

## LABORATORIJSKI PROTOTIP STATIČNEGA KOMPENZATORJA

Jernej ČERNELIČ, Gorazd ŠTUMBERGER

### POVZETEK

*V članku je predstavljena zgradba laboratorijskega prototipa statičnega kompenzatorja. Kompenzator je sestavljen iz enosmernega vodila, dvostopenjskega, trifaznega razsmernika in pasivnega LCL filtra. Krmiljenje je izvedeno s pomočjo digitalnega signalnega procesorja (DSP). Vodenje je izvedeno s tokovno regulacijo v dq koordinatnem sistemu in vektorsko pulzno širinsko modulacijo. Rezultati eksperimenta so pokazali ustreznost izvedbe in odlične odzive tudi pri prehodnih pojavih.*

### ABSTRACT

*This paper presents a design of a laboratory prototype of a static var compensator. Compensator is made of a DC-link, two-stage three-phase inverter and passive LCL filter. For control, Voltage oriented control with PI regulators is used, along with space vector pulse-width modulation. Results of the experiment have shown appropriate design and good responses in transient conditions.*

## 1. UVOD

Na elektroenergetsko omrežje vključujemo vse več naprav. Te za svoje delovanje potrebujejo delovno in jalovo moč. Jalova moč predstavlja recipročno izmenjavo energije, ta povzroča samo dodatne izgube pri prenosu električne energije, zato uporabljamo naprave, ki na posamezni lokaciji potrošnje jalove moči to generirajo. Te naprave imenujemo kompenzatorji jalove moči. Najpreprostejša kompenzacijska naprava je kondenzatorska baterija. Tej kompenzacijski napravi ne moremo spreminjati proizvedene jalove moči. Ker se jalova moč porabnikov spreminja s časom, takšna kompenzacija ni natančna. Boljša izbira so tako kompenzatorji pri katerih lahko proizvedeno jalovo moč reguliramo. To nam omogoča natančno kompenzacijo večih porabnikov hkrati. Eden od takšnih kompenzatorjev je statični kompenzator (STATCOM).

Delovanje statičnega kompenzatorja temelji na teoriji prenosa električne energije med dvema vozliščema. Prenesena energija bo torej odvisna le od fazorjev napetosti v obeh vozliščih. Upoštevajoč osnovne harmonske komponente toka in napetosti lahko usmerjen pretok energije predstavimo z delovno močjo  $P$  (1), recipročno izmenjavo energije pa z jalovo močjo  $Q$  (2).

$$P = \frac{EU \sin \varphi}{X} \quad (1)$$

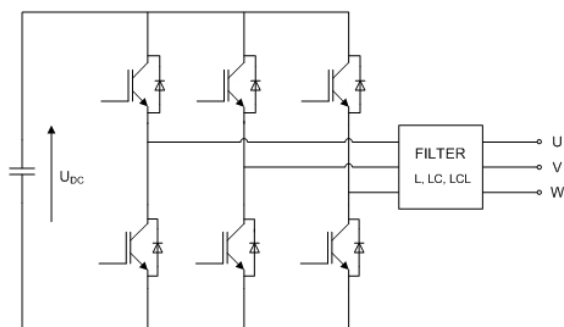
$$Q = \frac{EU \cos \varphi - U^2}{X} \quad (2)$$

kjer je:

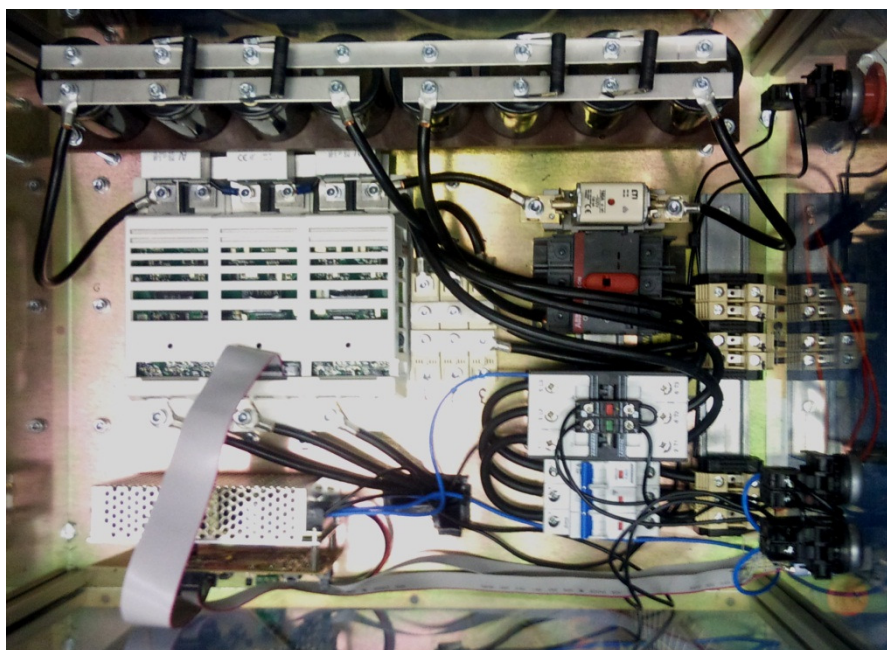
- $U$  efektivna vrednost napetosti omrežja
- $E$  efektivna vrednost napetosti kompenzacijske naprave
- $\varphi$  fazni kot med napetostjo omrežja  $U$  in napetostjo kompenzacijske naprave  $E$
- $X$  reaktanca povezovalnega voda

## 2. STROJNA OPREMA STATIČNEGA KOMPENZATORJA

Za izdelavo laboratorijskega prototipa smo uporabili že izdelan pretvorniški sistem usmernik-razsmernik. Pretvornik je sestavljen iz usmerniških diod SKKD 100/16, ki omogočajo usmerjanje do 100 A toka pri napetosti 1600 V. Enosmerno vodilo je sestavljeno iz osmih kondenzatorjev nazivne napetosti 400 V in kapacitivnosti 1 mF. Z vezavo v štiri pare dobimo nazivno napetost enosmernega vodila 800 V. Za razsmernik je uporabljen modul SkiiP 132 GD 120, ki omogoča toke do 150 A pri napetosti enosmernega vodila 900 V. Razsmernik je sestavljen iz šestih parov IGBT-dioda, ki lahko delujejo s stikalno frekvenco do 20 kHz. Če na sponke razsmernika priključimo omrežno napetost, se bo ta zaradi povratnih diod obnašal kot usmernik. Zgradba statičnega kompenzatorja je prikazana na sliki 1, izdelan pretvornik pa je prikazan na sliki 2.



Slika 1: Zgradba statičnega kompenzatorja

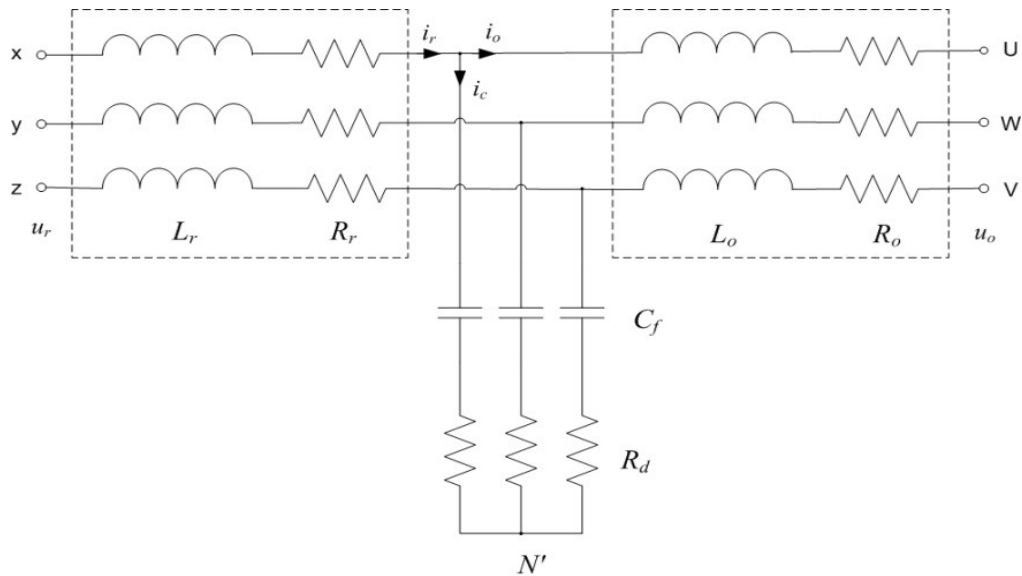


Slika 2: Izdelan pretvornik usmernik-razsmernik

Za vodenje je uporabljen krmilni sistem dSpace DS1103. Ta zraven glavnega procesorja Power PC vsebuje še podrejen procesor Texas Instruments TM320F240, ki vsebuje podporo za simetrično, asimetrično in vektorsko pulzno-širinsko modulacijo (SVPWM). DS1103 vsebuje tudi 20 analogno-digitalnih (A/D) pretvornikov za zajem podatkov. Omenjen sistem močno olajša izvedbo vodenja, saj lahko z njim zajamemo informacije o napetosti in toku. Zajete podatke nato obdelamo s programom, ki ga sestavimo kot model v programskem paketu Matlab/Simulink. Rezultate programa, ki predstavljajo prevajalna razmerja za posamezno fazo, podamo nazaj digitalnemu signalnemu procesorju (DSP), ki bo iz njih določil stikalna stanja za posamezen tranzistor. Pri tem podamo tudi stikalno frekvenco in mrtev čas (ang. *dead time*). To je čas med preklopom, ko sta oba tranzistorja v neprevodnem stanju.

Krmilni sistem DS1103 ima slabost, da ob signalu za izklop postavi vse tranzistorje v spodnjih vejah v prevodno stanje, kar bi povzročilo trifazni kratek stik na zbiralki enosmernega vodila. Zato je bilo razsmerniku dodano tudi krmilno vezje, ki to stanje prepreči. Krmilno vezje potrebuje za vklop pozitiven signal +5 V, ki ga zagotovimo z DSPjem kot sedmi signal. Prvih šest signalov predstavlja informacije o stikalnih stanjih tranzistorjev. Krmilno vezje vsebuje tudi stikalo za vklop razsmernika. Za vklop tako potrebujemo krmilni signal in stikalo v položaju 1. V nasprotnem primeru ostane vseh šest tranzistorjev v neprevodnem stanju. Krmilno vezje opravlja tudi galvansko ločitev razsmernika od DSPja, zagotavlja pa tudi napajanje krmilnega dela modula SkiiP.

Za priključitev na omrežje je uporabljen pasivni LCL filter. Ta filter odlikuje velika stopnja dušenja (-60dB/dekado), hkrati pa je tak filter manjši, lažji in cenejši od ostalih topologij filtrov. Filter je predstavljen na sliki 3, pri tem je  $L_r$  induktivnost dušilke na strani razsmernika,  $L_o$  induktivnost dušilke na strani omrežja,  $C_f$  pa kondenzator, ki mu v serijo vežemo še upor  $R_d$  za dušenje resonančne pojave.



Slika 3: Topologija LCL filtra

Parametri filtra so določeni s pomočjo poenostavljene metode [1]. Ta metoda za določitev parametrov uporablja valovitost toka skozi dušilko na strani omrežja in resonančno frekvenco filtra. Induktivnost dušilke na strani omrežja  $L_o$  določimo z enačbo (3)

$$L_o = \frac{U_n}{2\sqrt{6}\Delta i f_s} \quad (3)$$

kjer je:

- $U_n$  nazivna fazna napetost,
- $f_s$  stikalna frekvenca razsmernika,
- $\Delta i$  valovitost toka (5%  $I_n$ ).

Dobro dušenje dosežemo, če na strani razsmernika uporabimo dušilko z induktivnostjo  $L_r$ , ki ima dvojno induktivnost dušilke  $L_o$ .

$$L_r = 2 L_o \quad (4)$$

Resonančna frekvenca filtra mora biti 10-krat večja od nazivne frekvence omrežja in hkrati manjša od polovice stikalne frekvence. Kapacitivnost kondenzatorja  $C_f$  določimo na podlagi izbrane resonančne frekvence filtra.

$$C_f = \frac{L_r + L_o}{L_r L_o (2\pi f_{res})^2} \quad (5)$$

Na koncu določimo še upornost upora  $R_d$  za dušenje resonančnega pojava. Upornost določimo kot 1/3 reaktance kondenzatorja pri resonančni frekvenci. Če izberemo preveliko upornost se bodo izgube filtra povečale, če pa izberemo prenizko upornost pa lahko imamo težave s stabilnostjo sistema.

$$R_d = \frac{x_c}{3} = \frac{1}{3 \cdot 2\pi f_{res} C_f} \quad (6)$$

Uporabljene komponente so vzete iz serijske proizvodnje in so zbrane v tabeli 1. Izdelan filter je prikazan na sliki 4.

Tabela 1: Parametri posameznih elementov filtra

| dve dušilki                  | kondenzator                   | upor                     |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| $L_o = L_r = 2,7 \text{ mH}$ | $C_f = 6 \text{ }\mu\text{F}$ | $R_d = 5 \text{ }\Omega$ |
| $I_n = 13 \text{ A}$         | $U_n = 440 \text{ V}$         | $P_n = 50 \text{ W}$     |



Slika 4: Izdelan LCL filter

Nadomestna induktivnost izbranega filtra nastopa v reaktanci povezovalnega voda v enačbah (1) in (2). Zaradi tega za določitev ojačanj regulatorja potrebujemo prenosno funkcijo filtra, saj le ta predstavlja del regulacijske proge. Prenosno funkcijo izpeljemo iz vozliščne in obeh zančnih enačb v Laplace-ovem prostoru. Pri tem zanemarimo začetne pogoje. Prenosna funkcija, ki podaja odvisnost toka, ki teče v omrežje od napetosti razsmernika je zapisana z enačbo (7).

$$G_f(s) = \frac{I_o(s)}{U_r(s)} = \frac{R_d C_f s + 1}{L_r L_o C_f s^3 + R_d C_f (L_r + L_o) s^2 + (L_r + L_o) s} \quad (7)$$

### 3. REGULACIJA

Za regulacijo smo izbrali napetostno orientirano regulacijo s PI regulatorji (VOC-PI), kjer je referenčni koordinatni sistem dq spet s prostorskim vektorjem napetosti. Za delovanje moramo meriti vse tri napetosti omrežja in vse tri toke, ki tečejo v omrežje. Merilnike toka in napetosti smo postavili med filter in omrežje, tokovnike pa obrnili tako, da je tok, ki teče od kompenzatorja v omrežje predstavljen s pozitivnim predznakom. Izmerjene veličine najprej

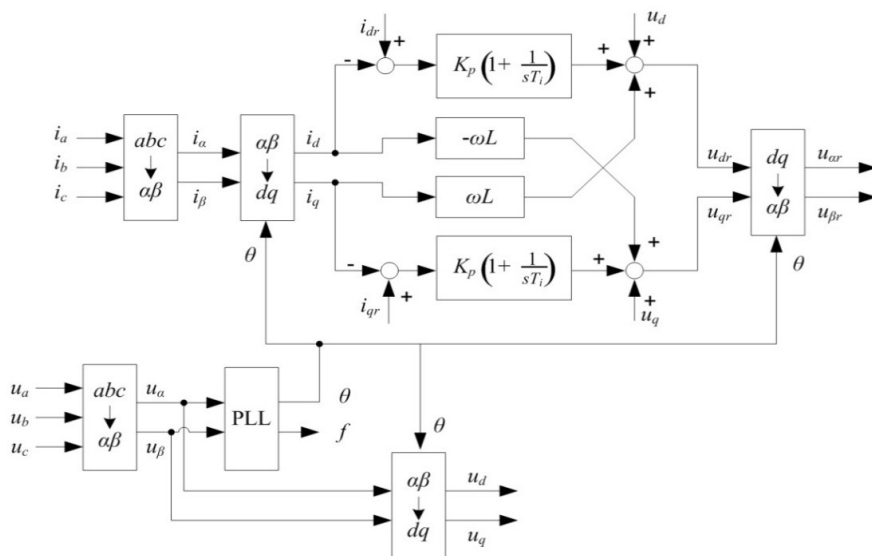
transformiramo s Clarkino oz. 3-2 transformacijo v  $\alpha\beta$  koordinatni sistem, nato pa še s Parkovo transformacijo v vrteč dq koordinatni sistem. Pri tem potrebujemo informacijo o kotu omrežja napetosti  $\theta$ . To informacijo pridobimo s pomočjo algoritma "Phase Locked Loop" (PLL). Informacija o kotu omrežne napetosti je zelo pomembna, saj opravlja sinhronizacijo z omrežjem. Spreminjanje kota omrežne napetosti v odvisnosti od časa nam daje tudi informacijo o krožni frekvenci omrežja  $\omega$ . Odstopanje izračunane vrednosti od dejanskega stanja nam lahko v omrežje požene velike tokove – skladno z enačbo (1) in (2). Napačna informacija o kotu pa pomeni izpad iz sinhronizma in možnost velike okvare sistema. Koordinatni sistem dq moramo postaviti tako, da bomo v d-osi regulirali delovno moč, v q-osi pa jalovo moč. Neskladnosti odpravimo z zamenjavo osi koordinatnega sistema ali z zamikom koordinatnega sistema za določen kot. V dq koordinatnem sistemu so nato uporabljeni PI regulator in razklopitve. Te potrebujemo da odpravimo vpliv ene komponente toka na drugo. Napetostne razmere so prikazane v enačbi (8) in (9), pri tem zadnji del enačbe predstavlja sklopljenost d- in q-osi. Indeks 'o' predstavlja veličine na strani omrežja, indeks 'r' pa veličine na strani razsmernika (glej sliko 3). Induktivnost  $L$  je nadomestna induktivnost LCL filtra.

$$u_{od} = L \frac{di_{od}}{dt} + u_{rd} - \omega_n L i_{oq} \quad (8)$$

$$u_{oq} = L \frac{di_{oq}}{dt} + u_{rq} + \omega_n L i_{od} \quad (9)$$

Na izhodu regulatorja dobimo referenčni vrednosti napetosti, ki ju transformiramo nazaj v  $\alpha\beta$  koordinatni sistem. Regulacijska shema je predstavljena na sliki 5.

Referenčne vrednosti nato uporabimo v vektorski pulzno-širinski modulaciji [2]. Pri tem referenčni vrednosti napetosti najprej določimo sektor, ki ji pripada. Preverimo pa tudi, ali lahko želeno referenčno vrednost generiramo, ali pa ta presega trenutne zmožnosti, ki jih omejuje trenutna vrednost napetosti enosmernega vodila. Če je referenčna vrednost prevelika se omeji na maksimalno možno vrednost, ki jo še lahko generiramo.

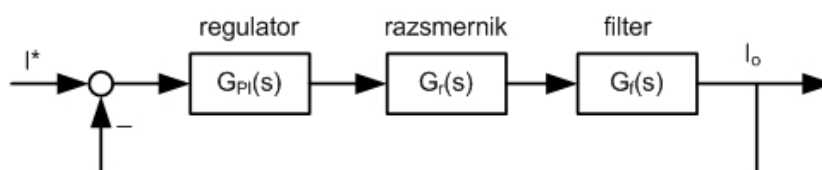


Slika 5: Napetostno orientirana regulacija v dq koordinatnem sistemu s PI regulatorji

Regulacijska proga (slika 6) je sestavljena iz prenosne funkcije PI regulatorja  $G_{PI}(s)$  (10), razsmernika  $G_r(s)$  (11) in filtra  $G_f(s)$  (7). Prenosna funkcija razsmernika  $G_r(s)$  (11) je podana kot člen prvega reda s časovno konstanto  $1,5 \cdot T_s$ . Pri tem je  $T_s$  stikalni čas.

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (10)$$

$$G_r(s) = \frac{1}{1 + 1,5 T_s s} \quad (11)$$



Slika 6: Regulacijska proga

Ojačanja regulatorjev smo zaradi kompleksnosti prenosne funkcije filtra določili s pomočjo Ziegler-Nicholsove metode stopničnega odziva [3]. Pri tem smo poiskali takšno ojačanje  $K_{krit}$ , pri katerem je bil sistem v mejno stabilnem stanju. Odčitali smo periodo nihanja  $T_{krit}$  in s pomočjo enačb (12) in (13) določili ojačeni proporcionalnega  $K_p$  in integralnega  $K_i$  dela regulatorja.

$$K_p = 0,45 \cdot K_{krit} \quad (12)$$

$$K_i = 0,54 \cdot \frac{K_{krit}}{T_{krit}} \quad (13)$$

Izdelati je bilo potrebno še regulacijo napetosti enosmernega vodila, saj v nasprotnem primeru ne bi mogli generirati napetosti višje od napetosti omrežja. Za generiranje takšne napetosti mora biti tudi napetost enosmernega vodila viša. Ojačeni regulatorja smo določili na podlagi načina delovanja PI regulatorja. Če izmerjena vrednost napetosti enosmernega vodila odstopa od referenčne vrednosti za 10 V, želimo postaviti referenčno vrednost toka v d-osi na 1 A. Ojačanje proporcionalnega dela regulatorja v tem primeru znaša 1/10 A/V. Ustrezen odziv sistema smo dobili ob uporabi časovne konstante integralnega dela 0,02 s. Izhod iz regulatorja smo omejili na  $\pm 4$  A, izračunano vrednost pa smo odšteli od referenčne vrednosti zaradi izbrane postavitve tokovnikov.

#### 4. REZULTATI EKSPERIMENTA

Izdelan laboratorijski prototip statičnega kompenzatorja smo priključili na elektroenergetsko omrežje preko priključne točke v laboratoriju. Parametri priključne točke so:

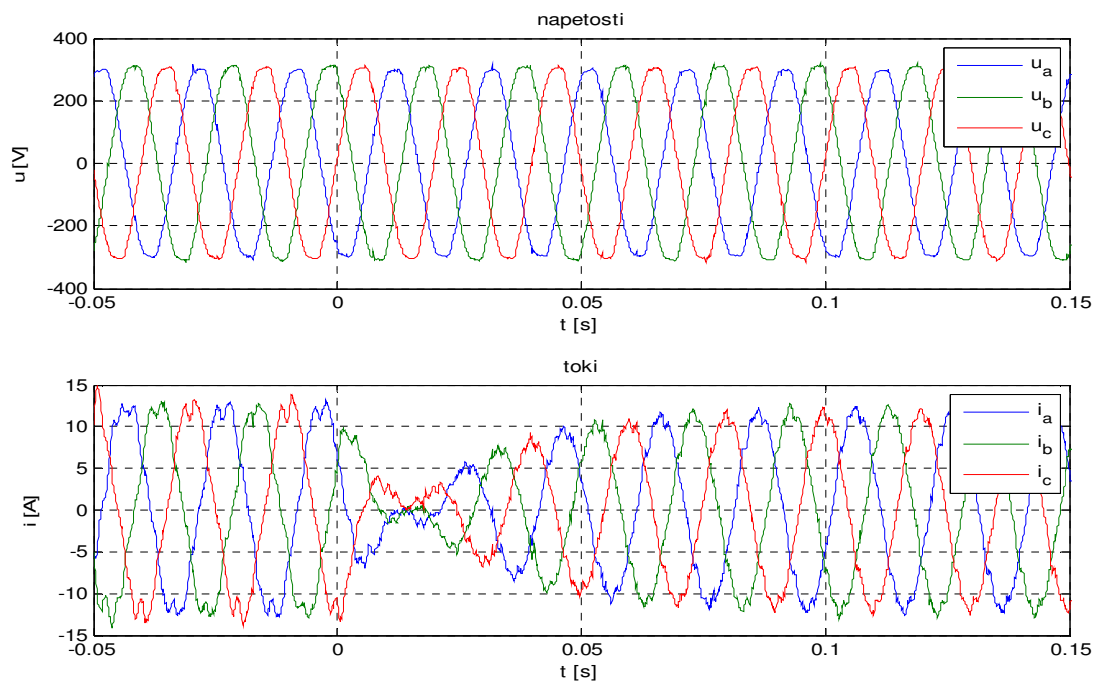
- nazivna fazna napetost  $U_n = 3 \times 230$  V
- nazivna frekvenca omrežja  $f_n = 50$  Hz

- nazivna navidezna moč  $S_n = 10.000 \text{ VA}$
- nazivni tok  $I_n = 14,4 \text{ A}$
- najvišja napetost enosmernega vodila  $U_{DC} = 700 \text{ V}$
- stikalna frekvenca razsmernika  $f_s = 10 \text{ kHz}$

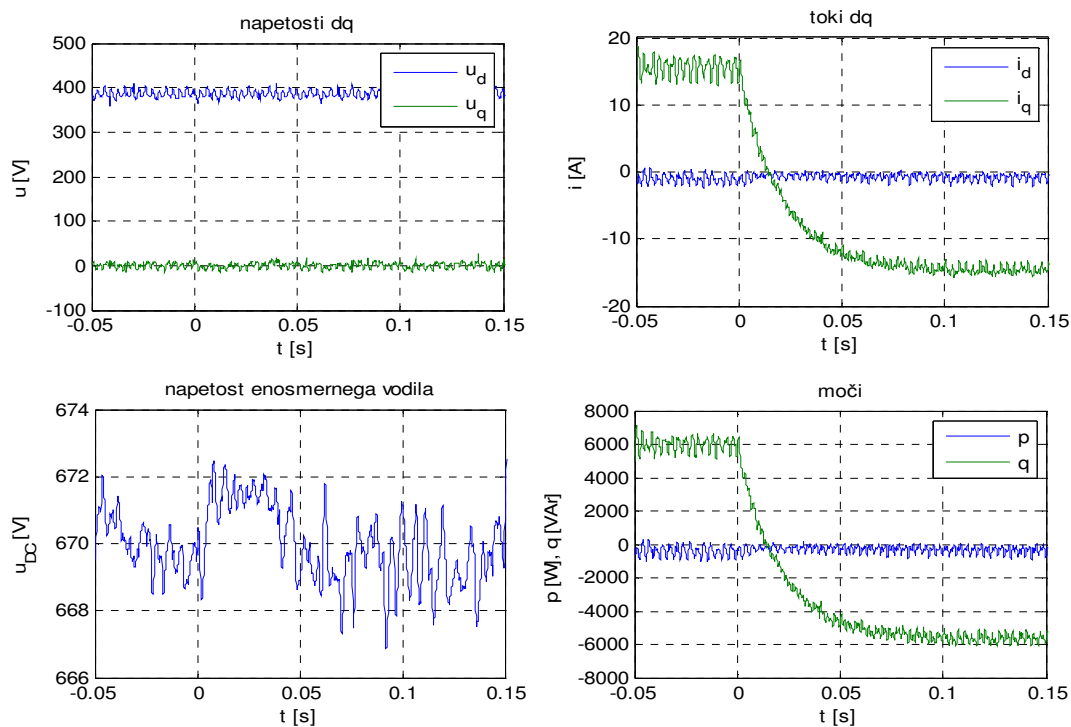
Preko nadzorne plošče smo nato spremenili referenčno vrednost jalove moči iz +6000 VAR na -6000 VAR. Ta sprememba referenčne vrednosti velja za najbolj neugodno, saj se med prehodnim pojavom spremeni fazni kot med tokom in napetostjo za  $180^\circ$ .

Na sliki 7 so prikazane napetosti in toki posameznih faz. Pri tem so napetosti merjene med linijskim in nevtralnim vodnikom omrežja. Med prehodnim pojavom je vidna sprememba faznega kota kakor tudi amplitude. Referenco smo sicer spremenili stopnično, vendar smo uporabili člen prvega reda, ki zmanjša naklon spremembe referenčne vrednosti. S tem tudi razbremenimo regulator in zmanjšamo verjetnost prenehaja. Vidna je tudi vsebnost višjih harmonskih komponent v izmerjenih napetostih in tokih. Višje harmonske komponente bi bilo možno odpraviti s spremembo regulacije, saj lahko z razsmernikom generiramo poljubne signale.

Na sliki 8 so prikazane napetosti in toki v dq koordinatnem sistemu, kjer opazimo, da je vsa napetost v d-osi. To je posledica zahteve, da bomo v d-osi regulirali delovno moč, v q-osi pa jalovo moč. Posledica tega je tudi ta, da sta grafa tokov in moči po obliki povsem enaka, le skalirana za napetost v d-osi (400 V). To dejstvo pomeni, da sta regulatorja toka hkrati tudi regulatorja moči. Potek napetosti enosmernega vodila potrjuje tudi ustreznost regulacije te napetosti, saj od referenčne vrednosti ne odstopa za več kot  $\pm 2 \text{ V}$ . Trenutna delovna moč  $p$  se giblje okoli vrednosti -300 W, kar predstavlja lastno rabo statičnega kompenzatorja. Ta moč se porabi za pokrivanje stikalnih izgub in ohmskih izgub pasivnega filtra. V nasprotnem primeru bi se znižala napetost enosmernega vodila in kompenzacija ne bi bila več mogoča. Dodatni rezultati, postopki in načrti so zbrani v [4].



Slika 7: Časovni poteki napetosti in tokov



Slika 8: Časovni poteki napetosti in tokov v dq koordinatnem sistemu, napetosti na enosmernem vodilu in delovne ter jalove moči

## 5. SKLEP

Rezultati so pokazali, da lahko z izdelanim prototipom generiramo kakršnokoli vrednost jalove moči, ki je manjša od nazivne vrednosti. To pomeni, da lahko s prototipom izvedemo popolno kompenzacijo oz. neki skupini bremen zagotovimo faktor delavnosti ena ( $\cos\varphi = 1$ ). Pri tem ni pomembno kakšna bremena kompenziramo in ni pomembno v kakšnem režimu ta bremena obratujejo, saj je prototip zmožen zelo hitro spremeniti količino proizvedene jalove moči. Izdelan prototip za svoje delovanje iz omrežja jemlje le delovno moč za pokrivanje stikalnih izgub tranzistorjev in ohmske izgube filtra. Za to skrbi regulacija napetosti enosmernega vodila.

Z ustrezno spremenjeno regulacijo bi bilo mogoče funkcijo kompenzatorja jalove moči vdelati v sistem fotovoltaične elektrarne. Izdelan prototip predstavlja le del tega sistema. Sistem fotovoltaične elektrarne s funkcijo kompenzacije jalove moči potrebuje le razsmernik z ustrezno večjo nazivno močjo. Topologija prototipa omogoča tudi kompenzacijo višjih harmonskih komponent v napetosti omrežja, kar bi zvišalo kvaliteto električne energije v neki točki omrežja. Za izvedbo je potrebno spremeniti le regulacijo.

## 6. LITERATURA

- [1] W.Sun, Z. Chen, X. Wu, Intelligent Optimize Design of LCL Filter for Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier, IEEE
- [2] D. Dolinar, G. Štumberger, Modeliranje in vodenje elektromehanskih sistemov, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Maribor, 2006
- [3] R. C. Dorf, R. H. Bishop, Modern Control Systems, Pearson, 2011
- [4] J. Černelič, Laboratorijski prototip statičnega kompenzatorja, diplomsko delo, Maribor, 2012

## NASLOV AVTORJEV

Jernej Černelič, univ. dipl. inž. el.

Red. prof. dr. Gorazd Štumberger

Univerza v Mariboru, Fakulteta, za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

e-mail: [cernelic@gmail.com](mailto:cernelic@gmail.com) , [gorazd.stumberger@uni-mb.si](mailto:gorazd.stumberger@uni-mb.si)