

Testiranje i upoređivanje interleaving i bridgeless kola za popravku faktora snage (PFC)

Saša Vučićević, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić

Odjeljenje za razvoj

DV Power

Sarajevo, BiH

sasa.v@kvteam.com, nijaz.h@kvteam.com, pero.c@kvteam.com

Sadržaj—Kao osnovno kolo za popravku faktora snage (Power factor correction - PFC) koristi se podizač, DC/DC pretvarač energetske elektronike. Pored klasičnog rješenja, gdje se za konstruisanje PFC-a koristi samo jedan podizač, PFC je moguće realizovati i sa dva podizača čiji su upravljački impulsi fazno pomjereni za 180°. U radu su opisane karakteristike interleaving i bridgeless PFC struktura. Opisano je upravljačko kolo UCC28070 koje može poslužiti za upravljanje PFC-a realizovanog pomoću obje strukture. Napravljeno je poredjenje ovih kola u konkretnom slučaju za PFC izlazne snage 300 W i izlaznog napona 390 V. Testiranja su rađena na standardnim mrežnim naponima od 230 V i 115 V. Poredjenje je pravljeno u odnosu na sljedeće parametre: faktor snage (PF), efikasnost kola, sadržaj viših harmonika i talasnost izlaznog napona.

Ključne riječi- popravka faktora snage; Interleaving PFC; Bridgeless PFC; efikasnost kola za popravku faktora snage

I. UVOD

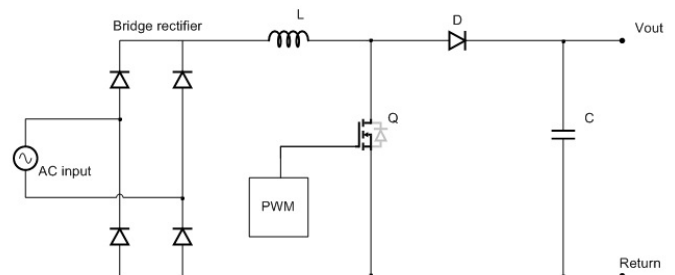
Kolo za popravku faktora snage (PFC) uobličava ulaznu struju, sa ciljem povećanja aktivne snage koja se dobija iz mreže i smanjenja viših harmonika struje koji se emituju nazad u mrežu. U idealnom slučaju, kada bi struja bila u fazi sa naponom i kada bi imala isti talasni oblik, kolo bi bilo čisto rezistivno (reaktivna snaga u kolu jednaka nuli). Faktor snage (PF) se definiše kao odnos aktivne snage (P) i prividne snage (S) i može imati vrijednost između nula i jedan. Cilj je da $PF \rightarrow 1$ [1].

$$PF = \frac{P [W]}{S [VA]} \quad (1)$$

Osnovno kolo koje se koristi za popravku faktora snage je podizač (*boost converter*), DC-DC pretvarač energetske elektronike (Sl. 1). Pored podizača, kolo za popravku faktora snage se sastoji i od mosnog ispravljača, koji se postavlja na ulaz u cilju ispravljanja naizmjeničnog mrežnog napona [2].

Postoje različita rješenja podizača koja se primjenjuju za realizaciju kola za popravku faktora snage. Prvo je klasično rješenje, gdje se koristi samo jedan podizač za konstrukciju PFC-a. Daljim razvojem, željela se povećati prekidačka frekvencija u cilju smanjenja veličine komponenti izlaznog filtera. Međutim, povećanjem prekidačke frekvencije, značajno se povećavaju prekidački gubici u kolu (korištenje prekidačke frekvencije veće od 100 kHz umnogome utiče na povećanje

gubitaka). Da bi se izbjegli ovi problemi koriste se različite rezonantne tehnike. Rezonantna kola imaju zadatak da omoguće uključivanje glavnog prekidača pri nultom naponu i isključivanje diode PFC-a pri nultoj struji. Ovo se ostvaruje primjenom rezonantne operacije samo za vrijeme prekidačkih promjena, dok se za vrijeme vođenja prekidača ovaj dio kola može zanemariti [3].



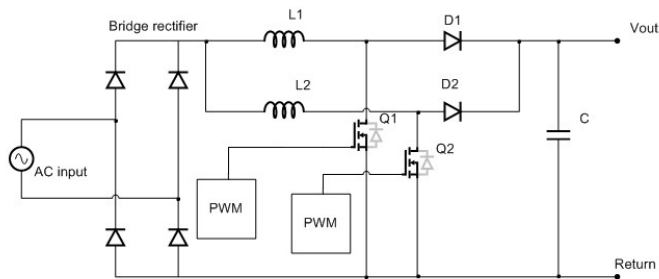
Slika 1. Pojednostavljena šema PFC-a

Naredni korak u razvoju kola za popravku faktora snage podrazumijevao je korišćenje dva podizača (*interleaving* rad), čiji su upravljački impulsi (PWM) fazno pomjereni za 180°. Postoje dvije vrste ovakvih kola: *interleaving*, koje podrazumijeva korišćenje mosnog ispravljača na ulazu i *bridgeless*, koji, za razliku od standardnog *interleaving* PFC-a, ne koristi mosni ispravljač na ulazu i čiji je cilj da popravi efikasnost kola smanjenjem broja prekidačkih elemenata. U radu će biti opisani *interleaving* i *bridgeless* PFC. Takođe, biće prikazani rezultati testiranja 300W PFC-a za obje strukture, kao i poređenje datih rezultata, uzimajući u obzir sljedeće parametre: faktor snage, efikasnost kola, sadržaj viših harmonika i talasnost izlaznog napona.

II. INTERLEAVING PFC

Interleaving PFC se sastoji od dva paralelna kola podizača koji rade fazno pomjereni za 180°. Pojednostavljena šema *interleaving* PFC-a je prikazana na Sl. 2. Ulazna struja predstavlja zbir struja zavojnica L_1 i L_2 . Pošto su struje zavojnica fazno pomjerene, kao rezultat njihovog zbira će se dobiti manja talasnost ulazne struje. Talasnost ulazne struje će se u potpunosti eliminisati pri faktoru ispunje od 50%. Struja izlaznog kondenzatora predstavlja zbir struja dioda *interleaving* PFC-a umanjena za vrijednost jednosmjerne izlazne struje iz

kola. Na taj način se smanjuje talasnost struje izlaznog kondenzatora [4]. Smanjenje talasnosti ulazne struje utiče na smanjenje EMI filtera i ulaznog kondenzatora, dok smanjenje talasnosti struje PFC kondenzatora omogućava korišćenje manjeg kondenzatora, čime mu se smanjuju veličina i cijena [5].



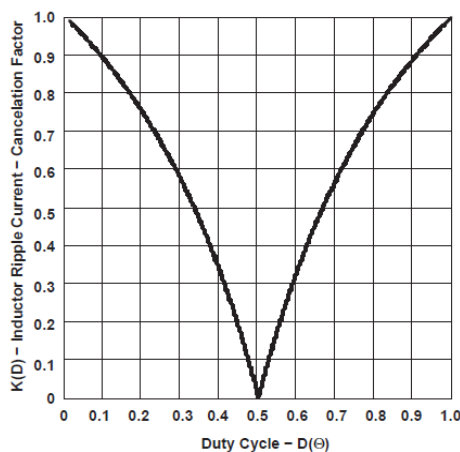
Slika 2. Interleaving PFC

Talasnost struja zavojnica može biti velika, dok je talasnost ulazne struje manja i zavisi od faktora ispunje (pri malim/velikim D teži talasnosti struje zavojnice). Odnos talasnosti ulazne struje i struje zavojnice direktno zavisi od faktora ispunje. Veoma je važno napomenuti da se talasnost ulazne struje mijenja, što je posljedica promjenljivog faktora ispunje PFC kola. Ovaj podatak je bitan prilikom izbora prigušnice *interleaving* PFC-a. Odnos talasnosti ulazne struje i struje zavojnice u zavisnosti na faktor ispunje je dat u sljedećim jednačinama i na Sl. 3 [4].

$$K(D) = \frac{\Delta I_{IN}}{\Delta I_{L1}} \quad (2)$$

$$K(D) = \frac{1-2D}{1-D}, \quad D \leq 0.5 \quad (3)$$

$$K(D) = \frac{2D-1}{D}, \quad D > 0.5 \quad (4)$$



Slika 3. Zavisnost relativne talasnosti ulazne struje od faktora ispunje [4]

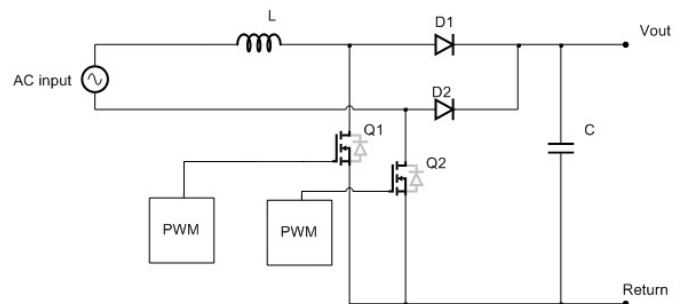
Faktor ispunje kod PFC kola nije konstantan i zavisi od faznog ugla i ulaznog napona. Varijacije faktora ispunje mogu biti velike, naročito u slučaju pretvarača koji je projektovan za univerzalni ulazni napon. Pri malim mrežnim naponima faktor

ispunje se kreće između 69% i maksimalne vrijednosti, dok pri visokim mrežnim naponima ide od 2% do maksimalne vrijednosti. Talasnost ulazne struje neće biti potpuno eliminisana, ali će biti značajno smanjena. Za nizak mrežni napon najveća talasnost ulazne struje će biti pri faktoru ispunje od 69%. Pri visokim mrežnim naponima, najveća talasnost ulazne struje će biti pri maksimalnom faktoru ispunje i pri faktoru ispunje od 2%. Ipak, prednost *interleaving* PFC-a u odnosu na klasični PFC je ta što će najveća talasnost ulazne struje biti 55% od maksimalne talasnosti ulazne struje PFC-a realizovanog sa jednim podizačem iste izlazne snage i iste induktivnosti [4].

Za razliku od klasičnog PFC-a, *interleaving* PFC koristi dvije zavojnice, što omogućava korišćenje zavojnica dvostruko manjih induktivnosti. Korišćenjem *interleaving* PFC-a se može smanjiti i veličina EMI filtera. Kod klasičnog PFC-a, struja zavojnice (samim tim i ulazna struja) ima najveću talasnost pri faktoru ispunje od 50%. Kod *interleaving* PFC-a, pri faktoru ispunje od 50%, talasnosti struja zavojnica se međusobno poništavaju, pa je talasnost ulazne struje minimalna. Na ovaj način se EMI filter može drastično smanjiti korišćenjem *interleaving* procesa. U cilju daljeg smanjenja EMI filtra, potrebno je smanjiti prekidačku frekvenciju PFC-a. Da bi se smanjila prekidačka frekvencija, a talasnost ostala mala, potrebno je povećati vrijednost induktivnosti zavojnica PFC-a. Ako je ovo urađeno korektno, veličina EMI filtera se može značajno smanjiti, a da induktivnost zavojnice PFC-a ne bude veća u odnosu na onu koja bi se upotrijebila kod klasičnog PFC-a. *Interleaving* upravljanje može povećati efikasnost PFC kola [4].

III. BRIDGELESS PFC

Dalji razvoj PFC-a je podrazumijevao određene promjene *interleaving* strukture kako bi se još više povećala efikasnost kola. Smanjenje broja poluprovodničkih komponenti dovelo bi do smanjenja gubitaka vođenja. Dio PFC-a koji daje određene gubitke vođenja je mosni ispravljač. Za vrijeme rada PFC-a, dvije diode mosnog ispravljača su uvijek aktivne. Zbog toga je konstruisan *bridgeless* PFC (Sl. 4).

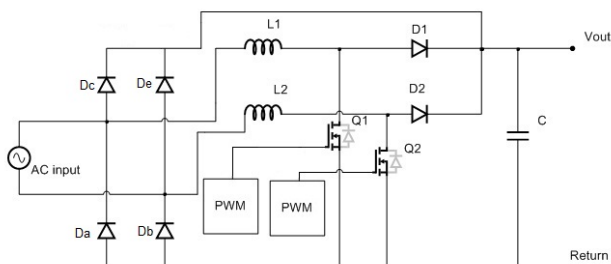


Slika 4. Bridgeless PFC

Kao što se vidi sa slike, postoje dvije prekidačke grane. Ulazna struja prolazi kroz onu granu koja je aktivna za polovinu talasa. Ipak, tranzistor neaktivne grane ima svoju ulogu, jer njegova povratna dioda služi da se zatvori strujni krug. Ovakva struktura eliminiše pad napona jedne diode, čime se povećava efikasnost [6].

Ipak, ova struktura ima određene nedostatke, što je rezultat činjenice da je faza plivajuća u odnosu na masu PFC-a. Određeni broj PFC kontrolera treba da mjeri ulazni napon i struju zavojnice. Ove zahtjeve je teško ostvariti za *bridgeless* strukturu. Pored ovih nedostataka, glavni problem predstavlja EMI filtriranje. Masa izlaznog napona je uvijek plivajuća u odnosu na odgovarajući AC ulaz. To dovodi do velikog šuma koji je teško filtrirati [6].

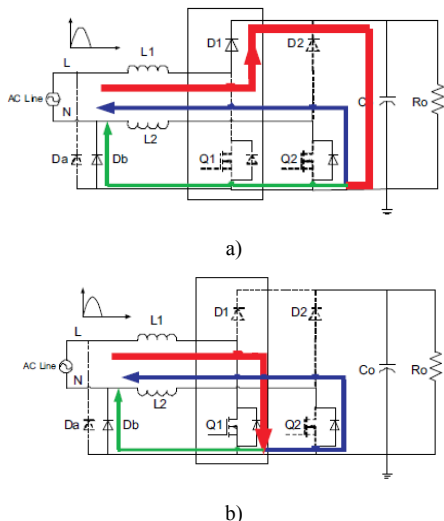
Da bi se prevazišli nedostaci *bridgeless* PFC-a, predloženo je *semi-bridgeless* kolo (Sl. 5). Kod ove topologije PFC zavojnica je podijeljena na dvije manje zavojnice i direktno spojena na AC ulaze. Takođe, dvije diode (D_a i D_b) su spojene na masu izlaza PFC-a, čime ulazni napon više nije plivajući u odnosu na masu. Na ovaj način je ulazni napon PFC-a ispravljena sinusoida u odnosu na masu, čime se uklanja problem mjerenja napona. Takođe, postavljanjem diode se smanjuje šum, što olakšava EMI filtriranje [6].



Slika 5. Semi-Bridgeless PFC

Ovo kolo, takođe, zahtijeva i dvije diode za prvo punjenje PFC kondenzatora (D_c i D_e). Nakon punjenja kondenzatora i početka rada pretvarača ove dvije diode nemaju više nikakvu ulogu u radu PFC-a. U tome se razlikuju od standardnog *interleaving* PFC-a, jer je aktivna samo jedna dioda mosnog ispravljača [6].

Ipak, problem mjerenja struje i u ovom kolu ostaje neriješen. Struja se vraća kroz diode mosta, ali i kroz povratnu diodu neaktivnog tranzistora. Na Sl. 6 je prikazan tok struje za pozitivnu poluperiodu [6].

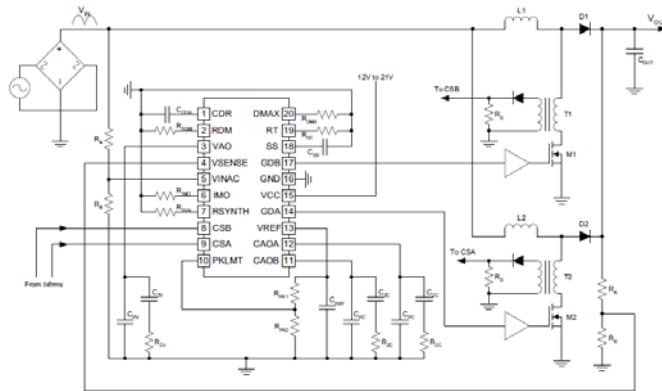


Slika 6. Tok struje za pozitivnu poluperiodu kod Semi-Bridgeless PFC-a: a) PFC dioda je aktivna; b) PFC tranzistor je aktivan [6]

Postoje određeni metodi koji koriste četiri strujna transformatora da bi mjerili struje tranzistora. Međutim, ovo upravljački krug čini komplikovanim i potrebna je mreža za resetovanje da bi se demagnetizovali strujni transformatori. Upravljačko kolo UCC28070 koje se koristi za *interleaving* PFC se može koristiti i za *semi-bridgeless* PFC bez modifikovanja upravljačkog i mjernog kruga [6].

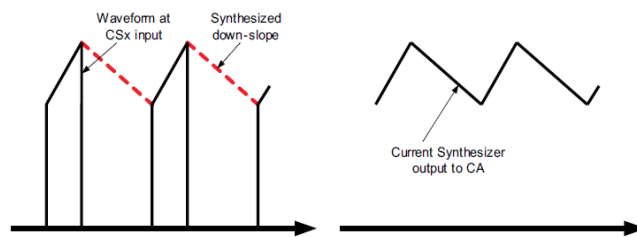
IV. UPRAVLJAČKO KOLO UCC28070

UCC28070 je upravljačko kolo za korekciju faktora snage koje daje dva upravljačka signala (PWM) fazno pomjerena za 180° , što mu omogućava upravljanje *interleaving* PFC-om. Na Sl. 7 je prikazana pojednostavljena šema *interleaving* PFC-a sa upravljačkim kolom UCC28070 [5].



Slika 7. Pojednostavljena šema interleaving PFC-a sa upravljačkim kolom UCC28070 [5]

Jedno od najvažnijih noviteta UCC28070 kola je način mjerenja struje zavojnice (Sl. 8). Za vrijeme vođenja glavnog prekidača, struje zavojnica se mjere na CSA i CSB pinovima upravljačkog kola preko strujnih transformatora. Istovremeno se odvija kontinualno mjerenje ulaznog i izlaznog napona preko VINAC i VSENSE pinova, što dozvoljava upravljačkom kolu da estimira struju zavojnice za vrijeme vođenja diode [5].

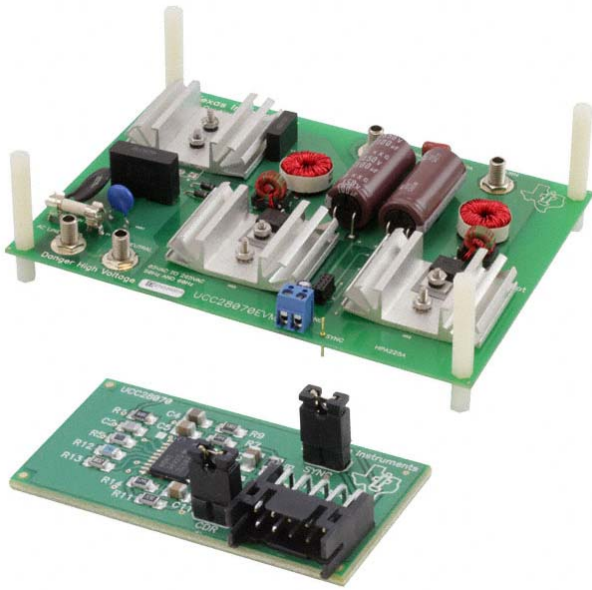


Slika 8. Izmjerena/estimirana struja zavojnice [5]

UCC28070 se može koristiti i kao upravljačko kolo za *semi-bridgeless* PFC. Kao što je već rečeno, mjerenje struje predstavlja problem za *semi-bridgeless* PFC. Najveća prednost ovog upravljačkog kola je ta što ono unutar sebe estimira struju zavojnice za vrijeme vođenja diode. Time se eliminiše potreba za strujnim transformatorom ili preciznim otpornikom [5].

V. TESTIRANJE PFC-A IZLAZNE SNAGE 300W

Za potrebe testiranja je korišten *Texas Instruments interleaving* PFC razvojni sistem UCC28070EVM (Sl. 9). Električne karakteristike kola su date u Tabeli I. Prekidačka frekvencija PFC-a se određuje postavljanjem željene vrijednosti otpornika na RT pin upravljačkog kola. U konkretnom slučaju prekidačka frekvencija ovog kola iznosi 200 kHz. Ono što se može primijetiti iz tabele je da je ovaj razvojni sistem za popravku faktora snage projektovan za rad sa univerzalnim naponom, tako da može raditi pri ulaznim naponima od 85 V do 265 V i pri frekvenciji mreže od 47 Hz do 63 Hz. Maksimalna snaga koju kolo može dati na izlazu je 300 W, pri čemu je izlazni napon konstantan i iznosi 390 V, a izlazna struja promjenljiva i pri maksimalnom opterećenju iznosi 0.77 A. Takođe, efikasnost datog kola ne smije biti ispod 90%, a faktor snage ispod 0,9.



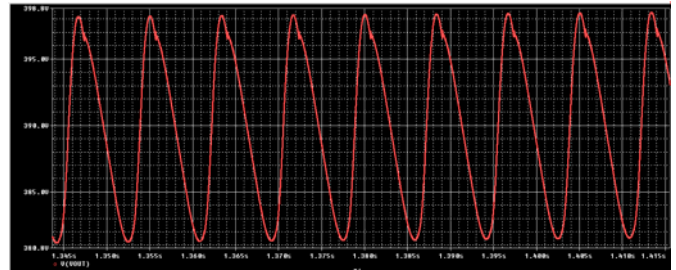
Slika 9. Razvojni sistem UCC28070EVM

TABELA I. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE PFC-A [7]

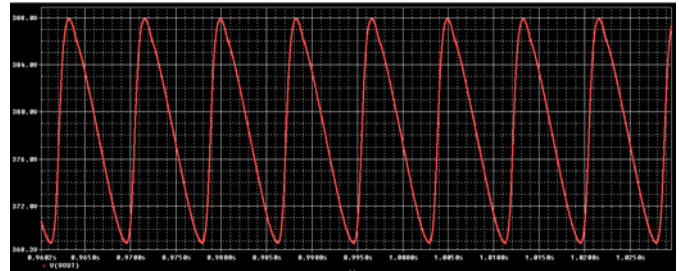
Definicija	Minimalna vrijednost	Standardna vrijednost	Maksimalna vrijednost	Jedinica
Ulazni napon	85		265	V
Izlazni napon		390		V
Frekvencija mreže	47		63	Hz
Faktor snage (PF) pri maksimalnom opterećenju	0.9			
Izlazna snaga			300	W
Efikasnost pri maksimalnom opterećenju	90			%

Za prvi dio testiranja, napravljena je šema PFC-a sa gore navedenim karakteristikama u PSpice-u. Model upravljačkog kola UCC28070 za PSpice je preuzet od Texas Instrumentsa.

Simulacija je rađena i za *interleaving* i za *bridgeless* PFC. Na Sl. 10 je prikazana talasnost izlaznog napona za *interleaving* i *bridgeless* strukture pri maksimalnom opterećenju.



a)

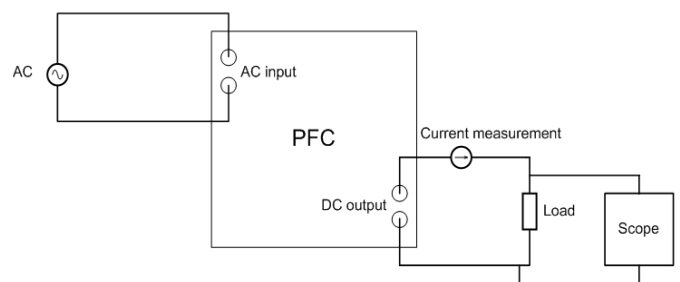


b)

Slika 10. Grafik izlaznog napona u PSpice-u: a) interleaving PFC; b) bridgeless PFC

Sa grafika se može primijetiti da pri maksimalnom opterećenju na izlazu, napon na izlazu *bridgeless* PFC-a pada na 380 V, dok je kod *interleaving* PFC-a ostao 390 V. To znači da maksimalna snaga *bridgeless* PFC-a nije 300 W, već oko 280 W. Pri manjim opterećenjima na izlazu, napon na izlazu iz *bridgeless* PFC-a je 390 V.

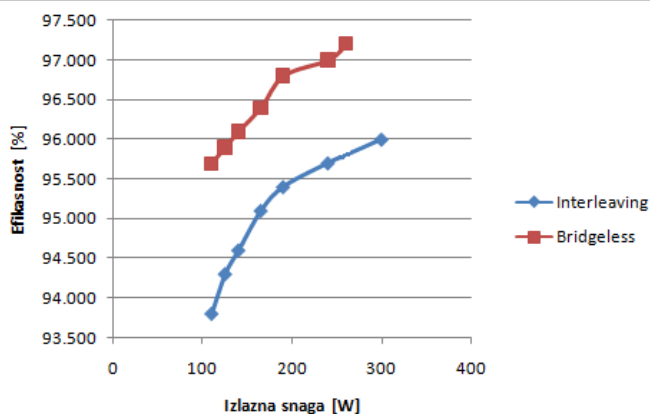
Dalja testiranja su rađena na razvojnem sistemu UCC28070EVM pri ulaznim naponima 115 Vac i 230 Vac i sa sedam različitih opterećenja na izlazu: 300W (maksimalno opterećenje), 240 W, 190 W, 165 W, 140 W, 125 W i 110 W. Šema spajanja PFC kola na ulazni napon i opterećenje je data na Sl. 11.



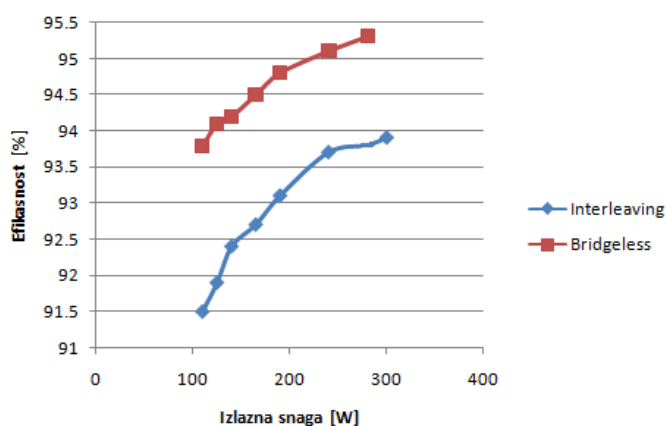
Slika 11. Šema spajanja razvojnog sistema PFC-a na ulazni napon i opterećenje

Uporedo su testirani i *interleaving* i *bridgeless* PFC. Na pločici je direktno napravljena modifikacija tako da se od *interleaving* PFC-a dobije *bridgeless* PFC sa istim elementima na pločici i sa istim upravljačkim kolom UCC28070. Glavni parametri koji su praćeni prilikom testiranja su efikasnost kola,

faktor snage (PF), sadržaj viših harmonika i talasnost izlaznog napona. Na Sl. 12 i 13 su prikazane zavisnosti efikasnosti od snage na izlazu, pri različitim ulaznim naponima.

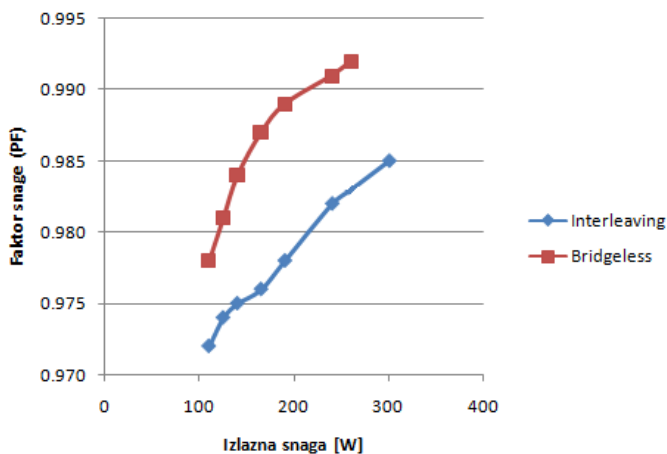


Slika 12. Efikasnost kola pri 230 Vac napajanju

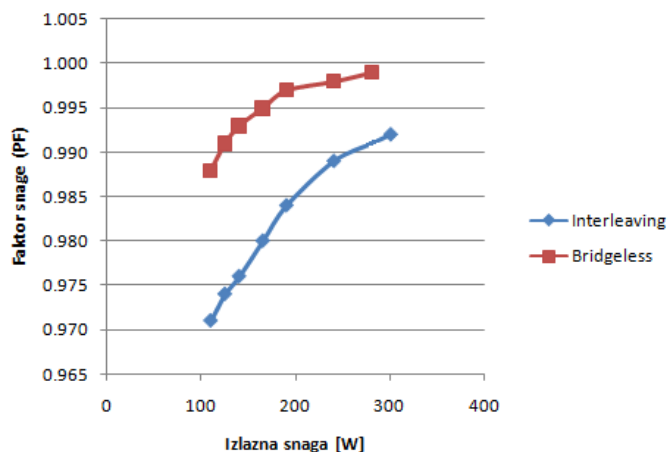


Slika 13. Efikasnost kola pri 115 Vac napajanju

Kao što se može primjetiti sa grafika, efikasnost je veća za *bridgeless* PFC. Na Sl. 14 i 15 su prikazane zavisnosti faktora snage u odnosu na izlaznu snagu.



Slika 14. Faktor snage kola pri 230 Vac napajanju



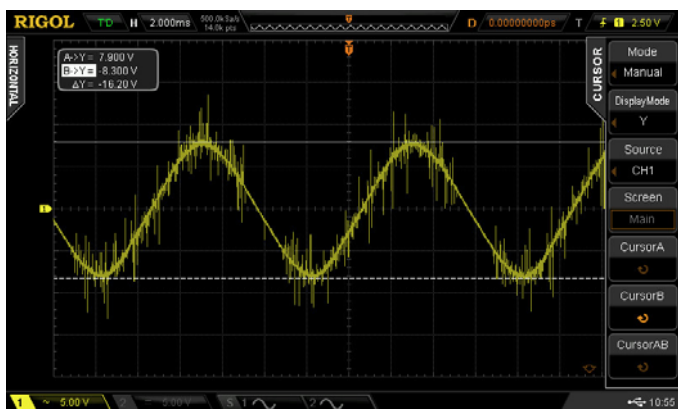
Slika 15. Faktor snage kola pri 115 Vac napajanju

Grafik faktora snage u odnosu na opterećenje pokazuje da je i u ovom slučaju *bridgeless* PFC bolji u odnosu na *interleaving* PFC. I ostala dva parametra koja su se mjerila prilikom testiranja (talasnost izlaznog napona i sadržaj viših harmonika) daju prednost *bridgeless* PFC-u. U tabeli II je prikazana talasnost izlaznog napona za obje vrste PFC-a.

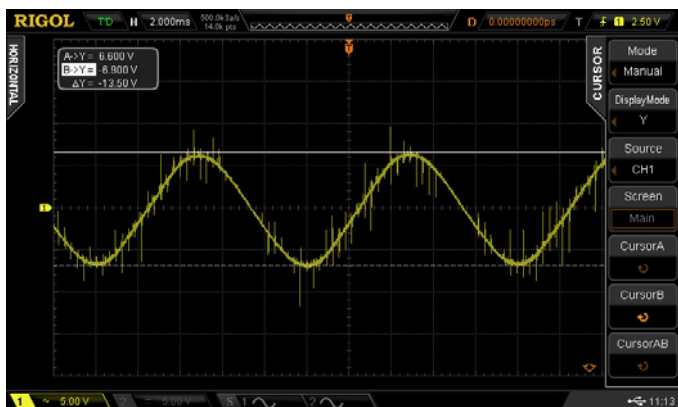
TABELA II. TALASNOST IZLAZNOG NAPONA

Izlazna snaga [W]	Talasnost izlaznog napona za interleaving PFC [V]	Talasnost izlaznog napona za bridgeless PFC [V]
300 (za bridgeless PFC 260 W)	16,2	13,5
240	13,1	11,9
190	11,1	9,9
165	9,6	8,3
140	8,2	7,36
125	7,36	6,6
110	6,64	5,96

Na Sl. 16 je prikazana talasnost izlaznog napona za 230 Vac mrežu pri maksimalnom opterećenju. Talasnost izlaznog napona za *interleaving* PFC je u ovom slučaju veća u odnosu na talasnost *bridgeless* PFC-a za oko 3 V i ne mijenja se za različite vrijednosti mrežnog napona.



a)



b)

Slika 16. Talasnost izlaznog napona pri maksimalnom opterećenju i 230 Vac mreži: a) Interleaving PFC; b) Bridgeless PFC

Posljednji parametar po kojem se vršilo poređenje je sadržaj viših harmonika. I u ovom slučaju *bridgeless* struktura se pokazala kao bolja. U tabeli III će biti prikazane vrijednosti THD-a struje, koji su dobijeni prilikom testiranja.

TABELA III. THD STRUJE

Izlazna snaga [W]	230 Vac		115 Vac	
	THD struje interleaving PFC-a [%]	THD struje bridgeless PFC-a [%]	THD struje interleaving PFC-a [%]	THD struje bridgeless PFC-a [%]
300	16,8	11,8 (izlazna snaga 260 W)	8,7	3,6 (izlazna snaga 280 W)
240	18,8	12,5	11,1	4,8
190	20,7	14,5	14,5	7,0
165	21,6	16,1	17,3	8,7
140	22,1	17,3	19,7	10,8
125	22,0	19,0	21,5	13,1
110	22,3	20,5	22,2	14,8

Jedini nedostatak *bridgeless* PFC-a u odnosu na *interleaving* PFC je taj što sa istim komponentama *bridgeless*

PFC daje manju maksimalnu snagu na izlazu kola. Dok *interleaving* PFC ima maksimalnu snagu od 300 W, *bridgeless* PFC na izlazu daje maksimalnih 260 W za 230 Vac mrežu i 280 W za 115 Vac mrežu. Ovaj nedostatak *bridgeless* PFC-a se pokazao i na simulaciji.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su opisane različite strukture kola za popravku faktora snage, gdje je akcenat stavljen na PFC kola koja koriste dva podizača koja rade fazno pomjerena za 180°. To su *interleaving* i *bridgeless* PFC. Jedno od upravljačkih kola koja se koriste za *interleaving* PFC je UCC28070. Prednost ovog kola je što se može koristiti i za upravljanje *bridgeless* PFC-om, bez da se uopšte moraju mijenjati komponente kola. Testiran je *Texas Instruments interleaving* PFC izlazne snage 300W, a zatim je na istoj pločici napravljen *bridgeless* PFC. Poređenjem rezultata oba PFC-a, pokazalo se da *bridgeless* PFC ima bolji faktor snage, efikasnost, talasnost izlaznog napona i sadržaj viših harmonika. Nedostatak *bridgeless* PFC-a je što sa istim komponentama ne može da da maksimalnu izlaznu snagu od 300 W. Dalji koraci razvoja će biti konstrukcija *interleaving* i *bridgeless* PFC-a izlazne snage 2500 W.

LITERATURA

- [1] ON Semiconductor, www.onsemi.com, "Power Factor Correction (PFC) Handbook, Choosing The Right Power Factor Controller Solution," April 2014.
- [2] Fairchild Semiconductor, www.fairchildsemi.com, "Power Factor Correction (PFC) Basics," Avgust 2004.
- [3] Jim Noon, "UC3855A/B High Performance Power Factor Preregulator," Texas Instruments, April 2004.
- [4] Michael O'Loughlin, "An Interleaving PFC Pre-Regulator For High-Power Converters," Texas Instruments, 2006.
- [5] Texas Instruments, "Interleaving Continuous Conduction Mode PFC Controller," Novembar 2008.
- [6] Liu ChueChao, Wang ZhiHao, "UCC28070 Implement Bridgeless Power Factor Correction (PFC) Pre-Regulator Design," Texas Instruments, Juli 2009.
- [7] Texas Instruments, "Using the UCC28070EVM, User's Guide," Maj 2009.

ABSTRACT

Power factor correction is accomplished with a boost converter topology. This paper explains two types of PFC: interleaving and bridgeless PFC. Both types of PFC can be controlled with the same controller UCC28070. Because of that, it is easy to perform tests and make comparison between these two types of PFC. In this concrete case comparison is made on the PFC with the output power of 300 W and output voltage 390 V. Tests have been performed on 230 Vac grid and on 115 Vac grid. Comparison is made according to these parameters: efficiency, power factor, THD and ripple of the output voltage.

TESTING AND COMPARISON OF INTERLEAVING AND BRIDGELESS PFC

Saša Vučičević, Nijaz Hadžimejlić, Pero Čeklić