

## Unapređeno upravljanje monofaznom statičkom preklpokom

Blagota Jovanović<sup>1</sup>, Mladen Milošević<sup>1</sup>, Žarko Janda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, ,  
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

[blagota.jovanovic@ieent.org](mailto:blagota.jovanovic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** Opisana je modifikacija upravljanja antiparalelnim tiristorima u monofaznoj statičkoj preklpokci. Predložena modifikacija omogućuje pouzdano preklapanje u slučajevima nelinearnog i pretežno kapacitivnog tereta. Prikazani su eksperimentalni rezultati na monofaznim invertorima snage 60 kVA koji potvrđuju pouzdanost i robusnost predloženog koncepta. Na osnovu analize i simulacija realnih radnih režima koji se odnose na poznate tranzijentne fenomene pri preklapanju sa invertora na mrežu i obrnuto može se izvršiti korektno dimenzionisanje tiristora i ultrabrzih prekidača u statičkoj preklpokci.

**Cljučne reči:** statička preklpokka, besprekidno napajanje, dimenzionisanje tiristora

### 1. Uvod

Osnovna uloga svakog sistema za besprekidno napajanje je sigurno napajanje važne grupe potrošača sa kvalitetnim naponom (zadate tolerancije efektivne vrednosti napona, frekvencije i harmonijskog izobličenja). Glavni pouzdani izvor napona napajanja u nekom sistemu besprekidnog napajanja je inverter. Sam inverter se napaja jednosmernim naponom koji se može dobiti iz baterije ili iz ispravljača koji je priključen na mrežu i stalno je sinhronizovan na mrežni napon ako taj napon postoji. U situacijama kada dolazi do prestanka rada invertora, bilo zbog nestanka napojnog jednosmernog napona bilo zbog kvara invertora ili promene ambijentalne temperature, neophodno je napajanje potrošača prebaciti na rezervni izvor napajanja. To može biti drugi inverter koji je bio sinhronizovan (u „toploj“ rezervi) ili napojna mreža na koju je glavni inverter bio sinhronizovan pre gubitka funkcije. Statička preklpokka je deo sistema za besprekidno napajanje koji omogućava transfer napajanja potrošača sa jednog izvora napajanja na drugi bez prekida. Obično su

raspoloživa dva izvora napajanja, inverter i mreža. Ako se potrošači napajaju sa invertora, u slučaju njegovog kvara statička preklopka bez prekida prebacuje napajanje potrošača na mrežu.

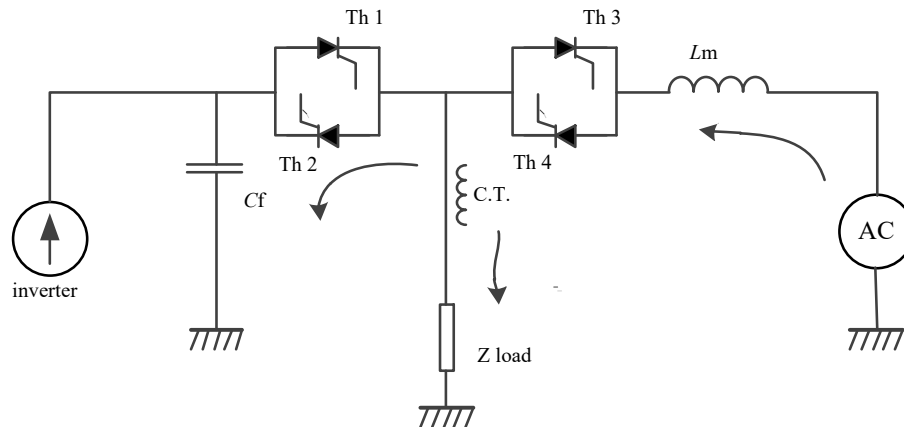
Pri tome elektronika koja upravlja statičkom preklopkom uvek može da dobije binarni signal koji daje radno stanje invertora, pre nego što bilo koji algoritam za obradu signala može da stigne da detektuje gubitak invertorskog napona. Ujedno to je i osnovna prednost konfiguracija sistema za besprekidno napajanje gde se potrošač stalno napaja sa invertora (on line, double conversion sistemi).

Sama statička preklopka je konfigurisana u vidu dve grupe antiparalelno vezanih tiristora [1], pri čemu je tiristor poluprovodnički prekidač koji prelazi u stanje vođenja struje kada je direktno polarisan i ako tada dobije impuls struje u gejtu. Tiristor ostaje u provodnom stanju ako je za vreme trajanja impulsa struje gejta struja tiristora porasla iznad nivoa struje hvatanja  $I_L$ , a prelazi u neprovodno stanje kada struja kroz tiristor padne ispod struje držanja  $I_h$  [2]. Rezervni izvor može biti mreža ili kućni generator. U slučaju gubitka napona sa rezervnog izvora, inverter radi sa svojom frekvencijom. Po pravilu su potrošači spojeni na inverter, ako je on u radnom stanju [1]. Rešenje gde su potrošači spojeni stalno na rezervni izvor a inverter je u praznom hodu i spreman je da preuzme teret, nije dobro, zato što u trenutku gubitka napajanja sa rezervnog izvora može doći i do gubitka sinhronizma, a time i do kratkotrajnog gubitka napona na potrošačima. Takođe, potrebno je izvesno vreme da se detektuje gubitak mrežnog napona, pri čemu taj algoritam ne treba da bude osetljiv na merni šum i komutacione smetnje koje mogu da postoje u mreži.

Tema rada je modifikacija upravljanja antiparalelnim tiristorima u monofaznoj statičkoj preklopci da bi se postigao pouzdan rad i pri novim okolnostima kao što je pojava nelinearnih potrošača koji se besprekidno napajaju, često kapacitivnog karaktera.

## 2. Načini upravljanja statičkom preklopkom

Na slici 1 je prikazana električna šema monofazne statičke preklopke. Moderni inverter predstavlja u stvari strujni izvor koji napaja izlazni filterski kondenzator invertora strujom čija je frekvencija jednaka frekvenciji osnovnog harmonika napona.



Slika 1. Energetska električna šema monofazne statičke preklopke

U referenci [3] je opisana realizacija statičke preklopke sa dve grupe antiparalelnih tiristora, jedna prema invertoru a druga prema mreži. Karakteristika opisanog rešenja je da pri komutovanju napajanja tereta sa invertora na mrežu i obrnuto postoji vremenski period u kome obe grupe antiparalelno vezanih tiristora dobijaju signale za paljenje. Taj period traje od 20 ms pri komutaciji tereta sa invertora na mrežu do 60 ms pri komutaciji sa mreže na inverter. Po isteku tog vremenskog intervala se uključuje odgovarajući kontaktor koji je paralelno vezan grupi tiristora prema izvoru koji preuzima napajanje tereta. Kada se ovako upravlja tiristorima postoji period kada svi provode i kroz statičku preklopku teče struja izjednačavanja između izvora. To znači da tiristori u statičkoj preklopki (u antiparalelnoj vezi) i inverter treba da budu dimenzionisani da mogu da izdrže tu prekostruju. Inverter opisan u [3] je bio tiristorski monofazni sa paralelnom komutacijom. Ovakva rešenja su bila primenjivana za napajanje telekomunikacionih uređaja male snage, reda 0,1 kW.

Kod većih snaga koncept upravljanja atiparalelno vezanim grupama tiristora koji dozvoljava struju izjednačenja nije bio prihvatljiv. Referenca [4] daje opis upravljanja signalima za paljenje antiparalelnih tiristora u monofaznoj statičkoj preklopki na takav način da struje izjednačenja nema. Pri tome se pale oni tiristori u antiparalelnoj grupi koji treba da preuzmu vođenje struje tereta i jasno se razlikuje slučaj čisto omskog i omsko-induktivnog opterećenja. Glavni potrošači koje su sistemi za besprekidno napajanje tada napajali su pripadali jednoj od ove dve vrste tereta. Uočava se da postoji potreba da se tačno zna znak struje tereta što je problem pri malim teretima.

Razdeljeno upravljanje antiparalelnim grupama tiristora je dalje razvijano [5,6] tako što su signali za paljenje antiparalelnih tiristora generisani logičkom operacijom AND između komande za uključivanje jedne grupe antiparalelnih tiristora i logičkog signala koji je bio jednak logičkoj jedinici kada su napon izvora i struja tereta bili istog znaka i u smeru tiristora koji treba da počne da vodi. Pri tome je postojao problem početnog pika struje koji je u stvari bio generisan kroz granu RC zaštite odgovarajuće grupe tiristora. Potrošači su

već postali izrazito nelinearni zbog velikog broja malih AC/DC konvertora koji su se nalazili u besprekidno napajanoj opremi, pri čemu standardi za kvalitet električne energije i faktor snage ovakvih potrošača još nisu bili usvojeni. Takođe, tehnologija izrade invertora se promenila i tada (1994) su to uređaji velike snage sa IGBT tranzistorima i nekom od naprednih PWM modulacija. Upravljačke elektronike invertora i statičke preklopke su bazirane na mikroprocesorima i nezavisno napajane jedna od druge.

Moderne realizacije statičkih preklopki se razlikuju prema načinu detektovanja gubitka mrežnog napona, načinu detektovanja faznog stava struje a glavni izazov predstavlja pojava nelinearnih potrošača koji se besprekidno napajaju, često kapacitivnog karaktera.

### 3. Unapređeno upravljanje statičkom preklopkom

Predložena i na realnim objektima proverena modifikacija upravljanja se odnosi na sledeći način komandovanja:

1. Pri prelasku na by-pass, nakon isključenja drugog invertora (u konfiguraciji sistema besprekidnog napajanja sa dva invertora i rezervnom mrežom), statička preklopka trenutno i bezuslovno prosleđuje komandu za uključanje oba antiparalelna tiristora prema mreži istovremeno, ne vodeći računa o znaku izlaznog napona i struje kao što je to rađeno u prethodnim rešenjima upravljanja. Ovakav način upravljanja može dovesti do pojave struje izjednačenja između izlaznog kondenzatora upravo isključenog invertora i mreže. Amplituda ove struje, prema rezultatima simulacija, ne bi trebala da pređe vrednost od 500A, a njeno ukupno trajanje ne iznosi duže od 2,5ms. Pojava ove struje neće se odraziti na rad potrošača. Prema oznakama na slici 1, mogu se napisati dve diferencijalne jednačine (1),

$$\begin{aligned} i_f(t) &= C_f \frac{du_f}{dt} \\ e_{mr}(t) &= u_f(t) + L_m \frac{di_f}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

a čije rešavanje daje izraz za struju filterskog kondenzatora koji ide kroz mrežnu grupu antiparalelno spojenih tiristora. Ekvivalentna početna vrednost napona na kondenzatoru u ekvivalentnom pasivnom LC kolu iznosi (2), gde je  $E_{inv}$  efektivna vrednost napona invertora pre kvara,  $E_{mr}$  efektivna vrednost napona mreže,  $\theta$  električni ugao napona mreže u trenutku kvara a  $\Delta\theta$  je razlika faza napona invertora i mreže, odnosno fazna greška sinhronizacije invertora na mrežu u trenutku kvara. Po pravilu u praksi je  $\Delta\theta < 10^\circ$ .

$$u_{f0,max} = \sqrt{2}|E_{inv} - E_{mr}| + \sqrt{2}E_{mr}\Delta\theta \cos(\theta). \quad (2)$$

U najnepovoljnijem slučaju ( $\cos(\theta)=1$ ), trenutna maksimalna vrednost te struje je data sa (3),

$$i_{f,max} = u_{f0,max} \sqrt{\frac{C_f}{L_m}} \quad (3)$$

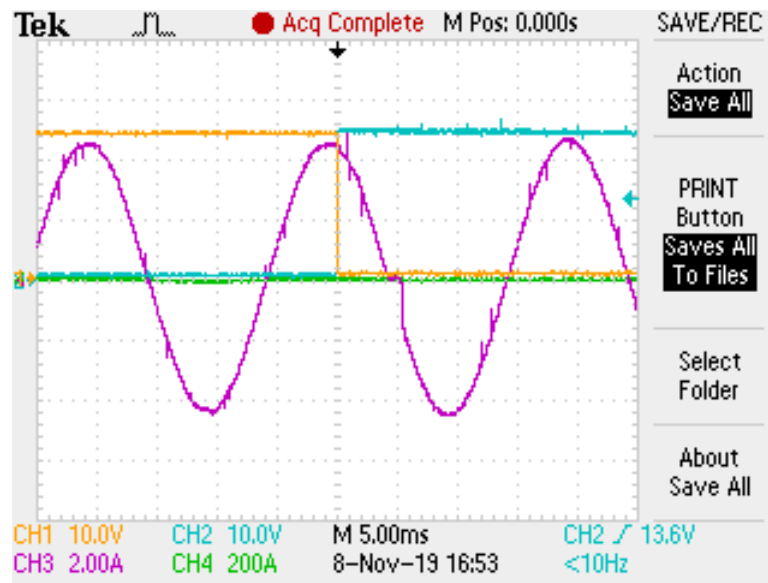
tako da se ta maksimalna vrednost struje uzima u obzir pri dimenzionisanju tiristora statičke preklopke. U izrazu (3) je zanemarena struja tereta. Kvadrat maksimalne vrednosti oscilatorne struje izjednačenja (3) i kvadrat maksimalne struje tereta se sabiraju i koren tog zbira daje maksimalnu struju koja može teći kroz mrežni tiristor. Dobra praksa je da nazivna srednja vrednost struje tiristora, na radnoj temperaturi tiristora koja zavisi od uslova hlađenja, bude oko tri puta manja od ove vrednosti.

2. Pri povratku sa by-pass-a, nakon ukjučenja prvog invertora i njegove sinhronizacije na mrežu, statička preklopka će sačekati trenutak da njen izlazni napon dostigne maksimalnu vrednost, tačnije 200  $\mu$ s kasnije, a potom će proslediti komandu za uključenje tiristora prema invertoru, vodeći sada računa o znaku izlaznog napona i struje. Na ovaj način se izbegava pojava struje izjednačenja inverter-mreža koja može dovesti do rada invertora u režimu strujnog limita što kao posledicu može imati propad izlaznog napona i ispad potrošača. Uključenje tiristora prema invertoru u trenutku maksimalnog izlaznog napona realizovano je zbog toga što su u datom trenutku vremena izlazni napon i struja opterećenja definitivno istog znaka pri svim realnim uslovima rada statičke preklopke.

Na sledećim slikama prikazani su eksperimentalno dobijeni talasni oblici struje pasivnog tereta statičke preklopke (mera izlaznog napona statičke preklopke) – ljubičasti trag, struje izjednačenja između invertora i mreže – zeleni trag, kao i komande za uključenje invertora i mreže pri različitim manipulacijama – žuti i plavi tragovi.

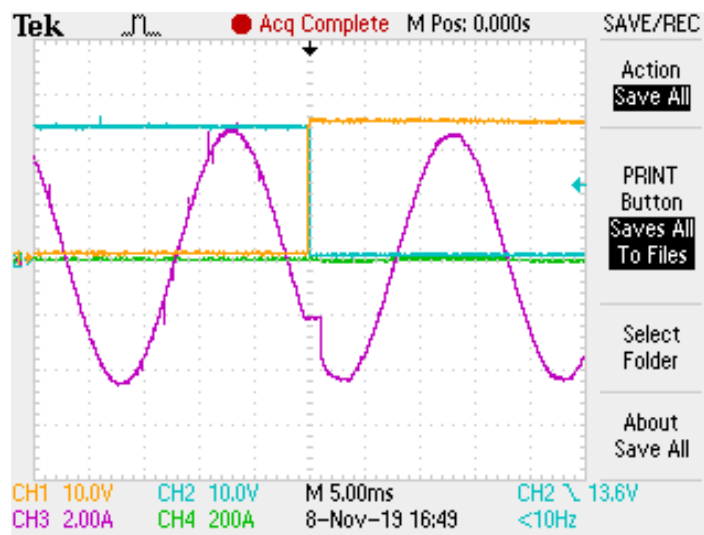
Invertori korišćeni u eksperimentu su bili monofazni invertori, nazivne snage 60 kVA, izlaznog napona 230 V i frekvencije 50 Hz. Frekvencija generisanja PWM signala je iznosila oko 3 kHz a prekidački invertorski most je rađen sa IGBT tranzistorima. Nazivna struja jednog ekvivalentnog prekidača u H mostu iznosi 1200 A a nazivni ulazni jednosmerni napon je 220 VDC.

Na slici 2 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa mreže na monofazni inverter nazivne snage 60 kVA. Napon invertora je 238V, a napon mreže 232V.



Slika 2. Prelazak sa mreže na inverter

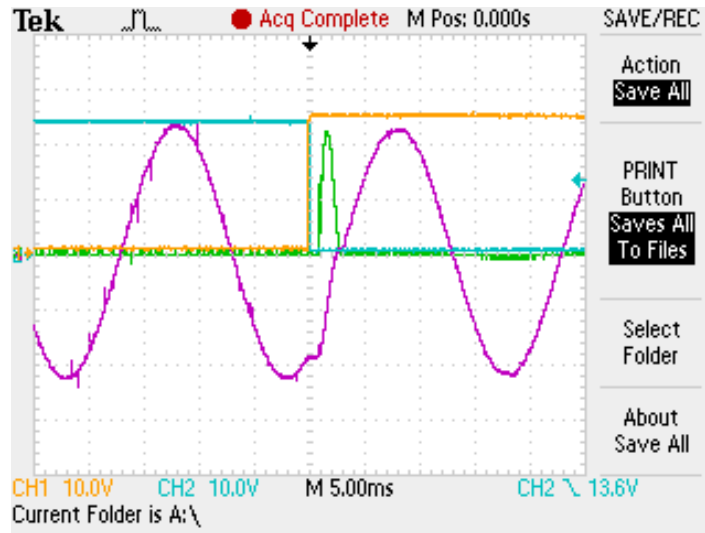
Na slici 3 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa invertora na mrežu. Napon invertora je 238V, a napon mreže 232V.



Slika 3. Prelazak sa invertora na mrežu

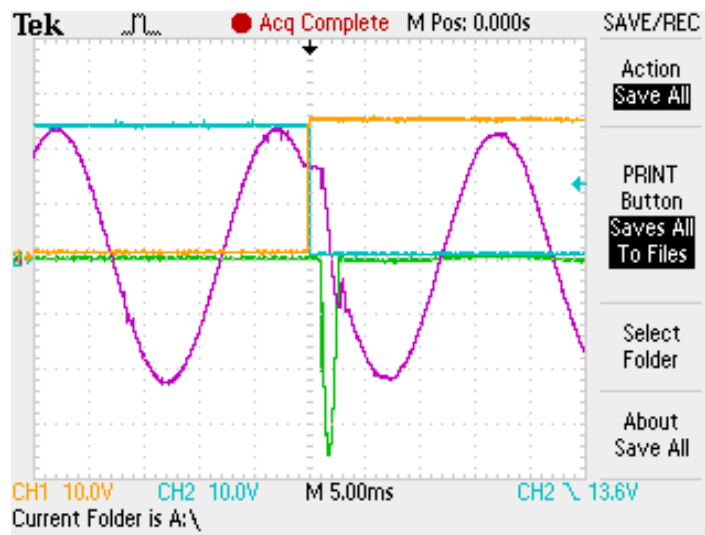
Na slici 4 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa invertora na mrežu. Napon invertora je 238V, a napon mreže 232V. Na slici 4

se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže čija je vršna vrednost 420A, a njeno ukupno trajanje 2ms.



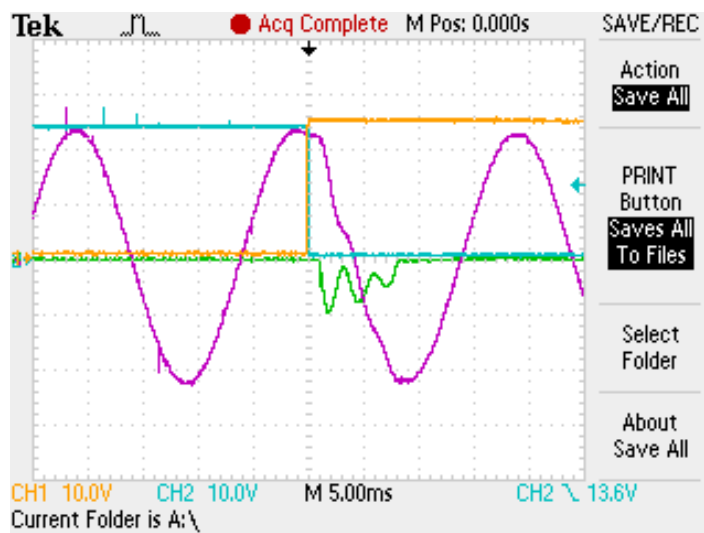
Slika 4. Prelazak sa invertora na mrežu, drugi snimak

Na slici 5 se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže čija je vršna vrednost 360A, a njeno ukupno trajanje 2ms.



Slika 5. Prelazak sa invertora na mrežu, treći snimak

Na slici 6 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa invertora na mrežu. Napon invertora je 238V, a napon mreže 232V.

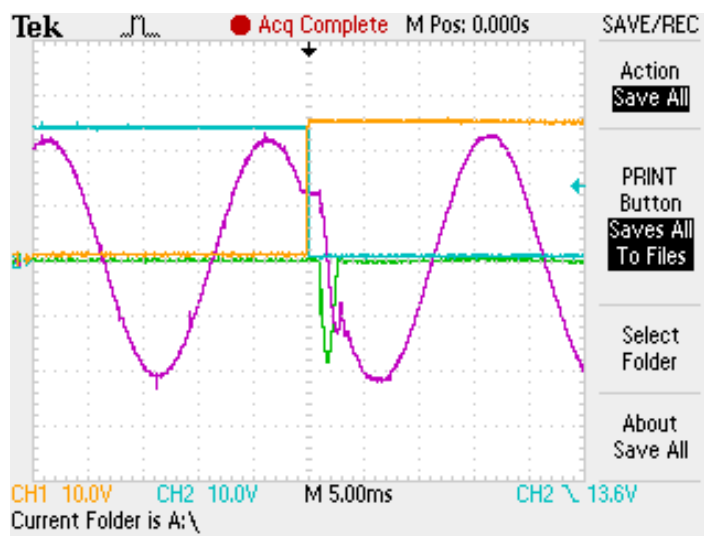


Slika 6. Prelazak sa invertora na mrežu

Na slici 6 se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže. Talasni oblik struje izjednačenja je oscilatorno prigušen, zbog uspostavljanja oscilatornog kola izolacioni mrežni transformator – filterski kondenzator invertora. Frekvencija snimljenih oscilacija je određena rasipnom induktivnošću izolacionog mrežnog transformatora i filterskog kondenzatora. Na amplitudu oscilatorne struje izjednačenja utiče kašnjenje pri uključanju grupe tiristora statičke preklopke prema mreži u odnosu na trenutak prestanka rada invertora.

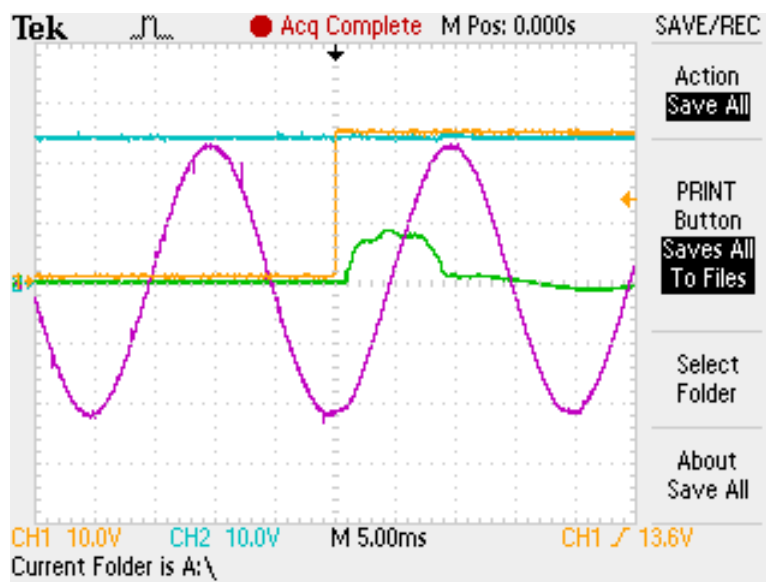
Na slici 7 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa invertora na mrežu. Napon invertora je 220V, a napon mreže 232V. Na slici 7 se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže čija je vršna vrednost 380A, a njeno ukupno trajanje 2ms.





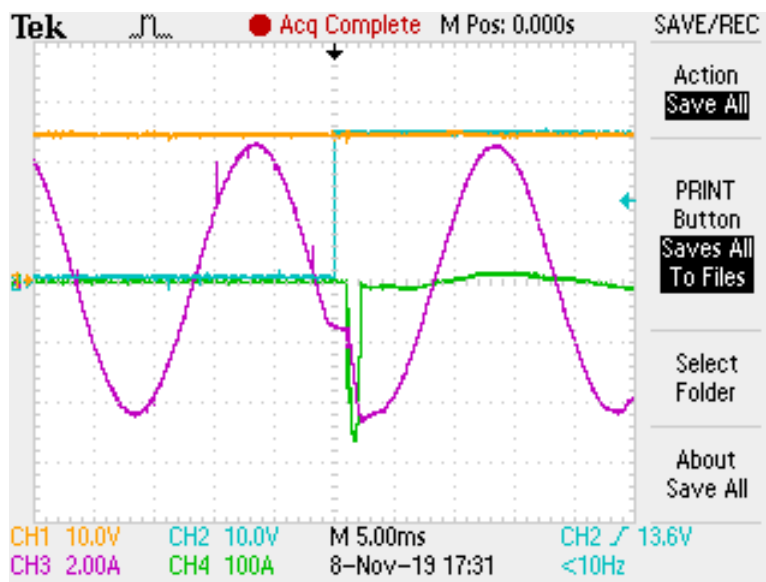
Slika 7. Prelazak sa invertora na mrežu

Na slici 8 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa drugog invertora iste nazivne snage na mrežu. Napon invertora je 232V, a napon mreže 232V. Na slici 8 se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže. Talasni oblik struje izjednačenja je oscilatoran, zbog uspostavljanja oscilatornog kola izolacioni mrežni transformator – filterski kondenzator invertora.



Slika 8. Prelazak sa drugog invertora na mrežu

Na slici 9 prikazan je talasni oblik relevantnih signala pri prelasku sa drugog invertora iste nazivne snage na mrežu. Napon invertora je 232V, a napon mreže 232V. Na slici 8 se uočava struja izjednačenja između invertora i mreže čija je vršna vrednost 380A, a njeno ukupno trajanje 2ms.



Slika 9. Prelazak sa invertora na mrežu

Na osnovu prethodnih slika zaključujemo da pri manipulacijama između oba invertora i mreže ne dolazi do gubitka izlaznog napona već samo do pojave deformacije njegovog talasnog oblika što sigurno neće prouzrokovati nepravilan rad ili ispad potrošača.

Maksimalna vrednost struje izjednačenja se određuje kao kvadratni koren iz zbira kvadrata maksimalne vrednosti oscilatorne struje izjednačenja i kvadrata maksimalne struje tereta. Ultrabrzni osigurači, koji su tako dimenzionisani da u slučaju kratkog spoja uspešno štite tiristore jer imaju manju vrednost podnosivog toplotnog impulsa ( $A^2s$ ) ne treba da reaguju na ovu vrednost struje. Snimljene maksimalne vrednosti struje iznose do 420 A u posmatranim slučajevima komutacije tereta sa invertora na mrežu. Maksimalna struja zbog oscilovanja filterskog kondenzatora sa rasipnom induktivnosti izolacionog mrežnog transformatora bi iznosila prema (3) oko 330 A u posmatranom slučaju a ukupna vršna, uzimajući u obzir nazivni teret, oko 490 A, budući da je filterski kondenzator testiranog invertora iznosio 1000  $\mu F$  a mrežni napon 230 VAC. Znači, u posmatranim slučajevima oscilatorna komponenta struje je znatno veća od struje filterskog kondenzatora ali se na nju može uticati skraćanjem vremena od trenutka prestanka rada invertora do početka ubrizgavanja struje gejta u antiparalelne tiristore statičke preklopke koji se nalaze u mrežnoj grani.

## 4. Zaključak

Modifikacija upravljanja monofaznom statičkom preklopkom na opisani način je dala zadovoljavajuće rezultate. Takođe su uočene prelazne pojave koje se ne mogu izbeći i koje treba uzeti u obzir prilikom dimenzionisanja tiristora i ultrabrzih osigurača statičke preklopke. Pokazano je kako treba uzeti u obzir maksimalnu efektivnu vrednost struje izjednačenja pri dimenzionisanju tiristora statičke preklopke. Prikazan način upravljanja je vrlo robusan u odnosu na smetnje koje dolaze iz mreže i glavni pravac daljeg razvoja je unapređenje detektovanje faznog stava struje tereta kada je ona mala ili u prelaznim režimima, bez blidera (veštačkog omskog malog opterećenja). Opisani način upravljanja statičkom preklopkom je pogodan i kod besprekidnog pretežno kapacitivnih potrošača pošto je komutacija sa mreže na inverter takva da se dešava u blizini pika mrežnog napona, kada struja i napon potrošača imaju isti znak za sve realne vrednosti faktora snage, bilo induktivnog ili kapacitivnog.

## Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju“, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Literatura

- [1] D. Rajković, Ž. Janda, *Sistemi za besprekidno napajanje električnom energijom*, Beograd, Agencija SPIRIDONVIĆ, 1999.
- [2] *THYRISTORS-RECTIFIERS*, General Electric, Auburn, 1982.
- [3] D. Eršetić, B. Matijević, I. Tomić, „Postrojenje za besprekidna napajanja izmjeničnim mrežnim naponom“, 7. Savetovanje Energetske elektronike, Beograd, oktobar 1988, pp 152 – 161.
- [4] D.C. Griffith, *Uninterruptible Power Supplies*, New York, Marcel Dekker, 1989, Appendix A
- [5] Jovan Bebić, *Jedan novi pristup konstrukciji monofaznih sistema za besprekidno napajanje*, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1994.
- [6] Ž. Janda, P. Ninković, R. Đorđević, "Mikroprocesorski vođena statička preklopka", u zborniku 26. savetovanja JUKO CIGRE, rad R14-04, Banja Vrućica 25-30.05.2003.

**Abstract.** The proposed modification of static transfer switch control algorithm enables safe and reliable load supply commutation in case of non-linear and capacitive loads. Experimental results derived on uninterruptible power supply static transfer switch connected to real industrial load are presented and explained. The design guidelines are outlined for thyristor and rapid fuse selection, regarding simulation results.

**Keywords:** static transfer switch, uninterruptible power supply, thyristor dimensioning.

## **Enhanced Single Phase Static Transfer Switch Control**

Blagoša Jovanović, Mladen Milošević, Žarko Janda

Rad primljen u uredništvo: 27.10.2019. godine.

Rad prihvaćen: 28.11.2019. godine.