

# Tok enosmernega tokokroga pri večfaznih pogonih

Mitja Nemec

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: mitja.nemec@fe.uni-lj.si

## Instructions and Template for ERK Conference (ERK\_Title)

**Abstract.** This paper presents the impact of parallel multiphase drive topologies on DC link current. Utilizing correct phase shift between parallel power stages the AC components of the DC link current can be significantly reduced, but as the simulation results show the attenuation depends on the drive operating point and is subject to law of diminishing returns with more parallel stages. Furthermore parallel operation changes the frequency spectra of DC link current moving the main frequency components higher but modulation algorithm used also has significant impact on the frequency spectra.

## 1 Uvod

Področje večfaznih pogonov je v zadnjem desetletju doživelo velik preboj predvsem na področju raziskav in le vprašanje časa je, kdaj se bodo pričeli v večji meri tudi pojavljati v praksi.

V raziskavah je bilo največ pozornosti namenjene osnovnemu principu delovanja [1], [2], redundanci, ki jo tak pogon lahko omogoča [3] in zmanjševanju motenj predvsem na strani stroja (tako zmanjševanju harmonske vsebine, kot tudi sofazne komponente) [4], [5].

Vendar pa lahko z večfaznimi pogoni tudi zmanjšamo vplive, ki jih pretvornik povzroča na strani enosmerne tokokroga. Čeprav so bile v preteklosti že opravljene raziskave, kako je tok enosmerne tokokroga odvisen od obratovalne točke [6] in modulacijskega algoritma [7], raziskav na temo vplivov večfaznih pogonov na tok enosmerne tokokroga ni bilo veliko [8].

V tem članku si bomo pogledali kakšen tok lahko pričakujemo na enosmerni strani in kako z večfaznim pogonom zmanjšamo izmenično komponento toka v enosmernem tokokrogu, ter kak vpliv imajo različni modulacijski algoritmi.

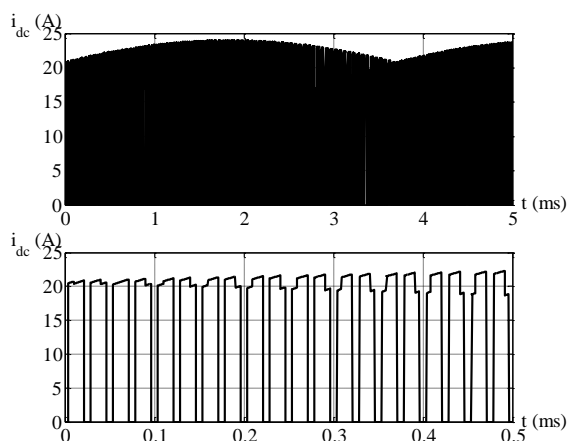
## 2 Opis večfaznega pogona

Pri klasičnem trifaznem pogonu z B6 močnostnim pretvornikom, se močnostni pretvornik obnaša kot pretvornik navzdol. To pa pomeni, da je tok v močnostni pretvornik trgan, kar lahko vidimo na sliki 1. Na obliko toka imajo zelo malo vpliva parametri stroja (upornost, induktivnost) več vpliva pa ima delovna točka pogona (hitrost, navor). Taka oblika toka povzroča veliko obremenitev kondenzatorjev

enosmerne tokokroga in hkrati tudi povzroča motnje, ki se širijo predvsem preko napajalnega voda.

Obremenitev enosmerne tokokroga z izmenično komponento toka lahko zmanjšamo v primeru, da imamo več paralelnih močnostnih stopenj od katerih vsaka prevzame del moči (toka). V primeru, ko je proženje močnostnih stopenj fazno zamaknjeno, se fazno zamakne tudi enosmerni tok posamezne močnostne stopnje in se lahko izmenična komponenta toka posameznih močnostni stopenj med seboj odšteje.

Omenjeno topologijo lahko dosežemo z večfaznim pogonom [9].

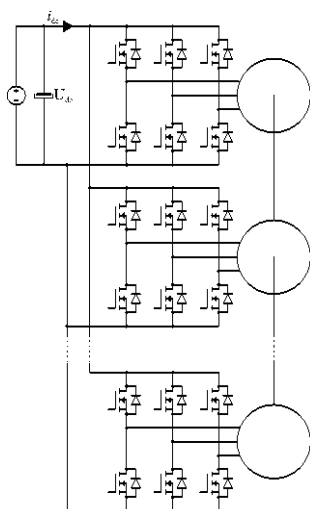


Slika 1: Oblika toka v enosmernem tokokrogu klasičnega B6 močnostnega pretvornika

Vendar pa so s stališča zmanjševanja vplivov na enosmernem tokokrogu paralelnega obratovanja s faznim zamikanjem nosilnega PWM signala v praksi zanimive samo izvedbe brez sklopitve med posameznimi fazami [10]. V strokovni literaturi jih srečamo pod izrazom simetrični večfazni stroji oziroma več-sistemske pogoni. V takem primeru lahko smatramo, da gre za več popolnoma ločenih pogonov na isti gredi (slika 2) in s takim pogonom se bomo ukvarjali v nadaljevanju.

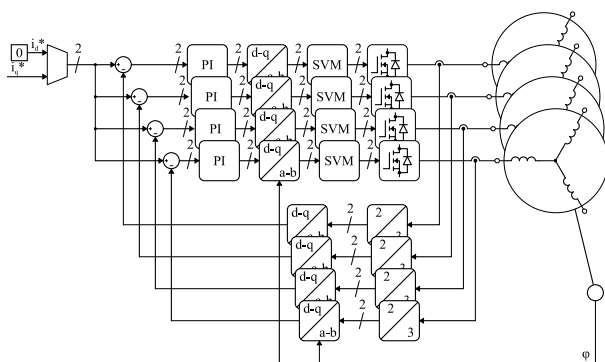
## 3 Simulacijski rezultati

Za potrebe prikaza vpliva več sistemkega pogona na izmenično komponento toka v enosmernem tokokrogu smo opravili simulacije s pomočjo programskega paketa MATLAB/Simulink. Simulirali smo klasičen trifazni pogon in dvo, tri in štiri-sistemske pogon z ustreznimi prilagojenimi električnimi parametri in v enakih delovnih točkah (slika 2). V kolikor ni izrecno navedeno je v simulacijah uporabljena klasična (simetrična oz zvezna) modulacija prostorskega vektorja napetosti (CSVM) [11]. Prisotnost vseh izmeničnih komponent je bila ocenjena s standardno deviacijo.



Slika 2: Shema več-sistemskega pogona

Sama regulacija toka je bila izvedena ločeno za vsak sistem posebej, kot je to za štiri-sistemske pogon prikazano na sliki 3.



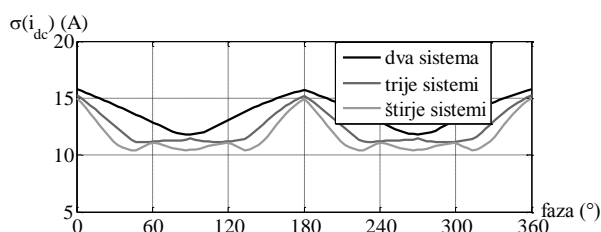
Slika 3: Regulacija toka pri štiri-sistemske pogonu

Podatki pogona pa so navedeni v tabeli 1:

Tabela 1. Podatki pogona

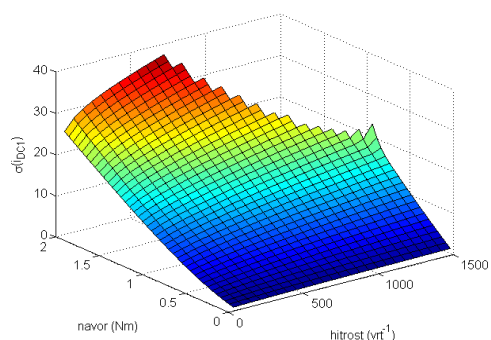
Statorska upornost	0,0567 $\Omega$
Statorska induktivnost	68 $\mu\text{H}$
Nazivni navor	1.5 Nm
Nazivna hitrost	900 $\text{min}^{-1}$
Napetost enosmerne tokokroga	10 V
Preklopna frekvenca	20 kHz

Prvi set rezultatov (slika 4) prikazuje odvisnost izmenične komponente toka enosmerne tokokroga od faznega zamika med modulatornimi signali posameznega sistema v eni delovni točki (1 Nm, 900  $\text{min}^{-1}$ ). Zaradi uporabe simetričnega prožilnega signala je najprimernejša fazna zakasnitev med posameznimi sistemi  $90^\circ$  za dvo-sistemske pogon,  $60^\circ$  za tri-sistemske pogon in  $45^\circ$  za štiri-sistemske pogon. V primeru uporabe nesimetrične modulacije prostorskega vektorja napetosti, so te premaknitve  $180^\circ$ ,  $120^\circ$  in  $90^\circ$ .

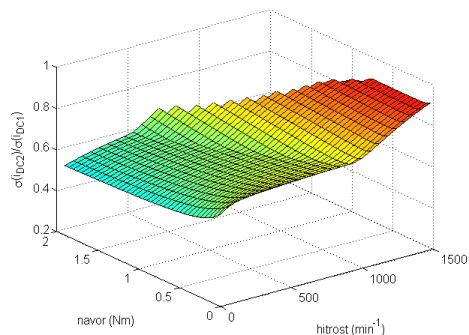


Slika 4: Odvisnost izmenične komponente toka v enosmernem tokokrogu od faznega zamika modulatorni signalov za dvo-sistemske, tri-sistemske in štiri-sistemske pogon.

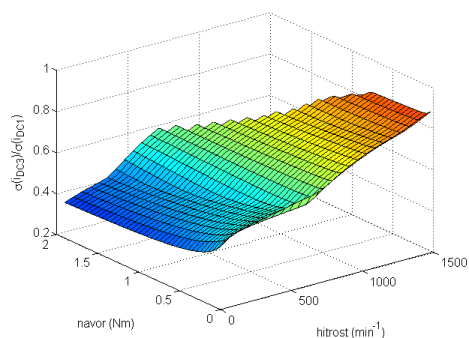
Nadaljnje si lahko ogledamo kako se vsebnost izmenične komponente toka v enosmernem tokokrogu spreminja z obratovalno točko pogona. Na sliki 5 vidimo kako se le ta spreminja za klasičen eno-sistemske pogon. Vidimo da je obremenitev enosmerne tokokroga največja pri najvišjih navorih in je bolj ali manj neodvisna od vrtilne hitrosti. Slike 6-8 prikazujejo relativno zmanjšanje obremenitve za dvo-, tro- in štiri-sistemske pogon v primerjavi z eno-sistemske pogonom. Vidimo lahko, da že dvo-sistemske pogon zmanjša obremenitev enosmerne tokokroga v večjem obsegu pod 70%, nikoli pa le-ta ni višja kot 90%. Pri tri-sistemske pogonu je obremenitev tako vedno manjša ko 85% in v večjem delu pod 60%. Pri štiri-sistemske pogonu, pa je obremenitev večjem delu pod 60% in nikoli nad 85%. Poleg tega lahko vidimo, da je zmanjšanje izmenične komponente najbolj učinkovito pri nizkih hitrostih in visokih navorih, potem pa ta učinek pada predvsem z naraščajočo hitrostjo. Tako z več-sistemske pogonom relativno učinkovito zmanjšamo izmenično komponento prav tam kjer je le ta največja t.j. pri visokih navorih. V splošnem lahko vidimo, da največ pripomore razširitev iz eno-sistemskega na dvo-sistemske pogon, potem pa doprinos z vsakim dodanim sistemom pada.



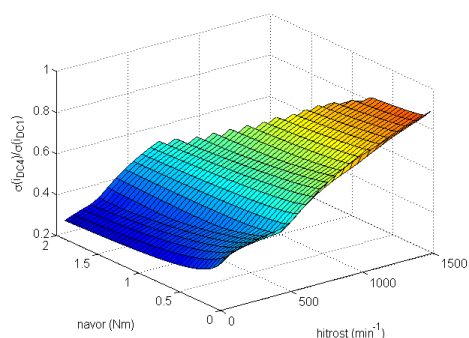
Slika 5: Vsebnost izmenične komponente toka v enosmernem tokokrogu v odvisnosti od delovne točke za eno-sistemske pogon



Slika 6: Relativna odvisnost izmenične komponente za dvo-sistemske pogon.



Slika 7: Relativna odvisnost izmenične komponente za tri-sistemske pogon.



Slika 8: Relativna odvisnost izmenične komponente za štiri-sistemske pogon.

Vendar pa samo vsebnost izmeničnih komponent ocenjena s standardno deviacijo ne pove katere frekvenčne komponente so prisotne. Le te so za eno delovno točko ( $1 \text{ Nm}$ ,  $900 \text{ min}^{-1}$ ) prikazane na sliki 9. V primeru uporabe simetričnega proženja, je najmočnejša frekvenčna komponenta ( $20 \text{ kHz}$ ) pri eno-sistemskem pogonu dvakratnik preklopne frekvence ( $40 \text{ kHz}$ ). Po pričakovanjih se obremenitev enosmernega tokokroga znižuje z večjim številom paralelnih sistemov, prav tako pa se viša tudi najbolj izrazita frekvenčna komponenta. Tako je morebitno odpravljanje teh komponent vedno lažje.

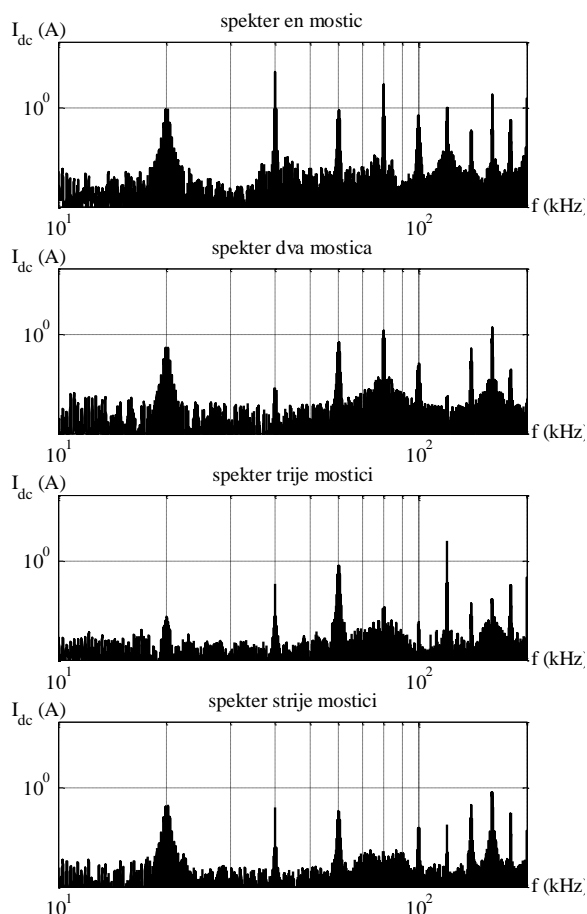
Za primerjavo so priloženi tudi frekvenčni spektri za primer, ko uporabimo asimetrično modulacijo [12] prostorskega vektorja napetosti (slika 10). Kljub temu, da je efektivno gledano obremenitev enaka ne glede na izbrani modulacijski algoritem, pa so frekvence komponente z najvišjo amplitudo za polovico nižje kot pri uporabi simetrične modulacije, kar nekoliko oteži morebitno naknadno odpravljanje teh komponent.

#### 4 Zaključek

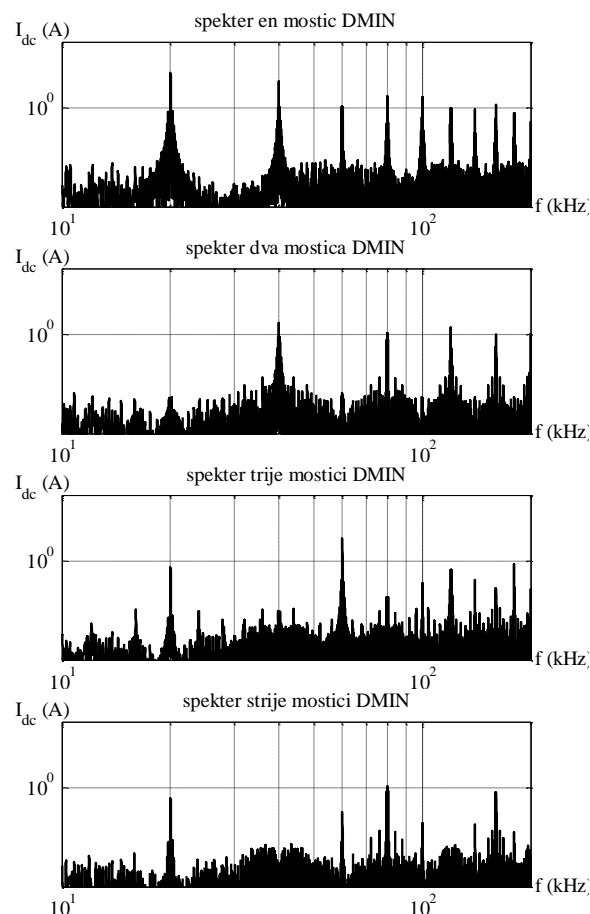
Čeprav je zaradi največjega doprinosa s stališča enosmernega tokokroga najbolj smiselna dvo-sistemska rešitev so več-sistemske rešitve vredne razmisleka v primeru, ko se povečuje moč pogona ali ko je treba prisotnost višjih harmonskih komponent reševati z dodatnimi prijemi. Več-sistemske rešitve te harmonske komponente pomaknejo višje, tako da jih je lažje odpravljati s pasivnimi komponentami.

Prav tako vidimo, da ima izbira modulacijskega algoritma nezanemarljiv vpliv na frekvenčni spekter izmeničnih komponent v enosmernem tokokrogu.

Pričujoči prispevek obravnava obremenitev enosmernega tokokroga z izmeničnimi komponentami, ko lahko posamezne elemente med seboj ločimo in so povezave med njimi brez parazitnih parametrov (induktivnost, kapacitivnost). V praksi, pa je to nemogoče, saj kondenzator enosmernega tokokroga ni en element temveč jih je več, pri čemer se stremi, da se jih postavi čim bližje posamezni tranzistorski veji. V takem primeru pa bi za oceno obremenitve posameznega elementa morali simulirati celoten sklop, pri čemer bi se parazitne parametre najlažje zajelo z FEM izračunom v 3D prostoru, kar pa simulacije naredi bistveno bolj kompleksne in specifične za točno določen pogon.



Slika 9: Frekvenčni spekter toka enosmernega tokokroga za eno, dvo, tri in štiri-sistemski pogon ob uporabi simetrične modulacije



Slika 10: Frekvenčni spekter toka enosmernega tokokroga za eno, dvo, tri in štiri-sistemski pogon ob uporabi asimetrične modulacije

## Literatura

- [1] E. Levi, „Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, let. 55, št. 5, str. 1893–1909, maj 2008.
- [2] E. Levi, R. Bojoi, F. Profumo, H. A. Toliyat, in S. Williamson, „Multiphase induction motor drives – a technology status review“, *IET Electr. Power Appl.*, let. 1, št. 4, str. 489, 2007.
- [3] M. J. Duran in F. Barrero, „Recent Advances in the Design, Modeling, and Control of Multiphase Machines - Part II“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, let. 63, št. 1, str. 459–468, jan. 2016.
- [4] K. Gopakumar in V. T. Ranganathan, „Split-Phase Induction Motor Operation from PWM Voltage Source Inverter“, str. 6.
- [5] L. Parsa, „On advantages of multi-phase machines“, 2005, str. 6 pp.
- [6] J. W. Kolar in S. D. Round, „Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems“, *IEE Proc. - Electr. Power Appl.*, let. 153, št. 4, str. 535–543, jul. 2006.
- [7] M. Bierhoff in F. W. Fuchs, „DC link harmonics of three phase voltage source converters influenced by the pulse width modulation strategy-an analysis“, v *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005.*, 2005, str. 6 pp.-.
- [8] P. A. Dahono, A. Satria, in D. Nurafiat, „Analysis of DC current ripple in six-legs twelve-devices inverters“, v *2012 International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE)*, 2012, str. 1–6.
- [9] E. Levi, F. Barrero, in M. J. Duran, „Multiphase machines and drives - Revisited“, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, let. 63, št. 1, str. 429–432, jan. 2016.
- [10] A. Leban in D. Vončina, „Vpliv sklopljenih dušilk na lastnosti vzporedno vezanih pretvorniških modulov“, predstavljeno na ERK, Portorož, Slovenija, 2006, str. str. 459-462.
- [11] X. Wen in X. Yin, „The SVPWM fast algorithm for three-phase inverters“, v *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, 2007, str. 1043–1047.
- [12] M. Thanuja, M. B. Jyothi, in D. M. V. Rao, „Analysis And Simulation Of Bus-Clamping Pwm Techniques Based On Space Vector Approach“, *Int. J. Eng. Sci.*, str. 10, 2012.