

Vpliv modulacijske frekvence na izgube elektromotornega pogona, harmonsko popačenje toka in temperaturo asinhronskega motorja

Tine Marčič¹, Gorazd Štumberger^{2,1}, Miralem Hadžiselimović^{2,1}, Ivan Zagradišnik^{2,1}

¹TECES, Tehnološki center za električne stroje, Gosposvetska 84, 2000 Maribor, Slovenija

²Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova 17, 2000 Maribor, E-pošta: marcic@teces.si, gorazd.stumberger@uni-mb.si, miralem.h@uni-mb.si, ivan.zagradisnik@uni-mb.si

Povzetek. Delovanje elektromotornega pogona spremljive hitrosti spremljajo izgube v pretvorniku in motorju, ki so odvisne od modulacijske frekvence. V delu je predstavljena analiza vpliva modulacijske frekvence na izgube celotnega pogona, pretvornika in površinsko hlajenega trifaznega asinhronskega motorja zaprte izvedbe s kratkostično kletko. Vpliv modulacijske frekvence je ovrednoten na podlagi primerjave rezultatov meritev segrevanja nazivno obremenjenega asinhronskega motorja, ki je napajan s pretvornikom. Pri tem so referenčne vrednosti amplitude in frekvence izhodnih napetosti pretvornika ves čas konstantne, modulacijska frekvenca pa se spreminja. V delu predstavljeni izsledki kažejo, da se izgube pretvornika večajo, izgube motorja pa manjšajo z večanjem modulacijske frekvence. Za testni pogon je določena modulacijska frekvenca, pri kateri so izgube celotnega pogona najmanjše. Podani rezultati kažejo, da je harmonsko popačenje toka motorja neposredno povezano s povečanjem izgub in temperaturo motorja.

Ključne besede: elektromotorni pogon, pretvornik, modulacijska frekvenca, harmonsko popačenje, izgube

The impact of modulation frequency on losses, current harmonic distortion and motor temperature in an induction motor drive

Extended abstract. Technology advances in power electronics made it possible to increase the voltage and power rating of switching components, resulting in more versatile and compact power electronic converters. Usage of them in electric drives is growing, although, all the effects of using a converter to feed an induction machine are still not satisfactory investigated. Both, the manufacturers and users of adjustable-frequency drives are concerned about the increase of losses and temperature of the driven motor, pulsating and insufficient maximal torque, and increased noise, bearing currents and winding insulation stresses, which could be caused by converter supply, resulting in a shortened motor life. Thus, it is important to investigate the impact of modulation (carrier) frequency on losses of the electric drive, i.e. the motor and the converter losses.

The heat generated in an adjustable-frequency drive motor depends primarily on harmonic content of the supply currents. Low current harmonic distortion generally causes only a small increase in losses and only a small increase in motor's temperature. However, higher current harmonic distortion normally results in higher loss increase and greater heat generation within the machine. Stranges and Dymond [1] concluded that the machine design, especially

the ventilation, has a significant impact on the difference in temperature rise due to the increased harmonic losses. Valenzuela, Tapia and Rooks [2] investigated the variation of cooling air flow, iron losses and current harmonic spectrum in totally enclosed fan-cooled induction motors in an open-loop scalar control mode. Bell and Sung [3] presented motor insulation problems which are connected to usage of drives that enable faster switching rates in the inverters based on IGBTs (insulated-gate-bipolar-transistors).

This work investigates the impact of modulation (carrier) frequency on motor losses, converter losses and losses of the entire drive, in the case of open loop controlled induction motor (IM) drive supplied by a voltage source inverter (VSI). A totally enclosed fan-cooled squirrel-cage IM was loaded with the rated output power. A series of test was performed, where the reference values of the VSI output voltages and frequency generated by the vector modulation were the same during all tests while the modulation frequency was set to 1, 2, 4, 6, 8 and 10 kHz. A comparative analysis based on measurements of the motor temperatures and currents, and measurements of the motor, converter and entire drive losses, is performed.

The experimental set-up is shown in Fig. 2. Data of the tested IM is presented in Table 1. The distortion factor of measured currents is calculated by (1). Temperature rise test results for the IM supplied by the converter at different modulation frequencies are given in Table 3, while Table 2

presents the temperature rise test results obtained by supplying the IM from a synchronous generator at the same loading conditions. The motor's current waveforms at different modulation frequencies are shown in Fig. 7, while Fig. 5 shows the motor's current waveform when it was supplied by the synchronous generator. Fig. 6 shows motor, converter and total drive losses as functions of the modulation frequency. Test results show that the converter losses increase and the motor losses decrease with the increase of the modulation frequency (Table 3 and Fig. 6). Consequently, the modulation frequency with the minimal drive losses is identified (Fig. 6). Also, the paper shows a unique relation among the increase of current harmonic distortion, the increase of motor losses and the increase of motor temperature (Table 3), which all are caused by the decrease of modulation frequency.

Key words: electric drive, converter, modulation frequency, harmonic distortion, losses

1 Uvod

V zadnjem času je tehnološki napredek na področju stikalnih elementov močnostne elektronike omogočil izdelavo pretvornikov, ki so cenovno ugodnejši, bolj prilagodljivi in kompaktni. Nenazadnje se je napetost in moč teh stikalnih elementov v zadnjih letih precej povečala. Posledično se je povečala razširjenost pogonov spremenljivih hitrosti z asinhronskimi motorji, ki so napajani in vodeni s pretvorniki. Ob tem pa se veča tudi zaskrbljenost, tako uporabnikov kot tudi proizvajalcev motorjev, saj posledice uporabe pretvornikov za napajanje asinhronskih strojev še vedno niso povsem raziskane.

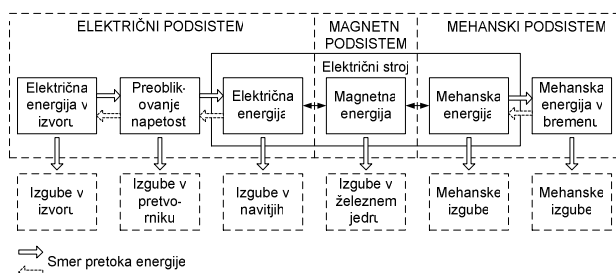
Proizvajalec motorja ali celotnega pogona želi plasirati konkurenčen izdelek, medtem ko želi uporabnik imeti zagotovilo, da temperatura motorja pri polni obremenitvi ne bo presegla mejnih vrednosti, ki so določene z razredom izolacije. Zaskrbljenost prizadetih se nanaša predvsem na: povečanje izgub in s tem povezane temperature motorja, povečanje pulzirajočih vrtilnih momentov, povečanje hrupnosti, nezadovoljiv maksimalni vrtilni moment, povečanje ležajnih tokov, dodatne napetostne obremenitve navitij in seveda posledično zmanjšanje življenjske dobe motorja. Uporabniki so tudi negotovi pri nabavi pretvornikov, saj ne vedo kakšen vpliv ima drugačna modulacijska frekvenca na izgube celotnega pogona. V splošnem namreč velja, da je dodatna proizvedena toplota, če motor uporabimo v pogonu spremenljive hitrosti, posledica harmonske vsebine toka. Nizka vsebnost višjih harmonskih komponent tako pomeni majhno povečanje izgub in s tem majhno povečanje temperature. Velja seveda tudi nasprotno. Posledica večje vsebnosti višjih harmonskih komponent v toku je večje povečanje izgub in s tem temperature motorja.

V delu [1] sta avtorja med drugim raziskala povečanje temperature velikih asinhronskih motorjev zaradi povečanja izgub, ki je posledica napajanja s pretvornikom, za različne načine hlajenja in izvedbe ohišja motorjev. Ugotovila sta, da je povečanje modulacijske frekvence pretvornika iz 3 kHz na 6 kHz povzročilo zmanjšanje temperature motorja pri enaki obremenitvi. Pri tem trdita, da je odvod toplote površinsko hlajenih motorjev zaprte izvedbe zelo slab ter da ima vsakršno povečanje izgub velik vpliv na temperaturo motorja s takšnim ohišjem in načinom hlajenja. Vpliv spremenjene hitrosti hladilnega zraka, spremenjenih izgub v železu in spremenjenega harmonskega spektra toka površinsko hlajenih motorjev zaprte izvedbe v odprtozančnem pogonu spremenljive hitrosti so raziskali avtorji v [2]. Frekvenco izhodne napetosti pretvornika so spreminjali v območju od 0,2 do 1,4 nazivne. Avtorji ugotavljajo, da je potrebno opraviti eksperimente s katerimi lahko določimo globalni koeficient prenosa toplote za ovrednotenje vplivov spremenjene hitrosti hladilnega zraka na temperaturo motorja. Medtem, ko se prej omenjeni deli ukvarjata s termičnimi obremenitvami motorja, se delo [3] loteva napetostnih obremenitev. V primerjavi s starejšimi izvedbami, pretvorniki z IGBT tranzistorji (insulated-gate-bipolar-transistor) omogočajo generiranje izhodne napetosti z višjo modulacijsko frekvenco, oziroma spreminjanje modulacijske frekvence v precej večjem področju (tudi do 20 kHz). Ta vrsta pretvornikov proizvede napetostne valove, ki so izjemno hitri in strmi [3]. Motorji, ki so grajeni za napajanje iz sinusnega izvora napetosti v splošnem pri napajanju s temi pretvorniki tečejo tiše in z boljšim izkoristkom. Po drugi strani pa je izolacija (napetostno) mnogo bolj obremenjena, kar lahko povzroči pospešeno staranje.

V tem delu je raziskan vpliv modulacijske frekvence pretvornika na harmonsko vsebino toka. Slednja je neposredno povezana z izgubami in temperaturo asinhronskega motorja pri trajni obremenitvi. Na osnovi meritev je ovrednoten vpliv modulacijske frekvence pretvornika na izgube celotnega pogona, pretvornika in motorja. Meritve so bile opravljene pri nazivni obremenitvi motorja, konstantnih referenčnih vrednostih amplitude in frekvence izhodnih napetosti pretvornika ter različnih modulacijskih frekvencah pretvornika.

2 Izgube elektromotornega pogona

Za delovanje elektromotornega pogona je značilna pretvorba energije iz ene oblike v drugo, proces pretvorbe pa spremljajo izgube, kot kaže slika 1. Pretvornik pretvarja vhodne napetosti in toke v izhodne napetosti in toke, kar je povezano z izgubami v izvoru in pretvorniku. V električnem podsistemu električnega stroja nastopajo izgube v navitjih, v magnetnem podsistemu nastopajo izgube v železnem jedru, v mehanskem podsistemu pa mehanske izgube [4].



Slika 1. Prikaz pretvarjanja energije in izgube v električnem pogonu

Figure 1. Energy conversion and losses in electric drives

2.1 Izgube pretvornika

Izgube pretvornika so povezane s številom preklpov tranzistorjev. Pri istih referenčnih vrednostih izhodnih napetosti in istem postopku modulacije se število preklpov tranzistorjev večja z večanjem modulacijske frekvence. Napetost in tok se v času spremembe stanja tranzistorja spreminjata, njun produkt pa predstavlja trenutno izgubno moč na tranzistorju. Pri večji modulacijski frekvenci se bo stanje tranzistorjev večkrat spremenilo. Torej bodo pri večji modulacijski frekvenci izgube pretvornika večje. Velja seveda tudi obratno, pri manjši modulacijski frekvenci bodo izgube pretvornika manjše.

2.2 Izgube motorja

V delu uporabljen postopek vektorske modulacije temelji na ujemanju čez interval modulacije povprečenih trenutnih vrednosti izhodnih napetosti pretvornika z referenčnimi. Izhodne napetosti pretvornika poženejo toke, ki vsebujejo poleg osnovne tudi višje harmonske komponente. Vsebnost višjih harmonskih komponent v toku motorja je odvisna od modulacijske frekvence in se z višanjem le te niža. Povečanje višjih harmonskih komponent v toku povzroča povečanje izgub v navitjih in železu motorja. Izgube v navitjih se povečajo, ker višje harmonske komponente povzročajo povečanje efektivne vrednosti toka. Kvadrat efektivne vrednosti toka je namreč enak vsoti kvadratov efektivnih vrednosti posameznih harmonskih komponent. Histerezne izgube se povečajo, ker višje harmonske komponente toka povzročijo dodatne delne premagnetizacije železa. Te se kažejo kot povečanje površine glavne histerezne zanke ali pa celo kot notranje histerezne zanke, ki nastanejo znotraj glavne. Znano je, da so histerezne izgube proporcionalne vsoti površin glavne in vseh notranjih histereznih zank. Povečanje vrtničnih izgub pa je posledica hitrejšega spreminjanja gostote magnetnega pretoka, ki je prav tako posledica višjih harmonskih komponent toka.

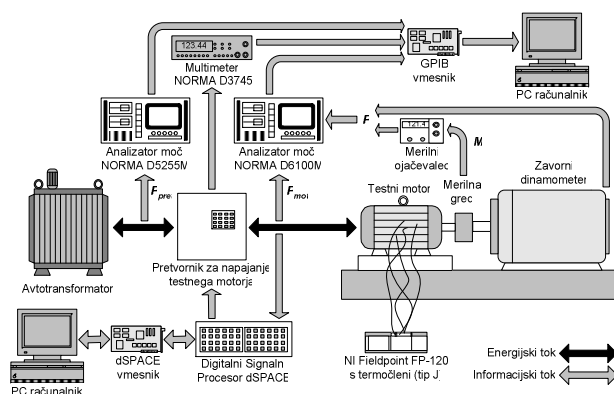
3 Opis eksperimenta in opreme

Za ovrednotenje vplivov modulacijske frekvence na izgube motorja, pretvornika in celotnega pogona, je

treba meriti sprejeto moč pretvornika, sprejeto moč motorja in oddano moč na gredi motorja.

Primerjalne meritve segrevanja motorja pri napajanju s pretvornikom so bile izvedene tako, da smo pri konstantni oddani moči na gredi motorja 830 W nastavili konstantno amplitudo in frekvenco referenčnih vrednosti izhodnih napetosti pretvornika, modulacijsko frekvenco vektorske modulacije pa smo spreminjali. Efektivne vrednosti faznih napetosti 230 V frekvence 50 Hz na izhodu pretvornika smo tvorili pri modulacijskih frekvencah 1, 2, 4, 6, 8 in 10 kHz. Analizator moči Norma D5255M je bil uporabljen za meritev napetosti, tokov in sprejete moči pretvornika, spektralni analizator moči Norma D6100M pa za meritev tokov in sprejete moči motorja. Oddana moč motorja je bila določena s pomočjo izmerjenega vrtilnega momenta in vrtiljavev. Uporabljeni eksperimentalni sistem je shematsko prikazan v sliki 2.

Meritve segrevanja motorja so bile izvedene tudi pri napajanju iz sinhronskega generatorja, in sicer pri enakih pogojih kot pri napajanju s pretvornikom.



Slika 2. Shematska predstavitev eksperimentalnega sistema

Figure 2. Schematic presentation of experimental set-up

3.1 Pretvornik

Uporabljeni pretvornik je sestavljen iz šest pulznega diodnega usmernika, kondenzatorja v enosmernem vmesnem krogu pretvornika in tranzistorskega razsmernika. Slednji je sestavljen iz treh IGBT modulov SKM 50 GB 123 D ($V_{max}=1200V$, $I_{cmax}=50A$) in pripadajočih gonilnikov SKHI 22 A, proizvajalca Semikron. Vhodni signali gonilnikov vrat posameznih tranzistorjev so generirani z digitalnim signalnim procesorjem TMS320F240 (Texas Instruments), ki je podrejeni procesor v krmilnem sistemu dSPACE PPC 1103 in teče s taktom 20 MHz. V nadrejenem procesorju krmilnega sistema dSPACE PPC 1103, IBM PowerPC 604e s taktom 400 MHz, se izvaja vektorska pulzno širinska modulacija. Princip tvorjenja izhodne napetosti na podlagi želenega vektorja izhodne napetosti je razložen v [4]. Izhodna napetost pretvornika se tako generira s pomočjo preklapljanja tranzistorjev, komutacija traja 5 μs (od tega znaša mrtvi čas 4 μs).

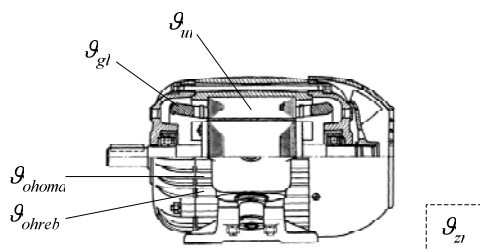
$2p$	U (V)	f (Hz)	I (A)	P (kW)	n (1/min)	$\cos\varphi$
6	400	50	2,85	0,83	950	0,66

Tabela 1. Nazivni podatki testnega motorja

Table 1. Rated data of tested motor

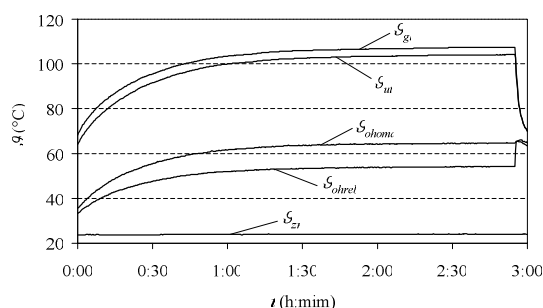
3.2 Motor

Uporabljen testni motor je trifazni površinsko hlajen asinhronski motor zaprte izvedbe s kratkostično kletko [5]. Vrtljaji rotorja so bili v termičnem ravnovesju pri vseh modulatorskih frekvencah praktično enaki, tako da je bil vpliv ventilacije, oziroma vpliv hitrosti hladilnega zraka na odvod toplote enak. V tabeli 1 so podane nazivne vrednosti motorja.



Slika 3. Skica namestitve termočlenov v motorju in na ohišju motorja

Figure 3. Positions of temperature sensors in the motor's winding and housing



Slika 4. Temperature na različnih delih motorja med segrevanjem pri frekvenci modulacije 2 kHz

Figure 4. Motor's temperatures between the temperature rise test at modulation frequency 2 kHz

3.3 Meritev temperature

Povečanje izgub motorja je neposredno povezano s povečanjem temperature motorja. Za ovrednotenje vpliva modulatorske frekvence na temperaturo motorja je bila za različne modulatorske frekvence določena temperatura navitja v termičnem ravnovesju tj. takrat ko se temperature na več delih stroja ne spreminjajo za več kot 2 K na uro [6]. Temperatura navitja motorja je bila določena s pomočjo meritve ohmske upornosti navitja statorja in ekstrapolacije krivulje upornosti med ohlajanjem do trenutka izklopa napajanja [7]. Med samo meritvijo segrevanja se je vršila kontrola temperatur v navitju in na ohišju motorja s termočleni, ki so bili pritrjeni na različna mesta motorja (slika 3), in sicer v:

θ_{gl} - glavo statorskega navitja, θ_{ut} - utor statorja, θ_{ohreb} - ohišje motorja (med hladilnimi rebri), θ_{ohoma} - ohišje motorja (pred priključno omarico). θ_{zr} označuje temperaturo okoliškega zraka. Primer poteka omenjenih temperatur med meritvijo je prikazan na sliki 4.

3.4 Harmonsko popačenje toka

Vpliv modulatorske frekvence na harmonsko popačenje toka je bilo ovrednoteno s pomočjo faktorja harmonskega popačenja toka (DF_I), ki je bil izračunan v skladu z (1). Pri tem a_k označuje amplitudo k -te harmonske komponente, k je red harmonske komponente n pa najvišji red harmonske komponente.

$$DF_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^n a_k^2}{a_1^2}} \quad (1)$$

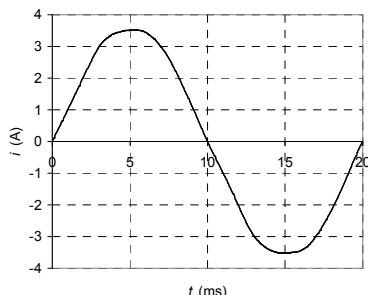
4 Rezultati meritev

Časovni poteki izmerjenih tokov motorja pri različnih modulatorskih frekvencah so prikazani na sliki 7. Tabela 3 podaja vrednosti izmerjenih električnih moči pretvornika, električnih in mehanskih veličin ter temperatur motorja pri različnih modulatorskih frekvencah (f_{mod} je modulatorska frekvenca, I je efektivna vrednost linijskega toka, DF_I je faktor harmonskega popačenja toka, $\Delta\theta$ je nadtemperatura navitja statorja v termičnem ravnovesju, P je mehanska oddana moč motorja na gredi, P_{mot} je sprejeta električna delovna moč motorja, P_{pret} je sprejeta delovna moč pretvornika, P_{izgmot} so izgube motorja, $P_{izgpret}$ so izgube pretvornika, P_{izgpog} so izgube celotnega pogona). Rezultate meritev segrevanja pri napajanju s sinhronskim generatorjem predstavlja tabela 2, obliko toka pa slika 5. Vse navedene vrednosti so določene v termičnem ravnovesju motorja.

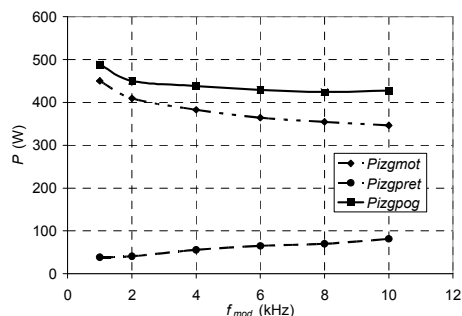
Rezultati podani v tabeli 3 in časovni poteki tokov na slikah 7 kažejo, da se s povečevanjem modulatorske frekvence zmanjšuje harmonsko popačenje toka, s tem pa tudi efektivna vrednost toka motorja. Posledično se z zmanjševanjem harmonskega popačenja toka zmanjšujejo tudi izgube in nadtemperatura motorja. Izgube pretvornika pa se s povečevanjem modulatorske frekvence povečujejo zaradi vse hitrejšega preklapljanja tranzistorjev in s tem povezanih preklopnih izgub. Slika 6 kaže, da so izgube celotnega pogona najmanjše pri modulatorski frekvenci 8 kHz, kjer je izkoristek pogona največji. Pri generiranju izhodne napetosti pri najvišji modulatorski frekvenci prihaja do izraza vpliv relativno velikih mrtvih časov pretvornika. Le-ti povzročijo majhno povečanje faktorja harmonskega popačenja toka v primerjavi z nižjimi modulatorskimi frekvencami.

Rezultati meritev pri napajanju testnega motorja iz sinhronskega generatorja so podani v tabeli 2. Oblika linijskega toka je podana na sliki 5. Rezultati kažejo, da je v primeru napajanja motorja s sinhronskim generatorjem efektivna vrednost toka med tistima, ki sta

bili izmerjeni pri napajanju s pretvornikom pri modulacijskih frekvencah 1 in 2 kHz. Efektivna vrednost toka neposredno vpliva na vrednost izgub in s tem na nadtemperaturo motorja. Izgube v navitjih testnega motorja predstavljajo poglavitni delež vseh izgub.



Slika 5. Oblika toka motorja pri napajanju iz sinhronskega generatorja
Figure 5. Current waveform for IM fed by a synchronous generator



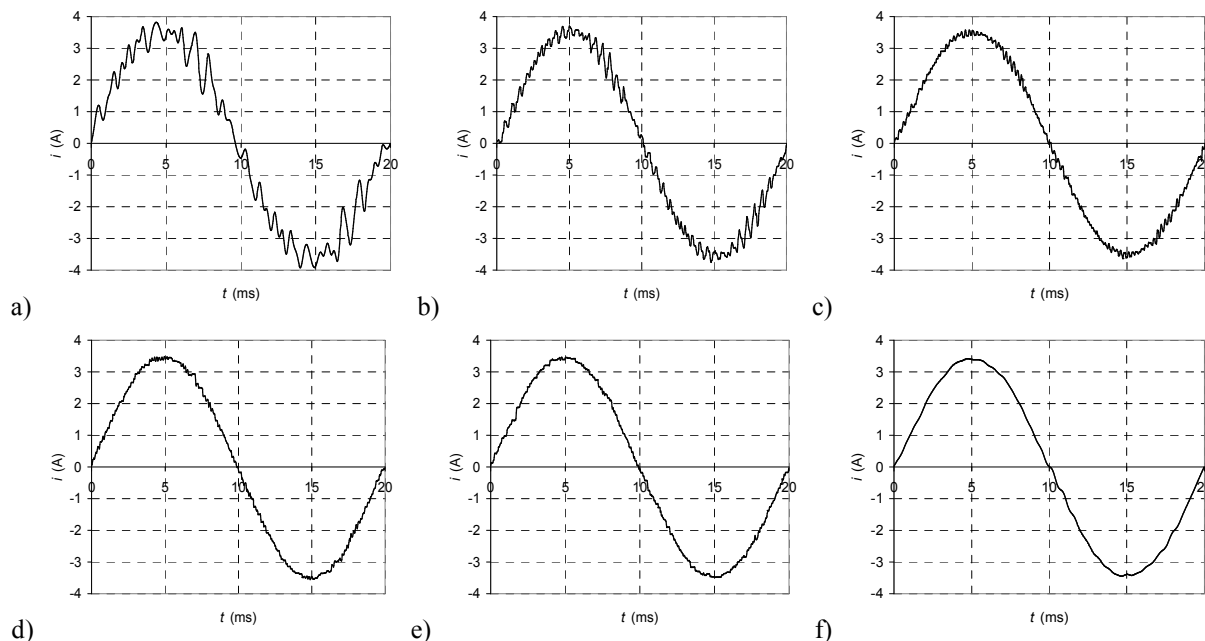
Slika 6. Izgube motorja, pretvornika in celotnega pogona v odvisnosti od modulacijske frekvence
Figure 6. Motor losses, converter losses and total drive losses as a function of the modulation frequency

I (A)	DF_1 (%)	$\Delta \vartheta_t$ (K)	P (W)	P_{mot} (W)	P_{izgmot} (W)
2,542	2,23	84,04	832,8	1245,8	413,0

Tabela 2. Rezultati meritev pri napajanju iz sinhronskega generatorja
Table 2. Results for IM fed by a synchronous generator

f_{mod} (kHz)	I (A)	DF_1 (%)	$\Delta \vartheta_t$ (K)	P (W)	P_{mot} (W)	P_{pret} (W)	P_{izgmot} (W)	$P_{izgpret}$ (W)	P_{izgpog} (W)
1	2,548	12,55	88,26	830,3	1280,4	1318,8	450,1	38,4	488,5
2	2,513	6,36	83,16	830,8	1240,3	1281,0	409,5	40,7	450,2
4	2,488	3,05	80,84	829,7	1212,5	1268,2	382,8	55,7	438,5
6	2,458	2,30	79,80	830,5	1194,9	1259,8	364,4	64,9	429,3
8	2,442	2,27	79,02	830,5	1184,9	1254,7	354,4	69,8	424,2
10	2,428	2,34	78,93	830,6	1176,8	1258,1	346,2	81,3	427,5

Tabela 3. Rezultati meritev pri različnih modulacijskih frekvencah
Table 3. Measurement results at different modulation frequencies



Slika 7. Oblike tokov motorja pri različnih modulacijskih frekvencah: a) 1, b) 2, c) 4, d) 6, e) 8 in f) 10 kHz
Figure 7. Current waveforms at different modulation frequencies: a) 1, b) 2, c) 4, d) 6, e) 8 and f) 10 kHz

Analitičen izračun motorja je za nazivno obremenitev in sinusno napajanje pokazal, da je v testnem motorju 69,5% izgub v navitju statorja, 18,2% izgub v navitju rotorja, 10,8% skupnih izgub v železu in 1,5% izgub trenja in ventilacije. Posledično je vrednost izgub motorja in njegova nadtemperatura med tistima, ki sta bili izmerjeni pri napajanju s pretvornikom pri modulacijskih frekvencah 1 in 2 kHz. Pri približno enaki učinkoviti vrednosti toka bi morale biti izgube motorja približno enake. Povečanje harmonskega popačenja toka pa bi pri enaki učinkoviti vrednosti toka pomenilo povečanje izgub v železu, ki pa so v testnem motorju mnogo manjše od izgub v navitjih.

5 Sklep

V delu je predstavljena analiza vplivov modulacijske frekvence na izgube elektromotornega pogona, pretvornika in testnega asinhronskega motorja. Za dani pogon je določena modulacijska frekvenca pri kateri so izgube obravnavanega elektromotornega pogona minimalne, izkoristek pa največji. V delu predstavljene metode meritev in iz njih izhajajoče ugotovitve je mogoče s pridom uporabiti pri izbiri modulacijskih frekvenc elektromotornih pogonov, z namenom doseganja čim boljših izkoristkov.

6 Literatura

- [1] N. Stranges, J. H. Dymond, How Design Influences the Temperature Rise of Motors on Inverter Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 39, no. 6, pp. 1584-1591, 2003.
- [2] M. A. Valenzuela, J. A. Tapia, J. A. Rooks, Thermal Evaluation of TEFC Induction Motors Operating on Frequency-Controlled Variable-Speed Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 2, pp. 692-698, 2004.
- [3] S. Bell, J. Sung, Will Your Motor Insulation Survive a New Adjustable-Frequency Drive?, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 5, pp. 1307-1311, 1997.
- [4] D. Dolinar, G. Štumberger, *Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov*, 2. izd., pogl. 1, str. 7-8, str. 47-50, pogl. 8, str. 269, Maribor, FERi, 2004.
- [5] I. Zagradišnik, B. Slemnik, *Električni rotacijski stroji*, 4. izd., pogl. 1, str. 150, Maribor, FERi, 2005.
- [6] *IEC Standard*, Publication 34-1, Rotating electrical machines, Part 1: Rating and performance, 1996.
- [7] M. Hadžiselimović, T. Marčič, M. Gajzer, I. Zagradišnik, Posebnosti električnih meritev eksplozijsko varnih motorjev, B. Zajc, *Zbornik dvanajste mednarodne Elektrotehniške in računalniške konference ERK 2003*, pp. 161-164, Ljubljana, Slovenska sekcija IEEE, 2003.

Tine Marčič je leta 2002 diplomiral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 2003 je zaposlen v Tehnološkem centru za električne stroje kot mladi raziskovalec. Ukvarja se s projektiranjem in preizkušanjem elektromehanskih pretvornikov s poudarkom na asinhronskih strojih. Tine Marčič je član študentske veje IEEE.

Gorazd Štumberger je diplomiral leta 1989 in magistriral leta 1992 na oddelku ERI Tehniške fakultete Univerze v Mariboru. V letu 1996 je doktoriral na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru, kjer je tudi zaposlen kot izredni profesor. Ukvarja se z modeliranjem in vodenjem elektromehanskih sistemov in elementov elektroenergetskega sistema. Dr. Gorazd Štumberger je član CIGRE, Compumag in IEEE.

Miralem Hadžiselimović je diplomiral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Od leta 2003 je zaposlen v laboratoriju za električne stroje kot asistent. Njegovo področje raziskav so rotacijski električni stroji s poudarkom na sinhronskih strojih.

Ivan Zagradišnik je diplomiral leta 1966 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, magistriral leta 1974 in doktoriral leta 1986 na elektrotehniški fakulteti v Zagrebu (Fakultet elektrotehnike i računarstva Zagreb). Po diplomi je bil do leta 1981 zaposlen v razvoju elektromotorjev v mariborski Elektrokovini. Od tedaj je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru. Leta 1997 je bil izvoljen za rednega profesorja za električne stroje. Njegovo področje raziskav so rotacijski in linearni električni stroji s poudarkom na asinhronskih strojih.