

Valovitost toka v 3-faznem 2-nivojskem razsmerniku

David Kovačič, Rastko Fišer, Klemen Drobnič

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: dk1550@student.uni-lj.si

Current ripple in 3-phase 2-level inverter

Abstract. 3-phase 2-level voltage-source inverters are a standard choice for generating three-phase voltage from a DC voltage source. Because energy conversion should be as efficient as possible, a modulation technique known as Pulse Width Modulation (PWM) is employed, which generates a switching voltage waveform. However, the switching mode of operation inevitably produces the current ripple, which depends on a load type, switching frequency, and modulation technique and manifests itself in a higher part of the spectra. In this paper, we analyzed the instantaneous current ripple during one fundamental period. Using simulation we determined a relation between the amplitudes and angles of voltage vectors and current ripple in the complex plane. We found that operation with high modulation indices experiences six distinct areas with high current ripple per period.

1 Uvod

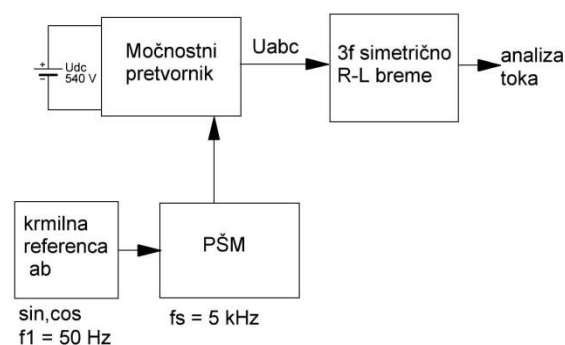
3-fazni 2-nivojski razsmernik je topologija močnostnega pretvornika, ki jo najdemo v številnih aplikacijah močnostne elektrotehnike, predvsem v električnih pogonih in omrežno povezanih pretvornikih električne energije. V večini tovrstnih pretvornikov vodenje temelji na pulzno-širinski modulaciji (PŠM) z nosilnim signalom, kar zagotavlja enostavno implementacijo, konstantno stikalno frekvenco in dobro definiran frekvenčni spekter. Neizogibna posledica stikalnega načina delovanja je valovitost izhodnega toka, ki naj bo kar najmanjša, saj je prav to neposreden vzrok za nastanek višjeharmonskih izgub na bremenu. S prilagajanjem oblike nosilnega signala lahko vsaj delno vplivamo na velikost tovrstnih izgub, npr. z uporabo nezvezne PŠM pri relativno visokih modulacijskih indeksih [1]. V nadaljevanju privzamemo, da je močnostni pretvornik voden s PŠM s sinusno suboscilacijo, ki ima identični frekvenčni spekter kot sicer dobro znana modulacija s prostorskim vektorjem.

2 Močnostni pretvornik z bremenom

2.1 Generiranje napetosti

Na sliki 1 je prikazana konceptualna shema simetrično obremenjenega 3-faznega 2-nivojskega razsmernika vodenega s PŠM. Močnostni pretvornik, napajan iz enosmernega vira napetosti, služi za generiranje trifazne izhodne napetosti U_{abc} . Z modulacijskim indeksom, ki je

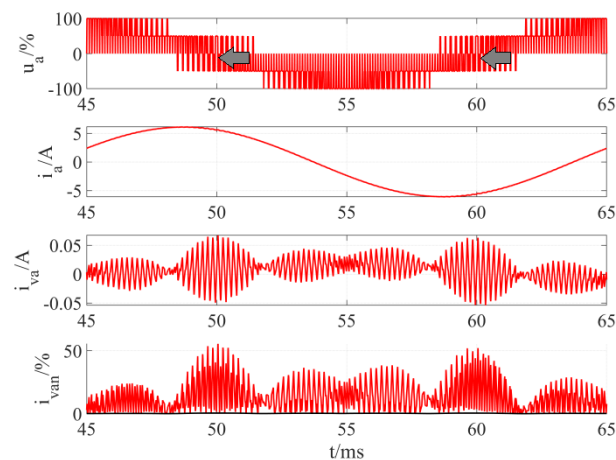
omejen na vrednosti med 0 in 1, izberemo amplitudo krmilne reference, katera se nato primerja s visoko frekvenčnim trikotnim signalom. Ohmsko-induktivno breme je simetrično, nespremenljivo z upornostjo 20Ω in induktivnostjo $0,15 \text{ H}$ na vsaki veji in vezano v zvezdo.



Slika 1. Shema simetrično obremenjenega 3-faznega 2-nivojskega razsmernika

2.2 Analiza valovitosti toka

Zaradi nezveznega poteka napajalne napetosti u_a se v časovnem poteku toka i_a pojavi valovitost i_{va} (slika 2). Največja valovitost toka sovpada z najstrmejšim delom časovnega poteka želene napetosti (tam, kjer krmilni signal prečka ničlo – označeno s kazalcema). Zaradi simetrije faz a , b in c bomo od sedaj naprej obravnavali zgolj fazo a .



Slika 2. Primerjava valovitosti toka s potekom napetosti v eni periodi osnovnega harmonika

Iz poteka toka i_a in njegove valovitosti i_{va} (slika 2) vidimo, da tok vsebuje poleg osnovne harmonske

komponente tudi višje harmonike [2]. Frekvenčni spekter na sliki 3 nazorno pokaže frekvenčno vsebino faznega toka – njegov idealni potek bi vseboval zgolj osnovni harmonik, ki zaradi preglednosti ni izrisan. Iz spektra je razvidno, da se najbolj zastopani harmoniki pojavijo v okolici stikalne frekvence (5 kHz) in njenih celoštevilskih večkratnikov.

2.3 Ovrednotenje valovitosti toka

Časovni potek valovitosti i_{va} izločimo iz skupnega toka i_a z

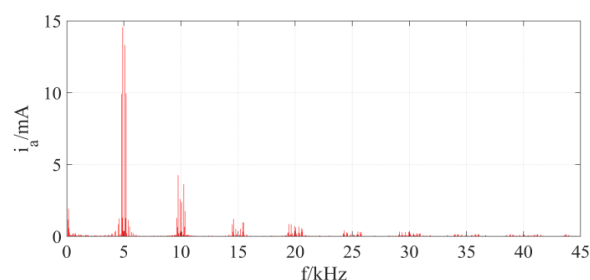
$$i_{va} = i_a - i_{a1}, \quad (1)$$

kjer je i_{a1} osnovni harmonik faznega toka. Največjo razliko v vršni-vršni vrednosti valovitosti v eni stikalni periodi definiramo kot

$$I_{vapp} = \max(i_{va}) - \min(i_{va}). \quad (2)$$

Valovitost i_{va} (slika 2) nato delimo s pravkar definirano vršno-vršno vrednostjo in dobimo normalizirano valovitost

$$i_{van} = \frac{|i_{va}|}{I_{vapp}}. \quad (3)$$



Slika 3. Frekvenčni spekter višjih harmonikov toka i_a

3 Analiza prostorskega vektorja

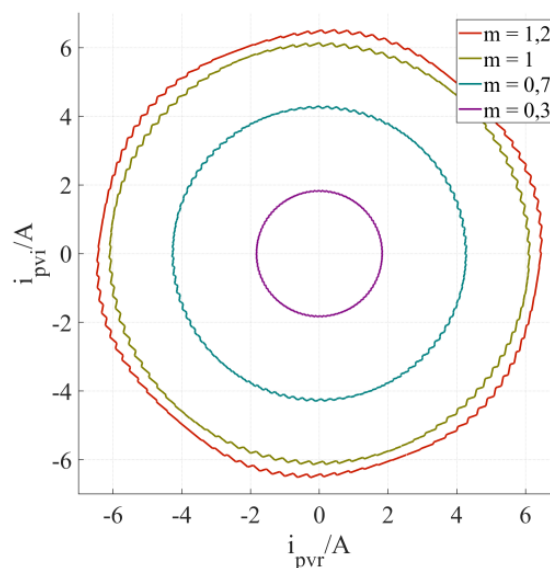
3.1 Analiza ovojnice prostorskega vektorja v kompleksni ravnini

Trifazni bremenski tok lahko v sistemih brez izvedenega ničelnega vodnika zapišemo s prostorskim vektorjem

$$i_{pv} = \frac{2}{3}(i_a + \mathbf{a}i_b + \mathbf{a}^2i_c) = i_{pvr} + j i_{pvi}, \quad (4)$$

kjer je $\mathbf{a} = \exp(j \cdot 2\pi/3)$. Časovni potek prostorskega vektorja pri posameznem modulačijskem indeksu m razkrije njegovo odvisnost od električnega kota. Na sliki 4 lahko vidimo, kako skupna valovitost faznih tokov vpliva na ovojnico prostorskega vektorja pri različnih vrednostih m . Idealne ovojnice, brez valovitosti toka, bi bile seveda krožnice. Razberemo lahko, da se valovitost spreminja z električnim kotom, in sicer šestkrat v eni osnovni periodi. V področju nadmodulacije ($m > 1$) se dodatno popači osnovna krožna oblika toka, saj se v toku takrat pojavijo

harmonske komponente tudi v spodnjem delu spektra (5., 7., 11., 13.,...).

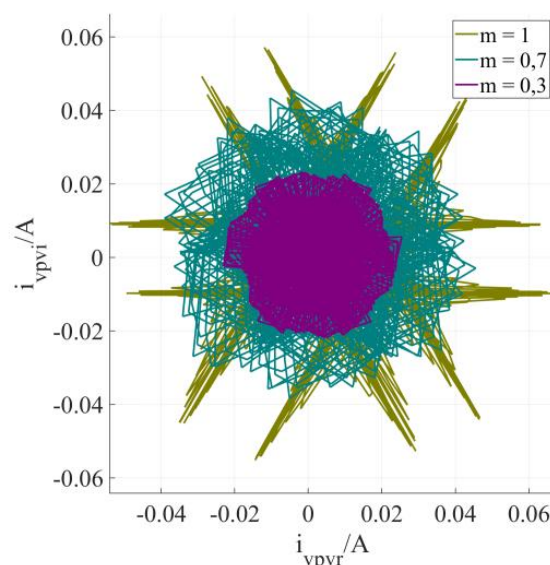


Slika 4. Potek ovojnice prostorskega vektorja toka z valovitostjo pri različnih modulačijskih indeksih

Iz faznih valovitosti sestavimo ovojnico prostorskega vektorja valovitosti

$$i_{vppv} = \frac{2}{3}(i_{va} + \mathbf{a}i_{vb} + \mathbf{a}^2i_{vc}) = i_{vppvr} + j i_{vppvi}, \quad (5)$$

ki jo prikazuje slika 5.



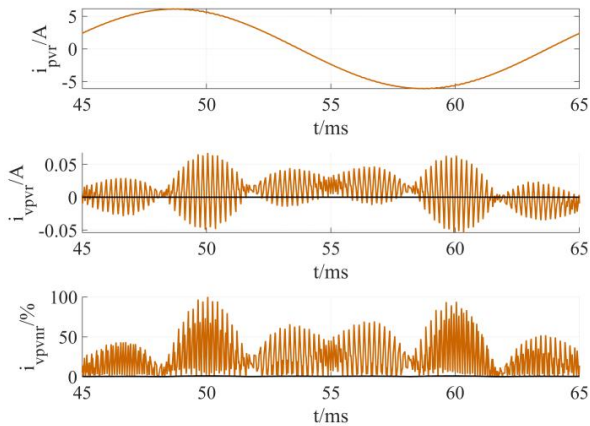
Slika 5. Projekcija valovitosti pri različnih modulačijskih indeksih

Razvidno je, da je valovitost odvisna od električnega kota. Največje izražene valovitosti sovpadajo z električnimi koti posameznih stikalnih

vektorjev. Opazimo tudi, da je prisotna podvojenost teh izraženosti ter da valovitosti ovojnice prostorskega vektorja s slike 4 ne sovpadajo z vrhovi stikalnih vektorjev.

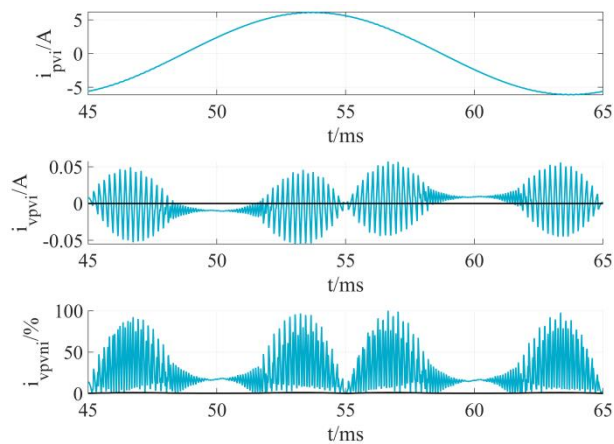
3.2 Analiza ovojnice prostorskega vektorja v kompleksno-časovnem prostoru

V kompleksno-časovnem prostoru obravnavamo imaginarni in realni del signala ločeno. Na sliki 6 lahko opazimo, da je izraženosti toliko, kot je stikalnih vektorjev (šest), in da je prisoten rahel odmik od abscisne osi.



Slika 6. Realna komponenta prostorskega vektorja, njena valovitost, in njena vršno-vršno ovrednotena valovitost

Tudi na sliki 7 lahko iz časovnega poteka valovitosti vidimo manjši odmik valovitosti od abscise, le da je tokrat prisoten pri okoli 50 ms in 60 ms. Zaradi projekcije na imaginarno ravnino so sedaj vidna štiri izražena področja. Preostali dve sta prikriti, ker sta pravokotni na imaginarno ravnino.

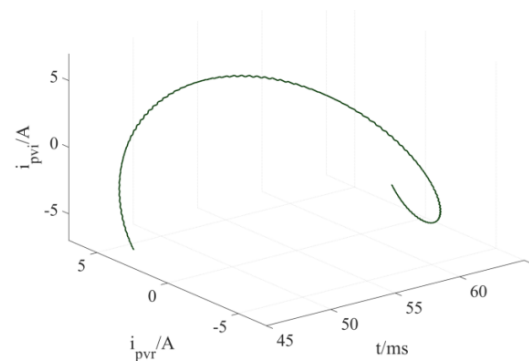


Slika 7. Imaginarna komponenta prostorskega vektorja, njena valovitost in njena vršno-vršno ovrednotena valovitost

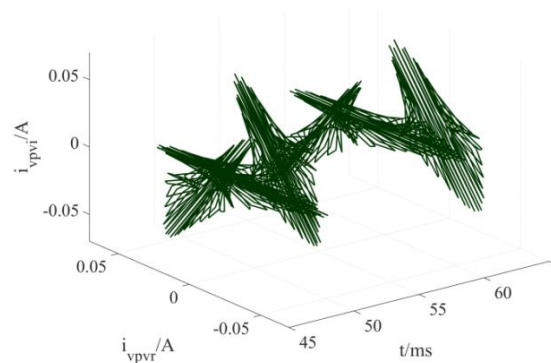
3.3 Predstavitve ovojnice prostorskega vektorja v kompleksno-časovnem prostoru

Za boljše predstavo vpliva enosmernih odklikov, kakor tudi šestih področij izraženosti valovitosti, lahko časovni potek ovojnice prostorskega vektorja i_{pv} in njegove valovitosti i_{vpv} prikažemo v kompleksno-

časovnem prostoru (slika 8). S slike 9 lahko razberemo, da bi bile izraženosti na sliki 5 popolnoma poravnane s stikalnimi vektorji, če časovni potek valovitosti ne bi imel odklikov od središčnice. Tako pa pride do podvojenosti.



Slika 8. Časovni potek prostorskega vektorja z valovitostjo za eno periodo

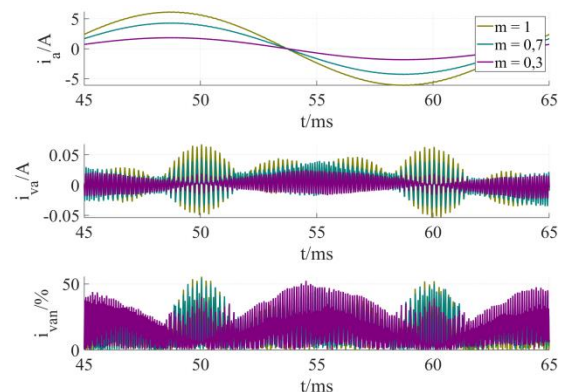


Slika 9. Časovni potek valovitosti v periodi prostorskega vektorja

4 Prikaz odvisnosti valovitosti od modulacijskega indeksa in kota

4.1 Prikaz valovitosti od kota pri posameznih modulacijskih indeksih

Pri spreminjanju modulacijskega indeksa v območju linearne modulacije ($m < 1$) je najopaznejša sprememba v amplitudah toka, kot prikazuje potek i_a na sliki 10 [2].

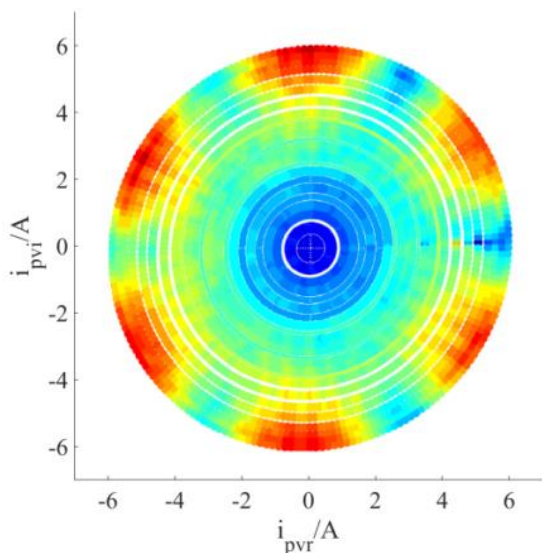


Slika 10. Časovni potek toka i_a , valovitosti i_{va} in njene normirane vrednosti i_{van} pri različnih modulacijskih indeksih

S slike 10 lahko razberemo, da amplitude valovitosti toka i_a (i_{va}) niso linearno odvisne od modulatorskega indeksa. Prav tako je z manjšanjem modulatorskega indeksa šest »izraženosti« vse manj izrazitih. Vpliv spreminjanja modulatorskega indeksa na prostorski vektor prikazuje slika 5, kjer vidimo, da se poveča »izraženost« valovitosti pri linearni modulaciji predvsem izven področja usmeritve stikalnih vektorjev.

4.2 Prikaz odvisnosti valovitosti od modulatorskega indeksa in kota

Z uporabo barvne lestvice (rdeča barva predstavlja največjo valovitost, medtem ko modra predstavlja najmanjšo valovitost) za velikost valovitosti omogočimo »zvezen« prikaz njene odvisnosti od modulatorskega indeksa in kota na sliki 11, ne da bi izgubili informacijo o njeni »izraženosti«.



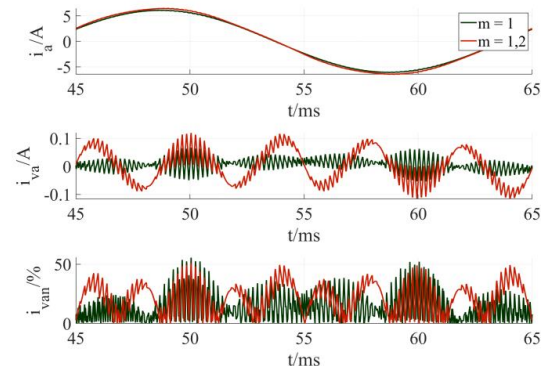
Slika 11. Barvni prikaz odvisnosti valovitosti od modulatorskega indeksa in kota prostorskega vektorja v linearnem področju modulacije

Iz razporeditve barv opazimo, da največja valovitost pri posameznih modulatorskih indeksih sovпада s sečišči »izraženosti« valovitosti med sabo. Ta sečišča so med seboj zamaknjena za 60° in so pri kotih 30° , 90° , 150° , 210° , 270° , 330° [2].

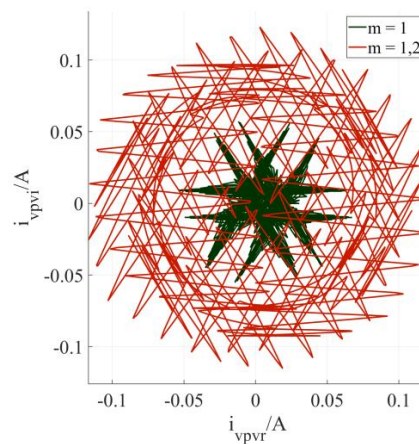
4.3 Nadmodulacija

Pri nadmodulaciji ostane izhod močnostnega pretvornika dlje časa odprt. Posledično pride do nesorazmerno večjih valovitosti v primerjavi z linearno modulacijo. Vpliv nadmodulacije na fazni tok i_a prikazuje slika 12, kjer ima valovitost sedaj prisoten izrazit peti harmonik, okrog katerega oscilirajo preostale komponente valovitosti. Njegova posledica je pretirana »izraženost« valovitosti pri nadmodulaciji, ki močno vpliva na obliko ovojnice prostorskega vektorja, kot je razvidno s slike 4.

S slike 13 lahko razberemo, da je vpliv petega harmonika na valovitost pri modulatorskem indeksu 1,2 bistveno bolj izrazit od vseh ostalih komponent skupaj.



Slika 12. Časovni potek toka i_a , valovitosti i_{va} in njene normirane vrednosti i_{van} pri modulatorskih indeksih 1 in 1,2



Slika 13. Projekciji valovitosti na kompleksno ravnino pri modulatorskih indeksih 1 (zeleni) in 1,2 (rdeči)

5 Zaključek

Ugotovili smo, da se valovitost toka ne spreminja zvezno z modulatorskim indeksom, kakor tudi ne zvezno s kotom prostorskega vektorja. Pri nadmodulaciji je to nadvse očitno. Vendar se moramo tudi v področju linearne modulacije zavedati, da navkljub nekolikošnemu zmanjšanju valovitosti v smeri stikalnih vektorjev, pridelamo povečano valovitost na drugih območjih. Problemu pojava valovitosti se s spreminjanjem modulatorskega indeksa torej ne moremo izogniti.

Literatura

- [1] Holmes D. G., Lipo T. A., *Pulse Width Modulation for Power Converters*, Wiley-IEEE Press, Hoboken, ZDA, 2003.
- [2] Grandi G., Loncarski J., Dordevic O., "Analysis and Comparison of Peak-to-Peak Current Ripple in Two-Level and Multilevel PWM Inverters", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, May 2015, pp. 2721-2730.