

Kapacitivni bežični prenos električne energije

Bogdan Jugović
 ZP “Elektrodistribucija” a.d. Pale
 Istočno Sarajevo, RS-BiH
 bogdan.jugovic@yahoo.com

Radivoje Đurić
 Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
 Beograd, Srbija
 rade@etf.rs

Sažetak—U radu je opisan princip rada kapacitivnog bežičnog prenosa električne energije. Na bazi modela spreznih kondenzatora proračunate su vrijednosti pasivnih komponentata i isprojektovan laboratorijski prototip kapacitivnog prenosa snage 5W na učestanosti od 1MHz. Pogodnim upravljanjem obezbjeđeno je efikasno prekidanje GaN prekidačkih tranzistora sa nultim naponom pri uključenju, čime su minimizirani prekidački gubici i povećana efikasnost energetske konverzije. Eksperimentalni i rezultati dobijeni simulacijama zasnovanim na modelu kapacitivnog prenosa pokazali su dobro slaganje, čak i u uslovima velikog stresa na prekidačima.

Ključne riječi—Kapacitivni; Bežični prenos energije; Kondenzator; PSIM;

I. UVOD

U poslednje vrijeme svjedoci smo velikog napora koji se ulaže u razvoj uređaja koji ne koriste energiju fosilnih goriva. Među njima su najznačajniji oni koji koriste baterije za skladištenje energije. Sa napretkom tehnologije, efikasno i komforno bežično punjenje baterija postalo je moguće.

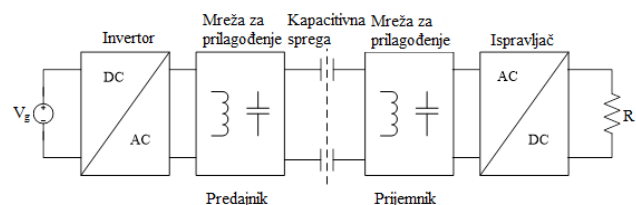
Istraživanja iz oblasti bežičnog prenosa električne energije dovela su do razvoja nekoliko načina prenosa. Koji način je najpogodniji za prenos energije zavisi od konkretne primjene. Iskrok je napravljen kod induktivnog prenosa energije na mala rastojanja, a u poslednje vrijeme izdvaja se i kapacitivni prenos.

Induktivni i kapacitivni prenos u osnovi su veoma slični, razlika je u komponenti polja koje se koristi za prenos energije kroz neprovodni medijum. Prenos električnim poljem u odnosu na magnetno je prirodniji, jer se zemlja ponaša kao veliki kapacitet, te se taj kapacitet može iskoristiti u određenim aplikacijama. Pored toga interakcija sa metalnim dijelovima kod kapacitivnog prenosa može poboljšati prenos, dok to nije slučaj kod induktivnog prenosa. U poređenju sa magnetnim poljem sistem za prenos električnim poljem je nešto složeniji za projektovanje. Razlog tome je veće rasipanje linija električnog polja, koje su otvorene linije i završavaju se na elementima u okolnom prostoru.

II. KAPACITIVNI PRENOS ENERGIJE

U osnovi kapacitivni prenos energije zasniva se na principu dobro poznatog rada kondenzatora. Prenos energije kapacitivnom spregom može biti konfigurisan kao unipolarni ili bipolarni.

Unipolarni prenos koristi sistem od jednog kondenzatora za prenos energije kroz vazduh, dok je povratni put za struju ostvaren preko zemlje. Bipolarni sistem je nešto složeniji, koristi diferencijalni par kondenzatora za ostvarivanje veze predajnik-prijemnik. Na Sl. 1 prikazana je topologija bipolarnog prenosa za kapacitivni bežični prenos energije.



Slika 1. Blok dijagram kapacitivnog prenosa.

Teorijski je sistem veoma prost, naime jednosmjerni napon se vodi na ulaz invertora gdje se pretvara u naizmjenični napon visoke frekvencije, reda MHz.

Dalje na strani predajnika se nalazi mreža za prilagođenje. Teorijski mreža za prilagođenje može biti izostavljena, međutim performanse sistema se značajno smanjuju, razlog je pojava reaktivne energije koja kruži po sistemu praveći bespotrebne gubitke. Prilikom projektovanja sistema veliki dio vremena odlazi na projektovanje mreže za kompenzaciju ili prilagođenje. Postoji niz mreža koje se koriste za ovu svrhu od onih jednostavnih sa jednim induktivnim elementom, preko sistema mreža sa nekoliko LC elemenata, pa sve do LC elemenata vezanih u niz od n ćelija.

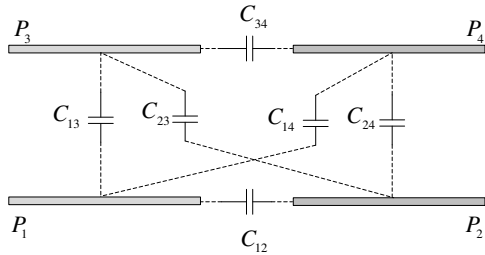
Sledeći elementi su sprezni kondenzatori po kojima je sistem i dobio ime. Fizički sistem izgleda dosta prosto, međutim u električnom pogledu sistem je dosta složen za analizu. Kod bipolarnog prenosa sistem ploča može biti postavljen paralelno, ili sve ploče jedna iznad druge, sa određenim rastojanjem, pored toga tu je i poboljšani sistem sa šest ploča.

Na strani prijemnika nalazi se takođe mreža za prilagođenje. Ova mreža je obično identična mreži na strani predajnika, ali postavljena kao lik u ogledalu. Između mreže za prilagođenje i potrošača nalazi se ispravljač. I konačno zadnji element sistema je potrošač.

Električna analiza sistema može se izvesti na nekoliko načina. Čest je slučaj da se pravi poređenje sa induktivnim prenosom, te da se ekvivalentni model izvodi na osnovu induktivnog prenosa [1], [2].

III. EKVIVALENTNI MODEL SPREŽNIH KONDENZATORA

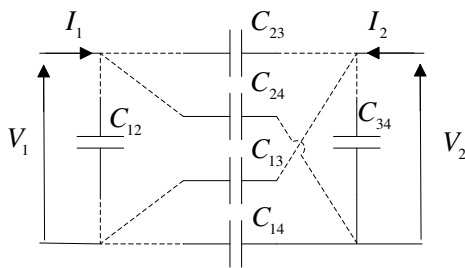
U ovom poglavlju dat je model sprežnih kondenzatora kao najznačajnijeg segmenta bežičnog prenosa energije kapacitivnom spregom. Model je izveden za paralelno postavljene ploče, prikazan na Sl. 2, a može se koristiti i za druge tipove kapacitivne sprege.



Slika 2. Paralelni tip kapacitivne sprege.

U ovom slučaju ploče su raspoređene tako da je jedan par ploča postavljen na predajniku, ploče P₁ i P₂, dok je drugi par postavljen na prijemniku, ploče P₃ i P₄, Sl. 2. Razlikujemo šest kapacitivnih sprega između ploča, prve su sprežne kapacitivnosti C₁₃ i C₂₄ koje su glavne i čija je uloga prenos energije od predajnika ka prijemniku. Druge kapacitivnosti su parazitne i one smanjuju performanse prenosa, C₁₄ i C₂₃ su unakrsne, dok su C₁₂ i C₃₄ samostalne. Sistemu se može dodati još devet kapacitivnosti koje znatno usložnjavaju model. Ove kapacitivnosti odnose se na sprege između ploča i podloge, ploča i metalnih dijelova prijemnika, kao i sprege metalnih dijelova prijemnika i podloge predajnika. Sa stanovišta složenosti sistema za analizu, sistem sa šest sprežnih kondenzatora je dovoljno složen i dovoljno tačan. Parazitne kapacitivnosti se mogu zanemariti u slučaju dobre usklađenosti između ploča i malog rastojanja.

Do ekvivalentnog modela sprežnih kondenzatora sa Sl. 2. možemo doći preko Y parametara četveropola. Radi lakše analize posmatraćemo šemu sa Sl. 3. koja je ekvivalentna kapacitivnim vezama sa Sl. 2.



Slika 3. Električni model sprežnih kapacitivnosti.

Na osnovu električne šeme sa Sl. 3 lako se dobijaju Y parametri ove dvoportne mreže:

$$Y_{11} = j\omega \left[C_{12} + \frac{(C_{13} + C_{14})(C_{23} + C_{24})}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \right]$$

$$Y_{22} = j\omega \left[C_{34} + \frac{(C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \right], \quad (1)$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -j\omega \left[\frac{C_{24}C_{13} - C_{14}C_{23}}{C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}} \right]$$

ω – kružna učestanost;

C₁₂, C₃₄ – sopstvene kapacitivnosti;

C₂₃, C₁₄ – unakrsne kapacitivnosti;

C₁₂, C₃₄ – sprežne kapacitivnosti.

Ako uvedemo ekvivalentne kapacitivnosti:

$$C_1 = \frac{Y_{11}}{j\omega}; \quad C_2 = \frac{Y_{22}}{j\omega}; \quad C_m = \frac{Y_{12}}{j\omega}; \quad (2)$$

dobijamo sistem jednačina:

$$I_1 = j\omega C_1 V_1 - j\omega C_m V_2$$

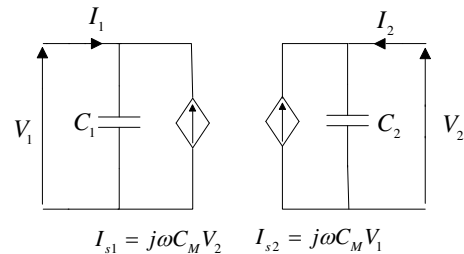
$$I_2 = -j\omega C_m V_1 + j\omega C_2 V_2, \quad (3)$$

C₁ – ekvivalentni kapacitet na strani predajnika;

C₂ – ekvivalentni kapacitet na strani prijemnika;

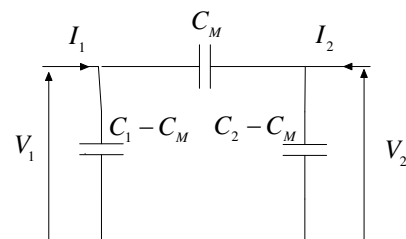
C_m – međusobna kapacitivnost.

Ekvivalentiranjem jednačine (3) kontrolisanim strujnim izvorima i pasivnim elementima, dobijamo ekvivalentnu zamjensku šemu prikazanu na Sl. 4.



Slika 4. Ekvivalentni model sprežnih kapacitivnosti sa kontrolisanim izvorima, Is1, Is2 – struje strujnih izvora na strani predajnika i prijemnika, respektivno.

Na osnovu relacija koje povezuju parametre π modela sa Y parametrima, dobijamo šemu sa Sl. 5.



Slika 5. Ekvivalentni π model sprežnih kapacitivnosti.

Po analogiji koeficijenta sprege kod induktivnog prenosa, uvešćemo koeficijent sprege kod kapacitivnog prenosa, koji ima oblik:

$$k_c = \frac{C_m}{\sqrt{C_1 C_2}} = \frac{\sqrt{C_{24} C_{13} - C_{14} C_{23}}}{\sqrt{C_{12} (C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}) + (C_{13} + C_{14})(C_{23} + C_{24})}} \cdot \frac{\sqrt{C_{24} C_{13} - C_{14} C_{23}}}{\sqrt{C_{34} (C_{13} + C_{14} + C_{23} + C_{24}) + (C_{13} + C_{23})(C_{14} + C_{24})}} \quad (4)$$

Koeficijent sprege će biti jednak jedinici ako se ponište parazitski efekti, odnosno kapaciteti C_{12} , C_{34} , C_{14} , C_{23} [3], [4].

Pored sprežnih kondenzatora važan element prenosa je mreža za prilagođenje, u zavisnosti od tipa mreže svaku mrežu je neophodno ponaosob analizirati. U ovom radu neće biti opisana analiza mreža za prilagođenje, više o tome se može naći u [1] i [5].

IV. EFIKASNOST PRENOSA

Kod prenosa energije, naročito velikih snaga, značajan parametar je efikasnost. Prema [2] izraz za maksimalnu efikasnost ima oblik:

$$\eta_{\max} = \frac{k_c^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k_c^2 Q_1 Q_2})} \quad (5)$$

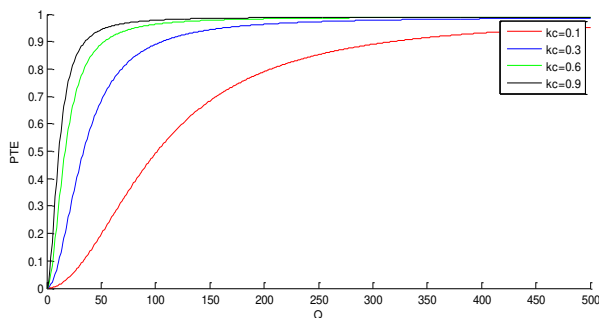
- k_c – koeficijent sprege;
- Q_1 – faktor dobrote predajnika;
- Q_2 – faktor dobrote prijemnika;

maksimalnu efikasnost moguće je postići za:

$$\alpha_{\max} = \frac{G_L}{G_2} = \sqrt{1 + k_c^2 Q_1 Q_2} \quad (6)$$

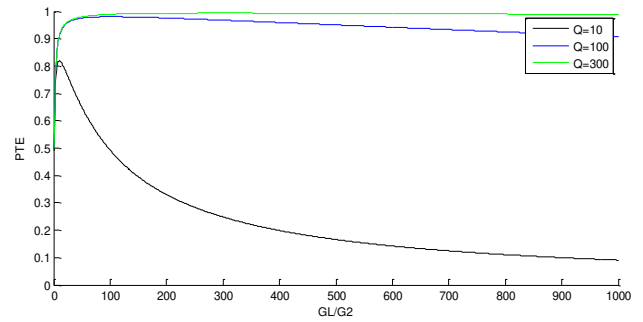
- G_L – provodnost potrošača;
- G_2 – provodnost prijemnika.

Iz prethodnih relacija može se vidjeti da efikasnost zavisi od tri međusobno zavisna parametra faktora dobrote predajnika, faktora dobrote prijemnika i provodnosti potrošača G_L . Pored navedenih parametara tu je i koeficijent sprege koji često u ovakvoj primjeni ne može ostati konstantan pa se mora posmatrati kao nezavistan parametar. Sledeći grafici prikazuju međusobne zavisnosti parametara sistema.



Slika 6. Efikasnost sistema u funkciji Q faktora kola i koeficijenta sprege.

Za dobijanje rezultata usvojeno je da je Q faktor predajnika i prijemnika jednak. Sa porastom koeficijenta sprege raste i efikasnost.



Slika 7. Efikasnost sistema u funkciji α .

Sa prethodnog grafika uočava se da za određenu vrijednost Q faktora kola, potrošač mora biti odabran iz tačno definisanog opsega vrijednosti. Za veće vrijednosti Q faktora opseg je širi.

V. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA, PRAKTIČNA REALIZACIJA PRENOSA

U ovom poglavlju su prikazani rezultati eksperimentalnog istraživanja bežičnog prenosa energije kapacitivnom spregom na laboratorijskom prototipu. Pored eksperimentalnih rezultata biće prikazani i rezultati simulacija bežičnog prenosa energije pomoću softverskog paketa PSIM.

Za eksperimentalni bežični prenos energije koriste se sprežni kondenzatori prikazani u prethodnom poglavlju (Sl. 2). Korištene su četiri ploče jednakih dimenzija, širine i dužine ploča 30 cm. Rastojanje između ploča P_{1-3} i P_{2-4} iznosi $d=18$ cm, dok sopstveno rastojanje iznosi $d_1=15$ cm. Dimenzije su odabrane tako da bi se mogao koristiti model prikazan u [5]. Karakteristične kapacitivnosti između ploča iznose $C_m=2,8$ pF; i $C_{in1}=C_{in2}=9,8$ pF;

Mreža koja se koristi za prilagođenje je LC, sa jednim kalemom i jednim kondenzatorom. Mreže sa kondenzatorom pogodne su jer snižavaju rezonantnu frekvenciju sistema, ali i povećavaju izlaznu snagu.

Korišteni kalem je sa vazдушnim jezgrom, odnosno drvenim jezgrom čije se karakteristike mogu posmatrati kao da je u pitanju vazduh. Ovdje je jako bitno napomenuti da kalem u ovakvom sistemu sa vazдушnim jezgrom mora biti projektovan i napravljen od lakirane licnaste žice ako se želi postići dobra efikasnost. U našem slučaju korištena je lakirana žica punog presjeka, prečnika 2 mm, namotana u jednom sloju. Jednoslojni kalem je pogodan jer izolacija podnosi veći probojni napon. Da bi se smanjio efekat blizine i ekvivalentna otpornost držala u zadovoljavajućim granicama, uzeto je da razmak između namotaja bude 2 mm. U eksperimentalnom ispitivanju pokazalo se da se ovako konstruisan kalem dobro pokazao iz ugla elektroenergetike, ali ne i iz ugla mikrotalasne tehnike. Zbog visokog napona koji vlada na priključcima kalema, ali i dimenzija kalema, dolazi do velikog zračenja energije u okolni prostor, što dovodi do povećanih gubitaka u sistemu. Izračunate karakteristike kalema date su u nastavku: $L=104,15$

μH ; $R=1,332 \Omega$; $f_{\text{rez}}=7,435 \text{ MHz}$; Mala odstupanja od proračunate i stvarne induktivnosti nisu od značaja, koliko je od značaja da su kalemovi na strani predajnika i prijemnika jednakih karakteristika.

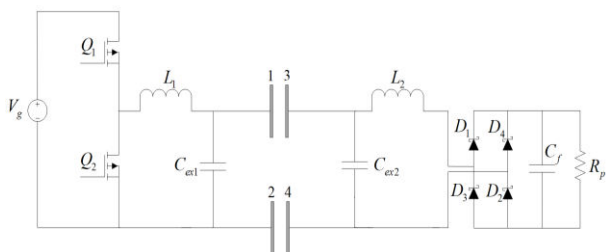
Eksterni kondenzatori koji se koriste na strani predajnika i prijemnika su film kondenzatori $C=220 \text{ pF}$.

Kao pobuda na strani predajnika koristi se polumosni inverter, projektovan da propušta veliku snagu na visokoj frekvenciji. Korištena razvojna pločica je EPC9034 sa Galijum-Nitridnim tranzistorima karakteristika: $V_{\text{DS}}=80\text{V}$; $R_{\text{on}}=2,2 \text{ m}\Omega$; $I_{\text{D}}=90 \text{ A}$; $I_{\text{D,puls}}=390 \text{ A}$;

Na strani prijemnika nalazi se punotalasni ispravljač sa Šotki diodama SS16, direktne struje 1 A i inverznog napona 60 V , pored toga tu je i filterski kondenzator kapaciteta $1 \mu\text{F}$.

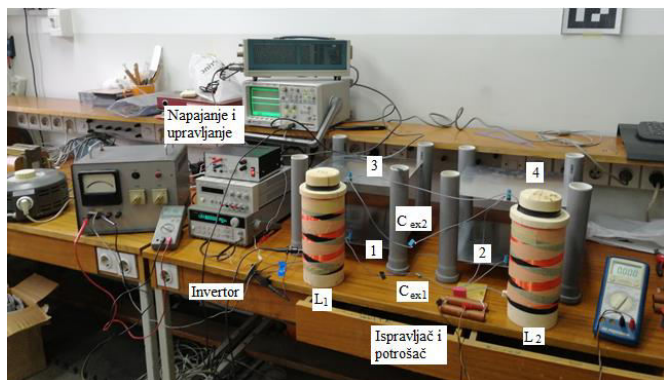
I na kraju kao zadnja komponenta je potrošač koji je priključen na krajeve ispravljača, koji ima čisto rezistivan karakter, sa otporom od $16,6 \Omega$.

Šema sistema prikazana je na sledećoj slici:



Slika 8. Električna šema za eksperimentalni i simulacioni istraživanja.

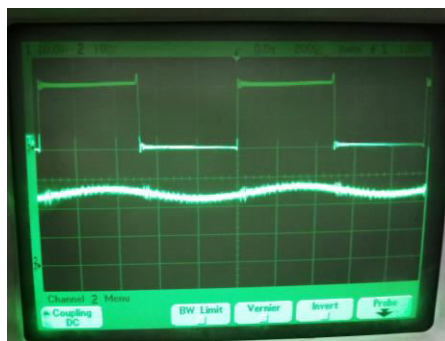
Dalje ćemo prikazati i eksperimentalni prototip koji je znatno zanimljiviji od same šeme:



Slika 9. Eksperimentalni prototip kapacitivnog prenosa električne energije.

U nastavku su prikazani karakteristični talasni oblici signala. Poređenja radi, uporedo su prikazani i pojedini karakteristični signali dobijeni simulacijom.

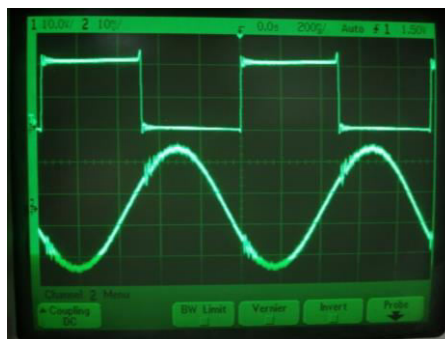
Prvi snimljeni signali su napon na izlazu invertora i srednja vrijednost ulazne struje koju inverter povlači iz mreže. Snimljene veličine prikazane su na sledećoj slici.



Slika 10. Talasni oblik napona na izlazu invertora 10V/pod; Kanal 2: Srednja vrijednost ulazne struje, 0,5 A/pod.

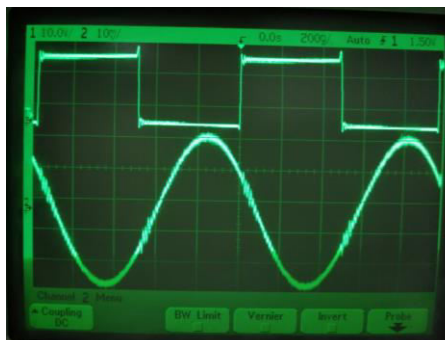
Sa prvog grafika se uočava da je upravljanje prekidačima simetrično, odnosno sa faktorom ispunenosti od 50 %. Napon izvora za napajanje je 20 V , ovaj napon se prosljeđuje na ulaz predajnika kada je tranzistor Q_1 aktivan. Frekvencija na kojoj rade prekidači Q_1 i Q_2 je $1,025 \text{ MHz}$ i odgovara rezonantnoj frekvenciji sistema.

U nastavku su prikazani talasni oblici struja kalemova I_{L1} i I_{L2} . Dobijeni talasni oblici simulirane i eksperimentalne struje I_{L1} je približno sinusni. Struja kalema L_1 u eksperimentalnim ispitivanjima ima znatno veću maksimalnu vrijednost, što za posledicu ima manju efikasnost sistema.

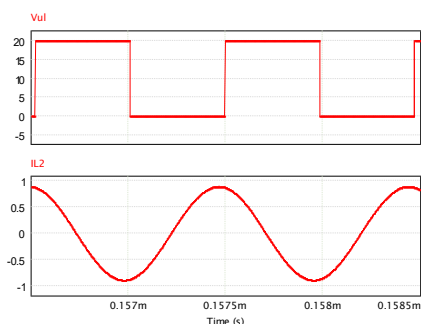


Slika 11. Kanal 2: Talasni oblici struje kalema L_1 , 2A/pod.

Na Sl. 12 prikazana je struja kalema L_2 . Ova struja je na strani prijemnika, a ujedno predstavlja struju potrošača, prije pretvaranja u jednosmjernu.



Slika 12. Kanal 2: Struja kalema L_2 , 0,5 A/pod.



Slika 13. Talasni oblik napona na izlazu invertora; Talasni oblik struje kabela L2, simulirane vrijednosti.

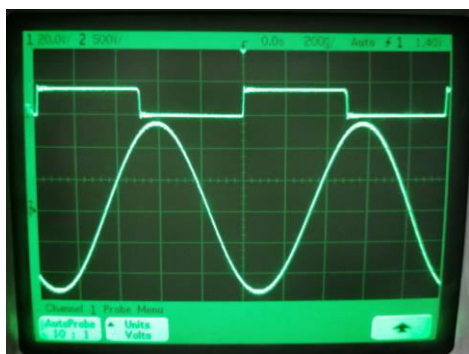
Sa grafika simulirane i eksperimentalne vrijednosti može se uočiti da odstupanje u amplitudi nije veliko.

Odnos struja I_{L1} i I_{L2} je logičan. Možemo napraviti paralelu sa induktivnim prenosom energije, ili čak sa energetske transformatorom. Naime struja kod transformatora je uvijek veća na strani pobude, za komponentu koja potiče od gubitaka u jezgu transformatora. U našem slučaju ne postoji jezgro, ali postoje gubici koji potiču od nesavršenosti elemenata na strani predajnika.

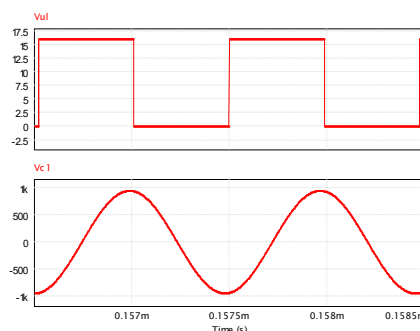
Poređenjem simulacionih i eksperimentalnih rezultata nije teško zaključiti da do gubitaka u sistemu prvenstveno dolazi u kolu na strani predajnika. Snaga koja se predaje potrošaču u simulacionom modelu iznosi 5 W, dok stvarna snaga dobijena eksperimentalnim mjerenjima iznosi 3,75 W.

Jako važan parametar sistema je rad prekidača sa prekidanjem pri nultom naponu pri uključanju (Zero Voltage Switch- ZVS).

Da bi najlakše utvrdili da sistem radi u rezonantnom režimu možemo mjeriti napon na eksternim kondenzatorima. Očekivana vrijednost napona je znatno veća od vrijednosti napona pobude. Talasni oblik napona na eksternom kondenzatoru na strani predajnika prikazan je na Sl. 14 i Sl. 15.



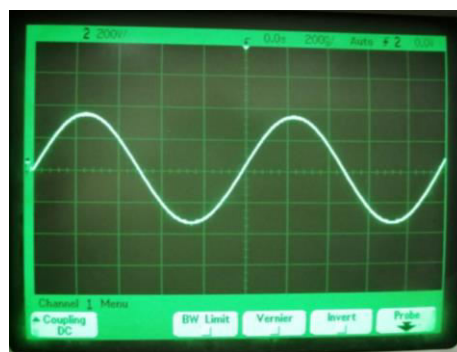
Slika 14. Kanal 2: Talasni oblik napona na eksternom kondenzatoru 500V/pod.



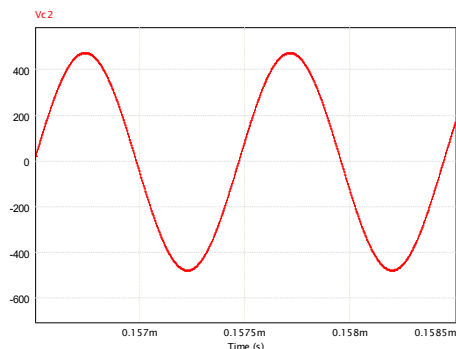
Slika 15. Talasni oblik napona na izlazu invertora; Talasni oblik napona na kondenzatoru Cex1, simulacija.

Poređenjem prethodnih grafika uočava se da naponi vrlo malo odstupaju po amplitudi, za eksperimentalnu i simuliranu vrijednost. Amplituda napona je znatno veća u odnosu na ulazni napon, što govori da sistem radi u rezonanciji.

I na kraju ćemo još prikazati talasni oblik napona na eksternom kondenzatoru na strani prijemnika Sl. 16 i Sl. 17.



Slika 16. Talasni oblik napona na kondenzatoru Cex2, 200V/pod.



Slika 17. Napon na kondenzatoru Cex2, simulacija.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je opisan princip kapacitivnog prenosa električne energije i pokazano je eksperimentalno serijsko rezonantno kolo za prenos energije. Zbog velikih vršnih vrijednosti struja i napona, za visoku efikasnost neophodno je koristiti aktivne i

pasivne komponente koje imaju dobre energetske i RF karakteristike.

Da bi se smanjili gabariti, eksperimentalni prototip je podešen da radi na relativno visokim učestanostima, reda MHz, a za to je bilo neophodno koristiti inverter sa GaN tranzistorima. Podešavanjem pobudih impulsa obezbijeđeno je da GaN tranzistori rade sa tzv. mekanim prekidanjem, odnosno da se uključuju sa nultim naponom na prekidaču, čime su prekidački gubici na njima značajno smanjeni.

Kritičan parametar pri projektovanju kola za prenos je napon koji vlada između ploča. Pri većim naponima napajanja stvaraju se velike vrijednosti prenapona, koji povećavaju gubitke u kompenzacionom kolu, a mogu biti i opasni po korisnike. Smanjenje ovog napona se može postići složenijim kompenzacionim kolima, a kompromis između složenosti i stresa na pasivnim komponentama biće predmet daljih istraživanja.

Zbog jednostavnog kompenzacionog kola sa jednom rezonancijom, primjećeno je da potrošač ima veliki uticaj na efikasnost prenosa snage. Dalja istraživanja bi se mogla usmjeriti na modifikaciju sprežnih kondenzatora i izgradnju sistema sa tri ili četiri rezonantna kola, kao kod induktivnog prenosa, sa ciljem da se umanjuje uticaj nepreciznosti između ploča kondenzatora i gdje bi rastojanje između ploča moglo da postane parametar pri projektovanju.

LITERATURA

- [1] Fei Lu, „High Power Capacitive Power Transfer for Electric Vehicle Charging Applications“, University of Michigan, 2017.

- [2] Fei Lu, Hua Zhang, Chris Mi, „A Review on the Recent Development of Capacitive Wireless Power Transfer Technology“, *Energies - Open Access Journal*, 1. November 2017
- [3] Hua Zhang, Fei Lu, Heath Hofmann, Weiguo Liu, Chris Mi, „A 4-Plate Compact Capacitive Coupler Design and LCL-Compensated Topology for Capacitive Power Transfer in Electric Vehicle Charging Application“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016.
- [4] Brandon Regensburger, Ashish Kumar, Sreyam Sinha, Khurram Afridi, „High-Performance 13.56-MHz Large Air-Gap Capacitive Wireless Power Transfer System for Electric Vehicle Charging“, University of Colorado Boulder, 2018.
- [5] Fei Lu, Hua Zhang, Heath Hofmann, Chunting Chris Mi, „A Double-Sided LC-Compensation Circuit for Loosely Coupled Capacitive Power Transfer“, *IEEE Transaction On Power Electronic*, vol. 33, no. 2, pp. 1633 – 1643, February 2018.

ABSTRACT

The working principle of capacitive wireless transmission of electricity is described in the paper. Based on the model of coupling capacitors, the values of the passive components were calculated and a laboratory prototype of capacitive power transmission of 5W at a frequency of 1MHz was designed. Convenient management ensures efficient switching on of GaN switching transistors with zero voltage switching, minimising switching losses and increasing energy conversion efficiency. Experimental and simulation results based on the capacitive transfer model showed good agreement, even under high-stress conditions on the switches.

CAPACITIVE WIRELESS TRANSMISSION OF ELECTRICITY

Bogdan Jugović, Radivoje Đurić