

DAUGIAFAZIŲ DAŽNIO KEITIKLIŲ ĮTAMPOS FORMAVIMO METODŲ ANALIZĖ

Tadas Lipinskis

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas tadas.lipinskis@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pristatomi daugiafazių variklių pranašumai, palyginus su trifaziais ir vienfaziais. Apžvelgiama variklių sandara ir pristatomi daugiafazių variklių apvijų tipai. Pristatomos variklių valdymo strategijos sugedus apvijos ar inverterio galios pakopos raktui. Pasiūloma daugiafazių dažnio keitiklių įtampos formavimo algoritmų vertinimo metodika. Matlab Simulink terpėje modeliuojamas šešiafazis dažnio keitiklis, kuriame veikia sinusinio impulso skvarbos moduliavimo įtampos formavimo algoritmas. Pagal sukurta vertinimo metodiką įvertinami dažnio keitiklio modeliavimo rezultatai, pateikiamos išvados.

Reikšminiai žodžiai: daugiafazis dažnio keitiklis, įtampos formavimo algoritmas, daugiafazis variklis, šešiafazis dažnio keitiklio modelis.

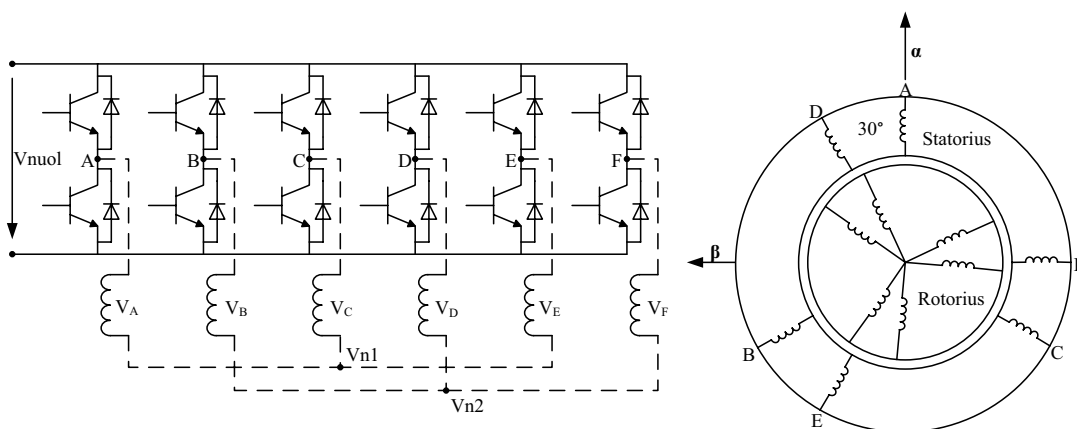
Įvadas

Pirmasis daugiafazis variklis buvo paminėtas 1969 m. (Levi *et al.* 2007), bet plačiau daugiafaziai varikliai pradėti taikyti tik nuo 1990-ųjų. Daugiafaziai varikliai dažniausiai naudojami patikimose sistemose, tačiau tai nėra vienintelė savybė, juos išskirianti iš trifazių ir vienfazių elektros variklių. Daugiafaziai varikliai turi ir daugiau pranašumų: mažesnes sroves apvijose, mažesnes sukimo momento pulsacijas. Daugiafaziai varikliai plačiai naudojami elektr varomų laivų (Terrien *et al.* 2004), elektromobilių ir hibridinių automobilių pavarose (Bojoi 2005), lėktuvuose (Atkinson *et al.* 2005).

Daugiafaziai varikliai kaip ir visi elektros varikliai skirstomi į sinchroninius ir asinchroninius. Daugiafaziuose

varikliuose statoriaus apvijos gali būti „tikrosios“ daugiafazės, kai visos fazių vijos jungiamos žvaigžde (Lipo 1980), ir turi vieną neutralę, arba, nagrinėjant šešiafazio variklio atvejį, gali būti dubliuojamos trifazės apvijos, perstumtos per 30 elektrinių laipsnių, taip gaunant dvigubos trifazės apvijos (angl. *split-phase six phase*) šešiafazį variklį, turintį dvi neutralės. Šešiafazio variklio su dviem neutralėmis statoriaus apvijų jungimo schema pavaizduota 1 pav.

Atitinkamai, pridėdam dar daugiau trifazių apvijų, galima įgyvendinti devynių ir daugiau fazių variklį (Takami, Matsumoto 1993; Khan 2008), tačiau neverta daryti fazių skaičiaus didesnio nei 15, nes variklio efektyvumo didėjimas greitai pasiekia asimptotę (Ferraris, Lazzari 1983).



1 pav. Sistema su šešių fazių asinchroniniu varikliu. Statoriaus apvija yra dvigubos trifazės apvijos tipo, apvijos perstumtos per 30°
Fig. 1. Asynchronous 6-phase motor drive. Split-phase stator winding configuration, windings shifted by 30°

Nuo daugiafazio variklio vijų jungimo priklauso ir valdymo strategijos tiek darbo, tiek galimų gedimų (atviros ar trumpai sujungtos apvijos, sugedusio inverterio galios pakopos rakt) metu. Daugiafaziai varikliai gali veikti su viena ar daugiau atvirų apvijų, bendruoju atveju daugiafazis variklis gali veikti, kol neveikiančių fazių skaičius neviršija $n < 3$ (Levi *et al.* 2007). Dingus vienai ar daugiau fazių, gali būti taikomos kelios valdymo strategijos (Apsley, Williamson 2006; Zhao, Lipo 1996): palaikyti fazines nominaliųjų verčių srovės, prarandant dalį sukimo momento, arba jas padidinti, kompensuojant sugedusią apviją ir atkuriant nominalųjį sukimo momentą. Ypač lengva gedimų valdymo strategija gali būti pritaikoma, jeigu variklio apvijos organizuotos $n = a \times k$ pavidalu, čia a – fazių skaičius apvijoje; k – apvijų skaičius (Jahns 1980). Sugedus, pvz., tokio variklio, kaip pavaizduota 1 pav., vienai iš fazių, gali būti tiesiog atjungiamas visa trifazė apvija, kurioje įvyko gedimas, ir variklis veiktu toliau, tačiau prarastų pusę nominaliojo sukimo momento ir galios. Pasaulyje paplitę elektros tinklai yra tik trijų fazių, tad dažniausiai daugiafaziams varikliams energiją tiekia specialūs prietaisai, vadinami dažnio keitikliais. Dažnio keitiklis jungiamas į standartinį trifazį ar vienfazį tinklą, o jo išėjime formuojama daugiafazė kintamojo dažnio ir amplitudės įtampa, kuria maitinamas daugiafazis variklis. Keičiant dažnį ir amplitudę valdomi variklio sukimosi greitis ir sukimo momentas. Įtampos keitikliuose naudojami greiti IGBT ar MOSFET struktūros tranzistoriai, kurių praleidžiamos srovės yra ribotos, tad sunku pasiekti didelę galią (Benatmane, McCoy 1998). Vienas iš šios problemos sprendimo būdų – daugiafazių variklių naudojimas, nes šių variklių apvijomis teka

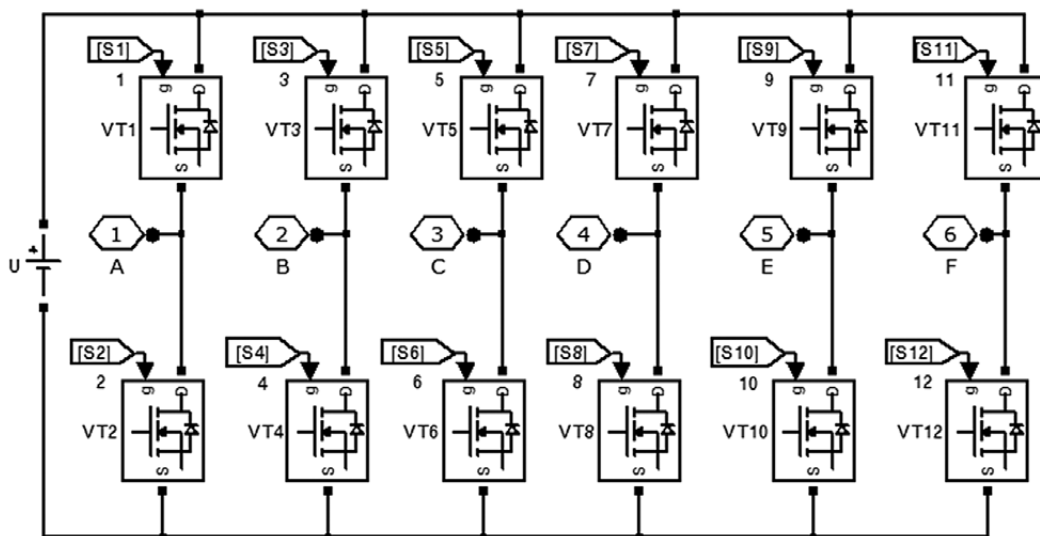
mažesnės srovės, lyginant su tos pačios galios trifaziais varikliais, tad galima naudoti tranzistorius su mažesnėmis puslaidininkinėmis sandūromis, kurių veikimo sparta didesnė. Šiame darbe siūloma šešiafazio variklio įtampos formavimo algoritmų efektyvumo vertinimo metodika ir pateikti sinusinio impulso skvarbos moduliavimo – SISM (angl. *Sinusoidal pulse width modulation, SPWM*) įtampos formavimo algoritmo vertinimo rezultatai.

Įtampos formavimo algoritmų vertinimo metodika

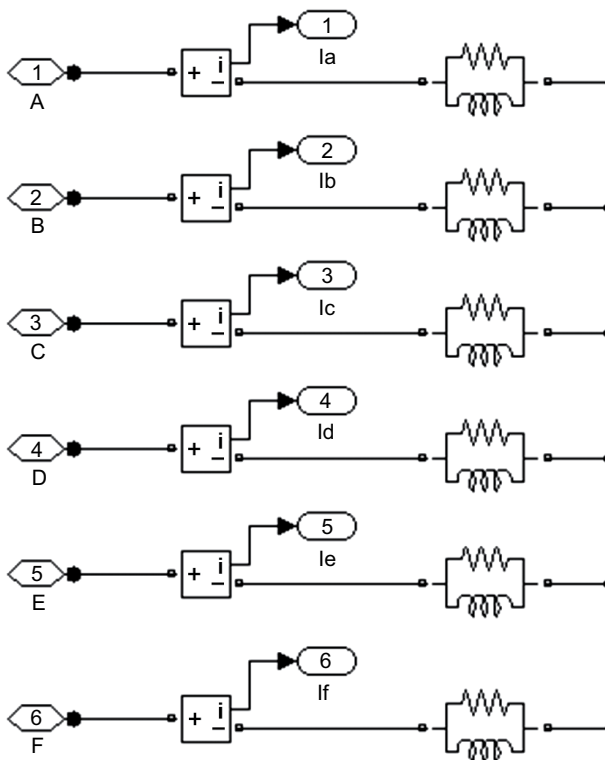
Įtampos formavimo metodai tiriami modeliuojant Matlab Simulink terpėje. Šiam tikslui buvo sukurtas šešiafazio inverterio modelis (2 pav.) ir simetrinė induktyvioji apkrova, naudojama variklio statoriaus apvijoms imituoti. Apkrova, pavaizduota 3 pav., sudaryta iš induktyvumų-rezistorių šakų, sujungtų į žvaigždę. Jų $L = 5$ mH ir $R = 5 \Omega$ parinkti taip, kad atitiktų tipinių kintamosios srovės elektros variklių apvijų statinius parametrus (Chiver *et al.* 2010).

Šis modelis visiškai neatitinka šešiafazio variklio, nes neįvertina apvijų tarpusavio induktyvumo bei kitų svarbių variklio parametrų, tačiau pradinėje įtampos formavimo metodų tyrimo fazėje tinka visiškai netinkamiems formavimo algoritmams identifikuoti.

Įtampos formavimo algoritmai buvo vertinami dviem etapais. Pirmame etape inverteris buvo apkraunamas 3 pav. pavaizduota apkrova, ir vykdomas modeliavimas. Nusistovėjus pereinamiesiems virsmams apkrovoje, buvo matuojamos srovės fazėse. Srovės buvo filtruojamos antrosios eilės žemųjų dažnių filtru, kurio atkirtos



2 pav. Šešiafazio dažnio keitiklio Matlab Simulink modelis
Fig. 2. Matlab Simulink model of a six-phase inverter



3 pav. Simetrinės šešiafazės apkrovos, imituojančios statoriaus apvijas, Matlab Simulink modelis

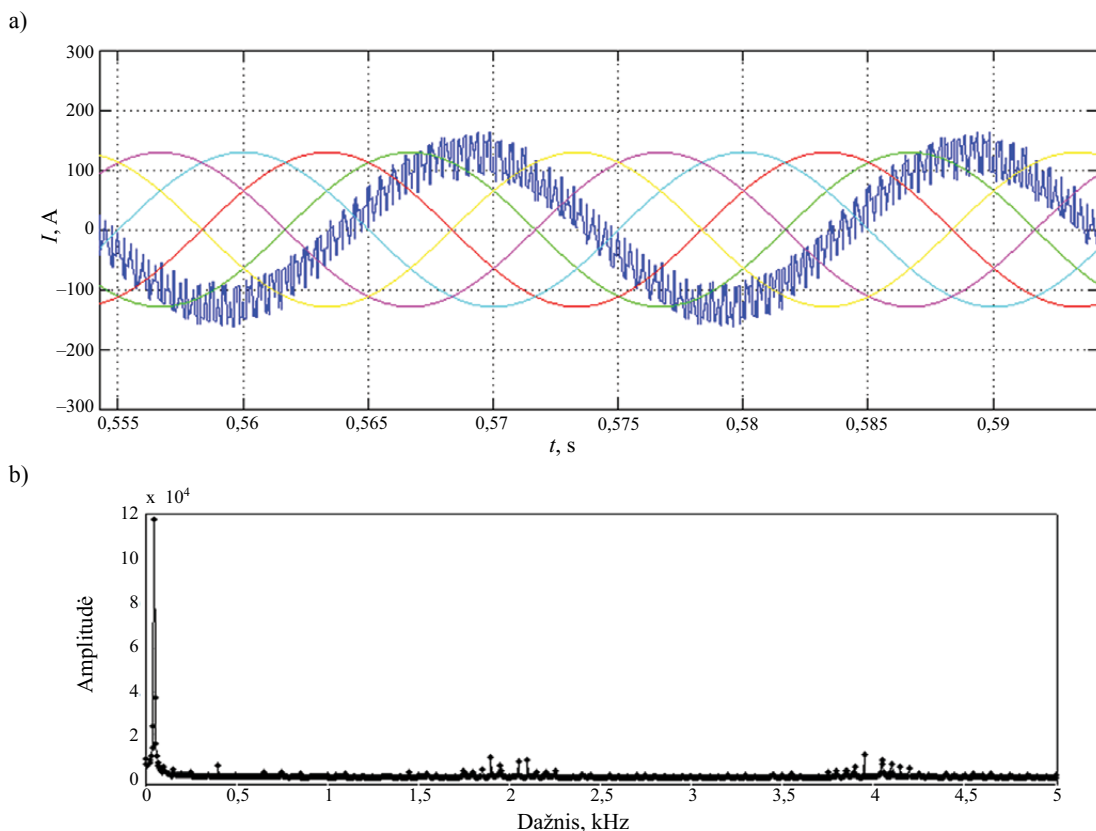
Fig. 3. Matlab Simulink model of a six-phase symmetrical load for stator windings simulation

dažnis $f_{atk} = 200$ Hz. Buvo filtruojama norint pašalinti nešlio sukuriamus triukšmus. Gautų nufiltruotų srovių epiūros (viena kreivė dėl vaizdumo palikta nefiltruota) pateiktos 4 pav., a. Taip pat, naudojant Matlab Simulink integruotas priemones, buvo skaičiuojamas nefiltruotos fazės spektras (4 pav., b) ir harmoniniai iškraipymai (angl. *total harmonic distortion*, THD).

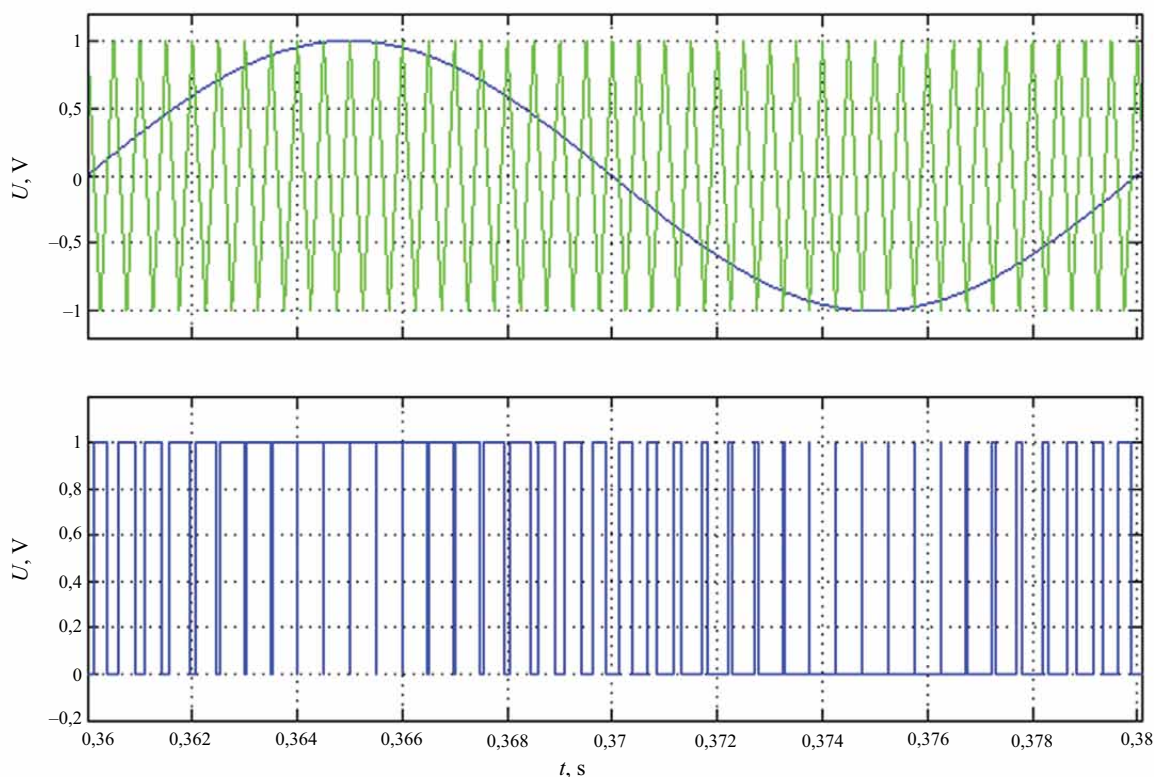
Antrame etape buvo atjungiamą induktyvioji apkrova ir prijungiamas diodų tiltelis su varžine apkrova. Šiuo metodu buvo vertinama, kiek įtampos gaunama po išlyginimo, taip nustatant, kiek įtampos buvo prarasta dėl įtampos formavimo metodo netobulumo.

Sinusinio impulso skvarbos moduliavimo įtampos formavimo metodas

Sinusinio impulso skvarbos moduliavimo (SISM) metodas plačiai naudojamas vienfaziuose inverteriuose. Taip pat, papildant etaloninių sinusoidžių signalus trečiaja harmonika (Salim, Salim 2001), šis metodas taikomas ir trifaziuose dažnio keitikliuose. Formuojant įtampą šiuo metodu, pirmiausia sintezuojama etaloninė sinusoidė, kurios dažnis lygus norimos gauti įtampos dažniui, tuomet ši sinusoidė lyginama su tokios pat amplitudės, tik kur kas didesnio dažnio „pjūklė“ formos signalu.



4 pav. Modeliavimo rezultatai: a – fazių srovės apkrovus inverterį simetrine šešiafaze apkrova; b – nefiltruotos srovės spektras
Fig. 4. Simulation results: a – phase currents with symmetrical load; b – spectrum of unfiltered current



5 pav. SISM įtampos formavimo metodo valdymo impulsų kūrimo principas
 Fig. 5. Principle of generation of SPWM control signals for inverter legs

Nuo pjūklo signalo dažnio priklauso inverterio raktų junginėjimosi dažnis (angl. *switching frequency*). Jis dar gali būti vadinamas nešlio dažniu (angl. *carrier frequency*). Jeiigu laiku t , sinusinio signalo vertė didesnė nei „pjūklo“, generuojamas galios pakopos raktų valdymo signalas – loginis „0“, jei mažesnė – loginis „1“. Valdymo signalų formavimo procesas pavaizduotas 4 pav. Šešifaziu atveju generuojamos šešios sinusoidės, kurių fazės perstumtos per 60° . Visos jos palyginamos su „pjūklu“, taip gaunami šeši loginiai valdymo signalai, valdantys galios pakopos raktų poras. Viršutiniam poros raktui siunčiamas neinvertuotas, o apatiniam – invertuotas loginis signalas.

Modeliavimo rezultatai

Buvo modeliuojamas šešifazis dažnio keitiklis, formuojantis įtampą SISM metodu. Keitiklio išėjimo įtampos dažnis $f = 50$ Hz, nešlio dažnis $f_n = 2$ kHz, galios pakopa maitinama 400 V nuolatine įtampa.

Modeliuojant buvo matuojami fazių srovių harmoniniai iškraipymai ir spektras. Kadangi ir apkrova, ir galios pakopa yra simetrinės, matavimai buvo atliekami tik vienoje fazėje. Modeliuojant gauti srovės harmoniniai iškraipymai neviršijo 0,23. Gautame srovės spektre, pavaizduotame 4 pav., b, matome pagrindinio 50 Hz dažnio dedamąją,

kuri yra didžiausia, ir 2 kHz nešlio dedamąją. Iš pateikto grafiko matyti, kad pagrindinė dedamoji yra apytiksliai 12 kartų didesnės amplitudės, palyginti su kita didžiausia spektro dedamąją.

Modeliavimas buvo pakartotas, vietoje simetrinės induktyviosios apkrovos prijungus diodų tiltelį, apkrauta 5Ω rezistoriumi.

Modeliuojant keitiklį sujungtą su tilteliu, ant apkrovos rezistoriaus buvo gauta 373 V įtampa, kuri sudaro 93 % galios pakopos maitinimo įtampos. Lyginant su trifaziu keitikliu, kuriame veikė geriausias iš žinomų (Salim, Salim 2001) įtampos formavimo algoritmų, buvo gauta 384 V, o tai sudaro 96 % maitinimo įtampos.

Išvados

1. Atlikta darbų apie šešifazius variklius apžvalga parodė, kad yra dvi šešifazių variklių rūšys: „dvigubos trifazės apvijios“ šešifaziai varikliai, kurių statoriuose yra dvi trifazės apvijios, perstumtos per 30 elektrinių laipsnių, ir „tikri“ šešifaziai varikliai, kuriuose šešių fazių apvijios sujungtos žvaigžde.
2. Atliekant daugiafazių variklių analizę, nustatyta, kad tokie varikliai iš prigimties yra patikimesni, nes, įvykus gedimui n -fazėje sistemoje, variklis, taikant specialius

- valdymo algoritmus, gali veikti toliau, jeigu sugedusių fazių skaičius neviršija $n < 3$.
3. Sukurtas šešiafazio variklio statoriaus modelis neleidžia tiksliai modeliuoti dažnio keitiklio ir variklio sąveikos, nes modelyje trūksta svarbių variklio parametrų, tokių kaip vijų tarpusavio induktyvumas, statoriaus ir rotorius tarpusavio induktyvumas, gaunamas sukimo momentas, apsukų skaičius ir kt.
 4. Modeliuojant šešiafazį dažnio keitiklį, apkrautą induktyviaja apkrova, kurio galios pakopos maitinimo įtampa – 400 V, formuojamos įtampos dažnis – 50 Hz, nešlio dažnis – 2 kHz, įtampos formavimo metodas – SISIM, gauti tokie rezultatai: fazių srovių harmoniniai iškraipymai: 0,23; pagrindinio dažnio spektro dedamoji yra 12 kartų didesnė už artimiausią didžiausią dedamąją; inverterio išėjimo įtampa išlyginus diodų tilteliu – 373 V, tai sudaro 93 proc. galios pakopos maitinimo įtampos.

Literatūra

- Apsley, J. M.; Williamson, S. 2006. Analysis of multi-phase induction machines with winding faults, *IEEE Transactionson Industry Applications* 42(2): 465–472. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2005.863915>
- Atkinson, G. J.; Mecrow, B. C.; Jack, A. G.; Atkinson, D. J.; Sangha, P.; Benarous, M. 2005. The design of fault tolerant machines for aerospace applications, in *Proc. of IEEE International Conferencen Electric Machines and Drives IEMDC, San Antonio, TX*. San Antonio, 1863–1869.
- Benatmane, M.; McCoy, T. 1998. Development of a 19 MW PWM converter for U.S. Navy surface ships, in *Proc. of International Conferencen Electric Machines ELECSHIP, Istanbul, Turkey*. Istanbul, 109–113.
- Bojoi, R.; Tenconi, A.; Profumo, F.; Farina, F. 2005. Dual-source fed multi-phase induction motor drive for fuel cell vechicles: topology and control, in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialists Conference PESC, Recife, Brazil*. Recife, 2676–2683.
- Chiver, O.; Petrean, L.; Neamt, L.; Erdei, Z. 2010. Study regarding end winding inductance of three phase A. C. windings in a single layer, in *Proc. of International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment, Bucharest, Romania*. Bucharest, 22–26.
- Ferraris, P.; Lazzari, M. 1983. Phase numbers and their related effects on the characteristics of inverter fed induction motor drives, in *Proc. of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting IAS, Mexico city, Mexico*. Mexico city, 494–502.
- Jahns, T. M. 1980. Improved reliability in solid-state AC drives by means of multiple independent phase-drive units, *IEEE Transactions on Industry Applications* 6(3): 321–331. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.1980.4503793>
- Khan, K. S. 2008. *Comparative Analysis of Multi Phase Machines*. Master's thesis in the international master's programme in electric power engineering. Chalmers University of Technology. Gotenborg, Sweden. 53 p.
- Levi, E.; Bojoi, R.; Profumo, F.; Toliyat, H. A.; Williamson, S. 2007. Multiphase induction motor drives – a technology status review, *IET Electr. Power Appl.* 1(4): 489–516. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-epa:20060342>
- Lipo, T. A. 1980. A d-q model for six phase induction machines, in *Proc. of International Conferencen Electrical Machines, Athens, Greece*. Athens, 860–876.
- Salim, Z.; Salim, K. M. 2001. Generation of pulse width modulation (pwm) signals for three-phase inverter using a single-chip microcontroller, *Jurnal Teknologi* 34(D): 1–12.
- Takami, H.; Matsumoto, H. 1993. Optimal pulse patterns of a nine-phase voltage source PWM inverter for use with a triple three-phase wound AC motor, *Electrical Engineering in Japan* 113(6): 102–113. <http://dx.doi.org/10.1002/eej.4391130610>
- Terrien, F.; Siala, S.; Noy, P. 2004. Multiphase induction motor sensorless control for electric ship propulsion, in *Proc. of IEE Power Electronics, Machines and Drives Conference PEMD, Edinburgh, Scotland*. Edinburgh, 556–561.
- 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>

ANALYSIS OF VOLTAGE FORMING METHODS FOR MULTIPHASE INVERTERS

T. Lipinskis

Abstract

The article discusses advantages of the multiphase AC induction motor over three or less phase motors. It presents possible stator winding configurations for a multiphase induction motor. Various fault control strategies were reviewed for phases feeding the motor. The authors propose a method for quality evaluation of voltage forming algorithm in the inverter. Simulation of a six-phase voltage source inverter, voltage in which is formed using a simple SPWM control algorithm, was performed in Matlab Simulink. Simulation results were evaluated using the proposed method. Inverter's power stage was powered by 400 V DC source. The spectrum of output currents was analysed and the magnitude of the main frequency component was at least 12 times greater than the next biggest-magnitude component. The value of rectified inverter voltage was 373 V.

Keywords: multiphase inverter, voltage forming method, multiphase induction motor, model of a six-phase voltage source inverter.