

IŠĖJIMO FILTRO TYRIMAS VIENFAZIO INVERTERIO SINUSINEI
ĮTAMPAI FORMUOTIAndrius Platakis¹, Vytautas Bleizgys², Tadas Lipinskis³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹andrius.platakis@vgtu.lt; ²vytautas.bleizgys@vgtu.lt; ³tadas.lipinskis@el.vgtu.lt

Santrauka. Pateikti vienfazio inverterio sinusinei įtampai formuoti išėjimo filtro tyrimo rezultatai. Išnagrinėtas inverterių principas, valdomųjų signalų formavimo būdai bei inverterio sandara ir labiausiai paplitusi topologija. Atlikti modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimai. Modeliuojant nustatytos inverterio išėjimo įtampos harmoninio iškraipymo (angl. *THD – Total Harmonic Distortion*) ribos pasirinktiems inverterio ir išėjimo filtro parametrams bei maksimali srovė, kuri teka per išėjimo filtro kondensatorių. Eksperimentiniam tyrimui sumontuotas iki 1 kW galios inverterio su išėjimo filtru maketas, kurio galios laipsnį sudarė raktai su IGBT tranzistoriais. Ištirti filtro droselio šerdies nuostoliai ir maksimali filtro kondensatoriaus srovė.

Reikšminiai žodžiai: įtampos šaltinio inverteris, išėjimo filtras, įtampos harmoniniai iškraipymai, nuostoliai droselyje.

Įvadas

Inverteris – tai įrenginys, gebantis iš nuolatinės įtampos formuoti reikiamo dažnio ir amplitudės kintamą įtampą bei srovę (Rashid 2006). Tokie įrenginiai reikalingi variklių sukimosi greičiui valdyti (angl. *ASD – Adjustable Speed Drive*), nepertraukiamo maitinimo šaltiniams (angl. *UPS – Uninterruptible Power Supply*) (Cortes et al. 2009), statiniams reaktyviosios galios kompensatoriams, lanksčioms kintamos įtampos perdavimo sistemoms (angl. *FACT – Flexible AC Transmission System*), įvairiems įtampos kompensatoriams, energijos keitikliams (Cha et al. 2010; Ilango et al. 2010) ir kt. Inverteris, kuris formuoja sinusinę įtampą su valdoma amplitude, dažniu ir faze, vadinamas įtampos šaltinio inverteriu (angl. *VSI – Voltage-Source Inverter*). Tokie inverteriai yra labiausiai paplitę dėl to, jog jie yra įtampos šaltinių analogai, o pramonėje būtent tokie šaltiniai yra reikalingi. Taip pat būna srovės šaltinio inverteriai (angl. *CSI – Current Source Inverter*). Juose formuojama reikiamų parametru kintamoji srovė. Tokie inverteriai naudojami vidutinės įtampos pramoniniuose įrenginiuose, kur reikalinga aukštos kokybės srovė.

Priimtiniams galios nuostoliams gauti tranzistoriai, naudojami inverteryje, privalo dirbti rakto režimu, todėl inverterio išėjimo įtampa yra impulsinė. Jai formuoti naudojami įvairūs impulso pločio moduliacijos (angl. *PWM – Pulse Width Modulation*) metodai. Kadangi išėjimo įtampa nėra sinusoidės pavidalo, ją sudaro daug harmonikų. Pagrindinę harmoniką užtikrina moduliacijos

būdas, kuris valdo raktų būsenas. Dažniausiai naudojami nešlio dažniu pagrįsti, pvz., sinuso, (angl. *SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation*), erdvinio vektoriaus (angl. *SV – Space Vector*) ir selektyvaus harmonikų šalinimo (angl. *SHE – Selective Harmonic Elimination*) moduliacijos būdai.

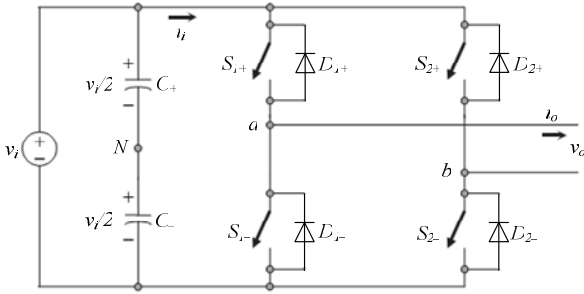
Įtampos šaltinių inverteriai generuoja įtampos impulsus, todėl apkrova turėtų būti induktyvinio pobūdžio, kad būtų gaunama sinuso dėsnio kintanti išėjimo srovė. Talpinio pobūdžio apkrova įtampos šaltinio inverteryje sukurtų didelius srovės šuolius. Tokiu atveju reikalingas induktyvusis filtras tarp inverterio išėjimo ir apkrovos. Kita vertus, srovės šaltinio inverteriai generuoja srovės impulsus, todėl apkrova turėtų būti talpinio pobūdžio, kad būtų gaunama sinuso dėsnio kintanti išėjimo įtampa. Induktyvinė apkrova srovės šaltinio inverteryje sukurtų didelius įtampos šuolius. Tokiu atveju reikalingas talpinis filtras tarp inverterio išėjimo ir apkrovos.

Vienfaziai įtampos šaltinių inverteriai gali būti dviejų topologijų: pusės ir viso tiltelio. Šių topologijų inverterių galia paprastai neviršija kelių kilovatų, tačiau jie plačiai naudojami maitinimo šaltiniuose, vienfaziuose nepertraukiamo maitinimo šaltiniuose, įvairiuose energijos keitikliuose ir kt.

Straipsnyje nagrinėjamas inverterio išėjimo filtras. Filtro parametru parinkimą sąlygoja konkrečios inverterio veikimo sąlygos. Darbe pateikiami išėjimo filtro tyrimo rezultatai kintant įvairioms inverterio veikimo sąlygoms. Išėjimo filtrui tirti sudarytas Matlab Simulink modelis bei pagamintas iki 1 kW galios eksperimentinis maketas.

Inverterio sandara ir veikimo principas

Inverteris. Vienfazio inverterio viso tiltelio topologijos struktūrinė schema pateikta 1 pav.



1 pav. Vienfazio viso tiltelio topologijos įtampos šaltinio inverterio struktūrinė schema

Fig. 1. Single-phase full-bridge voltage source inverter (VSI) layout

Inverterį sudaro: nuolatinės įtampos maitinimo šaltinis v_i , filtruojantys kondensatoriai C_+ ir C_- , galios raktai S_{1+} , S_{1-} , S_{2+} , S_{2-} ir diodai D_{1+} , D_{1-} , D_{2+} , D_{2-} . Moduliacijos metu raktus valdančių impulsų pločiai keičiami sinuso dėsnio. Tokia moduliacija vadinama sinusoidine impulso pločio moduliacija (angl. *SPWM – Sinusoidal Pulse Width Modulation*). 2 pav. pateikti *SPWM* moduliacijos signalai viso tiltelio inverterio topologijai. Moduluojami signalai v_c ir $-v_c$, kurių fazių skirtumas 180° , ir kurie kinta pagal sinuso dėsnį, lyginami su nešlio signalu v_Δ , kuris šiuo atveju yra trikampio formos. Praktiškai, kai $v_c > v_\Delta$ ir $-v_c < v_\Delta$, raktai S_{1+} ir S_{2-} įjungti, o S_{1-} ir S_{2+} išjungti. Analogiškai, kai $v_c < v_\Delta$ ir $-v_c > v_\Delta$, raktai S_{1+} ir S_{2-} išjungti, o S_{1-} ir S_{2+} įjungti. Moduluojančio signalo v_c dažnis yra f_c ir amplitudė \hat{v}_c , o nešlio signalo v_Δ dažnis yra f_Δ ir amplitudė \hat{v}_Δ . Tada amplitudės moduliacijos indeksas randamas:

$$m_a = \frac{\hat{v}_c}{\hat{v}_\Delta}, \quad (1)$$

ir dažnio moduliacijos indeksas (arba normalizuotas nešlio dažnis) apskaičiuojamas:

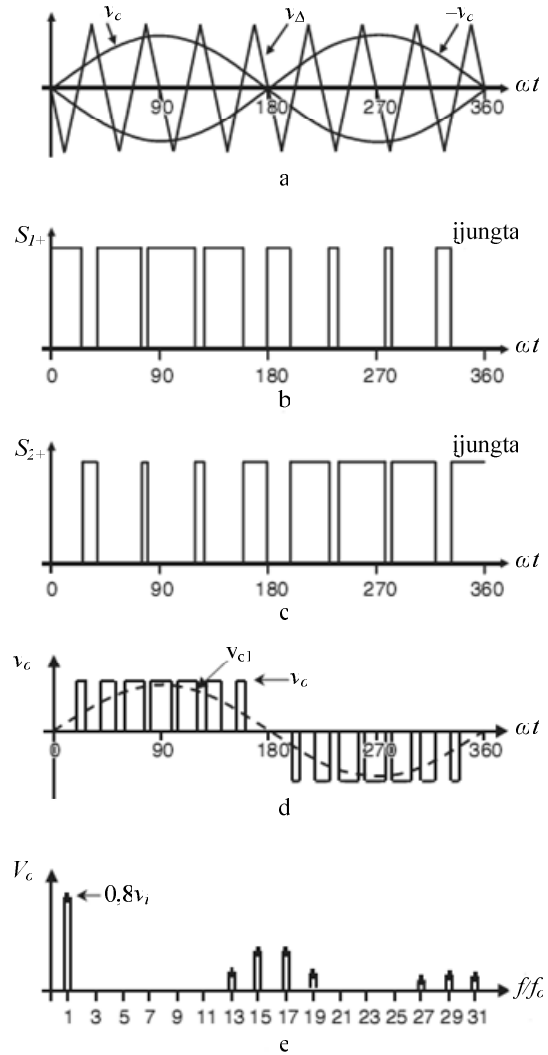
$$m_f = \frac{f_\Delta}{f_c}. \quad (2)$$

Kai $m_a \leq 1$, pagrindinė išėjimo įtampos v_o harmonikos amplitudė atitinka sąlygą $\hat{v}_{o1} = m_a \cdot v_i$. Kai m_f yra lyginis skaičius, harmonikos išėjimo įtampos signale atsiranda tokiuose dažniuose:

$$f_h = l m_f \pm k, \quad (3)$$

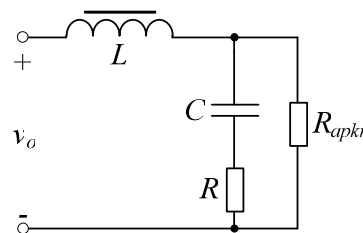
čia h – harmonikos numeris, $k = 1, 3, 5 \dots$ ir $l = 2, 4, 6 \dots$

Išėjimo filtras. Inverterio išėjimo filtrą (3 pav.) sudaro pirmosios eilės žemųjų dažnių LCR filtras (Cha *et al.* 2010; Kim *et al.* 2009).



2 pav. Viso tiltelio topologijos VSI signalai *SPWM* moduliacijai, kai $m_a = 0,8$ ir $m_f = 8$: nešlio v_Δ bei moduliacijos v_c ir $-v_c$ signalai (a); rakto S_{1+} valdymo signalas (b); rakto S_{2+} valdymo signalas (c); išėjimo įtampa v_o bei pirmosios harmonikos forma v_{o1} (d); išėjimo įtampos v_o spektras V_o (e)

Fig. 2. The full-bridge VSI ideal waveforms for the unipolar *SPWM*, when $m_a = 0,8$ and $m_f = 8$: carrier v_Δ and modulating v_c , $-v_c$ signals (a); switch S_{1+} state (b); switch S_{2+} state (c); AC output voltage v_o (d); AC output voltage v_o spectrum V_o (e)



3 pav. Pirmosios eilės žemųjų dažnių LCR filtras
Fig. 3. First-order low-pass LCR filter

Žemųjų dažnių filtras turi efektyviai filtruoti aukštesniausias nešlio signalo v_{Δ} harmonikas ir neslopindamas praleisti pagrindinę inverterio išėjimo įtampos v_o harmoniką. Filto ribinis dažnis randamas:

$$f_c = \frac{1}{\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}, \quad (4)$$

ir filto nominalioji varža:

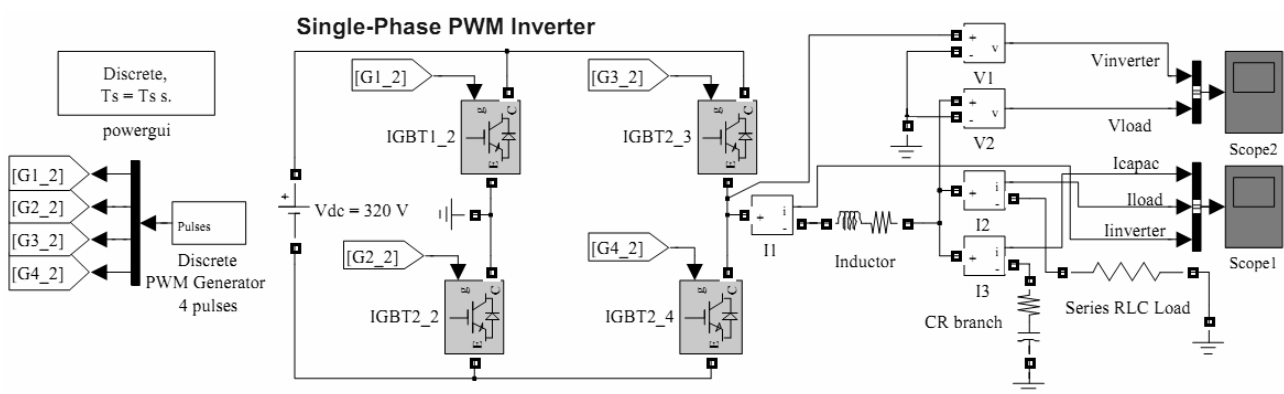
$$R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (5)$$

Filtro rezistorius R kartu su droselio apvijų aktyviaja varža skirti filtro rezonansui slopinti (Cha *et al.* 2010).

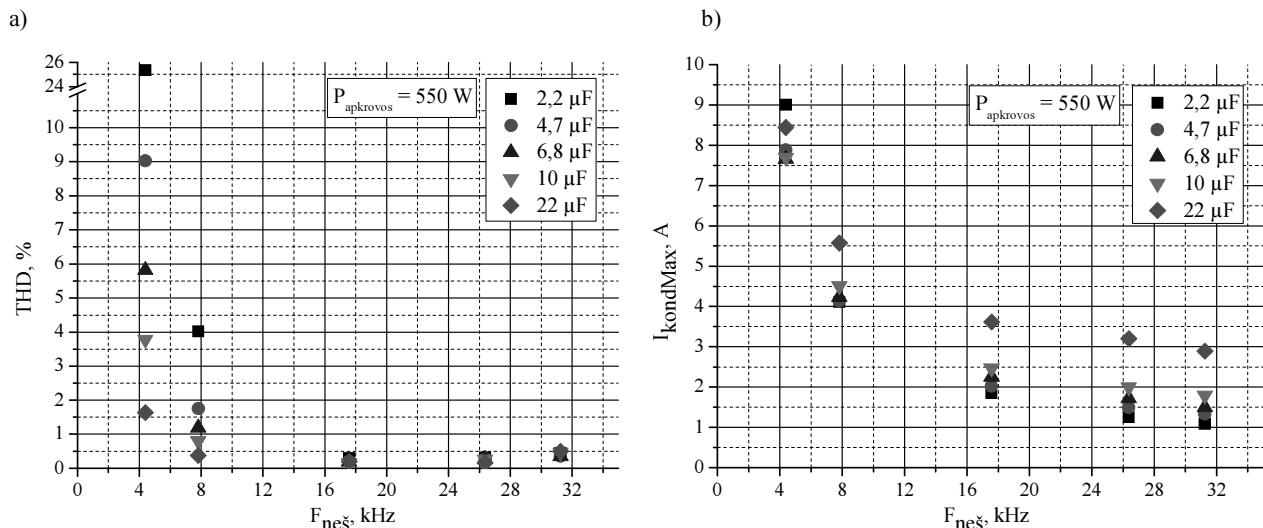
Modeliavimo rezultatai

Tiriamojo inverterio su išėjimo filtru modelis pateiktas 4 pav.

Modeliavimo metu buvo matuoti du parametrai: išėjimo įtampos harmoninis iškreipymas (5 pav., a) ir maksimali srovė, kuri teka per išėjimo filtro kondensatorių (5 pav., b). Visais atvejais išėjimo filtro droselio induktyvumas lygus 1,5 mH (Pasterczyk *et al.* 2008).



4 pav. Matlab Simulink vienfazio *VSI* modelis
Fig. 4. Matlab Simulink single-phase *VSI* modelį



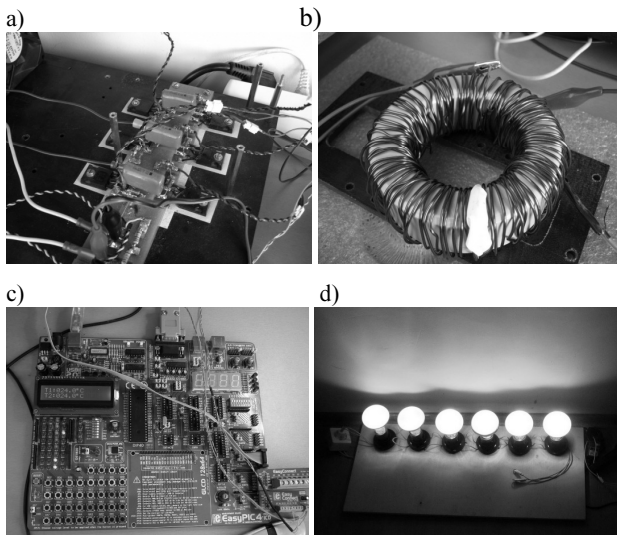
5 pav. Išėjimo įtampos v_o harmoninių iškreipimų (angl. *THD*) (a) ir maksimalios srovės, tekančios per išėjimo filtro kondensatorių (b), priklausomybės nuo nešlio dažnio įvairioms išėjimo filtro kondensatoriaus talpoms

Fig. 5. THD of the inverter output voltage v_o (a) and maximal current of the output filter capacitor (b) at different carrier frequencies and output filter capacitor values

Ekspirimentiniai rezultatai

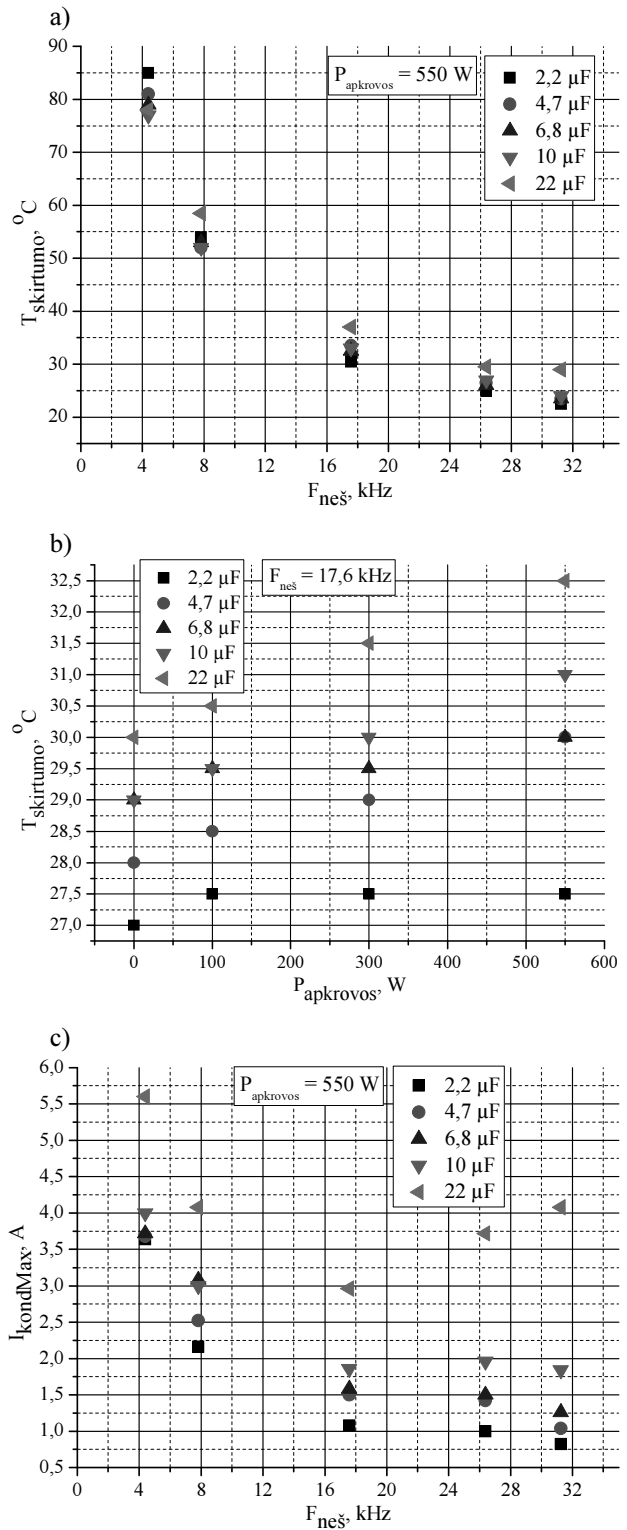
Ekspirimentiniam tyrimui buvo sumontuotas iki 1 kW galios inverterio su išėjimo filtru maketas. Nuolatinė 320 V įtampa inverterio maitinimui gauta išlyginus tinklo kintamą 230 V įtampą. Inverterio galios pakopą (6 pav., a) sudarė keturi IGBT tranzistoriai. Išėjimo filtro droselis (6 pav., b) suvyniotas ant toroidinės geležies miltelių su paskirstytu oro tarpu šerdies T300A-26. Droselis turi 92 vijas, jo induktyvumas 1,5 mH, aktyvioji varža 0,16 Ω. SPWM signalui formuoti, droselio temperatūrai stebėti bei duomenims surinkti panaudotas mikrokompiuteris su PIC18F4520 mikrovaldikliu (6 pav., c) (Ismail *et al.* 2006). Inverterio apkrovai buvo naudojamos šešios 100 W galios kaitinimo lempos (6 pav., d).

Ekspirimento metu (Yamaji *et al.* 2009; Salomaki *et al.* 2006) buvo matuota temperatūrų skirtumo tarp droselio šerdies ir aplinkos priklausomybė nuo nešlio dažnio ir išėjimo filtro kondensatoriaus talpos (7 pav., a), kai inverterio apkrovos galia 550 W. Taip pat matuota droselio šerdies temperatūros priklausomybė nuo apkrovos ir filtro kondensatoriaus talpos ties 17,6 kHz nešlio dažniu (7 pav., b) bei maksimalios srovės, tekančios per išėjimo filtro kondensatorių, priklausomybės nuo nešlio dažnio ir išėjimo filtro kondensatoriaus talpos (7 pav., c). Temperatūra matuota skaitmeniniais DS18S20 temperatūros jutikliais, kurių matavimo paklaida 0,5°C.



6 pav. Inverterio raktai (a); išėjimo filtro droselis (b); mikrokompiuteris su PIC18F4520 mikrovaldikliu (c); inverterio apkrova (d)

Fig. 6. IGBT power switches of the inverter (a); inductor of the output filter (b); PIC18F4520 development board (c); adjustable load of the inverter (d)



Išvados

1. Inverterio su filtru išėjimo įtampos harmoniniai iškrypimai priklauso nuo nešlio dažnio ir yra mažiausi (0,2–0,3 %), kai nešlio dažnis yra 17,6 kHz. Esant šiam dažniui, harmoniniai iškrypimai mažai priklauso nuo išėjimo filtro kondensatoriaus talpos. Tai patvirtina modeliavimo rezultatai.
2. Maksimali srovė, tekanti per išėjimo filtro kondensatorių, priklauso nuo nešlio dažnio ir kondensatoriaus talpos. Mažiausia srovė gaunama esant 31,3 kHz nešlio dažniui ir 2,2 μF išėjimo filtro kondensatoriaus talpai.
3. Išėjimo filtro droselio šerdies temperatūra priklauso nuo nešlio dažnio ir išėjimo filtro kondensatoriaus talpos. Mažiausia šerdies temperatūra gaunama esant 31,3 kHz nešlio dažniui ir 2,2 μF kondensatoriaus talpai. Droselio šerdies temperatūra atspindi aktyviuosius nuostolius šerdyje.

Literatūra

- Cha, H.; Vu, T.-K. 2010. Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter, in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, 1659–1665.
- Cortes, P.; Ortiz, G.; Yuz, J.; Rodriguez, J.; Vazquez, S.; Franquelo, L. 2009. Model Predictive Control of an Inverter With Output LC Filter for UPS Applications, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 56(6): 1875–1883.
- Ilango, G. S.; Rao, P. S.; Karthikeyan, A.; Nagamani, C. 2010. Single-stage sine-wave inverter for an autonomous operation of solar photovoltaic energy conversion system, *Renewable Energy* 35(1): 275–282. doi:10.1016/j.renene.2009.06.009
- Ismail, B.; Taib, S.; Saad, A.; Isa, M.; Hadzer, C. 2006. Development of a Single Phase SPWM Microcontroller-Based Inverter, in *IEEE International Power and Energy Conference 2006. PCon '06.*, 437–440.

- Yamaji, H.; Shimizu, T.; Takano, K.; Ishii, H. 2009. Iron loss evaluation of AC filter inductor core in a PWM inverter, in *Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on*, 1–8.
- Kim, H.; Sul, S.-K. 2009. Analysis on output LC filters for PWM inverters, in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International*, 384–389.
- Pasterczyk, R.; Guichon, J.-M.; Atienza, E. 2008. PWM inverter output filter cost to losses trade off and optimal design, in *Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2008*, 476–482.
- Rashid, M. H. 2006. *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits and Applications*. Burlington, San Diego, London: Academic Press. 1172 p. ISBN 978-0-12-088479-7
- Salomaki, J.; Hinkkanen, M.; Luomi, J. 2006. Influence of Inverter Output Filter on the Selection of PWM Technique, in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1052–1057. doi:10.1109/ISIE.2006.295782

THE INVESTIGATION OF SINUSOIDAL SINGLE PHASE VOLTAGE SOURCE INVERTER OUTPUT FILTER

A. Platakis, V. Bleizgys, T. Lipinskis

Abstract

The results of output filter investigation of single phase sine voltage source inverter (VSI) are presented. The operating principle, construction and a most widely used topology of single phase voltage source inverter is discussed. The results obtained using modeling and experimental investigation are presented. The Total Harmonic Distortion of the inverter output voltage and maximal current of the output capacitor were analyzed using Matlab Simulink software. The 1 kW inverter prototype was built for experimental investigation. The inverter switches are realized using IGBT transistors. The toroidal iron powder core with distributed air gap was used as the core of the inductor. The experimental investigation of inductor core losses and maximal current of output filter capacitor were performed.

Keywords: voltage source inverter, output filter, total harmonic distortion, filter, inductor core losses.