

Analiza in primerjava izgub dvosmernega DC-DC pretvornika v osnovni in porazdeljeni strukturi

Alenka Hren

**Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko
Smetanova 17, 2000 Maribor
alenka.hren@uni-mb.si**

Analysis and comparison of bidirectional DC-DC converter's losses in its basic and interleaved structures.

This paper presents the results of the loss study in bidirectional DC-DC converter in its basic and interleaved structure. The converter is usually a part of multi-functional converter system in which, besides high operation reliability its efficiency is also very important. An analytical procedure for converter losses calculation for both structures and for two operational modes, namely the step-up and step-down regimes, is described. The accuracy of the analytical procedure is verified by the simulation results obtained with the converter's simulation model in SimPowerSystems. Both, analytical and simulation results obtained confirm our assumption that the converter in interleaved structure operates with higher efficiency than in the basic structure, inspite the fact that in interleaved structure more components contribute to the total losses. This is because the conduction losses contribute a major proportion of the total losses and they depend on the square value of the current flowing through the component. As a value of the current in the interleaved structure is reduced proportional to the number of branches, the conduction losses are also reduced.

Kratek pregled prispevka

V prispevku so predstavljeni izsledki študije izgub dvosmernega DC-DC pretvornika v osnovni in porazdeljeni strukturi. Pretvornik je najpogosteje sestavni element več funkcijskega pretvorniškega sistema, za katerega je ob visoki zanesljivosti delovanja pomemben tudi izkoristek delovanja. Podan je analitičen postopek izračuna izgub za obe izvedbi pretvornika in za oba režima delovanja, in sicer za režim navzgor in režim navzdol. Pravilnost analitičnega postopka izračuna je verificirana s simulacijskimi rezultati, dobljenimi na osnovi realnega modela pretvornika v SimPowerSystems. Tako analitično dobljeni rezultati kot simulacijski pa potrjujejo našo predpostavko, da deluje pretvornik v porazdeljeni strukturi z višjim izkoristkom kot v osnovni strukturi, kljub temu, da imamo v porazdeljeni strukturi več komponent, ki prispevajo k izgubam. To je posledica dejstva, da prispevajo ohmske oz. prevodne izgube večji delež k skupnim izgubam, le-te pa so odvisne od kvadrata toka skozi komponento. Ker se velikost toka v porazdeljeni strukturi zmanjša sorazmerno s številom vej, se sorazmerno s številom vej zmanjšajo tudi ohmske izgube.

1 Uvod

Ne glede na način pretvorbe energije iz ene oblike v drugo, se ne moremo izogniti izgubam, ki pri tej pretvorbi nastanejo. Ker so viri energije omejeni, potreba po njej pa vsakodnevno narašča, postaja čim višji izkoristek energijske pretvorbe oz. naprav, ki jo izvajajo, vse pomembnejši. Tako velja tudi za stikalne pretvornike, med katere spada dvosmerni DC-DC pretvornik, da ob zanesljivosti delovanja postaja izkoristek naprave tisti parameter, ki vpliva na odločitev o njeni primernosti oz. uporabnosti. Visok izkoristek delovanja je še posebej pomemben pri stikalnih pretvornikih, ki se uporabljajo v prenosnih sistemih, ki so napajani iz baterije, pri pretvornikih, kjer je zaradi prostorskih omejitev potrebna kompaktna zgradba (npr. električni avto), ki zahteva skrbno termično obdelavo in seveda pri pretvornikih, kjer je še posebej pomembna tudi cena energije.

V preteklosti se je boljši izkoristek naprav poskušal doseči z uporabo osnovnih, dobro znanih enostavnih struktur stikalnih pretvornikov v kombinaciji z najnovejšimi oz. najustreznejšimi stikali [1], saj je nekako veljalo prepričanje, da dodatne komponente v kompleksnejših strukturah povzročajo dodatne izgube. Kompleksne, porazdeljene oz. več nivojske strukture pretvornikov so se sprva pojavile v visokonapetostnih aplikacijah, ker so omogočale razdelitev visokih napetosti v manjše dele in s tem uporabo klasičnih, optimiziranih polprevodniških stikal na osnovi silicija. Dandanes se uporabljajo tudi že za napetosti pod 1000V in dosegajo boljše izkoristke ob višji virtualni stikalni frekvenci delovanja.

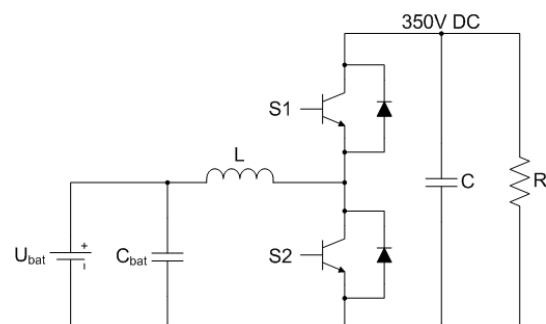
V članku bo predstavljena analiza in primerjava izgub pri dvosmernem DC-DC pretvorniku v osnovni in porazdeljeni strukturi.

2 Dvosmerni DC-DC pretvornik

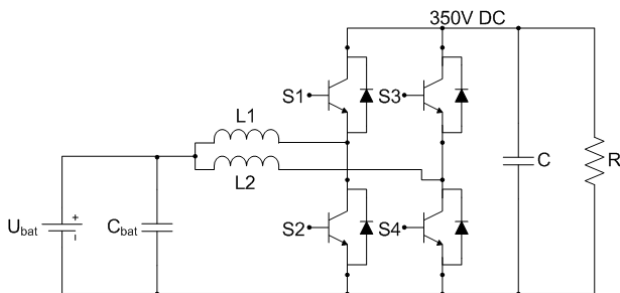
Dvosmerni DC-DC pretvornik je nepogrešljiv sestavni del avtonomnega pretvorniškega sistema, ki preko enosmerne zbiralke povezuje porabnike z različnimi

energijskimi viri, lahko tudi alternativnimi kot je npr. gorivna celica ali fotovoltaična celica [2]. Prav tako so nepogrešljiv sestavni del pogona v hibridnih električnih avtomobilih z gorivno celico, kjer povezujejo enote za shranjevanje energije kot sta npr. baterija in superkondenzator z električnim pogonskim sistemom preko enosmerne zbiralke. Njegova osnovna naloga je shranjevanje energije pri zaviranju in zagotavljanje ustrezne odzivnosti sistema v prehodnih pojavih oz. pri spreminjanju obremenitve, saj je dobro znano, da se sama gorivna celica v dinamičnih razmerah odziva prepočasi.

Kot že ime pove omogoča dvosmerni DC-DC pretvornik pretok energije v dveh smereh in lahko deluje v režimu pretvornika navzgor, to je v primeru, ko se energija prenaša iz baterije na enosmerno zbiralko in v režimu pretvornika navzdol, ko se presežek energije na enosmerni zbiralki prenaša v baterijo. Ko deluje pretvornik v režimu navzdol, ustrezno krmilimo stikalo S1 in kadar to stikalo ne prevaja, teče tok skozi diodo, ki je vezana vzporedno k stikalu S2. Če pa deluje pretvornik v režimu navzgor, ustrezno krmilimo stikalo S2 in kadar to stikalo ne prevaja, teče tok skozi diodo, ki je vezana vzporedno k stikalu S1. Izvedemo ga lahko v t.i. osnovni strukturi, ki je prikazana na sliki 1 in v t.i. porazdeljenih strukturah, ki je prikazana na sliki 2. Porazdeljena struktura se najpogosteje uporablja v aplikacijah višjih napetosti in večjih moči.



Slika 1: Osnovna struktura dvosmernega DC-DC pretvornika



Slika 2: Porazdeljena struktura (2 veji) dvosmernega DC-DC pretvornika

V porazdeljeni strukturi imamo lahko poljubno število vej, na sliki 2 je sicer prikazana porazdeljena struktura z dvema vejama. Če tak pretvornik deluje v režimu navzgor, v prvi veji teče tok skozi dušilko $L1$, pri tem ustrezno krmilimo stikalo $S2$ in kadar to stikalo ne prevaja, teče tok skozi diodo, ki je vezana vzporedno k stikalu $S1$, v drugi veji pa teče tok skozi $L2$, pri tem ustrezno krmilimo stikalo $S4$ in kadar to stikalo ne prevaja, teče tok skozi diodo, ki je vezana vzporedno k stikalu $S3$. V tej strukturi skozi dušilki $L1$ in $L2$ teče polovična vrednost toka v primerjavi s tokom skozi dušilko L v osnovni strukturi pretvornika, če oba pretvornika delujeta v enaki delovni točki. Ker prožilne signale za stikalo $S4$ tvorimo tako, da jih zakasnimo za polovico periode glede na prožilne signale za $S2$, takšen pretvornik deluje z navidezno dvakrat višjo frekvenco kot je stikalna frekvenca pretvornika. Analogno velja vse povedano tudi za delovanje pretvornika v režimu navzdol.

3 Izračun izgub stikalnega pretvornika

Natančen izračun izgub pretvornika in analiza posameznih prispevkov k izgubam lahko pripomore k izbiri takšnih komponent pretvornika, ki bodo zagotavljale zanesljivejše delovanje ob večjem izkoristku. Ob predpostavki, da je izbran kvaliteten kondenzator, lahko izgube na njem zanemarimo in v tem primeru izračunamo izkoristek pretvornika kot:

$$\eta = \frac{P_d - (P_{st} + P_{dušilka} + P_{dioda})}{P_d} \quad (1)$$

kjer je seveda P_d vhodna moč pretvornika, P_{st} skupne izgube na stikalu, ki so sestavljene iz ohmskih izgub in stikalnih izgub, $P_{dušilka}$ ohmske izgube na dušilki in P_{dioda} izgube na diodi, ki so prav tako sestavljene iz dveh delov.

Na osnovi enačb, ki so zapisane v naslednjih podpoglavjih smo v Excel-u zapisali program, ki omogoča izračun izgub dvosmernega DC-DC pretvornika v osnovni in porazdeljeni strukturi v obeh režimih delovanja. Na osnovi izračuna izgub, se izračuna izkoristek delovanja pretvornika in potem se ponovi izračun izgub ob upoštevanju potrebni korekciji prevajalnega razmerja pretvornika Δ_p , ki je za idealne razmere v režimu navzgor definirano kot:

$$\Delta_p = 1 - \frac{U_d}{U_o} \quad (2)$$

kjer je U_d vhodna napetost, U_o pa izhodna napetosti pretvornika. V primeru realnega pretvornika pa je potrebno izvesti korekcijo prevajalnega razmerja (ga ustrezno povečati) glede na izkoristek delovanja pretvornika:

$$\Delta_{p_kor} = 1 - \frac{\eta U_d}{U_o} \quad (3)$$

Na osnovi izračunanega izkoristka pretvornika se izračuna potrebna korekcija prevajalnega razmerja tudi v delovnem režimu navzdol.

Analično izračunane izgube smo primerjali z izgubami, ki so se pojavile na simulacijskem modelu dvosmernega DC-DC pretvornika v simulacijskem programu SimPowerSystems, ki teče znotraj simulacijskega okolja Matlab.

3.1 Izračun izgub osnovne strukture dvosmernega DC-DC pretvornika v režimu navzgor

Približno oceno izgub na posameznih elementih izračunamo kot:

$$P_{st} \doteq P_{st_ohm} + P_{st_stik} = r_{don} \left(\frac{I_o}{1 - \Delta_p} \right)^2 + \frac{U_o}{2} \frac{I_o}{1 - \Delta_p} (t_r + t_f) f_s \quad (4)$$

$$P_{dušilka} \doteq r_L \left(\frac{I_o}{1 - \Delta_p} \right)^2 \quad (5)$$

$$P_{dioda} \doteq P_{di_ohm} + P_{di_uf} = r_{di} I_o^2 + U_F I_o \quad (6)$$

kjer je r_{don} prevodna upornost stikala, r_L upornost dušilke, r_{di} prevodna upornost diode, U_o izhodna napetost pretvornika navzgor (napetost enosmerne zbiralke), I_o tok skozi breme R , U_F kolenska napetost diode, t_r čas vklopa stikala, t_f čas izklopa stikala, f_s stikalna frekvenca in Δ_p prevajalno razmerje pretvornika, ki nam pove kolikšen del periode stikalo S2 prevaja oz. ne prevaja. Napetostne in tokovne razmere na pretvorniku so določene z izbrano delovno točko, iz enačb pa je razvidno, da so v primeru, ko pretvornik deluje z velikim izhodno-vhodnim napetostnim razmerjem oz. z velikim prevajalnim razmerjem, izgube višje kot v primeru majhnega prevajalnega razmerja.

Z enačbami (4), (5) in (6) lahko dobimo dovolj dobro oceno skupnih izgub, dejstvo pa je, da z njimi ne zajamemo vseh izgub na realnem pretvorniku. Tako so npr. na dušilki upoštevane samo izgube v bakru in ne tudi izgube v jedru. Izgube v jedru dušilke so zanemarljive, če za dušilko izberemo ustrezno jedro in jo skrbno dimenzioniramo tako, da med delovanjem pretvornika dušilka ne deluje v nasičenju. Prav tako lahko s pravilno dimenzionirano dušilko vplivamo na izgube v bakru, saj so le-te linearno povezane z upornostjo dušilke, ta pa je v linearni odvisnosti od števila ovojev na dušilki. Pri izračunu izgub na diodi smo zanemarili stikalne izgube, ki se pojavijo na diodi ob preklopu v času okrevanja diode. Pri manj kvalitetnih diodah te izgube niso zanemarljive, če pa izberemo kvalitetno Schottky-diodo s kratkim časom okrevanja diode, pa je dopustno stikalne izgube diode zanemariti.

3.2 Izračun izgub porazdeljene strukture dvosmernega DC-DC pretvornika v režimu navzgor

Pri izračunu izgub pretvornika, izvedenega v porazdeljeni strukturi, je seveda potrebno

upoštevati število posameznih komponent, ki je odvisno od števila vej (n) v porazdeljeni strukturi. Torej lahko zapišemo enačbe za posamezne prispevke izgub:

$$P_{st_ps} \doteq n^* (P_{st_ohm_ps} + P_{st_stik_ps}) \\ = nr_{don} \left(\frac{I_o}{n(1 - \Delta_p)} \right)^2 + n \frac{U_o}{2} \frac{I_o}{n(1 - \Delta_p)} (t_r + t_f) f_s \quad (7)$$

$$P_{dušilke_ps} \doteq nr_L \left(\frac{I_o}{n(1 - \Delta_p)} \right)^2 \quad (8)$$

$$P_{diode_ps} \doteq n^* (P_{di_ohm} + P_{di_uf}) \\ = nr_{di} \left(\frac{I_o}{n} \right)^2 + n U_F \frac{I_o}{n} \quad (9)$$

Iz enačb je razvidno, da se vse ohmske oz. prevodne izgube zmanjšajo v odvisnosti od števila vej zaradi dejstva, da skozi stikala tečejo manjši tokovi, medtem ko na zmanjšanje stikalnih izgub tranzistorja lahko vpliva samo nižja stikalna frekvenca. Pretvornik v porazdeljeni strukturi deluje z navidezno frekvenco, ki je n krat višja od osnovne stikalne frekvence f_s , pri čemer je n enak številu vej porazdeljene strukture, iz česar sledi, da je lahko osnovna stikalna frekvenca nižja.

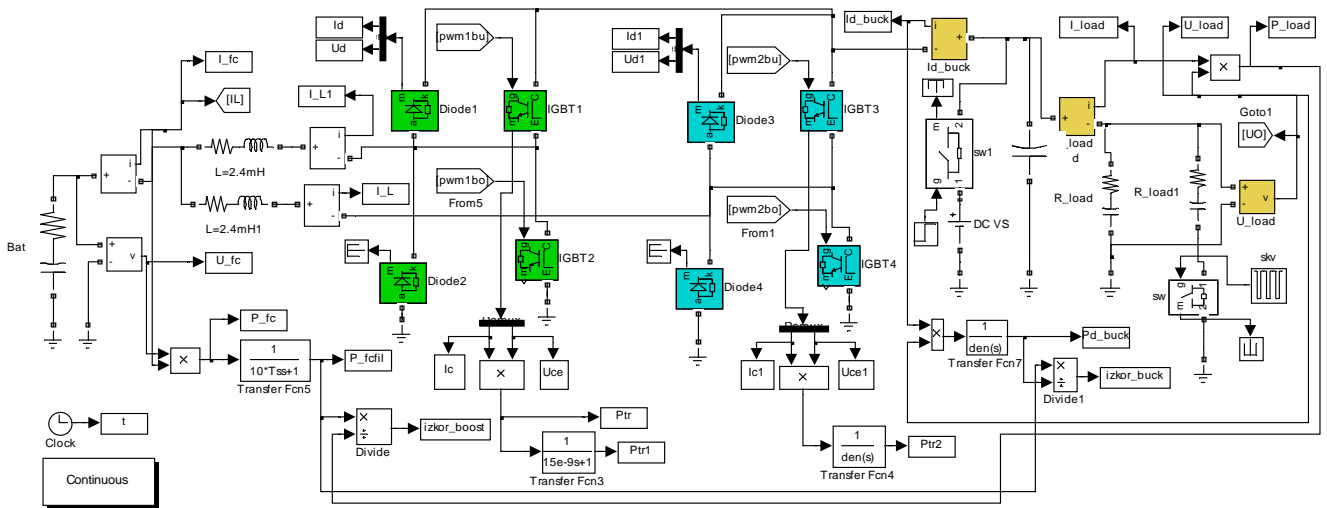
3.3 Izračun izgub osnovne strukture dvosmernega DC-DC pretvornika v režimu navzdol

Izkoristek delovanja dvosmernega DC-DC pretvornika v režimu navzdol je tudi določen z enačbo (1). Približno oceno izgub na posameznih elementih pa izračunamo kot:

$$P_{st} \doteq P_{st_ohm} + P_{st_stik} \\ = r_{don} (\Delta_p I_o)^2 + \frac{U_d \Delta_p I_o}{2} (t_r + t_f) f_s \quad (10)$$

$$P_{dušilka} \doteq r_L I_o^2 \quad (11)$$

$$P_{dioda} \doteq P_{di_ohm} + P_{di_uf} = r_{di} I_o^2 + U_F I_o \quad (12)$$



Slika 3: Simulacijski model dvosmernega DC-DC pretvornika

kjer smo za posamezne veličine uporabili enake oznake kot v poglavju 3.1. Vidimo, da so izgube tudi v tem režimu delovanja povezane s prevajalnimi razmerjem Δ_p po enaki zakonitosti in sicer pomeni večje prevajalno razmerje (večje vhodno-izhodno napetostno razmerje) večje izgube na pretvorniku.

3.4 Izračun izgub porazdeljene strukture dvosmernega DC-DC pretvornika v režimu navzdol

Tudi v tem režimu delovanja je potrebno upoštevati število posameznih komponent, ki je odvisno od števila vej (n) v porazdeljeni strukturi. Torej lahko zapišemo enačbe za posamezne prispevke k skupnim izgubam:

$$P_{st_ps} \doteq n(P_{st_ohm_ps} + P_{st_stik_ps})$$

$$= nr_{don} \left(\frac{\Delta_p I_o}{n} \right)^2 + n \frac{U_d}{2} \frac{\Delta_p I_o}{n} (t_r + t_f) f_s \quad (13)$$

$$P_{dušilke_ps} \doteq nr_L \left(\frac{I_o}{n} \right)^2 \quad (14)$$

$$P_{diode_ps} \doteq n(P_{di_ohm} + P_{di_uf})$$

$$= nr_{di} \left(\frac{I_o}{n} \right)^2 + nU_F \frac{I_o}{n} \quad (15)$$

Znova velja, da se vse ohmske oz. prevodne izgube zmanjšajo v odvisnosti od števila vej zaradi dejstva, da skozi stikala tečejo manjši tokovi, medtem ko na zmanjšanje stikalnih izgub tranzistorja vpliva samo nižja stikalna frekvenca.

4 Izračun izgub simulacijskega modela dvosmernega DC-DC pretvornika

Pravilnost analitičnega izračuna izkoristka delovanja pretvornika smo želeli potrditi s simulacijskimi rezultati. Tako sta bila narejena primerjava delovanja in izračun izgub za obe izvedbi (osnovne in porazdeljene strukture) dvosmernega DC-DC pretvornika s pomočjo simulacijskega programa SimPowerSystems, ki teče znotraj simulacijskega okolja Matlab.

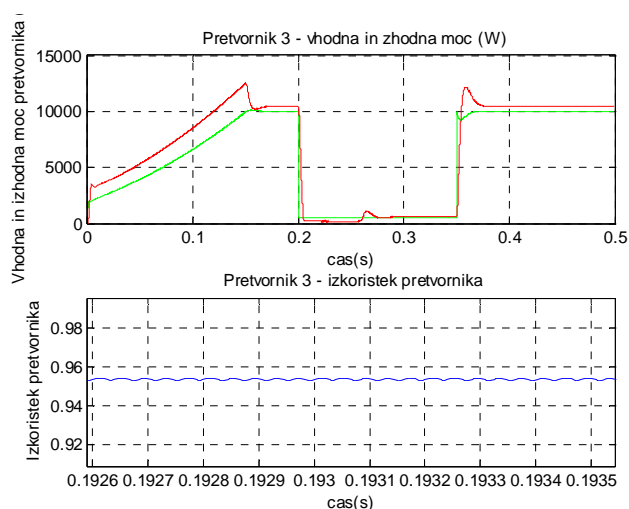
Simulacijski rezultati za obe izvedbi pretvornika so bili dobljeni na osnovi simulacijske sheme, ki je prikazana na sliki 3. Shema je sestavljena iz dveh vej pretvornika in v primeru simulacije osnovnega vezja je bilo samo onemogočeno proženje stikala v drugi veji. Shema omogoča simulacijo delovanja pretvornika v obeh režimih delovanja, torej v režimu navzgor in režimu navzdol. Zaradi kompleksnosti sheme samega pretvornika, ni prikazan regulatorski del sheme. Za obe izvedbi pretvornika je bila sicer uporabljena za primer delovanja v režimu navzgor kaskadna

regulacijska zanka, kjer sta bila uporabljena PI regulatorja za notranjo tokovno zanko in zunanjo napetostno zanko. V delovnem režimu navzdol (v tem režimu s presežkom energije na enosmerni zbiralki polnimo baterijo) pa reguliramo samo tok polnjenja baterije, prav tako s PI regulatorjem. Pri porazdeljeni strukturi (2 veji) se prožilni pulzi za tranzistorje tvorijo za obe veji z enakim prevajalnim razmerjem (glede na izhod iz tokovnega regulatorja), za drugo vejo so samo premaknjeni za polovico periode (pwm1bo in pwm2bo za režim navzgor ter pwm1bu in pwm2bu za režim navzdol na simulacijski shemi). Tako v simulaciji delovanja pretvornika kot v analitičnem izračunu izgub pretvornika smo uporabili podatke za IGBT modul SKM75GB128D, ki jih podaja proizvajalec SEMIKRON in ti so tako kot vrednosti ostalih komponent pretvornika podani v tabeli 1.

Tabela 1: Podatki za dvosmerni DC-DC pretvornik

$U_D(V)$	200
$U_o(V)$	450
$P_o(W)$	10000
$C(\mu F)$	2600
$L(mH)$	2.4
$r_{don}(\Omega)$	0.03
$r_L(\Omega)$	0.07
$r_{di}(\Omega)$	0.02
$U_F(V)$	2
$t_r(ns)$	65
$t_f(ns)$	35
Δ_p	0.556

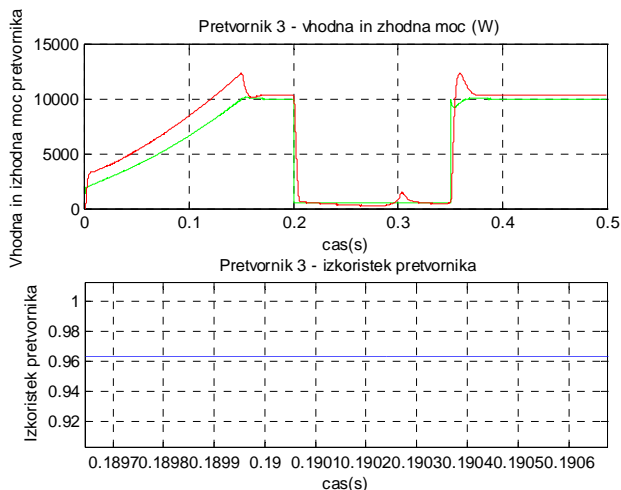
S pomočjo simulacijske sheme smo najprej preverili in primerjali delovanje osnovne in porazdeljene strukture dvosmernega DC-DC pretvornika, tako pri zagonu kot pri nazivni obremenitvi in razbremenitvi. Zaradi prostorske omejitve bodo sicer v članku prikazani samo poteki veličin, ki so bili pomembni za izračun izgub oz. izkoristka pretvornika, ki se je računal kot razmerje med trenutno vrednostjo izhodne moči in trenutno vrednostjo vhodne moči (glej sliko 3). Potek vhodne moči (rdeča krivulja) in izhodne moči (zelena krivulja) ter izkoristek pri nazivni obremenitvi za osnovno strukturo pretvornika so prikazani na sliki 4:



Slika 4: Vhodna in izhodna moč pretvornika ter izkoristek v delovnem režimu navzgor.

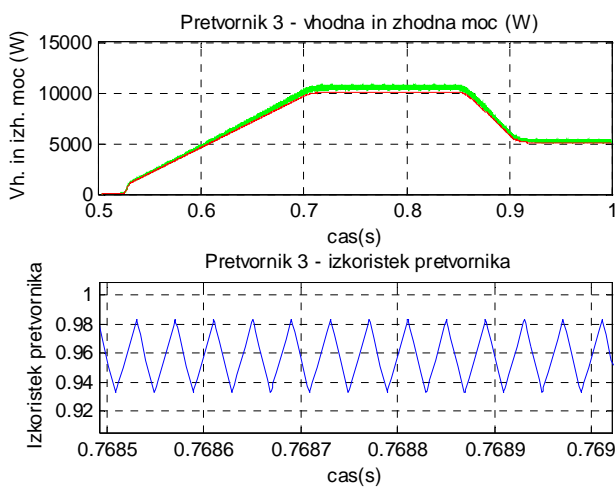
Na sliki 4 lahko vidimo, da zagon pretvornika na končno želeno vrednost izhodne napetosti U_o traja približno 0.15s, do 0.2s je pretvornik deloval pri nazivni obremenitvi, sledila je razbremenitev na 10% nazivne vrednosti ter pri 0.35s znova skok na nazivno obremenitev. Pričakovano je v intervalu zagona vhodna moč precej višja od izhodne moči, saj se v tem intervalu moč prenaša na breme in v kondenzator enosmerne zbiralke (ta se polni iz začetne napetosti 200V na končno vrednost 450V). Zato nas je zanimal predvsem izkoristek delovanja pretvornika pri nazivni obremenitvi in ta je prikazan na spodnjem grafu slike 4. Iz grafa odčitana izkoristek znaša $\eta=0.954$. Enak režim delovanja smo zaradi primerjave opazovali tudi za porazdeljeno strukturo pretvornika. Simulacijski rezultati so prikazani na sliki 5.

Iz poteka vhodne in izhodne moči je razvidno, da porazdeljena struktura pretvornika deluje skoraj identično kot osnovna struktura, pričakovano pa je izkoristek delovanja pri nazivni obremenitvi višji in znaša $\eta=0.964$. Podobno primerjavo delovanja osnovne in porazdeljene strukture dvosmernega DC-DC pretvornika smo naredili tudi za delovni režim navzdol.



Slika 5: Rezultati za porazdeljeno strukturo pretvornika v delovnem režimu navzgor.

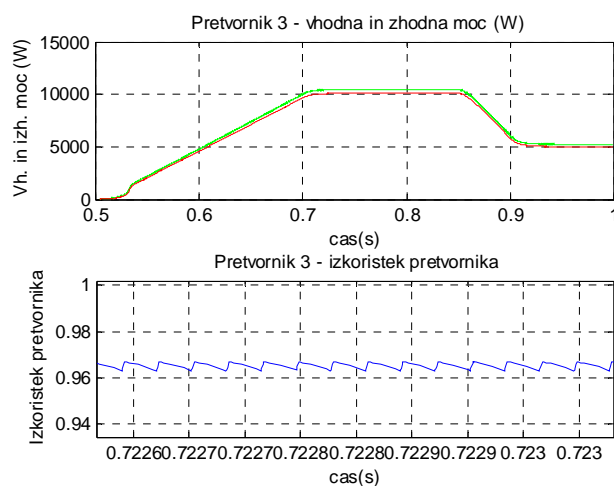
Na sliki 6 so prikazani poteki vhodne in izhodne moči za ta delovni režim, v katerega je prešel pretvornik ob času 0.5s. V tem režimu je uporabljena samo regulacija toka polnjenja baterije.



Slika 6: Rezultati za osnovno strukturo pretvornika v delovnem režimu navzdol.

Iz potekov moči je razvidno, da se tok polnjenja v času 0.5s do 0.7s spreminja od začetne vrednosti 0A do nazivne vrednosti 50A, v intervalu od 0.7s do 0.85s ostane na tej vrednosti, nato pa se zniža na polovično vrednost. Zaradi valovitosti toka polnjenja baterije (dopustna je 20% valovitost) niha tudi izračunan izkoristek, njegova povprečna vrednost, odčitana iz grafa, pa znaša $\eta=0.958$.

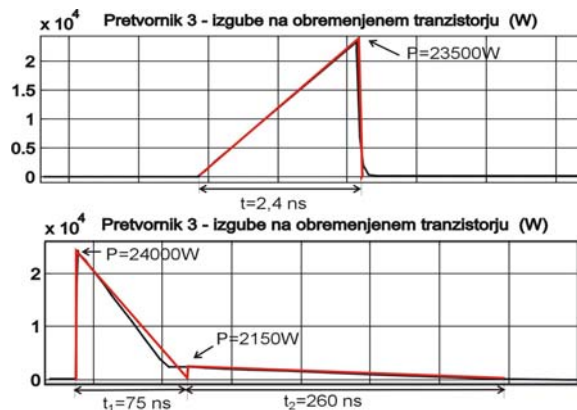
Na sliki 7 so prikazani simulacijski rezultati za porazdeljeno strukturo (2 veji) pretvornika v delovnem režimu navzdol. Pričakovano je potek izhodne moči zaradi višje virtualne stikalne frekvence f_s delovanja (v osnovni strukturi je $f_s=25kHz$, v porazdeljeni pa $f_s=16kHz$, torej je virtualna frekvenca $32kHz$) manj valovit in je posledično manj niha tudi izračunan izkoristek. Njegova povprečna vrednost, odčitana iz grafa, pa znaša $\eta=0.965$.



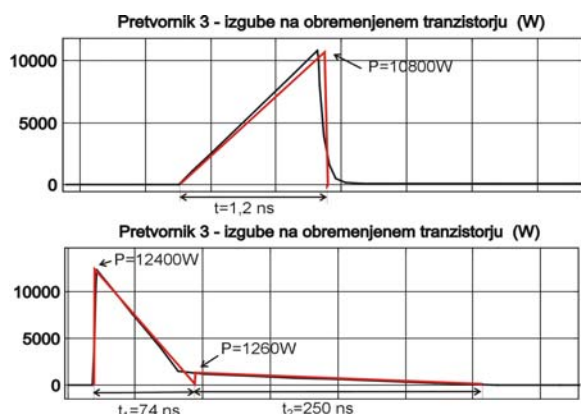
Slika 7: Rezultati za porazdeljeno strukturo pretvornika v delovnem režimu navzdol.

4.1 Primerjava izračunanih izgub z izgubami simulacijskega modela

Na slikah 8 in 9 so prikazani poteki vklopnih in izklopnih stikalnih izgub za pretvornik v osnovni in porazdeljeni strukturi v režimu navzgor, na osnovi katerih smo ocenili stikalne izgube v simulaciji pretvornika:



Slika 8: Vklonpe in izklopnpe stikalne izgube – osnovna struktura pretvornika



Slika 9: Vklonpe in izklopne stikalne izgube – porazdeljena struktura pretvornika

V tabeli 2 so podane vrednosti analitično izračunanega izkoristka za obe izvedbi pretvornika in če jih primerjamo z izkoristki v simulacijskih rezultatih vidimo skoraj popolno ujemanje rezultatov (izračunan izkoristek je v obeh primerih približno za 1% višji kot izkoristek v simulaciji). Pri tem je pomembno poudariti, da smo v izračunu in simulaciji upoštevali vrednosti realnih komponent

Tabela 2: Izračun izgub za dvosmerni DC-DC pretvornik v osnovni in porazdeljeni strukturi v režimu navzgor.

	OSNOVNA STRUKTURA	PORAZDELJENA STRUKTURA
f_s (kHz)	25	16
število vej	1	2
P_{st_ohm} (W)	75	37.5
P_{st_stik} (W)	28.13	18
$P_{dušilke}$ (W)	175	87.5
P_{diode} (W)	54.32	49.38
Skupne izgube (W)	332.45	192.38
Izkoristek η	0.968	0.981
Δ_p -kor	0.57	0.564
$P_{st_ohm_kor}$ (W)	80.07	38.96
$P_{st_stik_kor}$ (W)	29.06	18.35
$P_{dušilke_kor}$ (W)	186.83	90.9
P_{diode_kor} (W)	54.32	49.38
Skup_izgube_kor (W)	350.28	197.58
Izkoristek η_kor	0.966	0.98

Ker nas je še posebej zanimala ocena stikalnih izgub v simulaciji, smo jih izračunali s pomočjo računanja ploščine trikotnikov na osnovi potekov, ki so prikazani na slikah 8 in 9. Če dobljeni rezultate ($P_{st_stik}=31W$ za osnovno strukturo in $P_{st_stik}=19.8W$ za porazdeljeno strukturo) primerjamo z izračunanimi (glej tabelo 2), dobimo potrditev, da nam opisan analitični pristop omogoča dovolj natančno oceno izgub v dvosmernem DC-DC pretvorniku.

Iz rezultatov v tabeli 2 je razvidno, da so prevladujoče ohmske izgube na dušilki, te bi lahko v porazdeljeni strukturi zmanjšali z uporabo manjših dušilk. V tem primeru bi sicer morali povečati stikalno frekvenco, kar bi povečalo stikalne izgube, ampak te so relativno majhne v primerjavi z ohmskimi izgubami.

5 Zaključek

V prispevku je predstavljen analitični postopek izračuna izgub za dvosmerni DC-DC pretvornik v osnovni in porazdeljeni strukturi za

režim delovanja navzgor in režim delovanja navzdol. Da nam predstavljen analitični postopek zagotavlja dovolj natančno oceno izgub, smo potrdili na osnovi simulacijskih rezultatov, ki smo jih dobili z modelom realnega pretvornika v SimPowerSystems.

Z analitičnim in simulacijskim načinom pa smo potrdili, da so izgube v porazdeljeni strukturi manjše od izgub v osnovni strukturi pretvornika, kljub dejstvu, da je v slednji uporabljeno manjše število komponent.

6 Literatura

- [1] Jochen Koszescha, Advanced Multilevel Technologies: A technological Breakthrough?, Bodo's power Systems, Sept. 2010
- [2] Woonki Na, Bei Gou, and Taehyung Kim, Analysis and Control of a Bidirectional DC/DC Converter for an Ultra-Capacitor in a Fuel Cell Generation System, Journal of Electrical Engineering: Theory and Application (Vol.1-2010/Iss.2), pp. 72-78
- [3] Maxim, Application Note 4266, »An Efficiency Primer for Switch-Mode , DC-DC Converter Power«