

Več-vejno delovanje paralelnih močnostnih filtrov

Mitja Nemec

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

Multi-leg operation of parallel active power filters

Abstract. The presented research focuses on multi-leg operation of parallel active power filters (PAPF). After the introduction and a brief explanation of basic operation of PAPF the article discusses the impact of inductance design on active power filter operation. Then a multi-leg operation of PAPF is explained. The simulation results show that while multi-leg operation does not have significant impact on reducing switching frequency ripple on the output current, the increased bandwidth improves performance in lower frequency region and reduces the overall size of magnetic components.

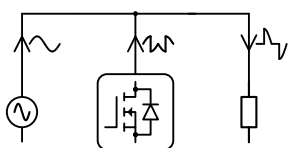
1 Uvod

Eden najbolj izrazitih trendov v močnostni elektroniki v zadnjem času je paralelna vezava močnostnih topologij [1]. Najbolj očitna prednost paralelne vezave je višja dosegljiva moč, ob izbranih stikalnih elementih [2]. Dodatno se delno oz. celoti izniči valovitost toka in/ali napetosti, ki je posledica stikalnega delovanja pretvornika. Posledično se zmanjšajo motnje, ki jih naprava oddaja v sistem. Prav tako lahko tudi zmanjšamo velikost pasivnih komponent (dušilke, kondenzatorji) in s tem zmanjšamo in pocenimo napravo.

Vplivi paralelne vezave v DC/DC pretvornikih so že dobro znani in opisani. Na področju AC/DC pretvornikov pa je raziskav nekoliko manj. V članku si bomo pogledali specifične paralelne vezave paralelnih močnostnih filtrov.

2 Osnove delovanja paralelnega aktivnega močnostnega filtra

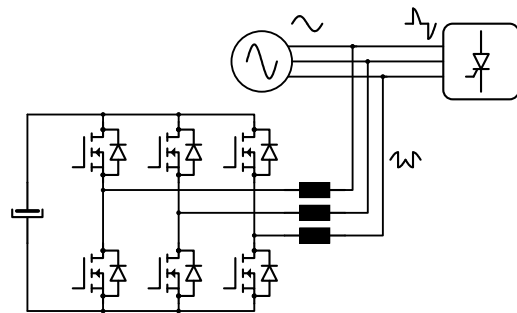
Paralelni aktivni močnostni filter je naprava ki se priključi paralelno k bremenu, ki je priključeno na omrežje [3]. Preko meritve bremenskega toka aktivni filter generira tak tok, da je vsota tokov, ki teče v/iz omrežja sinusna in pri trifaznih izvedbah tudi fazno enakomerno porazdeljena (slika 1)



Slika 1: Paralelni aktivni močnostni filter

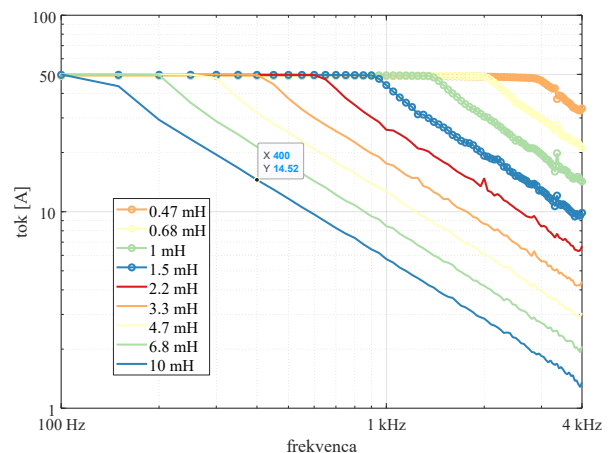
Najbolj pogosta izvedba je prikazana na sliki 2. Glavni del filtra predstavlja napetostno napajan trifazni tranzistorski mostič, ki je preko dušilk priključen na omrežje.

Ob normalnem obratovanju v stacionarnem stanju paralelni aktivni filter potrebuje delovno moč samo za pokrivanje izgub. Vsa preostala moč ki teče preko njega je jalovega značaja. Ob primerno izbrani kapacitivnosti enosmernege tokokroga ter nekoliko bolj zahtevni regulacijski shemi [4], aktivni filter ne potrebuje ločenega napajanja in se napaja kar iz omrežja.



Slika 2: Tipična topologija aktivnega močnostnega filtra

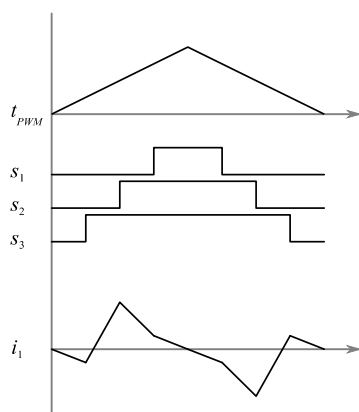
Glavni namen dušilk je omejitev strmine toka, ki je posledica stikalnega delovanja pretvornika. Z večjo induktivnostjo zmanjšamo vpliv stikalnega delovanja vendar s tem omejimo dinamiko filtra (slika 3). Ker pa je filter naprava s katero želimo iz omrežja izločiti predvsem tokove višjih frekvenc si poslabšanja dinamike ne želimo. Tako je pri načrtovanju filtra treba iskati kompromis



Slika 3: Pasovna širina toka v odvisnosti od induktivnosti

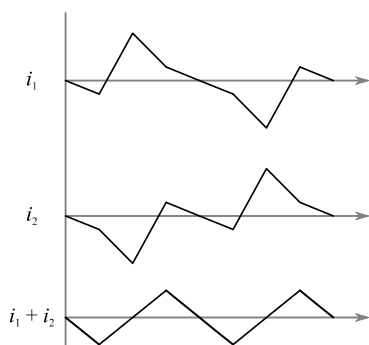
3 Več-vejno obratovanje

Najbolj pogosto uporabljena strategija proženja močnostnih stikal v trifaznem mostiču je modulacija prostorskega vektorja napetosti (SVM) [5]. Pri SVM se na podlagi simetričnega nosilnega signala tvorijo prožilni signali za posamezno vejo (slika 4). Zaradi simetričnega nosilnega signala je sredinsko simetrična tudi valovitost faznega toka.



Slika 4: Nosilni signal (t_{PWM} , prožilni signali (s_1 , s_2 in s_3) in valovitost toka pri SVM modulaciji

Pri paralelnem obratovanju več trifaznih pretvornikov je smiselno, da se nosilni signali med seboj fazno premaknejo. S tem lahko nekoliko zmanjšamo valovitost vsote tokov posamezne faze (slika 5) kot tudi valovitost toka v enosmernem tokokrogu [6]. Učinek je v tem primeru bistveno manjši kot pri DC/DC pretvornikih zaradi dveh razlogov. Prvič, posamezna veja nikoli ne obratuje v stacionarnem stanju saj se ji vklopno razmerje stalno spreminja. Drugič, valovitost toka v posamezni fazi je posledica preklonnega stanja te faze in tudi ostalih dveh faz.

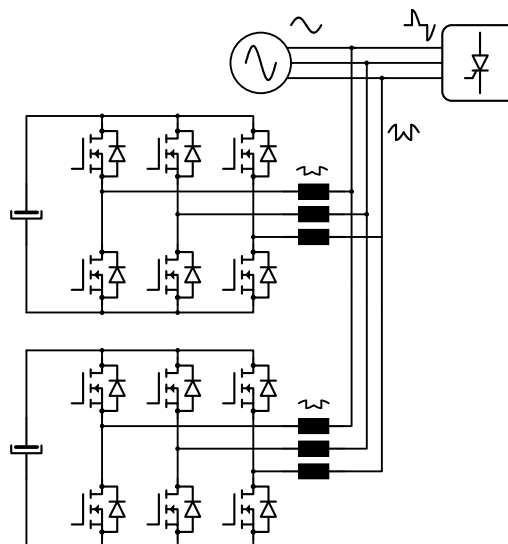


Slika 5: Vsota dveh tokov (i_1 in i_2) pri paralelni vezavi dveh trifaznih pretvornikov

Pri več-vejnem obratovanju (slika Error: Reference source not found) se pri enaki moči tudi spremeni tokovna obremenitev dušilk. Če privzamemo, da je volumen dušilke (V_1) proporcionalen produktu njene induktivnosti in kvadrata toka, ki teče čez njo [7] je volumen dušilke eno-vejnega pretvornika

$$V_1 \propto L_1 \cdot i_1^2 \quad (1)$$

Skupni volumen dušilk pri n-vejnem pretvorniku pa znaša



Slika 6: Dve-vejni paralelni aktivni močnostni filter

$$V_n \propto n \cdot L_n \cdot i_n^2 \quad (2)$$

In ker je tok čez posamezno dušilko n-vejnega pretvornika n-krat manjši manjši

$$i_n = \frac{i_1}{n} \quad (3)$$

Je lahko skupni volumen dušilk n-vejnega pretvornika pri enaki vrednosti ($L_1 = L_n$) induktivnosti n-krat manjši.

$$V_n \propto n \cdot L_n \cdot \frac{i_1^2}{n^2} = L_n \cdot \frac{i_1^2}{n} = \frac{V_1}{n} \quad (4)$$

Ker pa je valovitost toka pri n-vejnem pretvorniku še nekoliko manjša, so lahko za doseganje enake valovitosti skupnega toka tudi vrednosti induktivnosti nekoliko manjše in tako je volumen induktivnosti lahko še manjši.

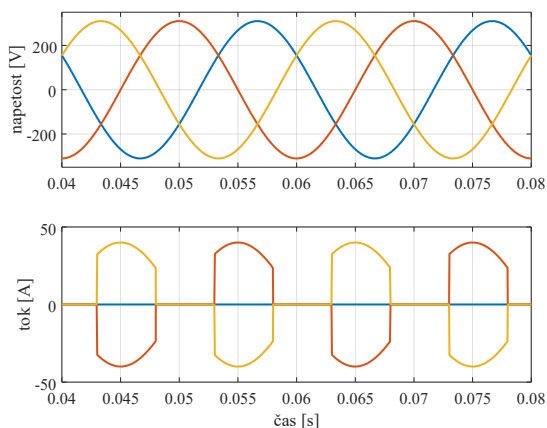
Pri več-vejnem obratovanju je treba omeniti tudi področje zanesljivosti delovanja. Zaradi večjega števila komponent je verjetnost odpovedi seveda večja kot pri enovejnih pretvornikih, vendar pa je v primeru okvare še vedno možno obratovanje z zmanjšano močjo.

4 Rezultati simulacij

Vpliv več-vejnega obratovanja paralelnih močnostnih filtrov smo analizirali simulacijskim paketom MATLAB/Simulink. Simulirano je bilo tudi stikalno delovanje pretvornika vendar so imeli stikalni elementi idealne parametre (upornost 0Ω v prevodnem stanju, hipni preklop, ...) Parametri simulacijskega modela so zbrani v tabeli 1.

Tabela 1. Parametri simulacije

Parameter	Vrednost
Napetost omrežja	400 V
Frekvenca omrežja	50 Hz
Napetost enosmernega tokokroga	720 V
Preklopna frekvenca	20 kHz
Simulacijski korak	500 ns



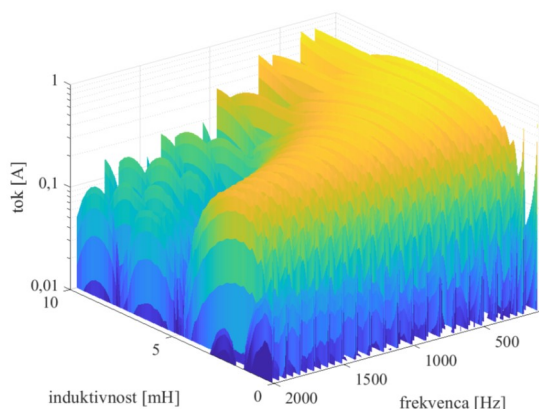
Slika 7: Omrežna napetost in bremenski tok

Slika 7 prikazuje napetost in bremenski tok uporabljen pri simulacijah. Bremenski tok je popolnoma sintetičen, saj v praksi nikoli ne dosežemo neskončne strmice toka in tako predstavlja največji možen izziv za aktivni filter.

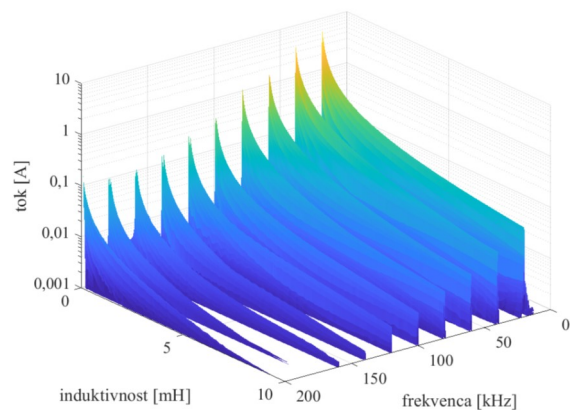
V aktivnem močnostnem filtru je bila za regulacijo toka izbrana metoda neposredne tokovne regulacije [8], s katero dosežemo najboljšo možno dinamiko in se tako izognemo vplivov regulacija na rezultate simulacij. Simulirali smo eno-vejni, dve-vejni, tri-vejni in štiri-vejni paralelni aktivni močnostni filter.

Prvi rezultati (slika 8 in 9) prikazujejo učinkovitost delovanja eno-vejnega aktivnega močnostnega filtra. V nizko frekvenčnem delu spektra (50 Hz - 2000 Hz) prikazanem na sliki 8 vidimo, da pri zelo nizkih induktivnosti (pod 2 mH) filter dobro opravlja svojo vlogo odstranjevanja harmonikov iz omrežnega toka. Delovanje se poslabša pri večjih induktivnosti kar je posledica zmanjšane pasovne širine.

V območju stikalnih frekvenc (20 kHz – 200 kHz) prikazanem na sliki 9 pa amplitude stikalnih harmonikov pričakovano padajo ob povečevanju induktivnosti.



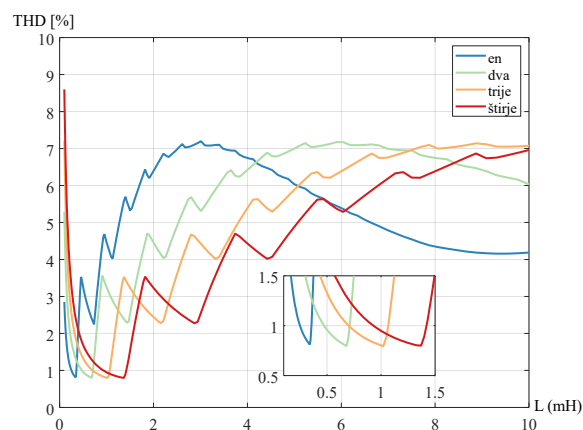
Slika 8: Nizkofrekvenčni del spektra omrežnega toka v odvisnosti od induktivnosti



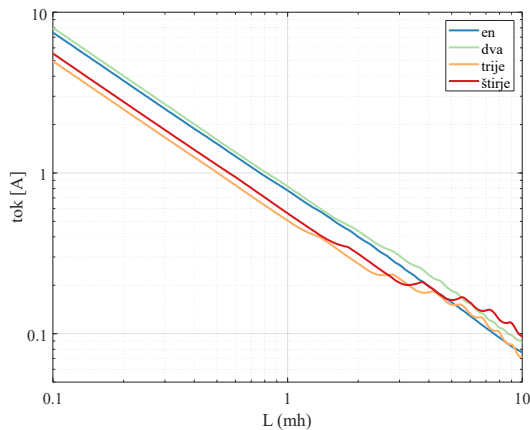
Slika 9: Visokofrekvenčni del spektra v odvisnosti od induktivnosti

Primerjava eno, dve, tri in štiri-vejnega aktivnega močnostnega filtra pa je prikazana na slikah 10 in 11. V nizko frekvenčnem delu spektra je na sliki 10 prikazano harmonsko popačenje v območju med 50 Hz in 2 kHz. Tudi tu je opazno povečanje harmonskega popačenja, ko se poveča induktivnost, vendar je področje nizkega harmonskega popačenja večje, več kot ima aktivni filter paralelnih vej. Glavni razlog za to povečanje je večja pasovna širina katero dosežemo pri enaki induktivnosti z večjim številom vej.

Slika 11 prikazuje efektivno vrednost visokofrekvenčnih komponent toka v odvisnosti od induktivnosti. Pričakovano se le-ta zmanjšuje z naraščajočo induktivnostjo. Nekoliko presenetljiva pa je ugotovitev, da imata razliki med eno in dve-vejnim aktivnim filtrom ter tri in štiri-vejnim aktivnim filtrom obraten smisel in sta zelo majhni (dve-vejni filter ima več visokofrekvenčnih komponent kot eno-vejni).



Slika 10: T.H.D. omrežnega toka v odvisnosti od induktivnosti za eno, dve, tri in štiri-vejni aktivni filter



Slika 11: Efektivna vrednost visokofrekvenčnih komponent toka v odvisnosti od induktivnosti za eno, dve, tri in štiri-vejni aktivni močnostni filter

5 Zaključek

V članku predstavljeni rezultati simulacij potrjujejo, da je več-vejno obratovanje paralelnih močnostnih filtrov možno, vendar pa učinek na zmanjšanje visokofrekvenčnih (stikalnih harmonikov) v izhodnem toku ni izrazit. Vendar pa z več vejnim delovanjem učinkovito povečamo pasovno širino regulacije toka. Tako lahko pri več-vejnih pretvornik povečamo vrednost induktivnosti s čimer zmanjšamo visokofrekvenčno valovitost toka pri tem pa ne zmanjšamo učinkovitosti delovanja v nizkofrekvenčnem področju.

V prihodnje velja raziskati vzrok zakaj je pri visokofrekvenčnih komponentah razlika med eno in dve-vejnim paralelnim filtrom v prid eno-vejnega ter potrditi rezultate z meritvami.

Zahvala

Delo je bilo sofinancirano iz programa ARRS »Pretvorniki električne energije in regulirani pogoni« P2-0258 (B).

Literatura

- [1] A. Rihar, M. Nemeč, and H. Lavrič, "Trendi v razvoju močnostne elektronike za vodenje električnih strojev," *Elektrotehniški Vestn.*, vol. 86, no. 5, pp. 237–247, 2019.
- [2] A. Rihar, P. Zajec, M. Nemeč, M. Petkovšek, and D. Vončina, "Načrtovanje, zasnova in izdelava večfaznega razsmernika z MOSFET stikali," Portorož, Slovenija, 2018, pp. 217–220.
- [3] H. Akagi, "Active Harmonic Filters," *Proc. IEEE*, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, Dec. 2005, doi: 10.1109/JPROC.2005.859603.
- [4] M. Nemeč, K. Drobnič, D. Nedeljković, and V. Ambrožič, "Regulacija napetosti pri aktivnem močnostnem filtru," 2008, p. str. 307-310.
- [5] X. Wen and X. Yin, "The SVPWM fast algorithm for three-phase inverters," in *2007 International Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, Dec. 2007, pp. 1043–1047.
- [6] M. Nemeč, "Tok enosmernega tokokroga pri večfaznih pogonih," in *ERK 2018*, 2018, p. str. 205-208.
- [7] "Ferrites and accessories - Application notes." Epcos AG, 2017.
- [8] K. Drobnič, M. Nemeč, D. Nedeljković, and V. Ambrožič, "Predictive direct control applied to AC drives and active power filter," vol. 56, no. 6, pp. 1884–1893, Jun. 2009.