

Nesimetrija toka v večvejnih pretvornikih

Mitja Nemec, Andraž Rihar, Peter Zajec, Marko Petkovšek, Danjel Vončina, Vanja Ambrožič

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

Current asymmetry in multi-leg converters

Abstract. The article presents a new avenue how the problem of current asymmetry in multi-leg converters could be solved. As the simulations show current asymmetry results also in 1st, 2nd and 3rd switching frequency harmonic presence in DC link voltage. By observing the amplitude and phase of these harmonics one could equalize leg currents.

1 Uvod

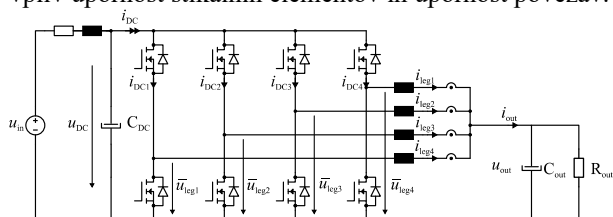
Z razvojem polprevodniških tehnologij, se na področju močnostne elektronike izkazuje več trendov [1]:

- vedno širša je uporaba novjših polprevodniških tehnologij (GaN, SiC), s katerimi dosežemo boljše obratovalne lastnosti (višja preklopna frekvenca, nižje izgube, ...)
- povečuje se kompleksnost topologij močnostne elektronike (večnivojske in/ali večvejne).
- vedno večja zmogljivost procesiranja omogoča: bolj kompleksne regulacijske pristope, hitrejšo in/ali bolj robustno detekcijo in diagnostiko različnih okvar v sistemu in nadomeščanje senzorjev z opazovalniki.

V cenovno občutljivih aplikacijah je nadomeščanje senzorjev z opazovalniki pogosto uporabljen pristop. To še toliko bolj velja za topologije, pri katerih je število nadomeščenih senzorjev visoko.

Topologija, ki jo bomo obravnavali v tem članku, je več-vejni pretvornik navzdol (slika 1), pri katerem za zanesljivo delovanje potrebujemo po en senzor toka za vsako vejo. Le tako lahko z individualnim proženjem posamezne veje zagotavljamo, da se tokovi med posameznimi vejami v stacionarnem stanju enakomerno porazdelijo in, da ne prihaja do preobremenitev.

Do razlike med posameznimi vejnimi tokovi v grobem pride bodisi zaradi različne vrednosti izhodne napetosti ($u_{leg\#}$) posamezne veje, ali pa zaradi različne upornosti posamezne veje, na katero imata največji vpliv upornost stikalnih elementov in upornost povezav.



Slika 1: Štirivejni pretvornik navzdol

Za doseganje enake upornosti posameznih vej bi morali zagotoviti, da imajo stikalni elementi primerljive upornosti (torej bi morali biti tudi dobro termično sklopljeni). Prav tako pa bi moralo biti vezje tudi

simetrično grajeno, kar je v nekaterih aplikacijah nemogoče doseči.

Na srednjo vrednost izhodne napetosti vplivajo morebitne razlike med posameznimi vejami v zakasnitvi prožilnih pulzov močnostnih stikal in različne pragovne napetosti močnostnih stikal.

Razlika med tokovi posameznih vej je proporcionalna razliki napetosti med posameznimi vejami in obratno proporcionalna upornosti stikalnih elementov, vezja in upornosti induktivnosti. Ker je pri sodobnih pretvornikih ta upornost zelo nizka (nižja kot je, višji je izkoristek pretvornika), lahko že majhna nesimetrija povzroči zelo veliko razliko v tokovni obremenitvi.

Vsi naštet razlogi (nesimetrična upornost, neenaka napetost) v praksi onemogočajo preprosto obratovanje več-vejnih pretvornikov brez senzorja toka na vsaki veji.

2 Brezsenzorsko delovanje

V literaturi so do sedaj predstavljene tri možne rešitve s katerimi se lahko izognemo vgradnji senzorja v vsako vejo.

Za pretvornike majhnih moči je bila predstavljena rešitev pri kateri se dodatno meri izhodna napetost preko kapacitivnega delilnika. Z dodatno obdelavo pomerjene napetosti se loči ali je pomerjena izmenična komponenta posledica spremembe obratovalne točke ali pa je rezultat valovitosti zaradi stikalnega delovanja. Tako lahko na podlagi oblike napetosti sklepamo o tokih čez posamezno vejo [2]. Žal pa je bila ta rešitev do sedaj preizkušena samo na eni tranzistorski veji.

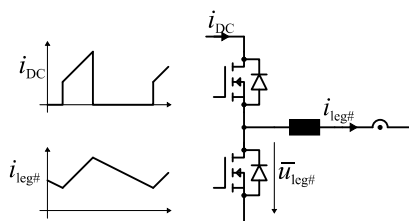
Druga predstavljena rešitev pa rešuje samo asimetrijo, ki je posledica različnih vklopnih razmerij posamezne veje, do katere predvsem zaradi toleranc močnostnih tranzistorjev. V tem primeru sistem meri napetost direktno na izhodu posamezne veje in z uporabo FPGA vezja določi dejansko vklopno razmerje posamezne veje [3]. Na podlagi te meritve nato prilagodi prožilne signale tako da imajo vse veje enako vklopno razmerje. Za simetrično porazdelitev toka v tem primeru pa morajo biti upornosti v posameznih vejah enake, saj metoda tega ne naslavlja.

Največ rešitev za navedeni problem pa temelji na opazovanju izhodne napetosti, ko se v sistem vsiljuje nesimetrično proženje posamezne veje. Iz primerjave posameznih odzivov lahko z naprednimi algoritmi [4]–[7] ugotovimo stanje nesimetrične obremenitve in jo tudi odpravimo. Ta rešitev je v praksi največkrat preizkušena, vendar pa je izenačevanje toka relativno počasno, poleg tega pa se lahko vsiljevanje nesimetričnega proženja kaže tako v povišanih

akustičnih kot elektromagnetnih motnjah. Zaradi tega se v zadnjem času veliko dela na izbiri primerne oblike nesimetričnega proženja [8].

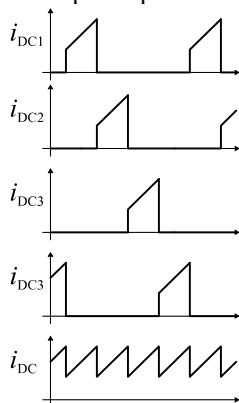
3 Ugotavljanje nesimetrije na podlagi meritve izmenične komponente napetosti na enosmernem tokokrogu

Vpliv nesimetrične obremenitve večvejnega pretvornika se kaže tudi na strani enosmernega tokokroga. Kot vidimo na sliki 2, je oblika toka posamezne veje v enosmernem tokokrogu odvisna tako od amplitude toka posamezne veje kot tudi od srednje vrednosti napetosti (vklopnega razmerja) posamezne veje.



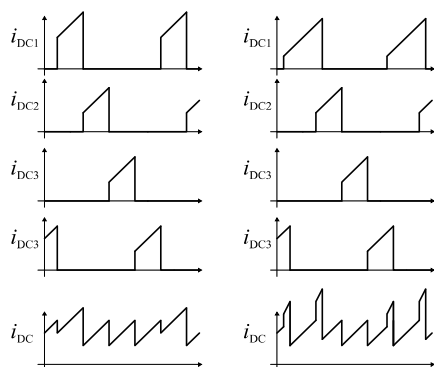
Slika 2: Tok v enosmernem tokokrogu in tok posamezne veje

Pri štirivejnem pretvorniku, ki je simetrično obremenjen je tudi vsota tokov vseh vej na enosmernem tokokrogu simetrična, pri čemer ima osnovna harmonska komponenta 4-kratnik preklopne frekvence (slika 3).



Slika 3: Tokovi posameznih vej in skupni tok v enosmernem tokokrogu ob simetrični obremenitvi

V primeru, ko je obremenitev nesimetrična, pa so v toku enosmernega tokokroga najbolj izrazite dodatne komponente, katerih frekvenca je 1-, 2- in 3-kratnik preklopne frekvence (slika 4).



Slika 4: Tokovi posameznih vej in skupni tok v enosmernem tokokrogu ob nesimetrični obremenitvi zaradi različne upornosti vej (levo) ter različnega vklopnega razmerja (desno)

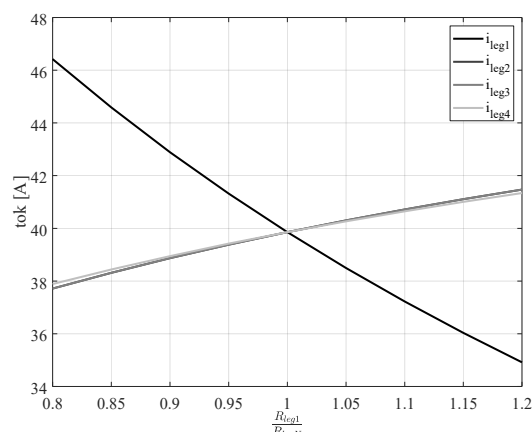
Ker, je tak pretvornik povezan proti napajanju s končno impedanco se le-ti harmoniki v toku enosmernega tokokroga izrazijo tudi kot harmoniki v napetosti enosmernega tokokroga u_{DC} . Tako bi lahko samo z meritvijo spektra napetosti enosmernega tokokroga sklepali (in tudi odpravili) nesimetrično obremenitev.

4 Rezultati

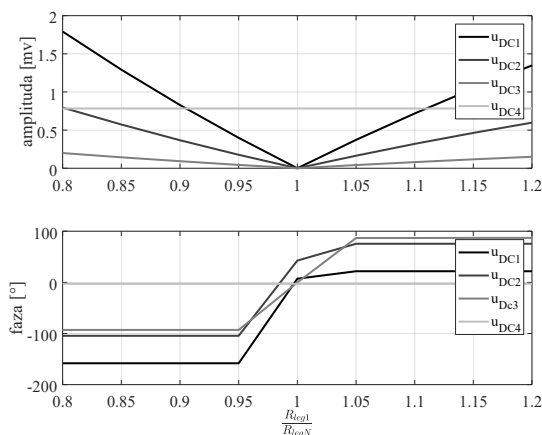
Za ugotavljanje odvisnosti harmonske vsebine v napetosti enosmernega tokokroga od tipa in stopnje nesimetrije obremenitve so bile s programskim paketom MATLAB/Simulink izvedene simulacije štirivejnega pretvornika navzdol, pri katerem sta se spreminjala tako upornost v posamezni veji kot tudi vklopno razmerje v posamezni veji.

Kot vidimo na slikah 5, 6 in 7, ko se spreminja upornost v eni sami veji glede na ostale tri veje, se pričakovano spreminja obremenitev v posameznih vejah. To pa se odraža tudi na spremembi 1. 2. in 3. harmonika napetosti enosmernega tokokroga. Četrti harmonik ostaja nespremenjen. Harmonska vsebina se prav tako razlikuje v primeru, ko je spremenjena upornost v prvi ali drugi veji (sliki 6 in 7).

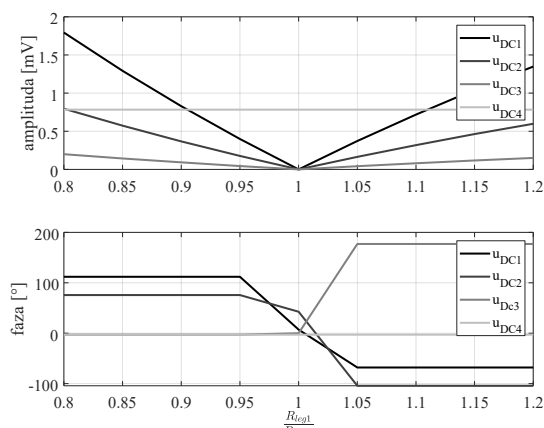
V kolikor pa se upornost spreminja v dveh vejah hkrati, so razmere sicer nekoliko bolj kompleksne, vendar je odziv podoben. Kot vidimo na primeru nesimetrične obremenitve v 1. in 3. veji se poveča harmonska vsebina 1, 2 in 3 harmonika (slika 8).



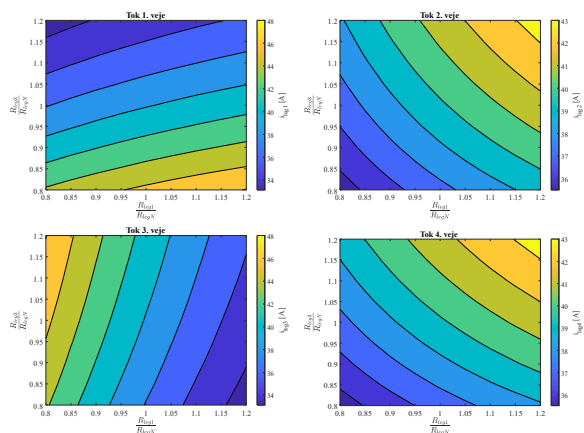
Slika 5: Odvisnost obremenitve od relativne spremembe upornosti v 1. veji



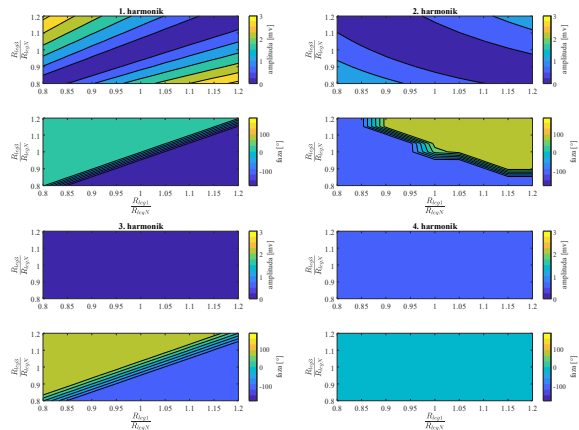
Slika 6: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od relativne spremembe upornosti v 1. veji



Slika 7: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od relativne spremembe upornosti v 2. veji



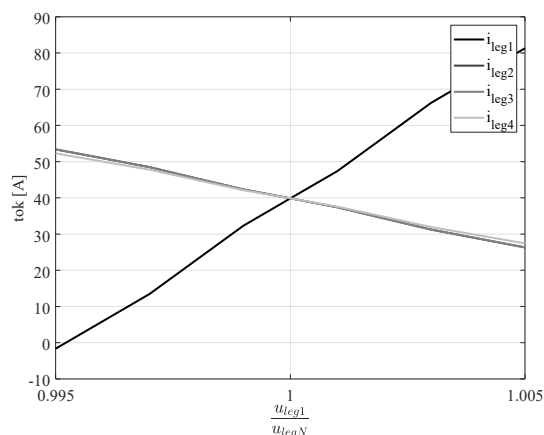
Slika 8: Nesimetričnost obremenitve v odvisnosti od relativne spremembe upornosti v 1. in 3. veji



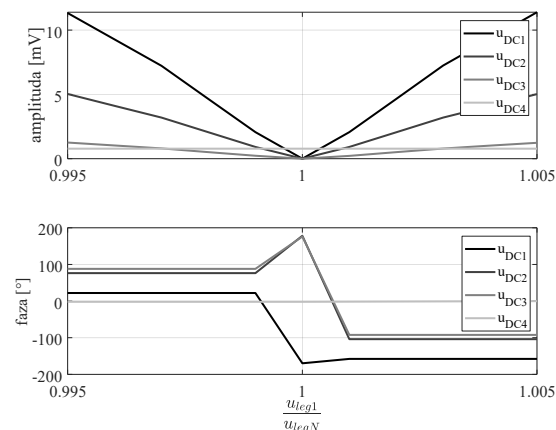
Slika 9: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov preklapne frekvence v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od relativne spremembe upornosti v 1. in 3. veji

Amplituda in faza posameznih harmonikov (slika 9) pa sta odvisni tako od stopnje nesimetrije kot tudi od razmerja nesimetrije med dvema vejama.

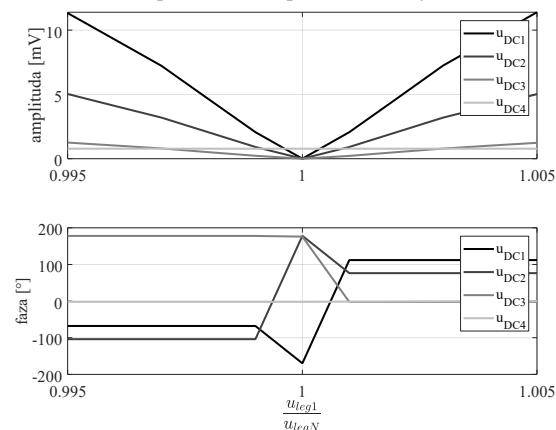
Praktično enak odziv vidimo tudi v primeru, ko do nesimetrije obremenitve pride zaradi odstopanja napetosti ene veje (slike 10, 11 in 12). Vendar pa je v tem primeru treba opozoriti, da že pri zelo zelo majhnih spremembah napetosti (0,5 %) pride do bistveno večje nesimetrije obremenitve. Posledično so tudi spremembe v harmonski vsebini enosmerne napetosti večje.



Slika 10: Nesimetričnost obremenitve v odvisnosti od relativne spremembe napetosti v 1. veji

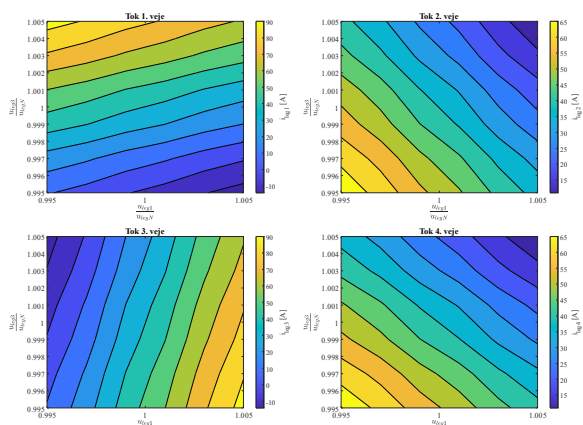


Slika 11: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od relativne spremembe napetosti v 1. veji

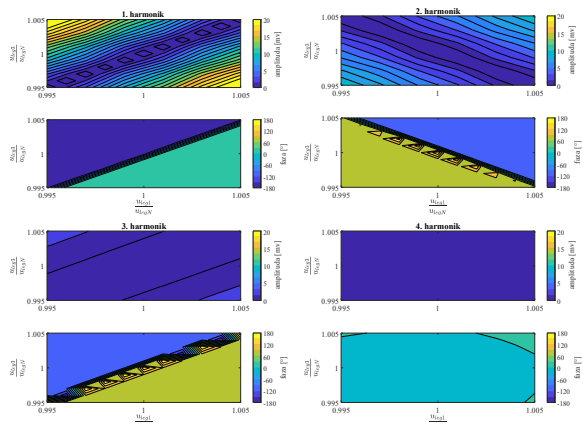


Slika 12: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od relativne spremembe napetosti v 2. veji

Primerljive rezultate dobimo tudi v primeru, ko se spreminjata napetosti dveh vej (1. in 3. veja). Tudi v tem primeru se z nesimetrijo v napetosti 1. in/ali 3. veje pojavi nesimetrija tokovne obremenitve. Prav tako se tudi povečajo amplitude 1., 2. in 3. harmonika v napetosti enosmernega tokokroga. Amplituda 4. harmonika pa je konstantna. Faza posameznih harmonikov so tudi v tem primeru odvisne od razmerja med nesimetrijo v 1. in 3. veji.



Slika 13: Nesimetričnost obremenitve v odvisnosti od spremembe napetosti v 1. in 3. veji



Slika 14: Amplituda in faza prvih štirih harmonikov v napetosti enosmernega tokokroga v odvisnosti od spremembe napetosti v 1. in 3. veji

5 Sklep

Simulacije, predstavljene v članku, nakazujejo možnost novega pristopa k izenačevanju tokovne obremenitve v večvejnih pretvornikih. Z opazovanjem harmonske vsebine v napetosti enosmernega tokokroga lahko sklepamo, v kateri veji je tok večji od povprečja, in ustrezno ukrepamo. Tak način deluje tako pri nesimetrijah zaradi razlike v upornostih med vejami kot tudi zaradi razlike v napetostih posamezne veje.

Simulacijski rezultati tudi nakazujejo, da je nesimetrija bistveno bolj odvisna od razlike napetosti med vejami kot zaradi razlike upornosti med posameznimi vejami. Tako je uporaba rešitev, ki odpravljajo nesimetrijo samo na podlagi meritve nesimetrije napetosti (vklopnega razmerja) [3], smiselna, saj s tem odpravimo večino nesimetrije.

Pri praktični implementaciji nakazane rešitve pa bo treba zagotoviti točno meritev izmenične napetosti z nizko amplitudo in visoko frekvenco, vzorčiti merjeni signal z najmanj nekaj 10 krat višjo vzorčno frekvenco, kot je preklopna frekvenca, in nato še implementirati algoritem, ki bo zanesljivo določil vir/vejo nesimetrije.

Zahvala

Delo je bilo sofinancirano iz projekta ARRS »Napredni elektronski napajalni modul za avtomobilski katalizator« L2-2619 (C).

Literatura

- [1] A. Rihar, M. Nemec, in H. Lavrič, "Trendi v razvoju močnostne elektronike za vodenje električnih strojev," *Elektrotehniški Vestn.*, vol. 86, no. 5, pp. 237–247, 2019.
- [2] X. Ke, J. Sankman, in D. Ma, "A 5MHz, 24V-to-1.2V, AO2T current mode buck converter with one-cycle transient response and sensorless current detection for medical meters," in *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, Mar. 2016, pp. 94–97. doi: 10.1109/APEC.2016.7467857.
- [3] J. Gordillo in C. Aguilar, "A Simple Sensorless Current Sharing Technique for Multiphase DC–DC Buck Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3480–3489, May 2017, doi: 10.1109/TPEL.2016.2592240.
- [4] X. Zhang, L. Corradini, in D. Maksimovic, "Sensorless Current Sharing in Digitally Controlled Two-Phase Buck DC-DC Converters," in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Washington, DC, USA, Feb. 2009, pp. 70–76. doi: 10.1109/APEC.2009.4802635.
- [5] W. Du, Y. Tao, Z. Chen, in C. Wang, "Sensorless current sharing in digitally controlled multiphase buck DC-DC converters," in *International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE)*, Kuantan, Malaysia, Jun. 2011, pp. 302–307. doi: 10.1109/INECCE.2011.5953896.
- [6] C. Wang, K. Wang, Z. Zheng, K. Sun, in Y. Li, "Modulation Induced Current Imbalance and Its Sensorless Control of a GaN-Based Four-Phase DC–DC Power Amplifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 2, pp. 1520–1531, Feb. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2905828.
- [7] K. Hu, Y. Chen, in C. Tsai, "A Digital Multiphase Converter with Sensor-less Current and Thermal Balance Mechanism," in *2018 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, Nov. 2018, pp. 175–178. doi: 10.1109/ASSCC.2018.8579301.
- [8] N. Bošković, J. Duarte, in E. A. Lomonova, "Signal Injection for Sensorless Current Sharing with Experimental Verification on 1 MHz GaN Prototype," in *2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe)*, Sep. 2020, p. P.1-P.8. doi: 10.23919/EPE20ECCEEurope43536.2020.9215720.