

Enofazno PFC usmerniško vezje

Aleš Leban, Peter Zajec

Fakulteta za elektrotehniko
Univerza v Ljubljani
Tržaška 25, 1001 Ljubljana, Slovenija
ales.leban@fe.uni-lj.si

Single Phase PFC rectifier

The paper presents single phase PFC rectifier, which meets the requirements of modern power supplies like high power factor, fast dynamic response, low EMI legislation, etc. The rectifier employs a boost converter with dedicated control scheme to shape sine line current and to control the output DC voltage. Due to the inherently limited bandwidth of the voltage controller, an additional line voltage feed-forward loop is added to improve the dynamics. Another improvement in the proposed topology is related to the line current ripple minimization by using a coupled inductor. At the end of the paper, the properties and the operation of the proposed rectifier was confirmed with the measurements on the experimental model.

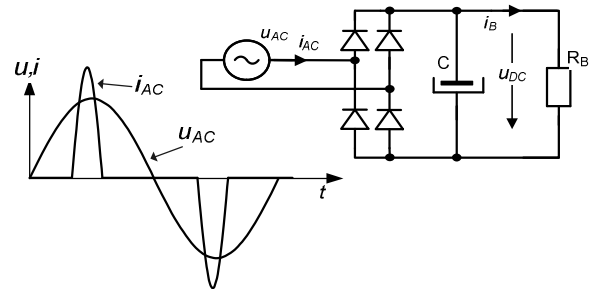
1 Uvod

Tehnološki napredek zadnjih desetletij je botroval razvoju številnih naprav, kar se med drugim kaže tudi v večjem številu porabnikov priključenih na distribucijsko omrežje. Številne od njih pa omrežja ne obremenjujejo zgolj z delavno močjo, pač pa ga, zaradi narave delovanja teh naprav, dodatno obremenjujejo z jalovo močjo. Problem je pereč zlasti z vidika distribucijskega omrežja, odraža pa se v dodatnih izgubah v omrežju in posledično zmanjšani zmogljivosti prenosa električne energije, jalova obremenitev omrežja pa vpliva tudi na kakovost električne energije. Tipičen primer jalove obremenitve so naprave, ki za svoje delovanje potrebujejo magnetenje (dušilke, transformatorji, električni stroji). Njihov vpliv na omrežje se kaže v faznem zamiku osnovne harmonske komponente toka glede na potek omrežne napetosti, opišemo pa ga s faktorjem premaknitve (displacement factor) [1]

$$k_{\varphi} = \cos\varphi_1, \quad k_{\varphi} \in [0,1] \quad (1),$$

Fazni kot φ_1 predstavlja kot med omrežno napetostjo in osnovno harmonsko komponentno omrežnega toka. Poleg faznega zamika osnovne harmonske komponente toka vplivajo na faktor delavnosti (λ) posamezne naprave tudi višjeharmonske komponente toka, ki jih ta naprava »vleče« iz omrežja. Z razmahom omrežno vodenih usmerniških vezij (slika 1) in razvojem sodobnih močnostnih stikal, ki so omogočila številne možnosti pri pretvorbi električne energije, se je delež

višjeharmonskih komponent v omrežnem toku skokovito povečal.



Slika 1: Usmerniško vezje s pripadajočima vhodnima veličinama

Splošen izraz za določanje faktorja delavnosti naprave se glasi

$$\lambda = \frac{P}{S} = k_{\varphi} \cdot k_{\theta} \quad (2)$$

k_{θ} je faktor popačenja toka (distortion factor), določen pa je z razmerjem efektivne vrednosti osnovne harmonske komponente in skupne efektivne vrednosti toka

$$k_{\theta} = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}, \quad k_{\theta} \in [0,1] \quad (3)$$

Ob upoštevanju definicije faktorja popačenja [2]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (4)$$

dobi (2) obliko

$$\lambda = \cos\varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}}, \quad (5)$$

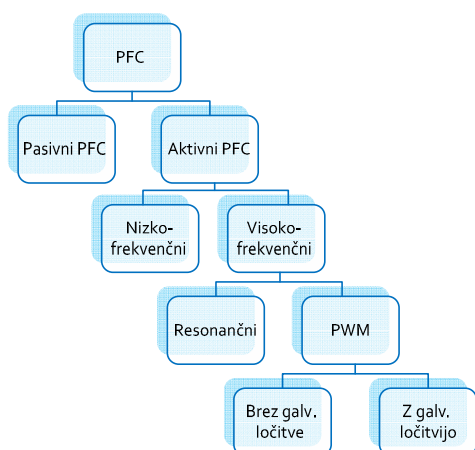
kar je splošen izraz za določitev faktorja delavnosti (power factor) določene električne naprave. Višjeharmonske komponente omrežnega toka ne povzročajo težav zgolj distributerjem pri zagotavljanju ustrezne kakovosti električne energije, saj se širijo vzdolž omrežja in vplivajo na pravilnost delovanja preostalih na omrežje priključenih naprav (EMC).

Z namenom, da se omeji vsebnost višjeharmonskih komponent toka in s tem zagotovi ustrezna kakovost električne energije, je bil na območju EU sprejet standard EN61000-3-2 [3], ki je del Evropske direktive EMC (Electro Magnetic Compatibility). Pri svojem delu se pogosto srečujemo s pretvorniški napravami

z nizkim faktorjem delavnosti (λ), kar je predvsem posledica bogate harmonske vsebine omrežnega toka. Tipični predstavniki so procesni viri z velikimi izhodnimi tokovi in sorazmerno nizkimi napetostmi (elektrokemija, obločno varjenje...). Ob upoštevanju navedene direktive smo v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME) pristopili k izgradnji usmerniškega modula z visokim faktorjem delavnosti. Pri realizaciji krmilno-regulacijskega vezja smo izhajali iz zahteve po visoki dinamiki regulirane veličine, topologijo pa smo zasnovali na način, ki omogoča dodatno znižanje amplitude višjiharmonskih komponent toka.

2 PFC usmerniška vezja

Osnovni cilj PFC usmerniških vezij je zmanjšati popačenje vhodnega toka in zagotoviti, da je le-ta v fazi z omrežno napetostjo – doseči visok faktor delavnosti. Načinov za doseganje tega cilja je več. V nadaljevanju se bomo omejili na enofazna usmerniška vezja, ki jih v grobem lahko razdelimo na način, kot ga kaže slika 2 [4].



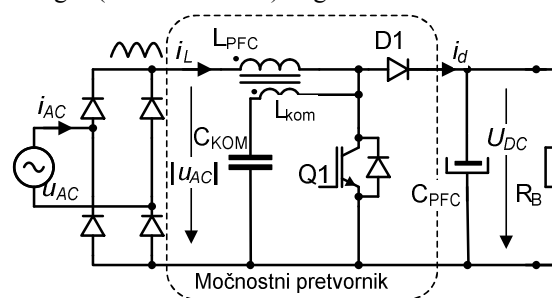
Slika 2: Osnovna delitev PFC usmerniških vezij

V pasivnih PFC usmerniških vezjih so dodani elementi (dušilke, kondenzatorji), ki v usmerniku tvorijo dodatna filtrska vezja. Možnih je več izvedb glede vrste in lokacije namestitve pasivnega filtra. Odlikuje jih robustnost, preprostost in zanesljivost, med pomanjkljivosti pa uvrščamo predvsem dimenzije, nizko dinamiko in dejstvo, da ne omogočajo regulacije izhodne napetosti. Prav tako velja, da je oblika omrežnega toka odvisna od bremena. Večjo fleksibilnost pri doseganju visokega faktorja delavnosti in nastavitvi izhodne napetosti nam nudijo rešitve z aktivnimi stikali v povezavi s pasivnimi filtrskimi elementi – aktivna PFC usmerniška vezja. V nizko-frekvenčnih PFC vezjih je preklopna frekvenca stikal (na mestu diod so uporabljeni tiristorji) enaka frekvenci omrežne napetosti. Iz tega razloga so izgube kot tudi EMC motnje zanemarljive, omogočena pa je tudi regulacija izhodne napetosti. Ponovno pa naletimo na težavo glede dimenzij filtrskih elementov in slabe

dinamike izhodne napetosti. V nadaljevanju se bomo omejili na PWM aktivna PFC vezja, katerih preklopna frekvenca je bistveno višja od frekvence omrežne napetosti. Posledično imamo v teh vezjih opravka z znatnimi stikalnimi izgubami, zanemarljive pa niso niti EMC motnje. Glede na topologijo pretvorniškega sklopa ločimo več izvedb, v našem primeru smo se odločili za izvedbo na osnovi topologije pretvornika navzgor.

3 Pretvornik navzgor v vlogi PFC vezja

Topologija PFC usmerniškega vezja na osnovi pretvornika navzgor je prikazana na sliki 3. Sestavlja ga diodni mostič, prek katerega je vezje priklopljeno na distribucijsko omrežje, močnostno vezje – pretvornik navzgor (boost converter) in gladilni kondenzator C_{PFC} .



Slika 3: Topologija PFC usmerniškega vezja

Vloga diodnega mostiča in kondenzatorja je enaka kot pri klasičnem usmerniškem vezju – usmerjanje izmenične omrežne napetosti in glajenje izhodne napetosti usmernika. Z dodanim močnostnim pretvornikom in pripadajočim krmilno-regulacijskim vezjem (na sliki 3 ni prikazano) zagotovimo $|\sin \omega t|$ obliko toka skozi dušilko (i_L), ki je enaka obliki usmerjene omrežne napetosti ($|u_{AC}|$). Na ta način zagotovimo, da sta si vhodni tok in napetost v fazi. Izhodna napetost usmernika, ki je odvisna od trenutne omrežne napetosti in od vklopnega razmerja stikala D

$$\frac{u_{DC}}{\hat{U}|\sin \omega t|} = \frac{1}{1-D}, \quad (6)$$

ne sme biti nižja od temenske vrednosti usmerjene omrežne napetosti. Ob upoštevanju (6) lahko za srednjo vrednost toka skozi diodo zapišemo

$$\bar{i}_d(t) = (1-d) \cdot \bar{i}_L(t) = \frac{\hat{U}_{AC}}{U_{DC}} \cdot \hat{I}_{AC} \cdot |\sin \omega t|^2. \quad (7)$$

Upoštevajoč trigonometrijo dobi (7) obliko

$$\bar{i}_d(t) = \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{AC} \hat{I}_{AC}}{U_{DC}} - \frac{1}{2} \frac{\hat{U}_{AC} \hat{I}_{AC}}{U_{DC}} \cos(2\omega t). \quad (8)$$

Poleg enosmerne komponente toka (prvi člen v (8)) je v toku skozi diodo prisotna tudi izmenična komponenta dvojne omrežne frekvence (drugi člen v (8)). Slednja je posledica neenakosti med trenutno vhodno močjo, ki je pulzirajoča, in močjo na izhodu usmernika za katero predpostavljamo, da je konstanta. Neenakost vhodne in

izhodne moči »blažimo« s kondenzatorjem C_{PFC} , ki ga določimo tako, da se preko njega zaključuje glavna izmenična komponenta toka. Iz tega naslova mora biti njegova kapacitivnost čim večja, kar pa je v nasprotju z željo po visoki dinamiki izhodne napetosti.

3 Regulacijska shema

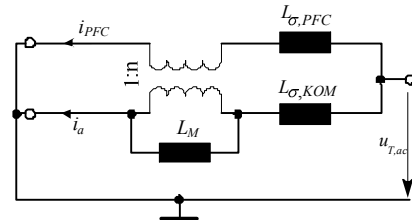
Regulacijska shema PFC usmernika je zasnovana kaskadno iz zunanje napetostne in notranje tokovne regulacijske zanke (slika 4).

Napetostni regulator zagotavlja ustrezen pretok moči iz omrežja in posledično konstantno napetost na izhodu usmernika tako, da na svojem izhodu generira ustrezen signal, ki predstavlja amplitudno vrednost referenčnega toka ($\hat{I}_{L,ref}$). Referenčni signal ($i_{L,ref}$) mora po obliki slediti poteku usmerjene napetosti $|u_{AC}|$, zato se amplitudna vrednost referenčnega signal v množilniku modulira s signalom $|\sin\omega t|$. Razlika referenčne in dejanske vrednosti toka je pripeljana na vhod tokovnega regulatorja, ki ustrezno krmili močnostni tranzistor. Iz praktičnih razlogov je z gladilnim kondenzatorjem na izhodu usmernika nemogoče popolnoma izločiti v (8) izpostavljeno izmenično komponento toka, zato se v izhodni napetosti pojavi drugi harmonik. Napetostnemu regulatorju moramo preprečiti odpravljanje te napake, saj bi se v nasprotnem primeru v vhodnem toku pojavila tretja harmonska komponenta [5], ki pa je s stališča faktorja delavnosti nezaželjena. Napetostnemu regulatorju moramo zato močno omejiti pasovno širino (15 Hz), kar pa negativno vpliva na dinamiko med prehodnimi pojavi (sprememba omrežne napetosti, sprememba obremenitve). Na sliki 4 je v osenčenem delu prikazana direktna krmilna veja, ki ob spremembi omrežne napetosti vpliva na referenčno vrednost toka. Krmilna veja deluje na mestu za napetostnim regulatorjem, zato je le-ta »razbremenjen«, hkrati pa ne vpliva na prehodni pojav. Na podoben način bi lahko v regulacijsko shemo vključili krmilno vejo (I_B -ff) vezano na spremembo bremenskega toka, kar bi dodatno izboljšalo dinamiko regulirane izhodne napetosti.

4 Kompensacija valovitosti vhodnega toka

Ena glavnih pomanjkljivosti sodobnih pretvorniških sklopov je valovitost toka, ki je povezana s stikalnim delovanjem vezja. Prekomerna valovitost dodatno

obremenjuje elemente vezja in vpliva na izkoristek vhodnega naprave, z valovitostjo pa je povezan tudi nivo motenj, ki se širijo v omrežje (konduktivne) oziroma jih naprava v obliki sevanja širi v okolico. Vplive teh motenj lahko delno slabimo z dodajanjem filtrskih vezij, še bolje pa je, če zmanjšamo oz. odpravimo vir nastanka motenj tj. valovitost toka. Za doseg tega cilja poznamo številne rešitve [6] med katerimi smo se zaradi preprostosti izvedbe odločili za kompenzacijsko vezje s kondenzatorjem C_{KOM} in dušilko L_{KOM} , ki je magnetno sklopljena z gladilno dušilko L_{PFC} (slika 3). Osnovni namen kompenzacijskega navitja je, da prevzame celotno izmenično komponento toka (valovitost), med tem ko skozi glavno navitje (L_{PFC}) teče zgolj osnovna harmonska komponenta toka. Podrobnejša analiza delovanja kompenzacijskega vezja je podana v [7], na tem mestu podajamo zgolj ključne ugotovitve. Pri tem nam bo v pomoč slika 5, ki kaže nadomestno vezje sklopljene dušilke ob upoštevanju zgolj izmeničnega vzbujanja $u_{T,ac}$ (small signal model).



Slika 5: Nadomesnto vezje sklopljene dušilke

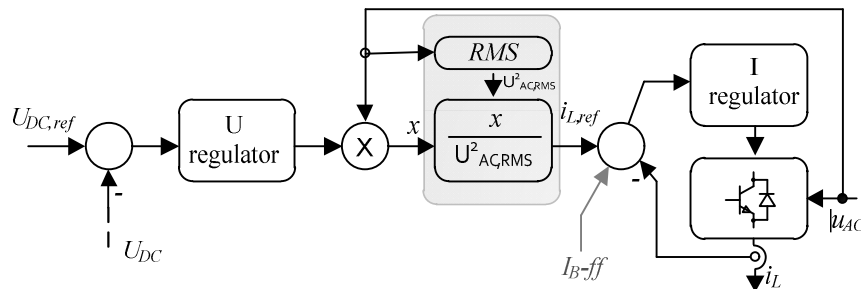
Valovitost toka skozi navitje PFC znaša

$$\frac{di_{PFC}}{dt} = \frac{1}{L_{PFC}(1-k^2)} \left[1 - k \sqrt{\frac{L_{PFC}}{L_{KOM}}} \right] \cdot u_{T,ac} \quad (9)$$

Na podlagi (9) je definiran pogoj nične valovitosti toka za PFC navitje

$$\delta = 1 - k \sqrt{\frac{L_{PFC}}{L_a}} \Rightarrow \delta = 1 - n \frac{L_M}{L_a} \quad (10)$$

Iz (10) je razvidno, da lahko na zmanjšanje valovitosti toka v navitju gladilne dušilke (L_{PFC}) vplivamo z ustrežno sklopitvijo navitij (k) in njunim prestavnim razmerjem (n). V praksi ne moremo zagotoviti popolne odprave valovitosti, saj metoda sklopljenih dušilk temelji na določenih predpostavkah, ki jih ne moremo v celoti izpolniti. V prvem primeru gre za neenakost napetosti na navitjih.



Slika 4: Regulacijska shema PFC usmernika

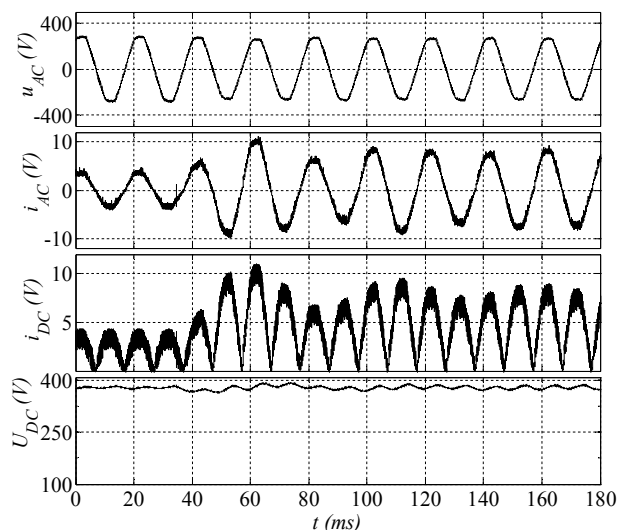
Druga omejitev je konstrukcijske narave, ki ne dopušča izgradnje navitij s poljubnim prestavnim razmerjem (diskretno število ovojev).

5 Meritve na eksperimentalnem modelu

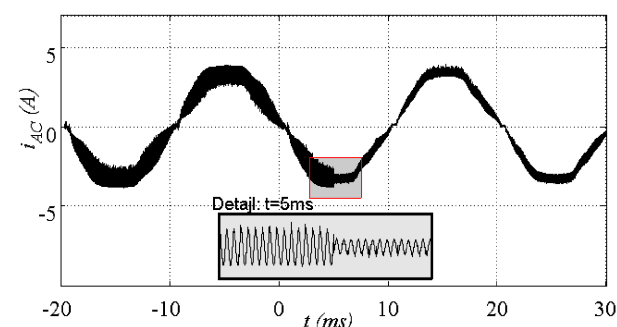
V LRTME smo za namen procesnega tokovnega vira [8] izdelali usmerniško vezje z zahtevami:

$$P = 1,6 \text{ kW}, U_{AC} = 240 \text{ V}, U_{DC} = 380 \text{ V}, \cos \varphi > 0,9.$$

Na sliki 6 so prikazani poteki veličin pri skočni obremenitvi (500 W → 1100 W) v trenutku 35 ms. Regulacijski odziv je trajal tri periode omrežne napetosti. V izhodni napetosti (U_{DC}) pa je opazna prisotnost izmenične komponente (100 Hz), ki se z obremenitvijo povečuje. Vrednost THD faktorja vhodnega toka se praktično ni razlikoval od THD vrednosti omrežne napetosti za katero smo izmerili $\text{THD} = 2,89 \%$.



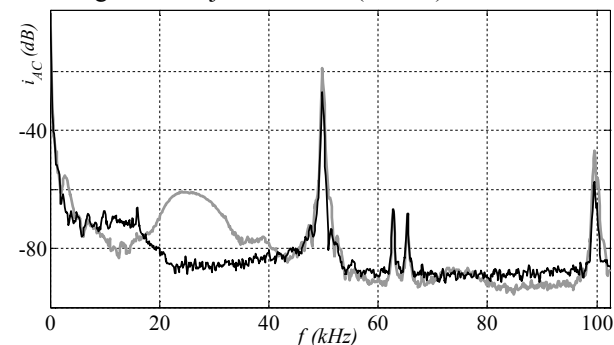
Slika 6: Karakteristične veličine usmerniškega vezja med prehodnim pojavom – skočna obremenitev



Slika 7: Valovitost vhodnega toka brez in z dodanim kompenzacijskim vezjem

S slike 7, ki kaže potek omrežnega toka, je razvidna valovitost toka brez ($t < 5 \text{ ms}$) in z ($t > 5 \text{ ms}$) dodanim kompenzacijskim vezjem. Valovitost se je v primeru uporabljenega kompenzacijskega vezja prepolovila. Na sliki 8 sta prikazana frekvenčna spektra vhodnega toka brez (svetla sled) in z dodanim (temna sled) kompenzacijskim vezjem. S slike je razvidno, da se s kompenzacijo valovitosti toka zmanjša (do -20 dB) delež tako harmonikov v območju od 20 kHz do

40 kHz, kot tudi harmonikov, ki so posledica stikalnega delovanja usmernika (50kHz).



Slika 8: Vpliv kompenzacijskega vezja na frekvenčni spekter vhodnega toka

6 Sklep

V prispevku smo predstavili problematiko nizkega faktorja delavnosti usmerniških vezij in način, ki to pomanjkljivost odpravlja. Predlagali smo topologijo aktivnega PFC usmerniškega vezja, ki temelji na pretvorniku navzgor. Pri tem smo se osredotočili na doseganje visokega faktorja delavnosti, dinamiko in na zmanjšanje valovitosti omrežnega toka in s tem motenj, ki jih naprava širi v omrežje. Analizirali smo ključno pomanjkljivost predlaganega vezja in sicer pulzirajoč pretok moči na strani omrežja. Ta med drugim določa pasovno širino napetostnega regulatorja in posredno dinamiko izhodne napetosti. Gladilno dušilko močnostnega pretvornika smo nadgradili z dodatnim sklopljenim navitjem, ki je del kompenzacijskega vezja za zmanjšanje valovitosti vhodnega toka. Z meritvami na zgrajenem modelu smo v celoti izpolnili predvidene lastnosti aktivnega PFC usmerniškega vezja.

Literatura

- [1] W. M. Grady, R. J. Gilleskie, "Harmonics and How They Relate to Power Factor", Proc. Of the EPRI power Quality&Opportunities Conf., Nov. 1993.
- [2] S.S.Varghese, S. George, "Analysis of AC-DC Converter Based on Power Factor and THD", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, No 2, Feb. 2013.
- [3] Harmonic Current Emissions Guidelines to the standard EN 61000-3-2, European power supply manufacturers association, Revision date 2010.
- [4] H. Khan, "Improving the Performance of Single Phase Power Factor Correction Circuit using Parallel Boost Converters", Department of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela-76900, 2012.
- [5] N. Mohan, "First Course on Power electronics and drives", MNPPE, Minneapolis, 2003.
- [6] P. Zajec, D. Vončina, "Ukrepi za zvišanje energijskega izkoristka in zmanjšanje EMI motenj v PFC usmerniku", Zbornik devetnajste mednarodne elektrotehniške in računalniške konference ERK 2010, 540. – 543, September 2010, Portorož, Slovenija
- [7] S. ostrožnik, P. Bajec, P. Zajec, "A study of a Hybrid Filter", IEEE on Industrial Electronics, Vol. 57, No.3, March 2010.
- [8] A. Leban, D. Vončina, "Procesni vir za impulzno bakrenje tiskanih vezij", Elektrotehniški vestnik, Vol. 75, No. 3, pp.105–110, 2008.