

ŠEŠIŲ FAZIŲ DAŽNINĖS PAVAROS EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Tadas LIPINSKIS ¹, Vytautas BLEIZGYS ^{1,2}

¹Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva;

²Fizinių ir technologijos mokslų centras, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹tadas.lipinskis@vgtu.lt; ²vytautas.bleizgys@vgtu.lt

Santrauka. Darbe pateikiami dažninės pavaros, sudarytos iš šešių fazių dažnio keitiklio ir šešių fazių asinchroninio elektros variklio, eksperimentinių tyrimų rezultatai. Šešių fazių įtampai formuoti taikomas autorius sukurtas erdvinė vektorių moduliacijos algoritmas, naudojantis vidutinio ilgio vektorius. Algoritmas realizuotas asmeniniu kompiuteriu Matlab/Simulink terpėje. Signalams inverterio raktų valdymui iš kompiuterio gauti panaudotas National Instruments PCI-6024E duomenų įvesties/išvesties įrenginys. Atlikti inverterio įtampos, kuriai esant šešių fazių variklis dirba maksimaliu naudingumo koeficientu, tyrimai. Pateikiami šešių fazių variklio greičio ir sukimo momento pereinamųjų procesų tyrimo rezultatai, esant vienos, dviejų ir trijų variklio apvijų gedimams, patvirtinantys, kad šešių fazių variklis gali ribotai veikti sugedus iki trijų apvijų.

Reikšminiai žodžiai: šešių fazių asinchroninis simetrinis variklis, šešių fazių dažnio keitiklis, vektorinis įtampos formavimo metodas, daugiafazė dažninė pava.

Įvadas

Daugiafazės dažninės pavaros, dėl savo privalumų lyginant su trifazėmis pavaromis, yra dažnas mokslinių tyrimų objektas. Pagrindiniai privalumai yra didesnis startinis sukimo momentas, mažesnė sukimo momento pulsacijos esant mažiems rotorius sūkiams, mažesnė maitinimo įtampa (Levi *et al.* 2007).

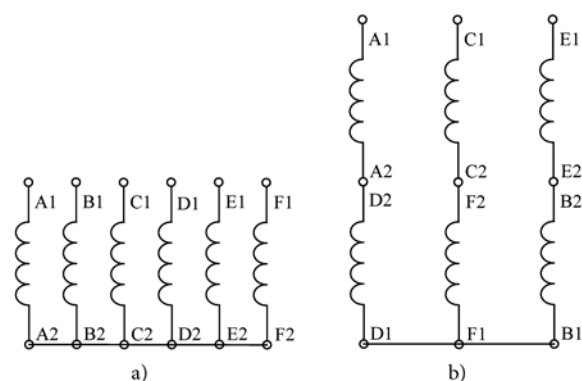
Dažnine pava vadinama sistema sudaryta iš dažnio keitiklio ir elektros variklio. Dažnio keitiklio paskirtis tokioje sistemoje – paversti įprastą vienos arba trijų fazių, 50 Hz dažnio tinklo įtampą, į reikiamo dažnio, reikiamo fazių skaičiaus ir reikiamos amplitudės įtampą elektros varikliui valdyti. Įtampos formavimo dėsniai dažnio keitiklyje skirstomi į skaliarinius, veikiančius sinusoidės-trikampio principu, arba vektorinius, tiesiogiai valdančius variklio magnetinį srautą (Dujic *et al.* 2007).

Šešių fazių varikliai plačiai tiriami ir Lietuvoje (Pitrėnas, Petrovas 2014; Kundrotas *et al.* 2014), yra apginta daktaro disertacija (Kundrotas 2014) šešių fazių asinchroninio variklio kūrimo tema. Paminėtuose šaltiniuose tyrimai atliekami dėmesį sutelkiant į patį elektros variklį ir jo viduje vykstančius procesus, tačiau netiriama šešių fazių dažninė pava kaip visuma.

Darbe pateikiamas šešių fazių dažninės pavaros eksperimentinis tyrimas ir gautų rezultatų palyginimas su trijų fazių pava. Pateikiami eksperimentinių tyrimų rezultatai, kai variklio fazėse yra gedimai.

Tyrimų įranga

Tyrimuose panaudotas šešių fazių variklis, sukonstruotas perdarius trijų fazių asinchroninį „Siemens“ kompanijos 750 W galios variklį 1LE1001-1AD4-21AA4 į šešių fazių asinchroninį variklį su simetriniu apvijų išdėstymu. Toks variklis, keičiant apvijų jungimą (1 pav.), gali veikti ir kaip šešių, ir kaip trijų fazių variklis. Norint maitinti variklį iš trijų fazių įtampos šaltinio, šešios fazinės apvijos jungiamos nuosekliai po dvi (1 pav. b). Taip sujungus variklio apvijas ir norint pasiekti tuos pačius variklio parametrus, trifazės įtampos amplitudė turi būti didesnė nei esant 6 fazių jungimui.



1 pav. Eksperimentinio variklio jungimo topologijos, naudotos tyrimuose: a) šešių fazių jungimas; b) trijų fazių jungimas
Fig. 1. Experimental motor connection topologies used in this work: a) six-phase; b) three-phase

Eksperimentinis variklis buvo sumontuotas ant specialaus tyrimų stendo, skirto iki 7,5 kW galios elektros variklių tyrimams. Stendo struktūra pavaizduota 2 pav. Kaip matome iš paveikslo, tiriamas variklis per movą sujungtas su sukimo momento jutiklio velenu. Sukimo momento jutiklio velenas toliau yra sujungtas su elektros generatoriaus velenu, ant kurio yra uždėtas optinis enkoderis, skirtas veleno sukiamams matuoti. Generatorius mechaniškai apkrauna variklį. Mechaninė apkrova gali būti keičiama tolydžiai, keičiant generatoriaus žadinimo srovę, arba diskrečiai žingsniais, atjungiant arba prijungiant nuosekliai sujungtas generatoriaus elektrines apkrovas. Duomenys iš stendo jutiklių diskretizuojami 10 Hz dažniu duomenų nuskaitymo grandine ir realiuoju laiku USB sąsaja perduodami į asmeninį kompiuterį.

Eksperimentinis variklis maitinamas iš autoriaus sukurto šešių fazių dažnio keitiklio maketo. Makete naudojami dviejų ir trijų fazių dažnio keitiklių inverteriai, kurių nuolatinės įtampos įėjimo grandinės yra sujungtos lygiagrečiai, ir maitinamos iš laboratorinio didelės galios „Elektro-Automatik“ maitinimo šaltinio EA-PS 8720-15. Loginiai signalai inverterių tranzistoriams perjungti formuojami asmeniniu kompiuteriu, Matlab/Simulink terpėje, ir tiekiami į inverterio tranzistorių valdymo schemas naudojant National Instruments PCI-6024E duomenų įvesties/išvesties įrenginį. Įtampa visuose pateiktuose tyrimuose formuojama pagal autoriaus sukurtą erdvinį vektorių moduliacijos algoritmą, naudojantį vidutinio ilgio vektorius, kuris yra aprašytas anksčiau darbuose (Lipinskis *et al.* 2014; Lipinskis 2015). Formuojant įtampą šiuo metodu, maksimali išėjimo įtampos amplitudė (kai moduliacijos koeficientas $m = 1$) yra susieta su inverterio maitinimo nuolatinė įtampa, ir yra lygi

$$U_m = 0,5U_{nuol} \quad (1)$$

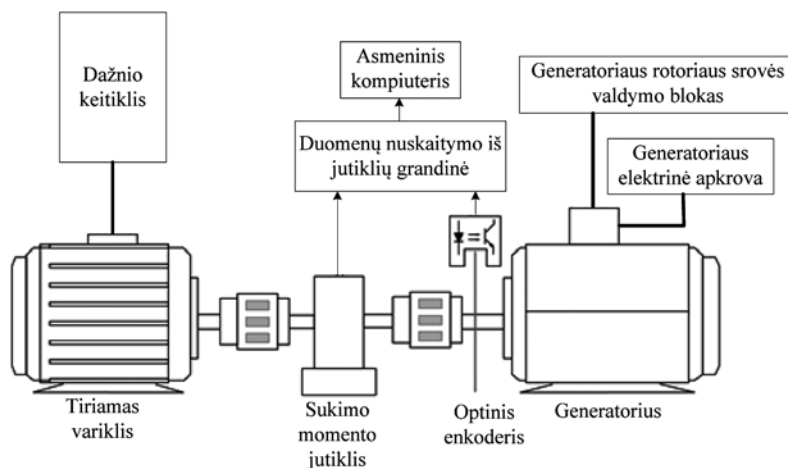
čia U_m – inverterio išėjimo įtampos amplitudė; U_{nuol} – inverterio nuolatinės įtampos maitinimo šaltinio įtampa.

Šešių ir trijų fazių eksperimentinio variklio įtampos amplitudės valdymo dėsnio tyrimas

Tyrimas buvo atliekamas siekiant surasti inverterio tiekiamos eksperimentiniam šešių fazių asinchroniniam elektros varikliui įtampos amplitudę esant įvairioms variklio mechaninėms apkrovoms ir inverterio išėjimo įtampos dažniams (variklio sukimosi greičiams), kuriai esant variklio naudojama galia yra minimali, t. y. variklis turi didžiausią naudingumo koeficientą. Gavus matavimų rezultatus, pateikiamos priklausomybės nuo inverterio nuolatinės maitinimo įtampos, kadangi inverterio išėjimo įtampa yra impulsinio pobūdžio, ir jos atstojamąją amplitudę tiksliai išmatuoti sunku. Sąryšį tarp inverterio maitinimo įtampos ir inverterio tiekiamos įtampos amplitudės apibūdina (1) lygtis.

Tyrimai buvo atlikti 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 Hz maitinimo įtampos dažniams, esant 0, 4, 7, 10 Nm apkrovai. Inverterio raktų komutavimo dažnis (angl. *switching frequency*) eksperimentuose buvo $f_s = 5$ kHz, įtampos formavimo metodo moduliacijos koeficientas $m = 1$.

Tyrimo metu, keičiant inverterio nuolatinės maitinimo įtampos vertę (dėl ko keitėsi išėjimo įtampos amplitudė pagal (1) lygtį), buvo randama mažiausia įtampos vertė, kai variklio rotorius neviršija kritinio slydimo ribos ir gali palaikyti užduotą apkrovą. Nors esant šiai nuolatinės įtampos vertei inverterio išėjimo įtampos amplitudė yra mažiausia, variklis neveikia maksimaliai naudingai, jo rotorius smarkiai slysta, todėl smarkiai išauga srovės apvijose. Didinant įtampos vertę, apvijų srovės bei variklio rotoriaus slydimas mažėja iki tam tikro optimalaus taško, kurį pasiekus srovės ima augti, ir vėl pradeda didėti variklio suvartojama galia. Tipinė variklio naudojamos galios priklausomybė, kai variklio apkrovos momentas $T_m = \text{const}$ ir rotoriaus sukimosi greičiai $n_r \approx \text{const}$, pavaizduota 3 pav.



2 pav. Dažninių pavarų tyrimo stendo struktūra

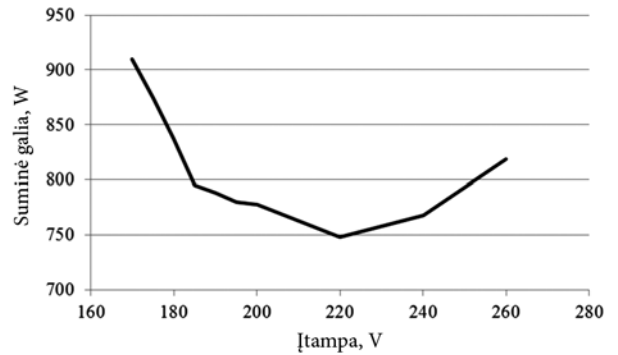
Fig. 2. The structure of frequency converter-based AC motor drives testing stand

Kaip matome iš 3 pav. elektros variklis prie 40 Hz dažnio, kurį atitinka $n_r \approx 550$ aps/min, ir $T_m = 7$ Nm apkrovos vartoja mažiausiai energijos, kai inverterio maitinimo įtampa $U_{nuol} = 220$ V, ir tai yra optimali įtampa esant šiam darbo režimui. Analogiškai buvo nustatytos optimalios maitinimo įtampos esant kitiems darbo režimams. Šešių fazių variklio inverterio optimalios maitinimo įtampos priklausomybė nuo dažnio, esant skirtingoms mechaninėms apkrovoms, pavaizduota 4 pav., a.

Lyginant šias priklausomybes su trijų fazių topologija prijungto to paties variklio charakteristikoms (4 pav., b) matyti, kad reikiama maitinimo įtampa optimaliam trifaze topologija sujungto variklio darbo režimui palaikyti yra apie 2 kartus didesnė. Kadangi matavimai daryti esant kelioms apkrovoms, galima nubraižyti inverterio išėjimo įtampos amplitudės U_m ir fazinio dažnio f santykio priklausomybes abiejų tipų varikliams. Teoriškai šis santykis dažninėse pavarose turėtų būti išlaikomas pastovus, t. y. pakeitus dažnį tiek pat reikėtų pakeisti ir amplitudę, esant pastoviai mechaninei variklio apkrovai. Kaip matome iš 5 pav., abiem variklio jungimo atvejais šis amplitudės valdymo dėsnis

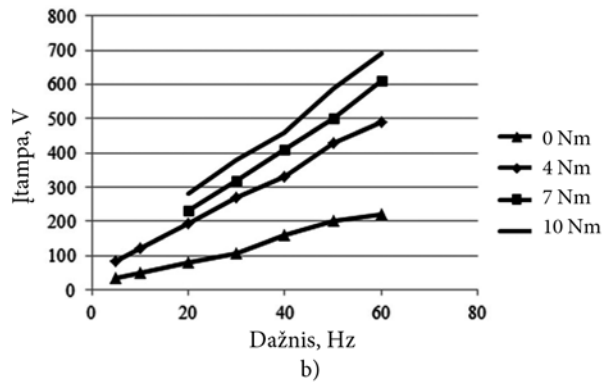
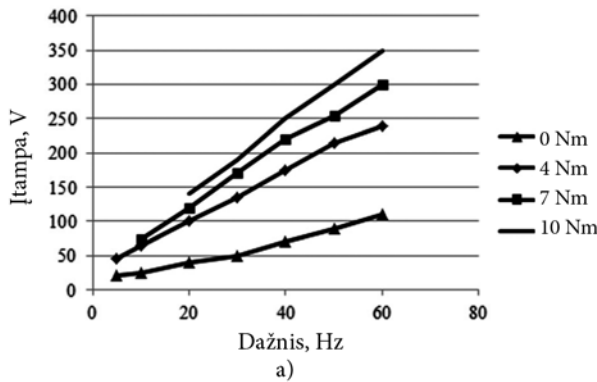
nėra tinkamas esant mažam inverterio formuojamos maitinimo įtampos faziniam dažniui.

Mažinant dažnį, mažinama ir įtampos amplitudė. Esant mažai amplitudei, vis didesnę įtaką daro įtampos kritimas statoriaus apvijų aktyviojoje varžoje, todėl esant mažam maitinimo įtampos dažniui, maitinimo įtampos



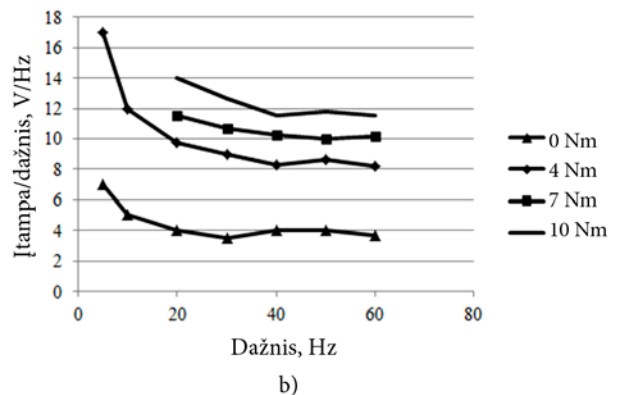
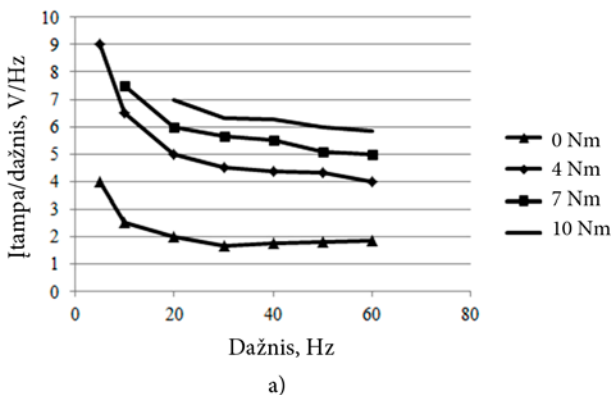
3 pav. Dažninės pavaros galios suvartojimo priklausomybė, kai $T_m = 7$ Nm ir $n_r \approx 550$ aps/min

Fig. 3. Power usage of a frequency drive when $T_m = 7$ Nm and $n_r \approx 550$ rpm



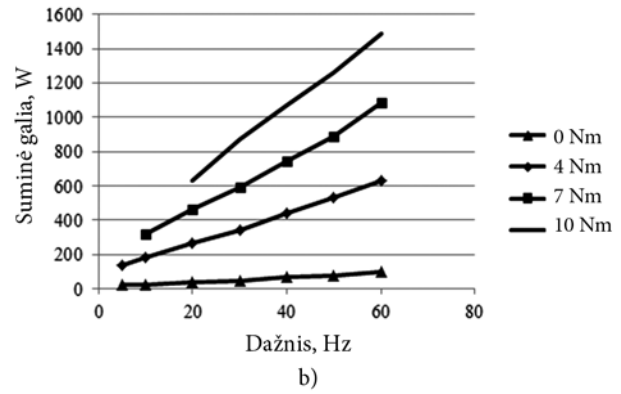
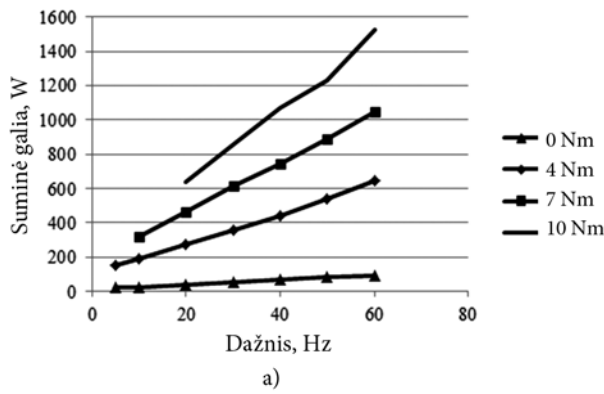
4 pav. Inverterio optimalios maitinimo įtampos priklausomybė nuo formuojamos išėjimo įtampos dažnio: a) maitinant šešių fazių variklį; b) maitinant trijų fazių variklį

Fig. 4. Inverters optimal voltage vs output voltage frequency: a) for a six-phase motor; b) for a three phase motor



5 pav. Eksperimentiškai gauta skaliarinio valdymo $U/f = \text{const.}$ kreivė: a) šešių fazių varikliui; b) trijų fazių varikliui

Fig. 5. Experimentally obtained scalar $U/f = \text{const.}$ control curve: a) for six-phase motor; b) for three-phase motor



6 pav. Variklio ir inverterio suvartojama galia: a) šešių fazių topologija; b) trijų fazių topologija
 Fig. 6. Power usage of the inverter and motor: a) six-phase topology; b) three-phase topology

amplitudė turi būti didesnė nei nusako skaliarinio valdymo dėsnis $U_m/f = \text{const}$. Kaip matome iš 5 pav., tiek šešių, tiek ir trijų fazių atveju optimalaus U_m/f santykio pokyčio tendencijos lieka tokios pat, tačiau pats santykis trijų fazių varikliui yra apie 2 kartus didesnis.

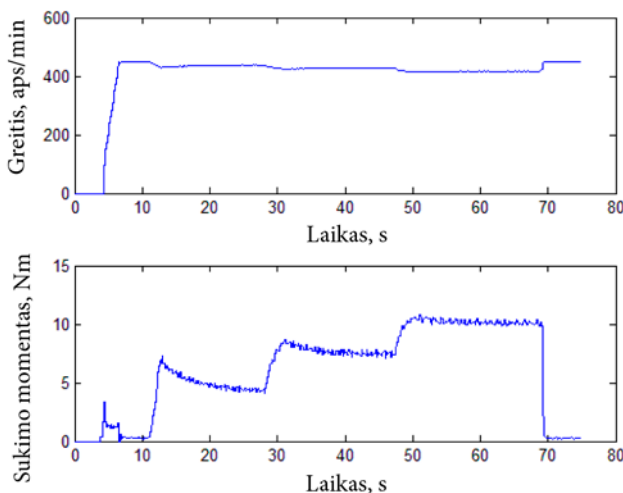
Lyginant abiejų variklių suvartojamą galią (6 pav.), šešių fazių topologijos pranašumą prieš trifazę pastebėta nebuvo. Esant vienodiems rotorius sukimosi greičiui ir sukimo momentui ir nustačius optimalią išėjimo įtampą amplitudę, abiejų topologijų dažninės pavaros vartojo tą pačią galią iš nuolatinės įtampos šaltinio, maitinančio dažnio keitiklio inverterį. Verta pastebėti, jog, tiriant trijų fazių pavarą, buvo naudojamas tik vienas trijų fazių inverteris, tačiau suvartojama galia išliko praktiškai ta pati, taigi energijos nuostoliai inverteryje yra labai maži.

Šešių fazių variklio darbas esant gedimui

Vienas pagrindinių daugiafazių variklių privalumų – galimybė veikti esant vienoms ar daugiau fazinių apvijų gedimui. Siekiant ištirti šešių fazių variklio darbą esant gedimui, eksperimento metu buvo atjungiamos viena, dvi ir trys variklio apvijos. Vykdamas eksperimentą inverteris buvo maitinamas 190 V įtampa, kuri yra optimali, kai variklis apkrautas 10 Nm apkrova. Inverterio tiekiamos į variklį įtampos dažnis 30 Hz. Eksperimento eigoje variklis buvo paleidžiamas be apkrovos, varikliui įsibėgėjus apkrova buvo tolydžiai padidinama iki 4 Nm, po to iki 7 Nm ir galiausiai iki 10 Nm.

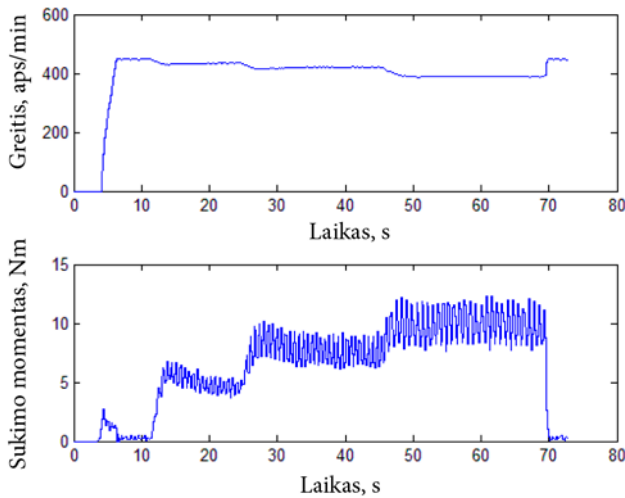
Pradžioje buvo gautas variklio pereinamasis procesas (7 pav.) veikiant visoms variklio apvijoms. Kaip matome iš paveikslėlio, variklio įsibėgėjimo laikas yra ~ 2,2 s, o įsibėgėjus rotorius jo greitis nusistovi ties 448 aps/min, kuris yra artimas sinchroniniam greičiui (450 aps/min). Toliau variklį apkrovus nominalia 4 Nm apkrova, sukimo momentas iš pradžių padidėja iki ~6,9 Nm. Taip yra todėl, kad generatoriaus, kuris apkrauna variklį mechanine apkrova, elektrinė apkrova yra šildymo elementai. Elementams šylant, didėja jų varža, dėl to mažėja jais tekanti srovė, todėl matomas tolydus lėtas sukimo momento nusistovėjimas ties nominalia verte. Apkrovus variklį 4 Nm apkrova, rotorius greitis nusistovi ties 437 aps/min. Apkrovus variklį 7 Nm apkrova, prieš nusistovėdamas sukimo momentas trumpam padidėja iki 8,6 Nm, o momentui nusistovėjus ties nominalia verte, rotorius greitis siekia 428 aps/min. Kai variklis apkraunamas optimalia pagal užduotą maitinimo įtampą apkrova – 10 Nm, jo sukiamas nusistovi ties 415 aps/min. Verta paminėti, kad varikliui veikiant įprastu režimu (be gedimo), nėra jokių akivaizdžių sukimo momento pulsacijų.

Toks pat pereinamojo proceso tyrimas buvo pakartotas atjungus fazės B variklio apviją. Eksperimento metu dažnio keitiklyje veikė toks pat įtampų formavimo algoritmas,



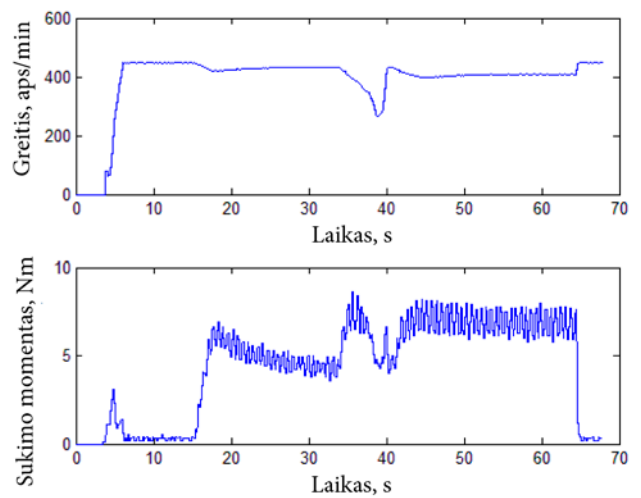
7 pav. Šešių fazių variklio greičio ir sukimo momento pereinamieji procesai, kai visos apvijos veikia

Fig. 7. Speed and torque transitions of a six-phase motor when all windings are working



8 pav. Šešių fazių variklio greičio ir sukimo momento pereinamieji procesai, kai atjungta B fazės apvija

Fig. 8. Speed and torque transitions of a six-phase motor when phase B winding is disconnected



9 pav. Šešių fazių variklio greičio ir sukimo momento pereinamieji procesai, kai atjungtos B ir D fazių apvijos

Fig. 9. Speed and torque transitions of a six-phase motor when phase B and D windings are disconnected

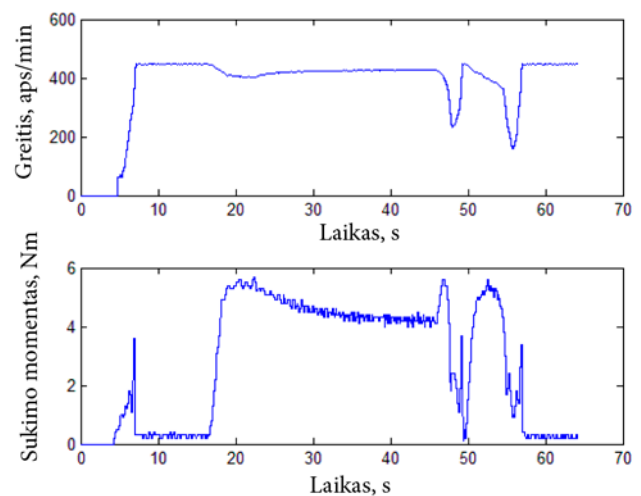
kuris buvo taikytas ankstesniame tyrime. Kaip matome iš 8 pav., variklis startuoja veikiant tik penkioms iš šešių apvijų. Rotoriaus įsibėgėjimas trunka ilgiau nei variklio, kurio visos fazės veikia – 2,3 s, o laisvų sūkių skaičius nusistovi ties 448 aps/min. Variklį apkrovus 4 Nm apkrova, sūkių skaičius nusistovi ties 436 aps/min, tačiau atsiranda nepageidaujamos žemo dažnio sukimo momento pulsacijos. Sukimo momento pulsacijų amplitudė esant 4 Nm apkrovai – ~0,8 Nm, dažnis – 1,6 Hz. Apkrovą padidinus iki 7 Nm, variklio sūkliai nusistovi ties 422 aps/min, padidėja sukimo momento pulsacijų amplitudė – ~1,3 Nm, tačiau pulsacijų dažnis išlieka beveik nepakitęs – 1,5 Hz. Sukimo momentą pakėlus iki 10 Nm, rotoriaus greitis nusistovi ties 389 aps/min, kas rodo, kad rotorius slysta žymiai daugiau nei esant tvarkingam varikliui. Sukimo momento pulsacijų amplitudė pasiekia ~2,1 Nm, dažnis – 1,3 Hz.

Imituojant dviejų fazių gedimą buvo atjungtos fazės B ir D. Taip buvo padaryta dėl to, kad esant dviejų greitimų fazių gedimui, pvz. B ir C, variklis, maitinamas inverterio, kuriame veikia standartinis įtampos formavimo metodas, startuoti negali. Neveikiant dvejoms apvijoms, neapkrautas variklis bėgėjasi 2,3 s, kol pasiekia 448 aps/min greitį. Variklį apkrovus 4 Nm apkrova, greitis nusistovi ties 432 aps/min, ir grafike (9 pav.) vėl matyti aiškios sukimo momento pulsacijos, kurių amplitudė yra ~0,6 Nm, dažnis – 1,6 Hz. Sukimo momentą didinant iki 7 Nm (9 pav., 35 sekundė), matomas staigus rotoriaus greičio mažėjimas, nes variklis jau negali išlaikyti staigaus apkrovos padidėjimo.

Lėtai didinant apkrovą, pavyko pasiekti maksimalų sukimo momentą esant dviem sugedusiom apvijom – 7 Nm

prie 408 aps/min. Sukimo momento pulsacijų amplitudė esant šiai apkrovai – ~1 Nm, dažnis – 1,5 Hz.

Esant trimis atjungtom apvijoms – B, D ir F, variklis startuoja per 2,4 s ir pasiekia 447 aps/min greitį. Variklį apkrovus 4 Nm apkrova, sūkliai nusistovi ties 425 aps/min, taip pat nėra sukimo momento pulsacijų (10 pav.). Tai galima paaiškinti tuo, kad variklis vėl veikia simetriniu režimu, nes veikiančios apvijos yra simetriškai, kas 120°, išsidėsčiusios statoriuje. Tačiau bandant didinti apkrovą iki 7 Nm, rotorius pradeda smarkiai slysti (10 pav. grafiko 48 ir 56 sek), o maksimalus sukimo momentas, kuriam esant variklis dar gali veikti, yra ~5,3 Nm.



10 pav. Šešių fazių variklio greičio ir sukimo momento pereinamieji procesai, kai atjungtos B, D ir F fazių apvijos

Fig. 10. Speed and torque transitions of a six-phase motor when phase B, D and F windings are disconnected

Išvados

1. Tiriant eksperimentinį šešių ir trijų fazių topologijomis sujungtą variklį nustatyta, kad gautos inverterio išėjimo įtampos amplitudės U_m ir fazinio dažnio f santykio U_m/f valdymo kreivės skirtingoms apkrovoms yra vienodo pobūdžio, tačiau trijų fazių varikliui maitinimo įtampos amplitudė turi būti 2 kartus didesnė, norint pasiekti tą pačią variklio galią.
2. Tiriant šešių fazių variklio atsparumą gedimams buvo nustatyta, jog variklis gali startuoti ir ribotai veikti esant iki trijų apvijų gedimams, su sąlyga, kad nėra sugedusios dvi gretimos apvijos. Esant dviejų gretimų fazių gedimui 6 fazių variklis, maitinamas sukurtu dažnio keitikliu, startuoti ir veikti negali.
3. Šešių fazių variklio apvijų gedimai mažai įtakoja neapkrauto variklio bėgėjimosi laiką ir sūkius. Esant vienos ir dviejų fazių gedimui, kai šešių fazių variklis yra apkrautas, pasireiškia žemo dažnio sukimo momento pulsacijos, kurių amplitudė svyruoja tarp 0,6–2,1 Nm, o dažnis 1,3–1,6 Hz, esant skirtingiems darbo režimams.
4. Sugedus trims iš šešių fazinių apvijų, variklio galia sumažėja pusiau, tačiau nėra sukimo momento pulsacijų, būdingų esant vienos arba dviejų fazinių apvijų gedimams.

Literatūra

- Dujic, D.; Jones, M.; Levi, E. 2007. Continuous carrier-based vs. Space Vector PWM for Five Phase VSI, in *Proceedings of EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool", 9–12 September 2007, Warsaw, Poland*, 1772–1779.
- Kundrotas, B. 2014. Šešiafazių asinchroninių variklių pereinamųjų vyksmų tyrimas: Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 119 p. ISBN 978-609-457-682-9.
- Kundrotas, B.; Petrovas, A.; Rinkevičienė, R.; Smilgevičius, A. 2014. Research of six-phase induction motor windings, *Electronics and Electrical Engineering* 1(20): 15–18. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.20.1.2237>
- 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>
- Lipinskis, T. 2015. Erdvinių vektorių perjungimo tvarkos įtaka komutavimo triukšmams dažnio keitiklio išėjimo įtampoje, *Science – Future Of Lithuania / Mokslas – Lietuvos Ateitis* 7(3): 357–360.
- 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>
- Pitrėnas, A.; Petrovas, A. 2014. Six-phase VSI control using 8-Bit MCU, *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering* 2(3): 104–107.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A SIX-PHASE VARIABLE FREQUENCY DRIVE

T. Lipinskis, V. Bleizgys

Abstract

Experimental results of a variable frequency drive, consisting of a six-phase voltage source inverter and six-phase asynchronous AC motor are presented in this paper. Frequency converter uses a six-phase space vector PWM scheme created by the author. The voltage forming scheme is implemented in Matlab/Simulink, and logical signals for inverter control are transferred from PC via the National instruments PCI-6024E data acquisition card. Voltages at which the experimental motor operates at maximum efficiency were determined experimentally. Motor transitions, when it is operating with one, two, and three failed phase windings are presented, confirming that a six-phase motor can operate with up to three failed windings.

Keywords: six-phase asynchronous symmetrical motor, six-phase voltage source inverter, space vector PWM, multiphase variable frequency drive.