

Kombinirano napajanje enosmernega serijskega motorja s prigrajenim navitjem močnostnega pretvornika

Peter Zajec

University in Ljubljana, Faculty of Electrical Engineering, Ljubljana, Slovenia
E-pošta: peter.zajec@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek podaja miselno pot pri reševanju kombiniranega napajanja enosmernega serijskega motorja. V nasprotju s poznanimi rešitvami, kjer je napetost nizkonapetostnega vira (akumulatorja) pretvorjena s pretvornikom navzgor, pri čemer je izhod slednjega priključen vzporedno motorskima priključkoma, predlagana rešitev temelji na namestitvi navitja pretvornika navzgor neposredno prek obstoječega statorskega navitja. Pretvornik navzgor je zato priključen vzporedno k rotorju, saj navitje močnostnega pretvornika služi tudi magnetenju stroja. Integracija navitja v obstoječe mere stroja poleg zmanjšanja dimenzij in teže celotnega pogona omogoča tudi polnjenje baterije, ko se motor napaja iz omrežja.

Podane so praktične omejitve predlagane rešitve in ukrepi za njihovo omilitev. Rešitev je bila preverjena na kombiniranem napajanju sesalne enote. Primerjava rezultatov z referenčnima pogonoma, prirejenima neposrednemu priklopu na izmenično napetost oziroma akumulator, kaže do 3-odstotno zmanjšanje energijskega izkoristka celotnega pogona. Slednje je v primerjavi z razširjeno funkcionalnostjo pogona zanemarljiva cena, še zlasti v električnih strojih, ki so izdelani iz sodobnih kompozitnih magnetnih materialov.

Ključne besede: enosmerni serijski motor, kombinirano napajanje, integracija, Boost pretvornik

Dual-voltage Supply of Serial-wound Motor with an Integrated Boost Winding

Extended abstract. The paper proposes an integration of a dual-power supply into the serial-wound motor necessitating no major construction redesign. The supply is optimized so as to feed the motor either from the mains voltage or from a low-voltage battery. The solution is unique due to its integration of the Boost choke winding on the stator pole thus omitting the use of an additional magnetic core. The function of the Boost choke winding is consequently two-fold: i) it is a part of the Boost converter and ii) it magnetizes the stator core of the motor (when the DC power supply is active).

Unlike in the conventional solution (Figure 3) with the Boost converter connected in parallel to the motor terminals, the common connection point in the proposed design (Figure 4) is moved to the rotor terminals. Namely, the same magnetizing field (4) is preserved regardless of the power source the energy flows from. Simultaneous magnetization by the used stator and Boost winding is prevented through a careful selection of magnetic coupling between both windings. The same

magnetic coupling increases the reversed voltage of the mains rectifier (5) and leads to the implementation of additional power switch D_z . When the motor draws power from the mains voltage, the battery can be charged through the auxiliary circuits as well (Figure 6).

The proposed dual-supply operation was implemented and tested on a DC serial-wound motor used to drive a vacuum cleaner suction unit. The motor nominal voltage is 230 V and the low-voltage battery is 24 V. In order to evaluate the proposed solution, three operation comparable designs were built and tested. In each of them the motor performance (Figure 7) was evaluated with an attached turbine unit. Experimental results (Table 1) show a small increase in losses mainly due to magnetic losses caused by the high switching frequency (15 kHz) of the Boost transistor. In new designs based on composed magnetic materials these losses can be further reduced.

Keywords: serial-wound motor, dual-voltage-supply, integration, Boost converter

1 Uvod

Konstruiranje modernih električnih strojev v zadnjih nekaj letih ni usmerjeno le v uporabo najodobnejših feromagnetnih materialov in pripadajočih obdelovalnih tehnologij, temveč je nujno povezano z znanji s področja močnostnih pretvorniških naprav. Slednje uravnavajo delovanje električnega stroja z nadzorovanim pretokom električne energije. Takšen skupek, elektromotor-močnostni pretvornik, mora izpolnjevati tri zahteve: i) imeti mora velik energijski izkoristek, ii) težiti mora k zmanjšanju dimenzij in teže naprav, t.j. po zvečanju specifične pretvorjene moči na enoto volumna in enoto teže, iii) ter k zagotavljanju elektromagnetne združljivosti s preostalimi električnimi napravami.

Te zahteve je mogoče izpolniti z optimalno konstrukcijo motorja in če slednji obratuje s približno konstantno vrtilno hitrostjo. V nasprotnem primeru je delovanje električnih motorjev neizvedljivo brez ustreznih elektronskih podsestavov. Omenjene problematike se dobro zavedajo izdelovalci prenosnih električnih strojev in naprav, ki so zaradi svetovne konkurence prisiljeni zniževati stroške vgrajenih komponent, medtem ko se od tovrstnih naprav zahteva čedalje širša funkcionalnost. Primer takšnega pogona je sesalna enota z možnostjo priklopa na izmenično napetost javnega distribucijskega omrežja (230 V, 50 Hz) ter na nizkonapetostni enosmerni vir napetosti (prenosni akumulator z napetostjo 24 V). Optimalno obratovanje pri tako velikem razponu napajalne napetosti je mogoče doseči le s primerno prireditvijo električnega stroja in/ali vgradnjo močnostnega pretvorniškega vezja. Vgradnji slednjega se lahko pri serijskem enosmernem motorju izognemo s podvajanjem statorskega in rotorskega navitja, tako da je prvi par navitij prilagojen izmenični, drugi par pa enosmerni napajalni napetosti. Poleg občutnega povečanja teže in dimenzij zahteva takšna rešitev tudi posebno pazljivost pri konstrukciji kolektorskih lamel in pri pravilni izbiri ščetk, ki morajo biti prirejene povečani tokovni gostoti. Uporaba tovrstnih rešitev je v praksi zelo redka [1,2]. Pogostejše so rešitve, kjer je električni stroj prirejen neposrednemu priklopu na eno izmed obeh napajalnih napetosti, medtem ko napetost drugega vira z močnostnim pretvornikom pretvorimo na nazivno napetost motorja. Čeprav v konstrukcijo stroja pri tej rešitvi ne posegamo, se dimenzije in teža električnega pogona zaradi vgrajenih reaktivnih elementov (gladilni kondenzator in dušilka) pretvorniškega vezja močno povečajo. Rešitev omenjenjega problema je zmanjšanje števila vgrajenih komponent oziroma njihova integracija v obstoječo konstrukcijo motorja. Takšna rešitev je opisana v [3], kjer je doseženo kombinirano napajanje reluktančnega motorja. Še zanimivejša je ideja avtorjev [4], kjer je

navitje pretvornika navzgor (v vezju za korekcijo moči – PFC) navito na statorski jarem BLDC motorja.

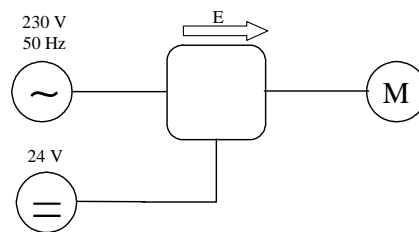
V nadaljevanju je podana rešitev za kombinirano napajanje enosmernega serijskega motorja, kakršnega najpogosteje uporabljamo v električnih orodjih. Predlagana rešitev izhaja iz vzporednega načina napajanja, kjer je napetost nizkonapetostnega vira s pomočjo pretvornika navzgor (Boost Converter) prilagojena nazivni napetosti motorja, z eno bistveno razliko. Da ni treba uporabiti dodatnega mehkomagnetnega jedra za dušilko v pretvorniku navzgor, je njeno navitje namreč nameščeno prek obstoječega statorskega navitja, kar zahteva tudi samosvojo prilagoditev pretvornika navzgor.

2 Sinteza predlagane rešitve z integracijo magnetnih komponent

Glede na podane zahteve je uporaba pretvorniških vezij za kombinirano napajanje serijskega motorja sesalne enote z možnostjo priklopa na akumulator ali omrežno napetost nujna. Izvedbe pretvorniškega vezja naj pri tem dodatno ne zahtevajo:

- obsežnih prilagoditev obstoječe zgradbe motorja,
- vgradnje velikih in dragih elementov in
- velikega števila preklopnih elementov za izbiro napajalnega vira.

Na podlagi omenjenih zahtev in kriterijev smo analizirali možnost uporabe ustaljenih pretvorniških vezij, ki bi bila primerna vmesni prilagoditvi bodisi obeh napajalnih virov bodisi le posameznega na nazivne parametre (napetost, tok) motorja. Rešitev, kjer bi pretvorniško vezje prilagajalo napetostna nivoja obeh napajalnih virov (slika 1), je zaradi ekonomskih razlogov neprimerna in je nismo podrobneje raziskovali.

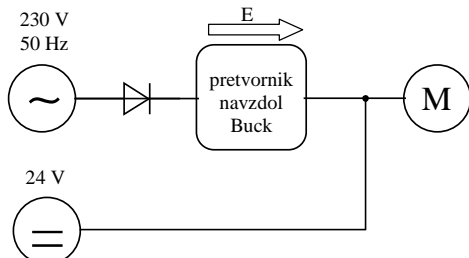


Slika 1: Pretvorniško vezje – vezni člen med motorjem in viroma napetosti

Figure 1. Power converter – a link between the motor and two supply sources

Ekonomsko upravičeni sta le preostali dve možnosti, kjer je motor prilagojen neposrednemu priklopu na enega izmed obeh virov, medtem ko drugi vir napaja motor posredno prek vmesnega pretvornika. Ne glede na rešitev mora biti izmenična napetost predhodno usmerjena. Neposreden priklop enosmernega

napajalnega vira omogoča rešitev na sliki 2. Navitji motorja sta prirejeni nizki enosmerni napetosti, zato mora pretvorniško vezje – vstavljeno med omrežjem in motorjem – poskrbeti za usmerjanje izmenične omrežne napetosti in za prilagoditev višine enosmerne napetosti. Slednjo nalogo lahko prevzame poljubno pretvorniško vezje za spust napetosti. Najprimernejše je osnovno pretvorniško vezje Buck z dvema močnostnima stikaloma (tranzistorjem in diodo) in z izhodno gladilno dušilko.



Slika 2: Vzoredni princip kombiniranega napajanja s pretvornikom navzdol

Figure 2. Dual-supply drive with a Buck converter in parallel

Brez podrobnejše analize pretvorniškega vezja [3] lahko povzamemo, da je takšna rešitev nepraktična, ker:

- skozi močnostni stikali teče velik tok, s čimer je težko doseči velik izkoristek pretvorniškega vezja,
- je tok gladilne dušilke prav tako zelo velik, enak je toku motorja, zato postane dušilka prevelika za vgraditev v ohišje stroja.

2.1 Vzoredni princip sklopitve - ustaljena rešitev

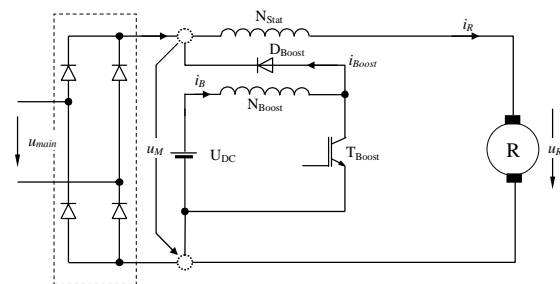
Podrobneje smo raziskali rešitev, kjer je motor prilagojen za posreden priklop (prek usmernika) na izmenični vir. Prilagoditev nizkonapostnega enosmernega vira na nazivno napetost motorja pa dosežemo s pretvornikom navzgor (Boost converter).

Osnovno topologijo takšnega pretvornika kaže slika 3, na kateri je razviden tudi način priključitve obeh virov. Izhodni gladilni kondenzator pretvornika (na sliki ni prikazan) ima zelo majhno kapacitivnost ($C = 1\mu\text{F}$), le tolikšno, da prepreči čezmerno rast napetosti ob komutaciji toka, zato v nadaljnji analizi tudi ni upoštevan. Zaradi enosmerne izhodne napetosti pretvornika navzgor je uporaba vhodnega usmerniškega mostiča nujna. Pretvornik navzgor je krmiljen tako, da na izhodnih sponkah generira enosmerno vrednost napetosti, ki je enaka usmerjeni srednji vrednosti omrežne napetosti

$$U_{Boost} = |U|_{main, rectif} = \frac{U_{DC}}{1-D} = U_M. \quad (1)$$

Zato uporaba pretvornika navzgor posledično omogoča gradnjo motorja z bistveno ugodnejšimi konstrukcijskimi parametri, to je z manjšo efektivno

vrednostjo toka, tanjšo žico in posledično manjšo obrabo ščetk.



Slika 3: Osnovno vezje kombiniranega napajanja s pretvornikom navzgor

Figure 3. Conventional solution - a Boost converter connected parallel to the motor terminals

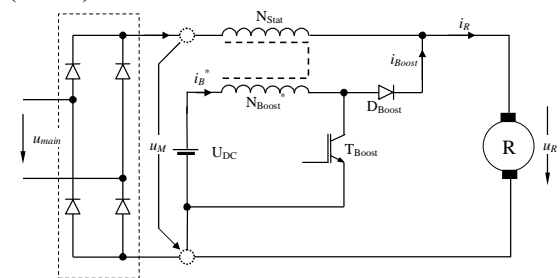
S funkcionalnega stališča zahteva rešitev uporabo dveh dodatnih polprevodniških stikal in dušilke N_{Boost} . Med omenjenimi elementi je problematična predvsem slednja. Skoznje teče tok akumulatorja

$$i_B = \frac{i_R}{1-D}, \quad D \leq 1, \quad (2)$$

ki je nekajkrat večji od motorskega (i_R), zato dušilka zavzame veliko prostora. Opisana rešitev ima v primerjavi z rešitvijo s slike 2 tudi to prednost, da omogoča avtomatičen »preklop« napajalnih virov ob izpadu ter ob ponovnem priklopu omrežne napetosti.

2.2 Predlagana rešitev z integracijo magnetnih komponent

Slabost opisanega vezja je v uporabi dodatnega magnetnega jedra, na katero namestimo navitje dušilke L_{Boost} . Njegovi uporabi smo se izognili s funkcionalnim in s konstrukcijskim "integriranjem" omenjene dušilke na feromagnetno jedro obstoječega statorskega paketa (slika 4).



Slika 4: Predlagano vezje z namestitvijo N_{Boost} na statorski paket motorja

Figure 4. Proposed solution with a Boost converter connected parallel to the rotor terminals and with magnetic coupling

Pretvorniško vezje je enako kot pri prejšnji rešitvi, le izhodna napetost pretvornika je sedaj vsiljena neposredno na rotor (ščetke) enosmernega motorja. Izhodna napetost pretvornika mora biti torej enaka

rotorski napetosti s slike 3, če želimo, da motor še naprej obratuje v izbrani delovni točki

$$U_R = \frac{U_{DC}}{1-D^*} = U^*_{Boost} \quad (3)$$

Navitje N_{Boost} pretvornika navzgor smo namestili neposredno na statorske pole, s čimer prevzame dušilka tudi vlogo vzbujalnega navitja serijskega motorja, ko je le-ta napajal enosmerne vira napetosti. Število ovojev dušilke N_{Boost} je pri tem izbrano tako, da tok

$$i_B^* \cdot N_{Boost}^* = i_R \cdot N_{stat} \quad (4)$$

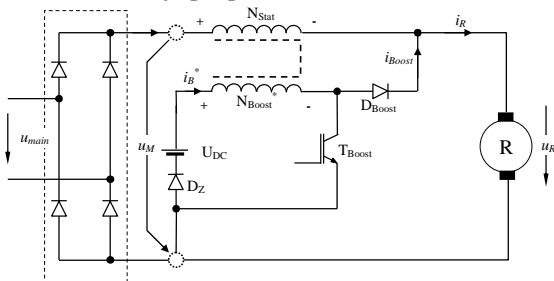
povzroči enake amperne - ovoje kot tok, ki teče skozi navitje N_{stat} pri izmeničnem napajanju. Število ovojev je torej tu dimenzionirano predvsem za optimalno vzbujanje motorja, ne pa toliko s stališča maksimalne dovoljene valovitosti toka, kot je to navada pri stikalnih pretvornikih.

3 Praktični vidiki predlagane rešitve

Podana rešitev je bila v predhodnem poglavju opisana s predpostavko, da je vsakokrat priključen le en napajalni vir, kar tudi pomeni, da je vpliv sočasnega vzbujanja motorja prek obeh navitij na statorskem polu prezrt.

3.1 Vpliv magnetne sklopitve

V časovnem intervalu t_{on} , ko prevaja tranzistor, se na obeh navitjih inducira napetost označene polaritete (slika 5). Tok teče le skozi navitje N_{Boost} , medtem ko so diode v usmerniškem mostiču reverzno polarizirane. Magnetna sklopitev zahteva vgradnjo usmerniških diod z višjo nazivno napetostjo, saj se inducirana napetost v statorskem navitju podpira z rotorsko.



Slika 5: Polariteta inducirane napetosti na magnetno sklopljenih navitjih

Figure 5. Polarity of the induced voltage during the conduction period of T_{Boost}

V časovnem intervalu t_{off} , ko prevaja dioda D_{Boost} , se inducira v statorskem navitju napetost nasprotno polaritete, zaradi katere se napetost prek usmerniških diod zniža na

$$U_R = \frac{U_R - U_{DC}}{N_{Boost}^*} N_{stat} \cdot k \quad (5)$$

Diode usmerniškega mostiča lahko tako postanejo prevodno polarizirane, pri čemer del toka i_R steče skozi diodo D_{Boost} , del pa skozi navitje N_{stat} . Nastane torej

sočasno vzbujanje, ki ga lahko najučinkoviteje omilimo s šibkim magnetnim sklepom (k) med obstoječim statorskim navitjem in navitjem N_{Boost}^* .

Pri napajanju iz omrežne napetosti se tokovne razmere glede na povsem ločena tokokroga (slika 3) ne spremenijo. Dioda D_{Boost} ne prevaja, ne glede na polariteto inducirane napetosti v navitju N_{Boost}^* . Slednje seveda velja ob neaktivnem oziroma blokiranem tranzistorju. Obvezno pa moramo dodati diodo D_Z , v nasprotnem lahko skozi interno diodo tranzistorja T_{Boost} steče tok, ko velja $u_M > U_R$.

3.2 Zmanjšanje števila mehanskih in elektronskih preklonnih stikal

Opisana rešitev pridobi popolno funkcionalnost šele po vgradnji nujno potrebnih preklonnih stikal za vklop naprave in za izbiro napajalnega vira.

Stikalo se mora tako obvezno nahajati v nizkonapetostnem tokokrogu, saj bi se akumulator tedaj, ko motor ne obratuje ($U_R = 0$), popolnoma izpraznil skozi diodo D_{Boost} in rotor. V najpreprostejši rešitvi bi lahko uporabili tripozicijsko mehansko stikalo/pretikalo, s katerim bi napravo izključili/priključili na izmenični napajalni vir/priključili na enosmerni napajalni vir. Velika termična obremenitev mehanskega stikala in predvsem njegova nezmožnost avtomatskega izbora izmeničnega vira po morebitnem izpadu omrežne napetosti daje prednost elektronskemu stikalu.

Elektronsko stikalo je narejeno v obliki dveh v protistiku vezanih močnostnih tranzistorjev T_a , T_b (slika 6, z vgrajenima internima diodama). Z nadrejenim logičnim vezjem, ki na sliki na podano, stikalo detektira prisotnost omrežne napetosti in polarizira nizkonapetostnega izvora, s čimer tranzistorja elektronskega stikala prevzema tudi zaščitno vlogo pri reverzni priključitvi baterije. Elektronsko stikalo s svojima internima diodama nadomesti tudi že omenjeno diodo D_Z .

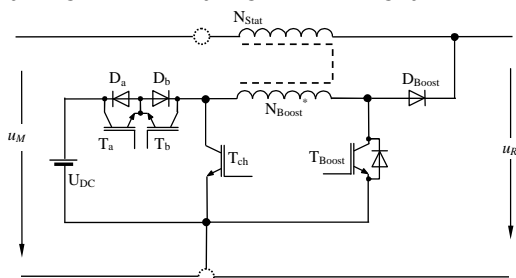
3.3 Polnjenje akumulatorja

Podpoglavje podaja opis rešitve, ki omogoča polnjenje akumulatorja v času, ko motor prejema energijo iz omrežja.

Dodatni tranzistor T_{ch} , dioda D_a in relativno velika stresana induktivnost navitja N_{Boost} (magnetni sklop je namreč namenoma majhen, da zadostimo enačbi 5) tvorita jedro »pretvornika navzgor«, ki v nasprotju s sestavo in delovanjem pretvornika, opisanega v poglavju 2.1, omogoča pretok energije k akumulatorju. To je mogoče le tedaj, ko je usmerjena omrežna napetost višja od napetosti rotorja ($u_M > U_R$).

V primerjavi z lastno induktivnostjo navitja, ki ima odločilno vlogo pri pretvorbi enosmerne napetosti akumulatorja, občutno manjša stresana induktivnost navitja zahteva izbor višje stikalne frekvence močnostnega tranzistorja T_{ch} , s tem pa se povečajo tudi

izgube v mehkomagnetnem jedru motorja. Zato je tovrstna rešitev upravičena predvsem pri motorjih iz sodobnih kompozitnih materialov, ki imajo občutno manjše izgube od obstoječega laminiranega jedra.

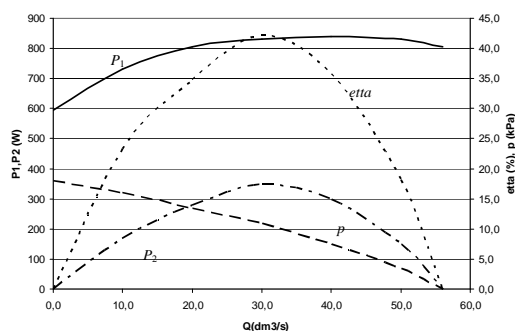


Slika 6: Razširjeno vezje z možnostjo polnjenja baterije
Figure 6. Optional circuitry for battery charging

4 Eksperimentalni rezultati

Predlagana rešitev je bila preizkušena na sesalni enoti z enosmernim serijskim motorjem z nazivno napetostjo 230 V. Napetost nizkonapetostnega vira je znašala 24 V. Za oceno predlagane rešitve sta bili izdelani dve različici referenčnih motorjev; prva je zasnovana na motorju z neposrednim napajanjem iz omrežja, medtem ko drugi pogon tvori motor, ki je optimiran za neposreden priklop na nizkonapetostni vir.

Obema referenčnima motorjema kot tudi predlaganemu motorju z integriranim navitjem smo dodali enako turbino, s katero smo izmerili obremenilno karakteristiko, kot jo kaže slika 7.



Slika 7: Obratovalne karakteristike sesalne enote referenčnega pogona, napajane z omrežno napetostjo (eta...izkoristek, P_1 ... vhodna električna moč, P_2 ...izhodna, mehanska moč, p ...zračni tlak) v odvisnosti od pretoka Q

Figure 7. Vacuum cleaner motor performance operated at the nominal mains voltage (eta...efficiency, P_1 ... input electric power, P_2 ...air power, p ...air pressure) in respect to airflow Q

Referenčni motor, ki je neposredno priključen na omrežno napetost, dosega maksimalni izkoristek 40% pri vhodni električni moči 850 W (tabela 1).

V prvem prototipu smo dodatno navitje namestili le na en statorski pol (slab magnetni sklop), vendar pa se

rešitev zaradi občutno nesimetrične obremenitve ščetk ni obnesla. Zato je navitje nameščeno simetrično na obeh statorskih polih, kar dodatno pripomore k zmanjšanju elektromagnetnih motenj.

Tabela 1: Primerjava referenčnih in predlagane izvedbe
Table 1: Comparison between different designs

Design	P_1	Eta
Referenčni motor 1:serijski motor-direktna priključitev na izmenično napetost	850	40
Reference design 1: serial-wound motor - direct connection to an AC source		
Predlagani motor-priključen na izmenično napetost	850	37
Proposed solution powered from an AC source		
Predlagani motor-priključen na enosmerno nizko napetost	300	27
Proposed solution powered from a DC source		
Referenčni motor 2:serijski motor-direktna priključitev na enosmerno nizko napetost	300	30
Reference design 2: serial-wound motor - direct connection to a DC source		

Obremenilni test predlaganega pogona, ko je slednji obratoval iz izmeničnega vira, je pokazal zmanjšanje izkoristka za tri odstotne točke, kar je povsem pričakovano zaradi vgraditve omrežnega usmernika in zamenjave ščetk. Slednje morajo biti namreč v predlagani rešitvi optimirane za enosmerne obratovalne pogoje.

Nazivna obremenitev pogona je bila pri napajanju iz nizkonapetostnega vira zaradi omejene energijske zmogljivosti baterije zmanjšana na 300 W. Veljavnost izpeljanih enačb in uporabnost opisane metode se s to poenostavitvijo v ničemer ne spremenita, saj za obratovalni točki ne zahtevamo, da ustrezata enaki obremenitvi. Razlika nastopi le v (3) in (4), kjer moramo računati z vklopnim razmerjem in z rotorsko napetostjo, ki ustreza obremenitvi s 300 W, doseženi pri nižani omrežni napetosti. Iz tabele 1 je razvidno, da znaša maksimalni izkoristek 27%. Vendar pa pri tem ne smemo prezreti, da upoštevamo celotni izkoristek skupaj s turbino.

Da bi ocenili, kolikšen del izgub odpade na pretvornik navzgor, smo omenjeni rezultat primerjali z referenčnim pogonom, ki je bil optimiran za neposreden priklop na enosmerno napetost. Razviden je tri odstotne točke višji izkoristek v primerjavi s predlagano zgradbo motorja z integriranim navitjem (tabela 1).

5 Sklep

Članek podaja rešitev kombiniranega napajanja serijskega enosmernega motorja z enosmernim virom nizke napetosti in z omrežno napetostjo. Poudarek je na integraciji dušilke pretvornika navzgor na statorske pole enosmernega motorja, s čimer znatno zmanjšamo velikost pogonskega sklopa. Predlagana rešitev z integracijo navitja N_{Boost} zahteva minimalne spremembe tuljavnika in je zato primerna tudi za že razvite modele strojev. Prav tako zahteva uporabo preprostega elektronskega vezja, ki regulira izhodno napetost (napetost rotorja) na vrednosti, da motor doseže nazivne obratovalne razmere (vrtilna hitrost in posledično moč). Primerna je predvsem za motorske pogone, kjer se ne predvideva nastavljanje vrtilne hitrosti v širokem območju, medtem ko pri delovanju v širšem območju vrtilnih hitrosti predlagani pogon ni več primerljiv s serijskim enosmernim motorjem. Magnetni sklep med obstoječim in dodatnim navitjem se izraža v višini transformirane napetosti na navitju, ki s funkcionalnega stališča tedaj ni aktivno. Omenjena napetost zvišuje nazivne napetosti vgrajenih elementov ter glede na jakost sklopitve povzroča tudi medsebojni vpliv med obema napetostnima viroma. Slednje velja, če virov, ko le-ti niso aktivni, ne ločujemo od tokokrogov z dodatnimi mehanskimi stikali.

Nadaljnji razvoj poteka v smeri segmentiranja obstoječega vzbujevalnega navitja N_{Stat} , s čimer se želimo izogniti negativnim posledicam magnetne sklopitve.

6 Literatura

- [1] Andrew Lakerdas, Peter A. Kershaw, "Three-Speed Dual-winding Direct Current Permanent Magnet Motor Method and Apparatus", patent US5925999A, 1999.
- [2] Graham D. Moss, Scott Campbell, "Commutator for Two Speed Electric Motor and Motor Incorporating Same", patent US5949174A, 1999.
- [3] M. Barnes, C. Pollock, "Forward Converters for Dual-voltage Switched Reluctance Motor Drives," IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 16, pp. 83-91, January 2001.
- [4] L. Helle, G. K. Andersen, F. Blaabjerg, P. O. Rasmussen, An Integrated Single-Phase Power-Factor-Controlled Switched Reluctance Motor Drive, PCIM99, Germany.
- [5] Timothy L. Skvarenina, The Electronics Handbook. New York: CRC Press, 2002, Chap. 2.
- [6] Abraham I. Pressman, Switching Power Supply. McGraw-Hill, 1998.

Peter Zajec je diplomiral leta 1994 in magistriral leta 1997 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Leta 1999 je na isti fakulteti zagovarjal doktorsko disertacijo, za katero je prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča. V letu 2000 je bil na trimesečnem strokovnem izpopolnjevanju na Universität Stuttgart, Institut für Leistungselektronik und Regelungstechnik.

Zaposlen je kot docent na Fakulteti za elektrotehniko, v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko. Težišče njegovega raziskovalnega dela je na področju statičnih pretvornikov in pripadajočih merilnih sistemih.