

Brezžični prenos električne energije

Rok Hodnik¹, Miha Šrekl¹, Selma Čorović¹, Damijan Miljavec¹

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko

E-pošta: rok.hodnik9@gmail.com

Wireless power transfer

Abstract. *Wireless power transfer is an interesting and promising technology that offers the user convenience and ease of use. It broadens the horizon of use of battery powered devices. Due to the capability of more often charging it allows the size of the battery in battery powered devices to be decreased. In this paper the field of wireless power transfer is investigated. A system for transfer of 100 W on the 5 cm distance is built, optimally dimensioned and investigated using simulation environment Matlab Simulink.*

1 Uvod

Brezžični prenos električne energije (BPE) postaja med uporabniki električnih naprav vse bolj priljubljen, saj ponuja kar nekaj prednosti v primerjavi s tradicionalnim žičnim prenosom energije. Takšen način prenosa električne energije uporabniku omogoča enostavnejše polnjenje prenosnih baterijskih naprav. Baterija je lahko v večini primerov zaradi pogostejšega polnjenja med uporabo manjša, v primerjavi z tisto v napravi, ki se polni žično. Zaradi kemične sestave električnih baterij se njihova življenjska doba pri pogosti globoki izpraznitvi krajša. Pogostejše polnjenje zniža stopnjo izpraznitve, kar podaljša življenjsko dobo baterije.

BPE pa ima tudi nekaj pomanjkljivosti v primerjavi z žičnim polnjenjem. Zaradi zračne reže in posledično slabše magnetne sklopitve takšen način polnjenja dosega nižje izkoristke. Nižji izkoristki nastanejo tudi zaradi višjega števila gradnikov potrebnih za delovanje sistema za BPE. Takšen izkoristek je v primerjavi z žičnim načinom polnjenja mnogo nižji, saj se pri žičnem prenosu pojavijo le izgube zaradi prevajanja električnega toka skozi vodnik. Izkoristek prenosa se lahko zaradi oddaljitve ali izmika iz idealne lege tuljav dodatno zniža. Prav tako je zaradi potrebe po dodatnih gradnikih cena sistema za brezžični prenos energije višja od žičnega sistema.

Glavni namen pričujoče študije je zgraditi in z računalniško podprtimi simulacijami analizirati sistem za prenos 100 W moči na razdalji 5 cm. V delu bodo razložene tudi osnove delovanja sistema BPE.

Zaradi pogoste uporabe v nadaljevanju definiramo faktorje kvalitete Q_T , Q_R in faktor magnetne sklopitve k z enačbami (1), (2) in (3),

$$Q_T = \frac{\omega L_T}{R_T} \quad (1)$$

$$Q_R = \frac{\omega L_R}{R_L} \quad (2)$$

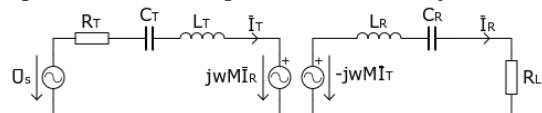
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_T L_R}} \quad (3)$$

kjer sta L_T in L_R induktivnosti oddajne in sprejemne tuljave, M medsebojna induktivnost med tuljavama, R_T in R_L upornosti oddajne tuljave seštetata z notranjo upornostjo vira in upornost sprejemne tuljave seštetata z bremensko upornostjo in ω krožna frekvenca napetosti napajalnega vira.

2 Osnove delovanja sistema za BPE

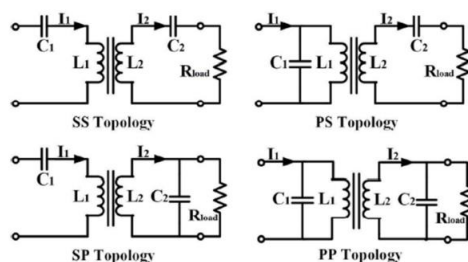
Induktivna sklopitev je izvedena s pomočjo dveh magnetno sklopljenih tuljav. Izmenična napetost na oddajni strani požene tok skozi oddajno tuljavo. Okoli tuljave se ustvari magnetno polje, ki se ob magnetni sklopitvi s sprejemno tuljavo zaključuje tudi skozi le to. Izmenično magnetno polje po Faradayevem zakonu v sprejemni tuljavi inducira napetost iste frekvence. Če je sprejemna tuljava vključena v tokokrog, bo inducirana napetost na tuljavi pognala tok. V tokokrog dodamo kompenzacijski kondenzator, kateri omogoča nižjo moč napajalnega vira za isto preneseno moč. V resonančnem stanju podirajoče magnetno polje v tuljavi generira tok, ki polni kondenzator. Ta isti kondenzator nato shranjeno energijo sprosti in pomaga ustvariti magnetno polje v tuljavi. Torej se v resonanci jalovi moči tuljave in kondenzatorja kompenzirata.

Opisan sistem lahko predstavimo kot vezje na sliki 1.



Slika 1: Reprezentativno vezje sistema za BPE.

Možnih je več različnih topologij vezave kompenzacijskih kondenzatorjev (Slika 2), kjer ima vsaka izmed topologij svoje prednosti in slabosti. Pri tem se uporablja notacija, kjer prva črka označuje način kompenzacije v oddajniški vezju in druga črka način kompenzacije v sprejemnem vezju. Črka S pomeni serijsko (zaporedno) vezavo, črka P pa paralelno (vzporedno) vezavo.



Slika 2: Topologije resonančnih vezij sistema za BPE [2].

V do sedaj izvedenih raziskavah [1], [2] se je izkazalo, da je najprimernejša topologija BPE SS topologija, saj v primerjavi z drugimi topologijami ponuja kar nekaj prednosti, kot so

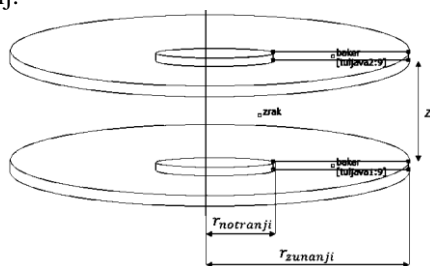
- višji izkoristek,
- neodvisnost vrednosti kompenzacijskega kondenzatorja od razdalje med tuljavama,
- impedanca na vhodu vezja je lahko čisto ohmskega značaja,
- boljše dušenje dodatnih harmonskih komponent, ki se pojavijo zaradi parazitnih elementov,
- stabilna izhodna napetost pri spreminjanju faktorja k in
- lažje nastavljanje resonančnega vezja zaradi odvisnosti kompenzacijskih kondenzatorjev le od frekvence napetosti napajalnega vira in lastnih induktivnosti tuljav L – enačba (11).

Topologija SS se na izhodu lahko obravnava, kot napetostni vir. Iz vidika polnjenja baterije bi bila primernejša topologija SP, ki se lahko obravnava kot tokovni vir.

Slabost SS topologije pa je višja napetost na kompenzacijskih kondenzatorjih v resonanci. Zaradi tega je potrebno izbrati kondenzatorje primerne za višje napetosti ($>2000 V_{eff}$). Prav tako je zaradi spreminjanja parametrov komponent s temperaturo težje obratovati v resonančni točki brez dodatne regulacijske zanke (zaradi spremembe temperature se spremeni C in s tem resonančna frekvenca).

3 Gradnja sistema za BPE

Za učinkovit sistem za BPE potrebujemo sistem dveh tuljav, ki je ustrezno dimenzioniran (Slika 3). S pravilnim dimenzioniranjem dosežemo optimalne razmere za BPE in najvišji možni izkoristek za zadan izziv. Zaradi stresanih magnetnih polj je optimalna izbira tuljav enakih dimenzij.



Slika 3: Geometrija tuljav.

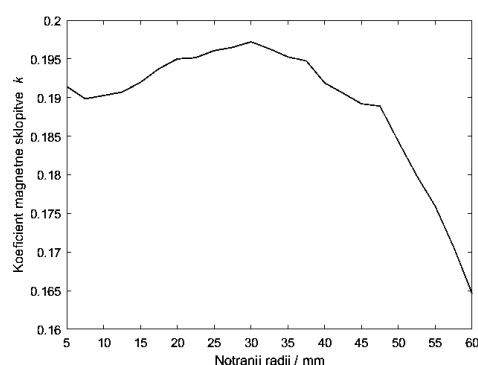
3.1 Dimenzioniranje tuljav

Pri določanju zunanjega radija tuljav smo pri večini aplikacij omejeni s prostorom, ki je na voljo v napravi za namestitve tuljave. S tem je omejen tudi največji zunanji radij, ki ga lahko uporabimo, zato nam v veliko primerih največji razpoložljiv radij kar definira zunanji radij tuljave. Glede na [3] obstaja optimalen zunanji radij oddajne (in s tem tudi sprejemne) tuljave $r_{zunanji_opt}$, pri

katerem se maksimira magnetna poljska jakost v ravnini, ki je na željeni razdalji z , v skladu z enačbo (4).

$$r_{zunanji_opt} = \sqrt{2} z \quad (4)$$

Za določitev optimalnega notranjega radija parametrično spreminjamo njegovo velikost in izvajamo analizo geometrije v smislu elektromagnetnih stanj s pomočjo programa FEMM, ki temelji na metodi končnih elementov. Iz analize pridobimo vrednosti lastne in medsebojne induktivnosti med tuljavama. Iz pridobljenih vrednosti lahko nato izračunamo koeficient magnetne sklopitve k , ki je najpomembnejše merilo pri vrednotenju snovno geometrijskih lastnosti sistema za BPE. Odvisnost faktorja k od notranjega radija tuljave podaja slika 4.

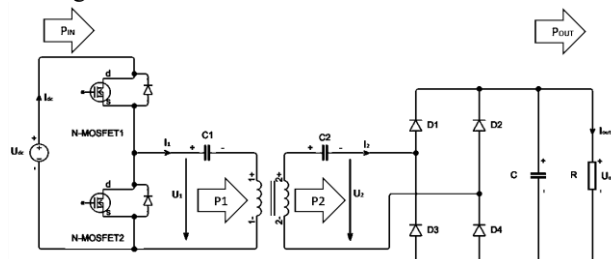


Slika 4: Odvisnost faktorja k od notranjega radija tuljave.

Iz rezultatov analize na sliki 4 se lahko razbere maksimum koeficienta k pri $r_{notranji} = 30$ mm.

4 Simulacije

Simulacijsko vezje je bilo sestavljeno v programskem okolju Matlab Simulink z uporabo elementov knjižnice Simscape (Slika 5). Okolje Matlab Simulink je neposredno povezano s programom Matlab, preko katerega vodimo izračune v Simulinku.



Slika 5: Poenostavljeno simulacijsko vezje.

4.1 Vpliv lokacije resonančne točke na izkoristek

Opravimo analizo, pri kateri spreminjamo lokacijo resonančne frekvence f od 10 kHz do 250 kHz in v vsaki točki preračunamo izkoristek magnetne sklopitve $\eta_{sklopitve}$ in skupni izkoristek sistema η_{skupni} z enačbama (5) in (6). Za vsako točko pri določeni frekvenci f po enačbi (11) preračunamo potrebni kompenzacijski kapacitivnosti C_1 in C_2 in z regulacijo

moči (preko duty cycle razsmerniških MOSFETov) zagotovimo moč 100 W na izhodu. Pri tem predpostavimo enakost tuljav in njihovih lastnih induktivnosti L .

$$\eta_{sklopitve} = \frac{P_2}{P_1} \quad (5)$$

$$\eta_{skupni} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (6)$$

Kjer so moči poračunane po enačbah (7), (8), (9) in (10).

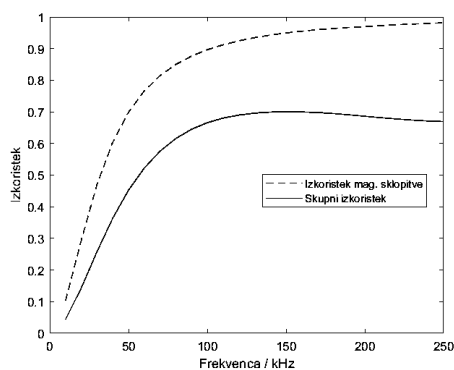
$$P_{IN} = U_{dc} I_{dc} \quad (7)$$

$$P_1 = U_1 I_1 \quad (8)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \quad (9)$$

$$P_{OUT} = U_{out} I_{out} \quad (10)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L} \quad (11)$$

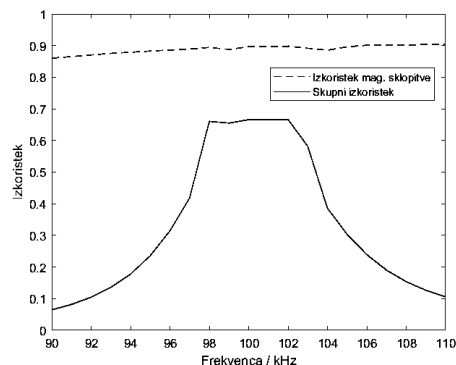


Slika 6: Odvisnost izkoristkov od lokacije resonančne točke.

Iz slike 6 je moč razbrati pričakovane lastnosti BPE. Izkoristek magnetne sklopitve se zaradi zviševanja frekvence in s tem povečevanjem faktorjev kvalitete tuljav vseskozi povečuje proti vrednosti 1. Skupni izkoristek pa je zaradi izgub na razsmerniških MOSFETih, usmerniških diodah in kondukcijskih izgub nižji od izkoristka magnetne sklopitve. Skupni izkoristek sistema se povečuje v začetnem področju frekvenc (od 10 kHz do 150 kHz), nato se zaradi povečanih preklopnih izgub začne zniževati.

4.2 Odvisnost izkoristka pri fiksni resonančni točki od vzbujalne frekvence

Postopoma zvišujemo frekvenco in preračunamo izkoristka za vsako točko. V tem primeru ne preračunamo kompenzacijskih C_1 in C_2 za vsako točko, temveč sta fiksirani tako, da z induktivnostma tvorita resonančno točko pri frekvenci 100 kHz po enačbi (11).

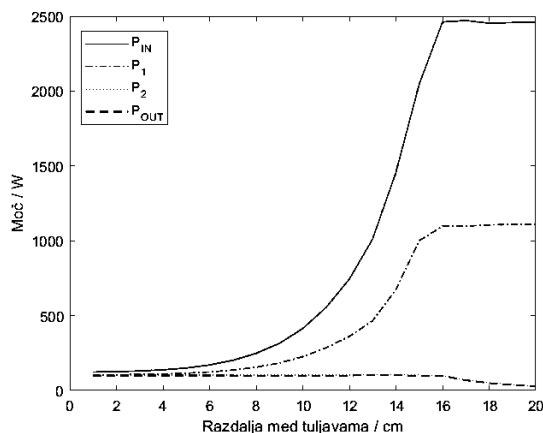


Slika 7: Odvisnost izkoristkov od frekvence pri fiksni resonančni točki.

Iz slike 7 razberemo dejstvo, da je izkoristek sistema močno odvisen od tega ali sistem vzbujamo z njegovo resonančno frekvenco. Temu je potrebno posvetiti posebno pozornost, saj se lahko lokacija resonančne točke spremeni zaradi odvisnosti parametrov od temperature - predvsem kompenzacijskih kapacitivnosti C_1 in C_2 . Opazimo, da zadovoljiv skupni izkoristek dosegamo le v bližini resonančne točke.

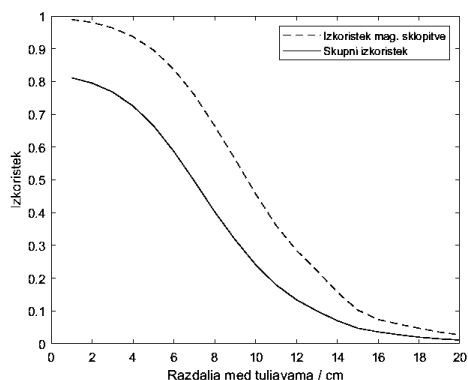
4.3 Odvisnost izkoristka od razdalje med tuljavama

Analizo opravimo s sklopitvijo vseh treh do sedaj uporabljenih programov (FEMM, Matlab, Simulink). Najprej s pomočjo Matlaba vodimo izračune elektromagnetnih stanj v programu FEMM, tako, da dobimo odvisnost lastne in medsebojne induktivnosti od razdalje med tuljavama. Nato preko Matlaba vodimo izračune v Simulinku za vsako točko posebej. Torej za vsako točko razdalje naložimo pripadajoči vrednosti lastnih induktivnosti tuljav L in medsebojne induktivnosti M in s tema parametroma poženemo simulacijsko vezje v Simulinku. Za dan primer izrišemo odvisnost moči od razdalje med tuljavama na sliki 8. Opazimo, da naš sistem uspe zagotavljati moč na bremenu 100 W vse do razdalje 16 cm, kjer regulator moči ne zmore več zagotoviti željene moči na bremenu, saj le ta preide v nasičenje (duty cycle proženja razsmerniških MOSFETov doseže zgornjo mejo).



Slika 8: Odvisnosti moči od razdalje med tuljavama.

Slika 9 prikazuje odvisnost izkoristkov od razdalje med tuljavama.



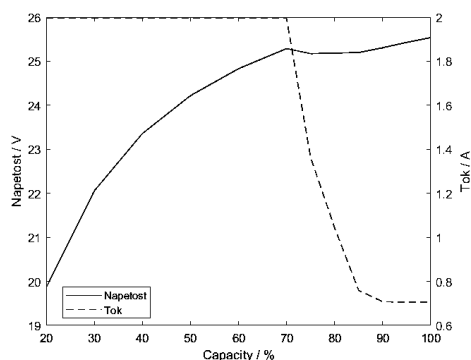
Slika 9: Odvisnost izkoristkov od razdalje med tuljavama.

Iz slike 9 opazimo, da izkoristek z večanjem razdalje med tuljavama upada z eksponentnim trendom.

Pri tem dosežemo izkoristka za prenos 100 W na 5 cm razdalje, ki sta enaka $\eta_{sklopitve} = 0,896$ in $\eta_{skupni} = 0,666$. Izkoristek zadošča za aplikacije prenosa moči nižjih vrednosti. Vendar bi se v primeru prenosa moči višjih vrednosti morali posvetiti zviševanju le teh.

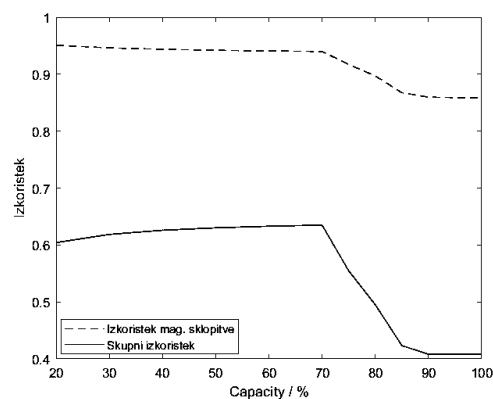
4.4 Polnjenje baterijskega paketa

Bremenski upor na sprejemni strani nadomestimo z modelom baterijskega paketa, ki je zgrajen iz šestih zaporedno vezanih celic z nazivno napetostjo celice 4,2 V. Simuliramo celoten cikel polnjenja baterije po metodi konstantnega toka, dokler baterijske celice ne dosežejo nazivne napetosti in po metodi konstantne napetosti do dokončne napolnitve baterije. Cikel polnjenja v odvisnosti od stopnje napolnjenosti baterije je prikazan na sliki 10.



Slika 10: Cikel polnjenja baterije v odvisnosti od stopnje napolnjenosti baterijskega paketa.

Za dan cikel polnjenja izrišemo še graf izkoristkov v odvisnosti od stopnje napolnjenosti baterije na sliki 11. Iz grafa je razvidna močna odvisnost izkoristkov od stopnje napolnjenosti oziroma od trenutne moči, ki se pri določeni stopnji napolnjenosti prenaša. Najvišji izkoristek se dosega pri 70 % napolnjenosti. Pri tej stopnji je tudi prenesena moč (produkt toka in napetosti) maksimalna.



Slika 11: Odvisnost izkoristkov od stopnje napolnjenosti baterijskega paketa.

5 Zaključek

V delu je opisan postopek določevanja topologij in dimenzioniranja parametrov sistema za brezžični prenos energije. Izvedene so optimizacije geometrije za zadan problem prenosa 100 W na razdalji 5 cm. Uspešno je izpeljanih nekaj simulacij in preračunov odvisnosti izkoristka sistema za različne primere.

Za primer naše aplikacije dosežemo izkoristka za prenos 100 W na 5 cm razdalje, ki imata vrednosti $\eta_{sklopitve} = 0,896$ in $\eta_{skupni} = 0,666$. Opazimo, da je naš sistem geometrijsko dobro dimenzioniran, saj se izkoristek magnetne sklopitve že približa vrednosti 90%. To vrednost bi lahko še nekoliko povežali s povečanjem zunanega radija tuljav.

Zaradi izbranih diodnih usmernikov na sprejemni strani in klasičnih MOSFETov se pri visokih frekvencah pojavijo dokaj visoke izgube, ki nižajo skupni izkoristek našega sistema. Skupni izkoristek je v realni aplikaciji predvidoma še nekoliko nižji, saj v naših simulacijah ne upoštevamo usmerniških izgub na oddajni strani, izgub v vodnikih tuljav zaradi kožnega pojava in izgub na električnih komponentah (krmilna elektronika, vezje). Pomembno je omeniti, da usmerniške izgube na oddajni strani nastopajo tudi v primeru, kadar napravo polnimo žično.

Literatura

- [1] Mude, Kishore Naik, "Wireless power transfer for electric vehicle [Ph. D. thesis]." Dosegljivo: <http://paduaresearch.cab.unipd.it/7477/>. [Dostopano: 25. 3. 2019].
- [2] Liu, Nan, "Design of a universal inductive charging system for electric vehicles." Dosegljivo: <https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/54917/LIU-DISSERTATION-2016.pdf>. [Dostopano: 25. 3. 2019].
- [3] Nguyen, Minh Quoc et al., "Field distribution models of spiral coil for misalignment analysis in wireless power transfer systems", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques (Volume: 62, Issue: 4, April 2014).