

ELEKTROS TINKLO MIKROINVERTERIO NAUDINGUMO FAKTORIAUS TYRIMAS

Edvardas BIELSKIS¹, Martynas ŠAPUROV², Andrius PLATAKIS³^{1,2,3}Fizinių ir Technologijos Mokslų Centras, Vilnius, Lietuva¹Šiaulių universitetas, Šiauliai, Lietuva^{2,3}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, LietuvaEl. paštas: ¹edvardas.bielskis@su.lt; ²martynas.sapurov@vgtu.lt; ³andrius.platakis@ftmc.lt

Santrauka. Darbe tirtas fotovoltinės energijos moduliams skirto mikroinverterio įtampą aukštinantis Flyback topologijos keitiklis. Ištirtos šio keitiklio naudingumo faktoriaus charakteristikos esant įvairioms nešlio dažnių ir keitiklio tiekiamos energijos galioms. Ištyrus klasikinį keitiklį, pasiūlytas patobulintas keitiklis, kuriame naudojama mažiau elektronikos komponentų. Pasiūlytas Flyback keitiklis yra pigesnis. Jo naudingumo faktorius yra 2–3 % aukštesnis už klasikinio, kai tiekiamą keitiklio galia nesiekia 95 W.

Reikšminiai žodžiai: Flyback keitiklis, tinklo mikroinverteris, impulso pločio moduliacija, naudingumo faktorius.

Įvadas

Fotovoltiniai energijos šaltiniai tiekia nuolatinę įtampą. Norint elektros energiją tiekti į elektros tinklą, nuolatinę įtampą reikia keisti į standartinę kintamąją. Tam tikslui naudojami keitikliai – inverteriai. Tinklo inverteriai (angl. *grid tied inverter*) – tai inverteriai, tiekiantys elektros energiją į elektros tinklą (Minjie *et al.* 2013). Tinklo inverteris nuolatinės įtampos fotovoltinę elektros energiją paverčia į reikiamos tinklui amplitudės ir dažnio energiją. Taip pat jis sinchronizuojasi su elektros tinklu ir perduoda srovę į elektros tinklą. Inverteriai, kurių galia mažesnė nei 250 W, vadinami mikroinverteriais.

Siūlomų rinkoje polikristalinių fotovoltinių elementų naudingumo faktorius siekia nuo 14 % iki 17,5 %. Kad gautas energijos kiekis dar labiau nesumažėtų, gauta energija turi būti keičiama, perduodama ir suvartojama kuo efektyviau. Dėl šios priežasties inverteriai turi pasižymėti aukštu naudingumo faktoriumi.

Straipsnyje pateikta tirta mikroinverterio įtampą aukštinančios dalies sistema, kurią sudaro Flyback topologijos įtampą aukštinantis keitiklis. Ištirta naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo galios tiekiamos į apkrovą ir impulsų pločio moduliacijos (IPM) būdu formuojamo inverterio raktų komutavimo signalo (nešlio) dažnio.

Ištirtas mikroinverteris su klasikine Flyback keitiklio topologija (Microchip 2011), gauti rezultatai palyginti su rezultatais, gautais naudojant pasiūlytą alternatyvią Flyback keitiklio topologiją.

Klasikinio Flyback keitiklio tyrimas

Tyrimui pasirinktas klasikinis mikroinverteris (*Microchip*) su šiais parametrais:

- maksimalioji įėjimo galia $P_{INmax} = 250$ W;
- maksimalioji išėjimo galia $P_{OUTmax} = 215$ W;
- maksimalioji įėjimo įtampa $U_{INmax} = 53$ V;
- maksimaliosios galios sekimo metodo efektyvumas 99,5 %
- maksimaliosios galios sekimo intervalas $U_{IN} = 20–45$ V;
- 50/60 Hz išėjimo įtampos darbinės ribos $U_{OUTRMS} = 210–264$ V;
- maksimalus naudingumo faktorius $\eta = 94,5$ %.

1 pav. pavaizduota struktūrinė tiriamojo mikroinverterio schema. Tai dviejų pakopų inverteris (Hao 2014), kuri sudaro trys pagrindinės dalys:

- Įtampos aukštinimo dalis, skirta iš saulės fotoelementų gautai įtampai aukštinti. Šis procesas vykdomas dviem nepriklausomais Flyback tipo keitikliais, kurie dirba sinchronizuotai, perstumtais IPM kampu.
- Synchronizacijos su tinklu dalis. Šią dalį sudaro vienfazis inverteris, kuris sudarytas iš viso tiltelio (angl. *full-bridge*) su MOSFET lauko tranzistoriais.
- Trikdžių filtras šuntuoja iš tinklo patenkančius aukštojo dažnio elektromagnetinius trikdžius ir gesina mikroinverterio aukštesnio dažnio kuriamas harmonikas.

Tiriamoji inverterio elektrinė schema

Tyrimo objektas – inverteryje esantys Flyback tipo įtampos aukštinimo keitikliai. Tiriamojo keitiklio ypatybė ta, kad jis turi aktyvią viršįtampos gesinimo elektrinę grandinę, gebančią transformatoriaus saviindukcijos energiją Q1 tranzistoriaus atjungimo metu grąžinti atgal į maitinimo šaltinį, kaip tai pavaizduota 2 pav.

Periode Flyback keitiklis turi du veikimo ciklus:

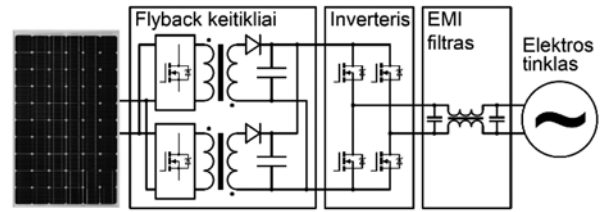
- Kai tranzistorius Q1 yra laidžios būsenos, pirminę induktoriaus (transformatoriaus) apviją jis sujungia su maitinimo šaltiniu. Induktyviojo elemento magnetiniame lauke kaupiama energija. Kondensatorius C1 maitina apkrovą.
- Užsidarius tranzistoriui Q1, magnetiniame lauke sukauptą energiją indukuojama į antrinę apviją: įkraunamas kondensatorius C1, maitinama apkrova. Dalis magnetinio lauko energijos grįžta į pirminę apviją, kur energija grąžinama į maitinimo šaltinį per aktyviai valdomą grandinę: atsidarūsį Q2 tranzistorių ir kondensatorių C2.

Tiriamame inverteryje įdiegti du tokio tipo keitikliai, kurie įtampos aukštinimą atlieka sinchroniškai perstumiant IPM fazę. Flyback tipo keitikliuose naudojami impulsiniai transformatoriai su ferito šerdimis, kurie savo magnetinėje sistemoje turi oro tarpą. Oro tarpas reikalingas, kad šerdis neįsisotintų, tai pat energijos kaupime magnetinėje transformatoriaus sistemoje (Xiangjun *et al.* 2003). Sukauptą energiją džauliais transformatoriaus magnetinėje sistemoje su oro tarpu galima aprašyti formule:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} V_{oro}, \quad (1)$$

čia: W – sukauptą energija, J; B – magnetinio srauto tankis, T; μ_0 – vakuumo (etaloninė) magnetinė skvarba 4π ; V_{oro} – oro tarpelio dydis, mm.

Tyrimas atliktas prijungus prie keitiklio atskirą impulso pločio moduliatorių, generuojantį nepriklausomus



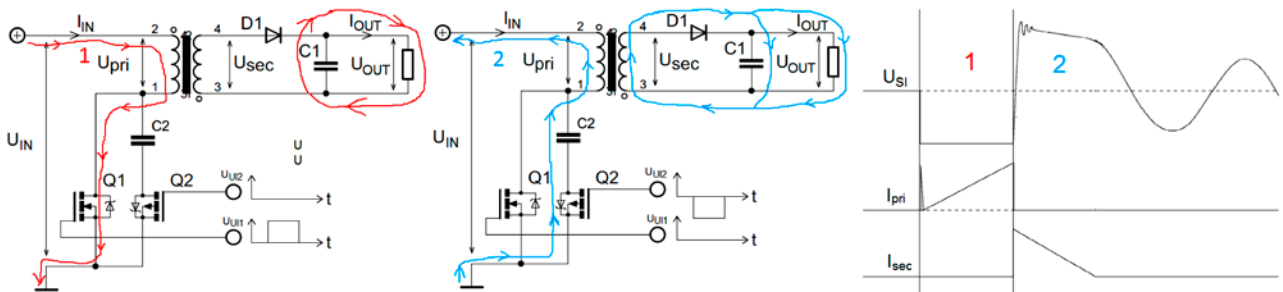
1 pav. Struktūrinė Flyback inverterio schema

Fig. 1. The block diagram of the Flyback inverter

vienas nuo kito perstumtus impulsus, kurių skvarbą D galima valdyti nuo 0 iki 48 %. Impulso pločio moduliatorių (generatorių) sudaro analoginis SG3525 universalus valdiklis, skirtas impulsinių maitinimo šaltinių raktų (tranzistorių) impulsiniam valdymui. SG3525 lustą sudaro šios pagrindinės dalys: 5 V etaloninės įtampos šaltinis, skirtas nuostato vertėms formuoti; pjūklinės įtampos generatorius; komparatorius nuostato vertės lyginimui su pjūkline įtampa; TTL logika ir trigeriai 180° perstumtiems impulsams generuoti; IPM signalų išėjimo tranzistorinė pakopa IPM signalo srovės stiprinimui.

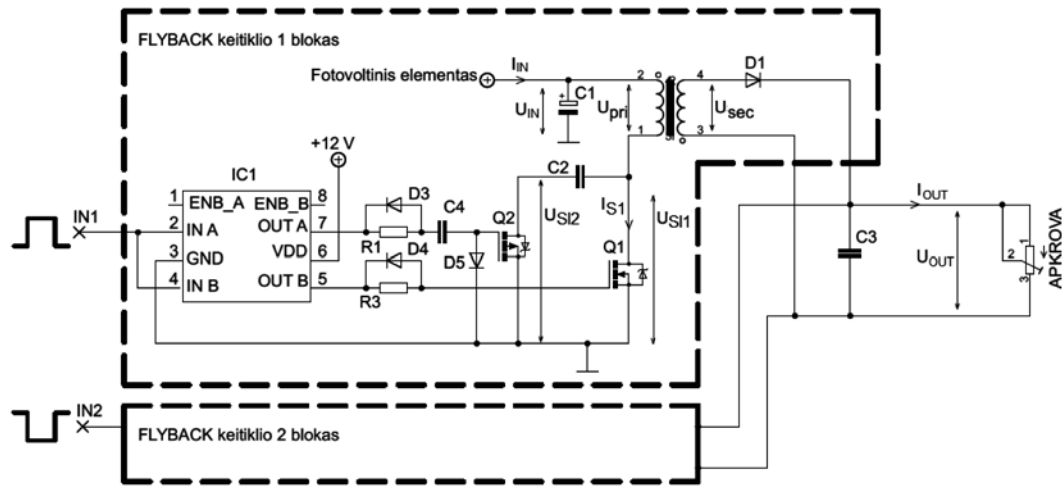
Vėliau valdymo signalai iš SG3525 valdiklio patenka į klasikinį tiriamą Flyback keitiklį (3 pav.), kurį sudaro: tranzistorius valdantis IC1 lustas MCP14E4-E/SN; Q1 lauko tranzistorius (IRFS4321TRL PBF) srovės kaupimo ciklui vykdyti; Q2 lauko tranzistorius (SI7115DN-T1-GE3) aktyviam viršįtampos šuntavimui; Flyback tipo transformatorius.

Tiriamojo Flyback keitiklio maitinimo įtampa 30 V. Flyback keitiklio apkrova $R_A = 430 \Omega$ reostatas. Flyback keitiklio tyrimai atlikti nešlio dažniams: 25,3; 36,2; 60,3; 89 kHz, keičiant IPM signalo tranzistorių valdymui impulsų skvarbą, kuri nulemia tiekiamą į apkrovą galią, nuo 0 iki 48 %. Naudingumo faktoriui nustatyti buvo matuojamos tiekiamą į keitiklį ir keitiklio tiekiamą į apkrovą galios. Gautas naudingumo faktoriaus priklausomybės nuo Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios ir nešlio dažnio pateiktos 4 pav.



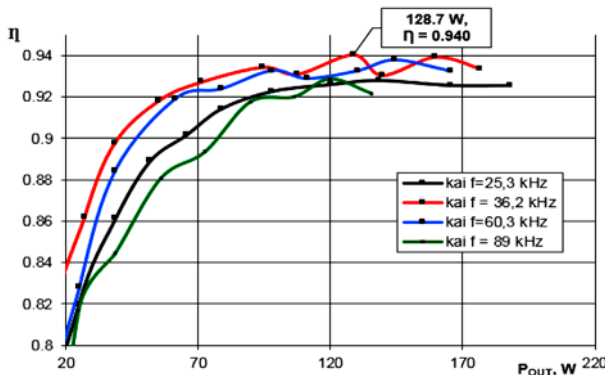
2 pav. Flyback keitiklio veikimo principas: a) pirmo ir antro veikimo ciklo elektros srovės kontūrai; b) tipinės elektros srovės oscilogramos pirmame ir antrame veikimo cikluose

Fig. 2. The operating principle of the Flyback topology inverter: a) the electrical current loops of first and second operation cycle; b) diagrams of electrical current of first and second operation cycles



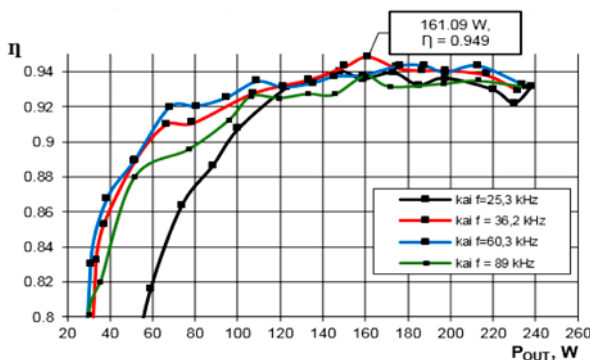
3 pav. Flyback keitiklio elektrinė schema

Fig. 3. The circuit diagram of the Flyback converter



4 pav. Naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios skirtingiems nešlio dažniams esant fiksuotai apkrovos varžos vertei $R_A = 430 \Omega$

Fig. 4. Flyback converter efficiency dependence on converter output power at various PWM switching frequencies and fixed load resistance $R_A = 430 \Omega$



5 pav. Naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios, esant skirtingiems nešlio dažniams ir esant fiksuotai IPM signalo skvarbos vertei $D = 35\%$

Fig. 5. Flyback converter efficiency dependence on converter output power at various PWM switching frequencies and fixed duty cycle $D = 35\%$

4 pav. gautoje charakteristikų šeimoje matyti:

1. Didžiausias 94 % naudingumas pasiekiamas, kai nešlio dažnis siekia 36,2 kHz, keitikliui tiekiant 128,7 W galią. Keitiklio naudingumo faktoriaus vertės didėjimas įsotina pasiekus 92 % ribą.
2. Esant 25 kHz dažniui gautas efektyvumas yra mažesnis dėl stipresnės sistemos darbinės srovės, kuri sukuria didesnius vario nuostolius transformatoriuose ir tranzistoriaus galios grandinėje.
3. 89 kHz nešlio dažniu dirbančiame keitiklyje pasireiškia komutacijos nuostoliai tranzistoriuose (Causo *et al.* 2013), nes tranzistoriai ilgesnę ciklo dalį veikia pereinamųjų vyksmų režime, kurių metu galios nuostoliai yra didžiausi. Komutaciniai nuostoliai apskaičiuojami pagal formulę:

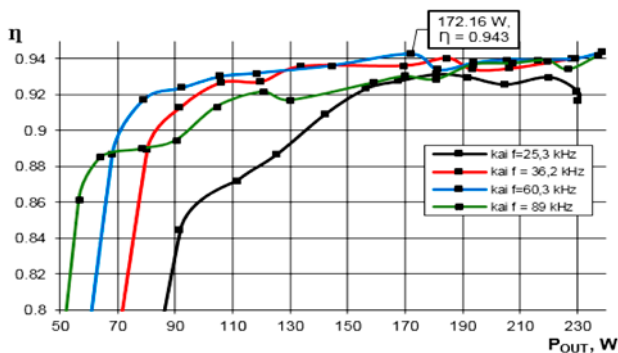
$$P_{nuost} = \frac{1}{2} I_{maks} \cdot V_{SI} \cdot t_{iSj}, \quad (2)$$

čia: I_{maks} – maksimali tranzistoriaus atjungimo metu sukaup-ta srovė, A; V_{SI} – įtampa tarp tranzistoriaus santakos ir iš-takos gnybtų tranzistoriui esant nelaidžioje būsenoje, V; t_{iSj} – pereinamojo vyksmo trukmė uždariant tranzistoriaus laidųjį kanalą, s.

Buvo tiriama Flyback keitiklio naudingumo fakto-riaus priklausomybė nuo apkrovos galios, keičiant apkrovos reostato varžą dvejoms fiksuotoms IPM signalo skvarbos vertėms: $D = 35\%$, ir $D = 44\%$. Tyrimai atlikti esant nešlio dažniams: 25,3; 36,2; 60,3; 89 kHz. Gauti rezultatai pateikti 5 ir 6 pav.

Iš bandymo rezultatų matyti:

1. Naudingumo faktorius sumažėja, keitikliui vei- kiant mažesne kaip 100 W galia. Bandymo metu pastebėta, kad esant mažesnei kaip 50 W galiai pa-



6 pav. Naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios, esant skirtingiems nešlio dažniams ir esant fiksuotai IPM signalo skvarbos vertei $D = 44\%$

Fig. 6. Flyback converter efficiency dependence on converter output power at various PWM switching frequencies and fixed duty cycle $D = 44\%$

didėja tranzistoriaus Q2 (4 pav.) galios nuostoliai, nes tranzistorius labiau įkaista, lyginant su pradinė bandymo temperatūra. Tranzistorius kaista dėl nepakankamai apkrauto transformatoriaus, dėl ko didesnis nesunaudotos magnetinio lauko energijos kiekis grįžta atgal į pirminę apviją.

- Esant 25,3 kHz nešlio dažniui abiem atvejais (5 ir 6 pav.) dėl didesnės keitiklio srovės vertės padidėjo keitiklio transformatoriaus saviindukcijos elektrovaros viršįtampį gesinančios aktyvios grandinės Q2 tranzistorių temperatūra.
- Esant 89 kHz nešlio dažniui, keitiklyje pasireiškia tranzistorių komutacijos nuostoliai, nes tranzisto-

riai ilgesnę ciklo dalį veikia pereinamųjų vyksmų režime, kurių metu galios nuostoliai yra didžiausi.

Sukurto Flyback keitiklio tyrimas

Sukurtas ir ištirtas klasikiniame Flyback keitikliui alternatyvus keitiklis. Jo elektrinė schema pateikta 7 pav. Sukurto Flyback keitiklio skirtumai nuo klasikinio yra šie:

- Keitiklyje naudojami tik vieno tipo laidžiojo N kanalo lauko tranzistoriai. N laidaus kanalo lauko tranzistoriai turi geresnes greiteveikos savybes nei P kanalo lauko tranzistoriai;
- Saviindukcijos viršįtampio gesinimui panaudojamas tik vienas kondensatorius C6, todėl naudojama mažiau elementų lyginant su tirtu klasikiniu keitikliu.
- Schemoje naudojami tipiniai pusės H tiltelio lauko tranzistorių valdikliai. Nebenaudojamas valdiklis, generuojantis neigiamą valdymo signalą Q2 p laidumo lauko tranzistoriui (3 pav.).

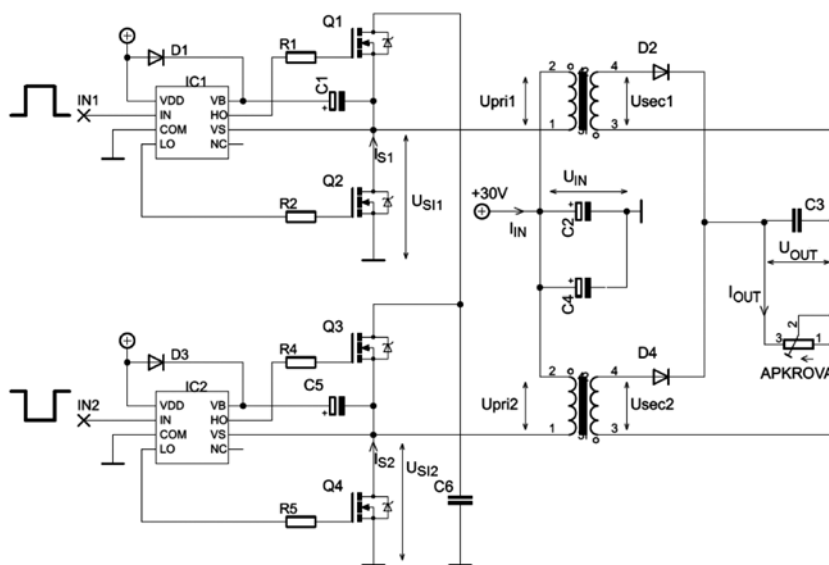
Pasiūlytame Flyback keitiklyje tranzistorių valdikliai realizuoti naudojant specializuotą IR2111 lustą.

Atlikti sukurto Flyback keitiklio tyrimai, analogiški tyrimams atliktiems klasikiniame Flyback keitikliu. Gauti rezultatai pateikti 8 ir 9 pav.

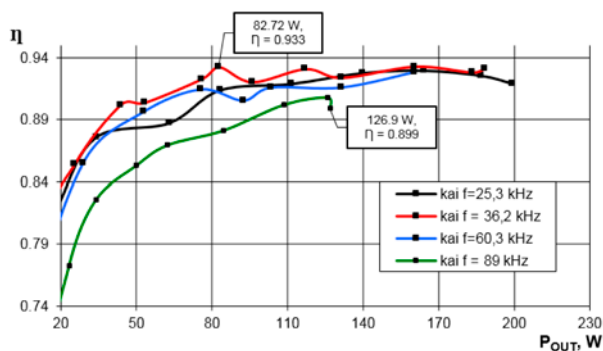
Iš gautų kreivių matyti, kad naudingumo faktorius skiriasi nežymiai. Didžiausia naudingumo faktoriaus vertė $\eta = 0,938$ gauta esant 36,2 kHz nešlio dažniui.

Esant nešlio dažniui 89 kHz, keitiklio naudingumo faktorius sumažėja iki $\eta = 0,899$.

Gautų rezultatų palyginimas abiem Flyback keitiklių schemoms pateiktas 10 pav.

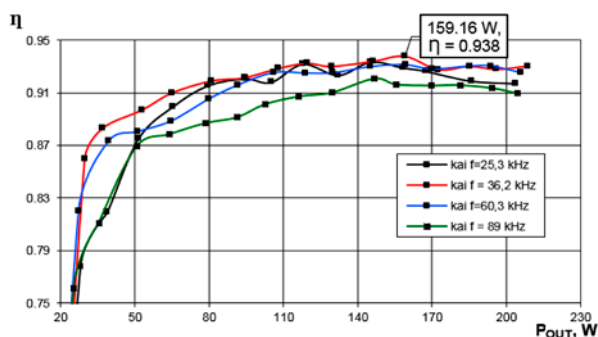


7 pav. Alternatyvi Flyback keitiklio principinė elektrinė schema
Fig. 7. The alternative circuit diagram of Flyback converter



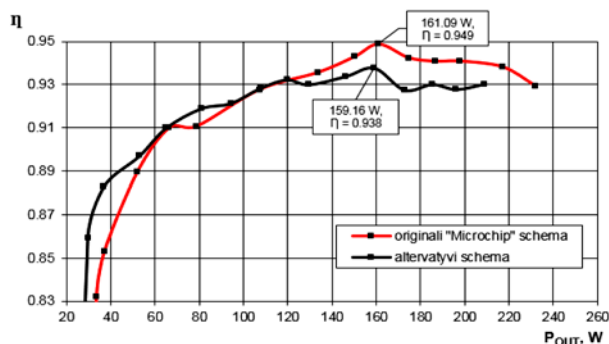
8 pav. Naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo sukurto Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios skirtingiems nešlio dažniams esant fiksuotai apkrovos varžos vertei $R_A = 430 \Omega$

Fig. 8 Created Flyback converter efficiency dependence on converter output power at various PWM switching frequencies and fixed load resistance $R_A = 430 \Omega$



9 pav. Naudingumo faktoriaus priklausomybė nuo sukurto Flyback keitiklio tiekiamos į apkrovą galios, esant skirtingiems nešlio dažniams ir esant fiksuotai IPM signalo skvarbos vertei $D = 44 \%$

Fig. 9. Created Flyback converter efficiency dependence on converter output power at various PWM switching frequencies and fixed duty cycle $D = 44 \%$



10 pav. Klasikinės ir pasiūlytos schemas Flyback keitiklių naudingumo faktoriaus priklausomybės nuo apkrovos galios, kai $f = 36,2 \text{ kHz}$ ir $D = 35 \%$

Fig. 10. Efficiency dependence on output load of Flyback converter developed using classic and alternative circuit diagram solution, at $f = 36.2 \text{ kHz}$, $D = 35 \%$

Matome, kad pasiūlyto keitiklio naudingumo faktorius yra 1 % mažesnis už klasikinio, kai keitiklio galia viršija 95 W, tačiau yra 2–3% didesnis, kai galia nesiekia 95 W. Siūlomo Flyback keitiklio didesnis naudingumo faktorius prie mažų galių paaiškinamas geresnėmis panaudotų N kanalo Q1 ir Q3 (7 pav.) lauko tranzistorių laidumo savybėmis.

Išvados

1. Tirtas klasikinis Flyback keitiklis naudingiausiai veikia ties 36,2 kHz nešlio dažniu esant 160 W apkrovos galiai. Didinant galią naudingumo faktorius mažėja dėl didėjančių transformatoriaus vario nuostolių ir lauko tranzistorių komutacinių nuostolių.
2. Pasiūlyto keitiklio naudingumo faktorius yra 1 % mažesnis už klasikinio, kai keitiklio galia viršija 95 W, tačiau yra 2–3 % didesnis, kai galia nesiekia 95 W. Siūlomo Flyback keitiklio didesnis naudingumo faktorius prie mažų galių paaiškinamas geresnėmis panaudotų N kanalo Q1 ir Q3 lauko tranzistorių laidumo savybėmis.
3. Sukurtoje alternatyvioje Flyback keitiklio schemoje naudojama mažiau elektronikos komponentų, naudojamas paprastesnis lauko tranzistorių valdymas, nėra neigiama įtampa valdomų tranzistorių, dėl šių savybių pasiūlytas alternatyvus Flyback keitiklis yra pigesnis ir patikimesnis.

Literatūra

- Causo A.; Salati A.; Lorenzani E. 2013. Power losses analysis in interleaved flyback based PV grid connected micro-inverters, in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, 10–13 November 2013, Vienna, Austria, 1833–1838.
- Grid-Connected Solar Microinverter Reference Design Using a dsPIC Digital Signal Controller*. 2011 [interaktyvus] Microchip [žiūrėta 2015 m. gegužės 13 d.]. Prieiga per internetą: www.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01338D.pdf
- Minjie, C.; Afridi, K. K.; Perreault, D. J. 2013. A multilevel energy buffer and voltage modulator for grid-interfaced micro-inverters, in *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*, 15–19 September 2013, Denver, 3070–3080.
- Xiangjun, Z.; Hankui, L.; Dianguo, H. 2003. Analysis and design of the flyback transformer, in *Industrial Electronics Society, 2003. IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, 2–6 November 2003, Harbin, People's Republic of China, 715–719.

INVESTIGATION OF ELECTRICAL POWER GRID MICROINVERTER EFFICIENCY

E. Bielskis, M. Šapurov, A. Platakis

Abstract

In this paper the investigation results of a boost Flyback converter, which is used in a micro-inverter, are presented. The efficiency characteristics of the converter at various carrier frequencies and output loads were investigated. An alternative circuit diagram solution which is less complex in structure and has fewer components but has the same properties as the classic circuit scheme is proposed for the converter. The proposed Flyback converter is less expensive. Its efficiency is 2–3% higher than the classic Flyback converter when the converter output power is less than 95 W.

Keywords: Flyback converter, microinverter, efficiency, pulse width modulation.