekti. Šie varikliai yra patikimesni už trifazius, nes priklausomai nuo daugiafazio variklio fazių skaičiaus gali veikti sugedus vienai ar daugiau apvijų (Zhao, Lipo 1996).

Daugiafaziai elektros varikliai yra maitinami daugiafazių dažnio keitiklių. Keitikliai naudojami dėl dviejų priežasčių: pirma – pasaulyje nėra standartinių elektros tinklų, turinčių daugiau negu 3 fazes, antra – daugumoje pramonės sričių, kur gali būti panaudoti daugiafaziai elektros varikliai, būtinas variklio sūkių reguliavimas.

Dažnio keitiklio išėjimo tranzistoriai veikia rakto režimu, t. y. į variklį yra siunčiami įtampos impulsai, todėl dažnio keitiklio išėjimo įtampos spektre atsiranda harmonikų, artimų keitiklio išėjimo įtampos nešlio dažniui. Šios harmonikos yra vadinamos komutavimo triukšmu (angl. *Switching noise*) (Levi *et al.* 2007).

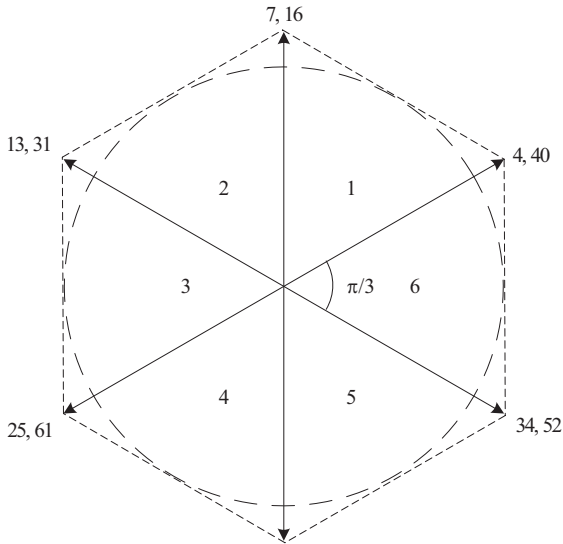
Darbo tikslas yra ištirti, kaip keitiklio išėjimo įtampos komutavimo triukšmų lygiui įtakos turi erdvinių vektorių, naudojamų įtampai formuoti, perjungimo tvarka. Sumažinus komutavimo triukšmų lygį sumažėja galios nuostoliai variklyje ir dažnio keitiklyje, be to, sumažėja ir į elektros tinklą skleidžiamų harmonikų lygis.

Darbe pateikiamas įtampos formavimo algoritmas, kurį taikant susiaurinamas keitiklio skleidžiamų komutavimo triukšmų spektras. Algoritmas analizuojamas modeliuojant dažnio keitiklį *Matlab/Simulink* terpėje ir lyginant gautus rezultatus su kitų įtampos formavimo metodų rezultatais.

Šešių fazių dažnio keitiklio įtampos formavimo algoritmas

Darbe nagrinėjamas šešių fazių dažnio keitiklis, apkrautas žvaigždės topologijos simetrine apkrova su viena neutrale. Išnagrinėjus keitiklio, apkrauto tokia apkrova, vektores diagramas, sukurtas įtampos formavimo algoritmas (Lipinskis *et al.* 2014), naudojantis iš pagrindinės vektores diagramos plokštumos tik vidutinio ilgio vektorius.

Tokio įtampos formavimo metodo naudojamų vektorių diagrama pavaizduota 1 pav. Kaip matome iš paveikslo, diagrama yra suskirstyta į 6 sektorius. Kiekvieną sektorių vieną nuo kito riboja po du sutampančius vektorius. Įtampa sektoriuje yra formuojama iš šių sutampančių vektorių, kurie riboja sektorių (iš viso 4 vektoriai), ir dviejų nulinių vektorių, kurie diagramoje nepavaizduoti. Atstojamasis išėjimo įtampos vektorius yra formuojamas iš šių vektorių, sumuojant juos laike. Sanklotą sudarančių arba aktyviųjų



1 pav. Vektorinė diagrama, kurioje pavaizduoti tik vektoriai, taikomi įtampai formuoti (Lipinskis *et al.* 2014)

Fig. 1. Space vector diagram that shows only the used vectors for voltage forming (Lipinskis *et al.* 2014)

(t_a , t_b) ir nulinių (t_0) vektorių įjungimo laikas apskaičiuojamas pagal formules (Lipinskis *et al.* 2014)

$$t_a = \frac{\sqrt{v_s} |\sin(k\pi/3 - \alpha)|}{\sqrt{v_a} |\sin(\pi/3)|} T_s, \quad (1)$$

$$t_b = \frac{\sqrt{v_s} |\sin(\alpha - (k-1)\pi/3)|}{\sqrt{v_b} |\sin(\pi/3)|} T_s, \quad (2)$$

$$t_0 = T_s - t_a - t_b, \quad (3)$$

čia k – sektoriaus numeris, T_s – nešlio periodas, α – išėjimo įtampos vektoriaus kampas, t_0 – nulinio vektoriaus veikimo laikas per periodą.

Įjungimo laikas t_a yra tolygiai paskirstomas pagal (4) tarp sutampančių vektorių Nr. 4 ir 40 (pirmajame sektoriuje, kituose sektoriuose analogiškai). Laikas t_b yra paskirstomas pagal (5) tarp kitos sektoriaus kraštinės vektorių Nr. 7 ir 16:

$$t_a \sqrt{v_a} = 0,5t_a \sqrt{v_{a1}} + 0,5t_a \sqrt{v_{a2}}, \quad (4)$$

$$t_b \sqrt{v_b} = 0,5t_b \sqrt{v_{b1}} + 0,5t_b \sqrt{v_{b2}}. \quad (5)$$

1 lentelė. Du skirtingi vektorių išdėstymo per periodą būdai

Table 1. Two different vector alignment methods per switching period

S	Nesuvienodintas perjungimų skaičius per periodą						Suvienodintas perjungimų skaičius per periodą						
	$t_0/2$	$t_a/2$	$t_a/2$	$t_b/2$	$t_b/2$	$t_0/2$	$t_0/4$	$t_a/2$	$t_1/2$	$t_0/2$	$t_b/2$	$t_b/2$	$t_0/4$
1	000000	110000	111001	111100	011000	111111	000000	110000	111001	111111	111100	011000	000000
2	000000	011000	111100	011110	001100	111111	000000	011000	111100	111111	011110	001100	000000
3	000000	001100	011110	001111	000110	111111	000000	001100	011110	111111	001111	000110	000000
4	000000	000110	001111	100111	000011	111111	000000	000110	001111	111111	100111	000011	000000
5	000000	000011	100111	110011	100001	111111	000000	000011	100111	111111	110011	100001	000000
6	000000	100001	110011	111001	110000	111111	000000	100001	110011	111111	111001	110000	000000

Tolygiai paskirsčius laiką kompensuojama trečioji harmonika išėjimo įtampoje, atsirandanti iš $0_{-}d-q$ transformacijos komponentės (Lipinskis *et al.* 2014).

Vektorių perjungimo lentelės

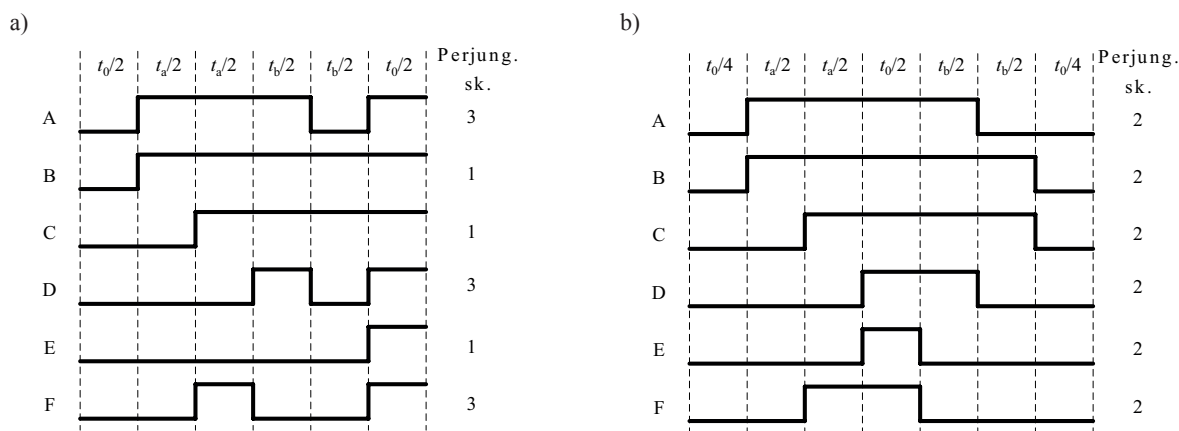
Vektorių perjungimo tvarką nusako vektorių perjungimo lentelė. Sudarant vektorių perjungimo lenteles turime vieną laisvės laipsnį: vektorių sekos eiliškumą. Taigi pagrindinis darbo tikslas ir yra ištirti vektorių perjungimo tvarkos įtaką dažnio keitiklio išėjimo įtampai.

Darbe buvo sudarytos dvi skirtingos 1 lentelėje pavaizduotos vektorių perjungimo sekos. Pirmoji seka, kurioje perjungimų skaičius per periodą yra nesuvienodintas, buvo sudaryta vektorių perjungiant tiesiog ta eilės tvarka, kuria jie gauti taikant Klarko transformaciją (Levi *et al.* 2007). Taikant šią perjungimo tvarką gaunama pirmojo įtampos formavimo sektoriaus ($S = 1$) laikinė tranzistorinių raktų veikimo diagrama (2 pav., a). Kaip matome iš diagramos, dalis tranzistorių per vieną nešlio dažnio periodą persijungia tris kartus, kita dalis – kartą. Toks persijungimų skaičiaus nevienodumas gali turėti įtakos išėjimo įtampos aukšto dažnio harmonikoms, dar vadinamoms komutavimo triukšmais.

Kita vektorių perjungimo seka buvo sudaryta taip, kad sektorių vieno periodo laikinėse diagramose tranzistorių perjungimo skaičius būtų vienodas – 2 perjungimai (2 pav., b). Iš pirmojo sektoriaus abiejų perjungimo sekų laikinių diagramų (2 pav.) akivaizdu, kad vektorių veikimo trukmė išlieka nepakitusi, nors antrosios sekos perjungimo lentelė tapo vienu stulpeliu didesnė. Antroji lentelė padidėjo dėl to, kad vienas iš nulinių vektorių yra įjungiamas du kartus per periodą, tačiau jo veikimo laikas yra tolygiai paskirstytas per abu kartus ir bendra jo įjungimo trukmė lieka ta pati kaip ir pirmuoju atveju.

Įtampos formavimo algoritmo tyrimas *Matlab/Simulink* aplinkoje

Aprašytas įtampos formavimo metodas, taikant du skirtingus vektorių perjungimo lentelės sudarymo būdus, buvo



2 pav. Pirmojo sektoriaus vieno periodo laikinės diagramos: a) parenkant vektorius iš eilės didėjimo tvarka; b) kai vektoriai perjungimo lentelėje išdėstyti suvienodinant raktų perjungimo skaičių per periodą. A, B, C... – keitiklio fazė

Fig. 2. Time plot of first sector's period: a) using vector alignment by ascending vector number; b) when vectors are aligned to equalize the switch count per period A, B, C... – inverter phase

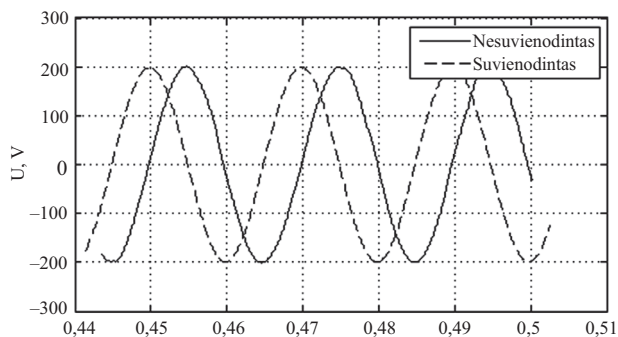
išbandytas šešių fazių dažnio keitiklio modelyje, veikiančiame *Matlab/Simulink* terpėje (Lipinskis 2013). Dažnio keitiklio apkrova buvo modeliuojama žvaigžde sujungtomis RL šakomis, kurių $R = 5 \Omega$ ir $L = 10 \text{ mH}$ buvo parinkti kaip tipinio vidutinės galios elektros variklio (Nabi *et al.* 2011). Modeliuojamo dažnio keitiklio raktų perjungimo dažnis $f_s = 2 \text{ kHz}$, išėjimo raktai maitinami $U_{nuol} = 400 \text{ V}$ įtampa, išėjimo įtampos dažnis $f = 50 \text{ Hz}$.

Modeliuojama apkrova yra simetrinė, tad galima daryti prielaidą, jog visos fazinių įtampų kreivės yra vienodos, skiriasi tik jų fazė. Remiantis šia prielaida, modeliavimo metu buvo stebima tik A fazės fazinė įtampa (3 pav.). Jos vertės prieš atvaizduojant buvo filtruotos žemųjų dažnių filtru, kurio atkirtos dažnis yra 200 Hz .

Iš 3 pav. matyti, kad įtampos kreivės iš esmės yra identiškos: sinusoidės formos, neturi akivaizdžių žemųjų dažnių harmonikų, abiejų kreivių amplitudės yra $\approx 200 \text{ V}$, dažnis 50 Hz . Tačiau, iš pirmos pažiūros, identiškų kreivių nefiltruotos įtampos spektro analizė (4 pav.) rodo, kad išėjimo įtampų harmoninė sudėtis aplink nešlio dažnį skiriasi. Pirmuoju atveju (4 pav., a), kai vektoriai lygiuojami tiesiog pagal jų eilės numerį, komutavimo triukšmai, artimi keitiklio nešlio dažniui, yra išsidėstę nuo $\approx 1,3 \text{ kHz}$ iki $\approx 2,7 \text{ kHz}$ dažnių, ir užima $\approx 1,4 \text{ kHz}$ pločio spektro ruožą.

Antruoju atveju (4 pav., b), kai vektoriai parenkami suvienodinant tranzistorių perjungimų per periodą skaičių, komutavimo triukšmai išsidėstę $\approx 0,8 \text{ kHz}$, t. y. beveik perpus siauresniame, spektro ruože.

Spektro analizė taip pat rodo, kad nors antruoju atveju triukšmo spektras siauresnis, tačiau jo amplitudė yra didesnė.

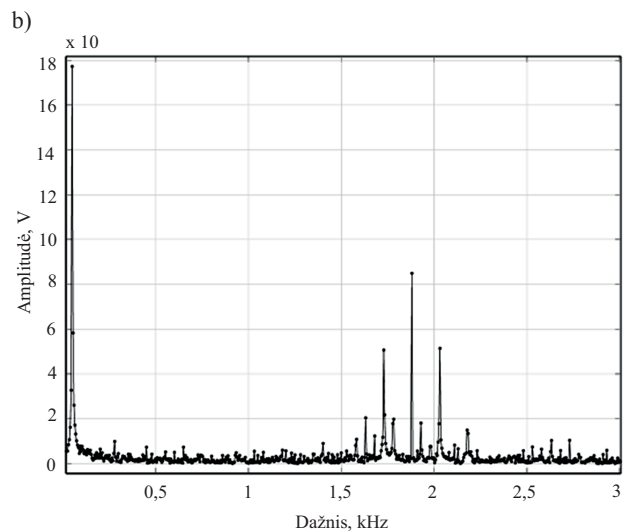
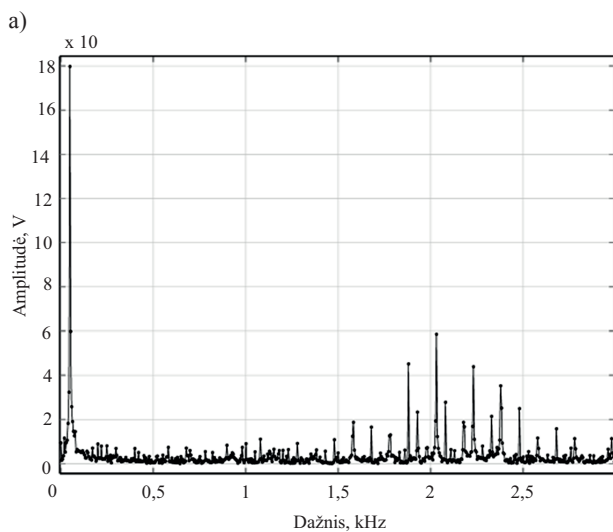


3 pav. Dažnio keitiklio išėjimo A fazės įtampa, filtruota 200 Hz žemųjų dažnių filtru, kai vektorių perjungimo lentelė sudaryta pagal vektoriaus eilės numerį arba suvienodintą perjungimų skaičių

Fig. 3. Inverter's phase A output voltage, filtered with a 200 Hz low pass filter, when switching table is formed selecting vectors by their number, or selecting vectors to equalize switch count

Išvados

1. Vektorių perjungimo tvarkos keitimas neturi įtakos dažnio keitiklio išėjimo įtampos pagrindinei harmonikai. Tačiau vektorių perjungimo tvarkos išdėstymas turi didelę įtaką komutavimo triukšmams išėjimo įtampoje. Parenkant tinkamą vektorių tvarką galima susiaurinti arba išplėsti komutavimo triukšmų spektrą dažnio keitiklio išėjimo įtampoje.
2. Parenkant vektorių perjungimo tvarką, kai skirtingų fazių dažnio keitiklio išėjimo raktų persijungimo skaičius skiriasi, komutavimo triukšmų spektras išėjimo įtampoje tampa platesnis, tačiau harmonikų amplitudės yra mažesnės nei tuo atveju, kai perjungimų skaičius



4 pav. Dažnio keitiklio išėjimo fazės A srovės spektras: a) kai perjungimo lentelėje vektoriai išdėstyti pagal eilės numerį; b) kai perjungimo lentelėje vektoriai išdėstyti taip, kad būtų suvienodintas perjungimų skaičius

Fig. 4. Inverter's output phase A voltage spectrum: a) when switching table vector sequence is formed by selecting vectors by their number; b) when switching table vector sequence is formed to equalize the switch count

suvienodintas. Suvienodinus išėjimo raktų perjungimų per periodą skaičių, komutacinių triukšmų spektras tampa siauresnis, tačiau harmonikų amplitudės padidėja, todėl galima teigti, kad komutacinių triukšmų bendroji galia lieka nepakitusi.

Literatūra

- Levi, E.; Bojoi, R.; Profumo, F.; Toliyat H. A.; Williamson, S. 2007. Multiphase induction motor drives – a technology status review, *IET Electric Power Applications* 1(4): 489–516. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa:20060342>
- Lipinskis, T. 2013. Analysis of voltage forming methods for multiphase inverters, *Science – Future of Lithuania – Mokslas – Lietuvos Ateitis* 5(2): 119–123. <http://dx.doi.org/10.3846/mla.2013.22>
- Lipinskis, T.; Baskys, A.; Bleizgys, V.; Platakis, A. 2014. True six-phase space vector modulation scheme with reduced low order harmonics, *Electronics and Electrical Engineering* 20(9): 46–49. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.9.8712>
- Nabi, H. P.; Dadashi, P.; Shoulaie, A. 2011. A novel structure for vector control of symmetrical six-phase induction machines with three current sensors, *Engineering, Technology & Applied Science Research* 1(2): 23–29.
- Zhao, Y.; Lipo, T. A. 1996. Modeling and control of a multi-phase induction machine with structural imbalance. Part I: machine modeling and multi-dimensional current regulation, *IEEE Transactions on Energy Conversion* 11(3): 570–577. <http://dx.doi.org/10.1109/60.537009>

THE IMPACT OF SPACE VECTOR SEQUENCE IN THE SWITCHING TABLE ON INVERTERS OUTPUT VOLTAGE

T. Lipinskis

Abstract

Multiphase AC machines are more reliable than three phase machines due to their ability to work when one or more phases fail. Also multiphase machines have higher starting torque, which enables them to start with heavier loads. Inverters are used to supply power and control parameters of an AC machine. In this paper a six phase inverter with a symmetrical star connected load with a single neutral is discussed. When the inverter's output voltage is formed by space vector pulse width modulation method, a high frequency harmonics appear in the output voltage, which increases power losses. The purpose of this work is to investigate what type of effect on output voltage harmonics has the sequence of space vectors in the switching table. Two methods of creating a switching table are presented in this paper, and two switching tables are created. Inverter's operation with both switching tables is simulated in Matlab/Simulink environment. Result analysis shows that changing the switching vector sequence in the switching table has an effect on output voltage harmonics of frequency around inverter's switching frequency.

Keywords: six phase inverter, space vector pulse width modulation, switching noise, harmonics of inverter voltage.