

**OPTIMIZACIJA DETEKCIJE PROBOJA KOD ELEKTROSTATIČKIH  
FILTERA SA JEDNOFAZNIM TIRISTORSKIM NAPAJANJEM**

Ilija Stevanović, Rajko Prole, Darko Jevtić, Slobodan Josifović,  
Mladen Ostojić, Dušan Arnautović

*Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd*

**Kratak sadržaj:** *Pravilna i sigurna detekcija proboja tj. varnice, a posebno električnog luka i kratkog spoja između elektroda elektrostatičkog filtra je od presudnog značaja za njegov pravilan rad. Pored toga neki algoritmi za regulaciju napona elektrofiltera, osim DC napona i DC ili AC struje, koriste i broj proboja u minuti kao povratnu spregu u regulaciji. U ovom radu su analizirani neki od načina za detekciju proboja kod elektrofiltera i algoritmi upravljanja opremom u tom slučaju. Kao primer za proračun i analizu poslužili su podaci o elektrofilterima na blokovima A1 i A4 u TE „Nikola Tesla A“ čije se sekcije napajaju jednofaznim tiristorskim napajanjem, a upravljaju kontinualno ili intermitentno. Izvršena je optimizacija parametara regulatora pri reakciji upravljačkog algoritma na vrstu detektovanog proboja.*

**Ključne reči:** *elektrofilter, detekcija varnice i električnog luka, algoritmi upravljanja*

**1. UVOD**

Efikasnost čišćenja dimnog gasa koji nastaje sagorevanjem uglja u termoelektranama dominantno zavisi od površine elektroda za izdvajanje pepela u elektrofilterima. Takođe, veliki uticaj na čišćenje dimnog gasa ima način održavanja visokog napona između elektroda tj. vrste napajanja i regulacije napona. Najveći broj elektrofiltera u svetu se napaja preko regulisanog jednofaznog tiristorskog napajanja koje posredstvom visokonaponskog transformatora i ispravljača obezbeđuje visoki jednosmerni napon na emisionim elektrodama elektrofiltera.

Klasičan način regulacije ovog napona je kontinualno upravljanje uglom vođenja antiparalelnih tiristora na primarnoj strani jednofaznog transformatora [1]. Ovaj način napajanja i upravljanja tiristorima nosi određene nedostatke među kojima je potrebno posebno istaći pojavu čestih proboja između elektroda sa mogućnošću nastanka kratkih spojeva i veliki rizik od nastanka povratne korone. Ove pojave smanjuju efikasnost čišćenja elektrofiltera, povećavaju potrošnju električne energije i smanjuju životni vek elektroda. Da bi se delimično ublažile ove štetne posledice razvijen je napredniji algoritam upravljanja već postojećim sistemom napajanja elektrofiltera. To je takozvano intermitentno upravljanje jednofaznim napajanjem [2]. Suština ovog načina upravljanja je periodično generisanje određenih pauza u nizu impulsa za upravljanje tiristora. Na taj način se u pravilnim vremenskim razmacima, jednosmerni napon elektrofiltera dovodi na nultu vrednost. To omogućava da se naelektrisane čestice prašine nataložene na elektrodama delimično razelektrišu što u najvećem broju slučajeva dovodi do sprečavanja pojave povratne korone. Smanjen broj proboja i kratkih spojeva uz održavanje visokog napona na elektrodama dovodi do smanjenja potrošnje električne energije i povećanje efikasnosti čišćenja dimnog gasa pri intermitentnom napajanju u odnosu na kontinualno [3].

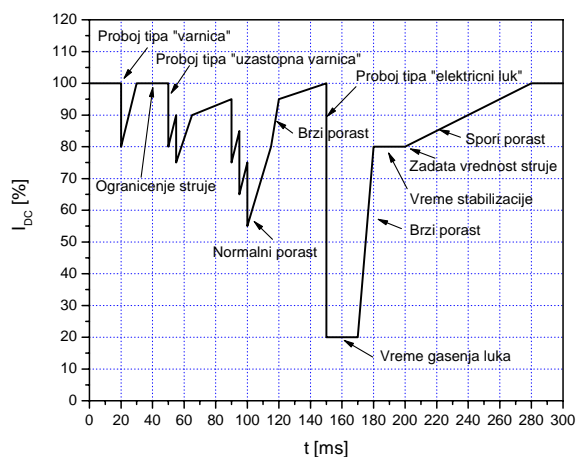
## 2. DETEKCIJA PROBOJA

Posle uključenja sekcije elektrofiltra dolazi do brzog podizanje napona na elektrodama do zadate vrednosti, a zatim sporo sve dok se ne dogodi proboj u elektrofilteru ili dostigne ograničenje DC struje ili DC napona. Kada dođe do proboja, vrši se njegova detekcija, odnosno određuje se vrsta proboja (varnica ili električni luk), a zatim se prosleđuje odgovarajući nalog za upravljanje tiristora [4]. Ako je pri proboju došlo do smanjenja DC napona i manjeg povećana DC struje onda se radi o varnici. Nju je veoma teško detektovati. Obično se to vrši hardverski pomoću filtra propusnika visokofrekventnih impulsa (oko 20kHz) u DC naponu ili softverski kod savremenih mikroprocesorskih regulatora analizom promenljivih veličina elektrofiltra u vremenskom domenu. Električni luk prati znatno veći pad DC napona i povećanje DC struje koji kao posledicu imaju povećanje energije koja dolazi iz izvora napajanja. Iz tog razloga došlo je do povećanja i AC struje na regulisanom tiristorskom pretvaraču.

Na osnovu izmerenih vrednosti promenljivih veličina elektrofiltra pri proboju, regulator definiše vrstu reakcije (slika 1). Pri detektovanju „varnice“, reakcija regulatora je takva da smanjuje referentnu vrednost struje za određeni iznos (obično 10 do 20%). Posle toga referenca se povećava nekom normalnom brzinom do prethodnog stanja kako je definisano u generatoru reference. Ako prethodno stanje nije moguće postići, dolazi do pojave „uzastopne varnice“ koja dovodi do znatnijeg pada reference i samim tim i napona elektrofiltra. Posle takve promene obično je moguće uspostaviti uobičajeni proces regulacije napona. Međutim, ako je pad reference znatno veći potrebno je posle nekog vremena brzim porastom reference dovesti elektrofilter u normalnu radnu tačku.

Pojava naglog povećanja AC struje elektrofiltra pri proboju je siguran kriterijum da je došlo do električnog luka. U tom slučaju, regulator potpuno ili delimično blokira vođenje tiristora svodeći napon elektrofiltra na nulu ili na veoma mali iznos. Nakon vremena gašenja luka, vreme smirenja, napon se brzo podiže do referentne vrednosti, zadržava se neko vreme na njoj, vreme stabilizacije, a zatim polako podiže do pojave korone.

Proračunom i analizom promenljivih elektrofiltra pri različitim vrstama proboja u elektrofilteru potrebno je odrediti kvalitativne i kvantitativne odnose što je urađeno u nastavku ovog rada.



Slika 1. Reakcije regulatora napona pri različitim vrstama proboja u elektrofilteru

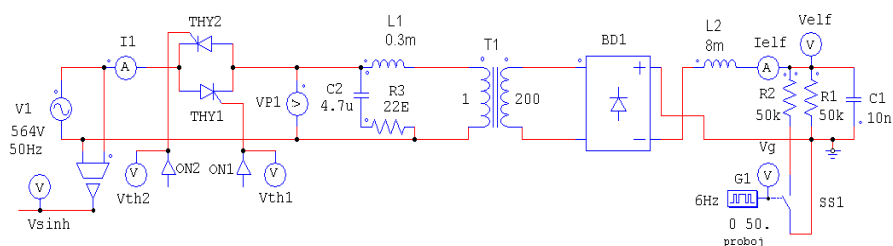
### 3. MODEL ZA PRORAČUN

Proračun karakterističnih promenjivih veličina elektrofiltra se vrši pomoću profesionalnog softvera za analizu električnih kola. Prvo je napravljen model jednofaznog tiristorskog napajanja elektrofiltra i model samog elektrofiltra. Odgovarajuće električno kolo prikazano je na slici 2. Sistem za proračun obuhvata izvor napajanja V1 efektivne vrednosti 400 V, 50 Hz, maksimalne vrednosti napona 564 V, antiparalelne tiristore THY1 i THY2 sa odgovarajućim upravljanjem ON1 i ON2, prigušnicu L1 u primaru visokonaponskog transformatora, visokonaponski transformator T1 sa realnim parametrima prenosnog odnosa 200, ispravljač BD1 sa prigušnicom L2 u sekundarnom kolu transformatora i ekvivalentni model elektrodnog sistema elektrofiltra.

Elektrofilter je modelovan sa ekvivalentnim otporom R1 od 50 k $\Omega$  i paralelno vezanim ekvivalentnim kondenzatorom C1 od 10 nF. Pri probou otpornost elektrofiltra se nelinearno menja i u ovom proračunu je simulirana pomoću otpora R2 od 50 k $\Omega$  koji se uključuje paralelno otporu R1 pomoću kontakta SS1. Učestanost i trajanje probouja se podešava pomoću kola G1. U upravljanju tiristorima postoji još jedno ovakvo kolo koje generiše signal zabrane vođenja tiristora. Ovaj signal može da menja svoj početak i trajanje. Kontinualno upravljanje tiristorima se vrši pomoću sinhronizacionog napona Vsinh promenom ugla upravljanja  $\alpha$ . Intermitentni režim rada je ostvaren dodatnim signalom koji moduliše osnovni signal upravljanja. Kod njega se podešava frekvencija i faktor intermitencije. Na taj način dobijeno je električno kolo koje simulira rad elektrostatičkog filtra u kontinualnom i intermitentnom režimu rada i pri probouju.

Proračuni su urađeni pri uglu upravljanja tiristora od 70° el. što odgovara realnoj situaciji. Intermitentni režim rada je simuliran sa frekvencijom 3,33 Hz i faktorom intermitencije 0,8. To znači da će posle svakih 240 ms nastati pauza u vođenju tiristora u trajanju od 60 ms. Probouj između elektroda je simuliran sa učestanošću od 6 Hz i trajanju od 50° el. odnosno 23 ms. Zabrana vođenja tiristora počinje 20° el. odnosno 9,2 ms posle nastanka probouja i traje sledećih 50° el. odnosno 23 ms. Vremenski interval u kome se vrši proračun iznosi 1 s.

Rezultat proračuna pri ovim uslovima prikazan je na slici 3. Prvi dijagram sa ove slike prikazuje jednosmernu struju elektrofiltra  $I_{elf}$ . Na njemu su vidljivi vremenski intervali koji su karakteristični za kontinualni režim rada elektrofiltra, zatim tri pauze usled intermitencije i 6 probouja sa odgovarajućim pauzama. Na drugom dijagramu prikazan je oblik naizmenične struje elektrofiltra  $I_I$ , na trećem oblik jednosmernog napona elektrofiltra  $V_{elf}$ , na četvrtom oblik napona na izlazu iz upravljačke jedinice tj. iza tiristora  $V_{P1}$ , a na petom signali koji generišu probouj  $V_g$  i zabranu vođenja tiristora  $V_{inh}$ .



Slika 2. Šema električnog kola za simulaciju rada elektrofiltra



Slika 3. Vremenski dijagrami koji ilustruju rad jednofaznog elektrofiltera u intermitentnom režimu i pri probouju

Dobijeni dijagrami realno ilustruju promenjive na stvarnom elektrofilteru date u [2] što pokazuje da je analiza koja sledi postavljena na realne osnove. Na vremenskim dijagramima se jasno uočavaju intervali vremena u kojima jednosmerni napon i struja elektrofiltera imaju vrednost jednaku nuli. Prisustvo ovih vremenskih intervala je od presudnog značaja za lošije pokazatelje kvaliteta rada ove vrste napajanja. Praktično se elektrofilter samo jednu trećinu raspoloživog vremena nalazi pod visokim naponom sposobnim da izazove koronu i jonizaciju čestica pepela koja doprinosi njihovom izdvajanju iz dimnog gasa.

#### 4. OPTIMIZACIJA PROBOJA

Za pravilan rad elektrofiltera jedna od najznačajnijih radnji je način detekcije proboja (prvenstveno električnog luka). Da bi se bolje upoznala ova pojava veoma dobro mogu da posluže dobijeni model elektrofiltera sa napajanjem i rezultati iz prethodnog proračuna. Posmatrajući pažljivije sliku 3 mogu se uočiti četiri karakteristična proboja, i to 2., 3., 4. i 6. proboj. Preostala dva se ponavljaju. Postavlja se pitanje po čemu su oni karakteristični. Prvenstveno se to odnosi na trajanje vremenskog intervala sa povećanom strujom, maksimalnu vrednost struje pri probouju i trajanje pauze posle proboja.

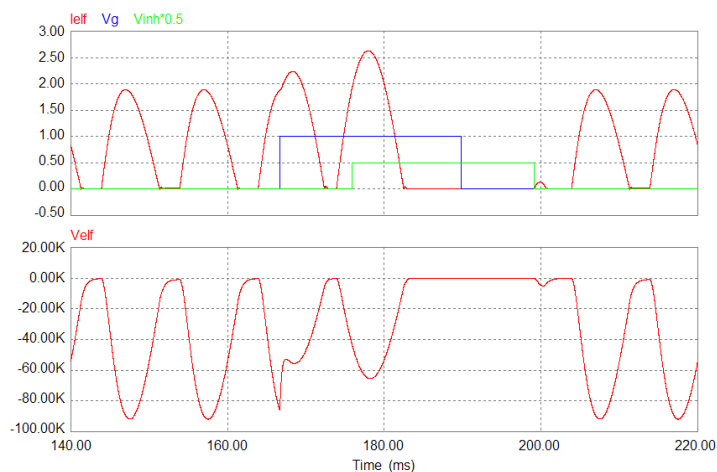
Na slici 4 je prikazan drugi po redu proboj sa slike 3. Jednosmerni napon i struja pre proboja su imali maksimalne vrednosti od 1,9 A i -92 kV. Probouj se dešava pri uglu koji je veći od trenutnog ugla upravljanja tiristora, što ima za posledicu vođenje tiristora, a manji je od 90° el. Struja kroz filter je porasla zbog smanjenja otpornosti

pepela između elektroda. U trenutku proboja vodio je jedan od tiristora, npr. THY1. Posle vremenskog intervala koji je potreban za detekciju proboja, koji je u ovom proračunu uzet da iznosi 9,2 ms, dat je nalog na oba tiristora za prestanak njihovog vođenja. U tom trenutku tiristor THY1 nije bio u provodnom stanju, a tiristor THY2 je bio u stanju vođenja. Međutim, tiristor ne može da prestane da vodi, bez obzira na zabranu vođenja, sve dok je pozitivno polarisan tako da struja kroz njega nastavlja da teče. Tek u sledećem ciklusu generisanja upravljačkih impulsa na gejtovima tiristora, odnosno u sledećem periodu napona napajanja, oba tiristora će biti blokirana.

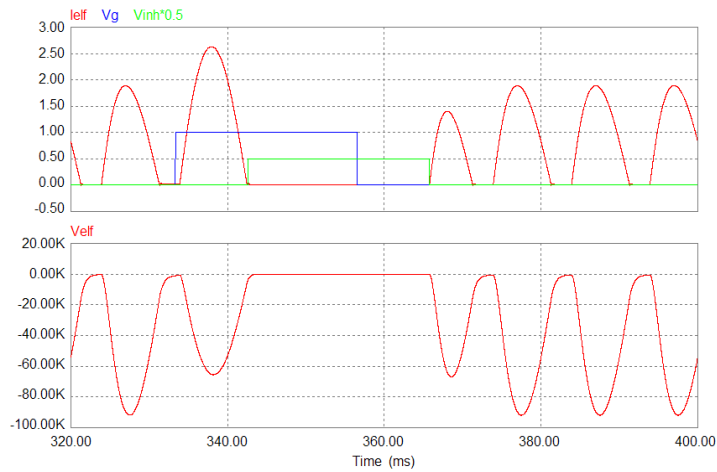
Vrednost maksimuma struje i napona u prvom polutalasu posle proboja iznose 2,25 A što je povećanje oko 18 % i -56 kV što je smanjenje od oko 40 % u odnosu na vrednosti pre proboja. U drugom polutalasu struja elektrofiltra dostiže svoj maksimum koji iznosi 2,6 A (povećanje od 38 %), a napon elektrofiltra ima vrednost -65 kV (smanjenje oko 30%). Posle trajanje pauze od 23 ms uspostavlja se ponovo vođenje tiristora i elektrofilter nastavlja normalno da radi.

Sledeći karakteristični proboj je treći proboj sa slike 3 i prikazan je na slici 5. On se dešava kada je struja kroz tiristore jednaka nuli, a zabrana vođenja tiristora se zadaje pri uglu manjem od ugla upravljanja. Zbog toga se maksimalna struja za vreme proboja uspeva da razvije samo kroz jedan tiristor koji je u tom trenutku bio u stanju vođenja. Drugi tiristor ne dolazi u stanje vođenja posle proboja tako da postoji samo jedan polutalas struje sa povećanom vrednošću. Nakon određene pauze u vođenju tiristora posle detekcije proboja nastupa ponovo normalno upravljanje. Dakle, u ovom slučaju povećana struja zbog proboja u elektrofilteru postoji kraće vreme nego u prethodnom slučaju.

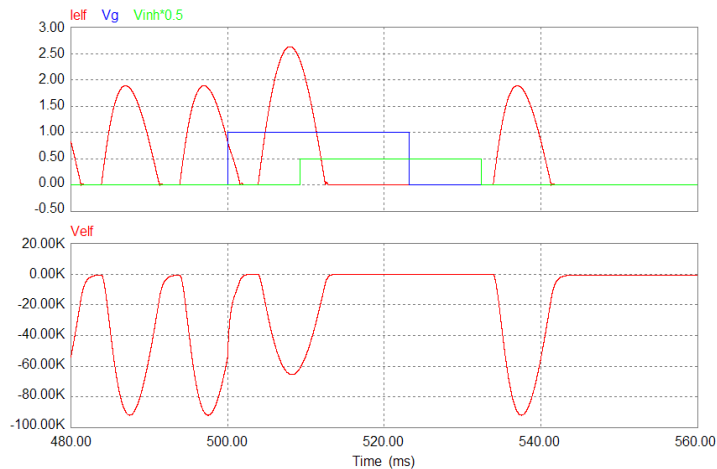
Treći karakteristični proboj je četvrti po redu proboj sa slike 3 i prikazan je u razvijenom obliku na slici 6. Odlikuje se trenutkom proboja koji nastaje pri uglu većem od  $90^\circ$  el. Struja kroz tiristor koji trenutno vodi je u fazi opadanja, a maksimum struje pri proboju se postiže tek u sledećoj poluperiodi. Trajanje proboja je duže od jedne poluperiode, ali se pojavljuje samo jedan maksimum struje do prestanka vođenja tiristora.



Slika 4. Prvi karakteristični proboj  
(proboj pri uglu većem od ugla upravljanja a manjem od  $90^\circ$ )



Slika 5. Drugi karakteristični proboj  
(proboj pri uglu manjem od ugla upravljanja)



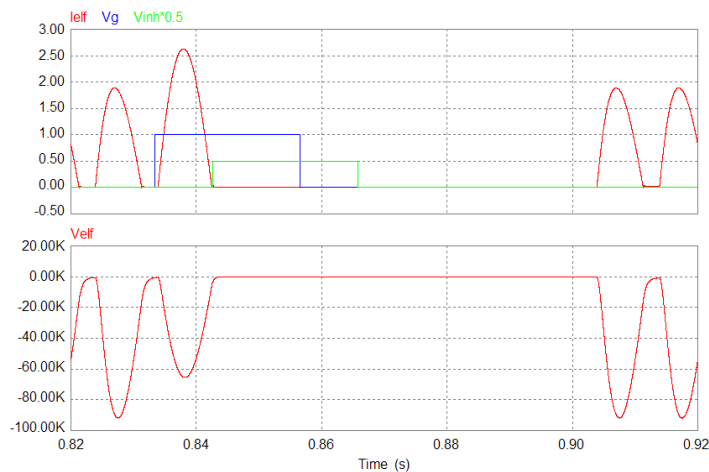
Slika 6. Treći karakteristični proboj  
(proboj pri uglu većem od ugla upravljanja i većem od  $90^\circ$ )

Četvrti karakteristični proboj je šesti proboj sa slike 3 i prikazan je na slici 7. Za njega je karakteristično da se vreme zabrane vođenja tiristora spaja sa vremenom pauze usled intermitencije. Rezultat je veća pauza u vođenju tiristora od uobičajene što nepotrebno smanjuje vreme kada je elektrofilter pod visokim naponom.

Na osnovu izvršene analize može se zaključiti da se proboj u elektrofilteru može da dogodi kada je struja kroz tiristore jednaka nuli i pri uglovima upravljanja tiristora manjim ili većim od  $90^\circ$  el. Najnepovoljniji trenutak nastanka proboja je pri uglovima koji su veći od ugla upravljanja tiristora, a manji od  $90^\circ$  el. To je u suštini i najverovatniji trenutak nastanka proboja u realnim pogonskim uslovima. Najpovoljniji trenutak za zabranu vođenja tiristora posle proboja je trenutak kada je struja kroz

tiristore jednaka nuli. Trajanje detekcije proboja od trenutka njegovog nastanka do trenutka zabrane vođenja tiristora ne bi trebalo da je duže od 5 ms kako bi se sprečilo vođenje sledećeg tiristora i skratilo vreme u kome se elektrofilter nalazi u kratkom spoju tj. sa povećanom strujom. Vreme za gašenje električnog luka odnosno dejonizaciju gasa treba da je dovoljno dugo kako se ne bi ponovo uspostavio luk u sledećem ciklusu vođenja tiristora. Preliminarno ga treba podesiti na vrednost koja nije manja od 10 ms, odnosno najmanje jednu poluperiodu.

Ove kvalitativne i kvantitativne analize vrednosti jednosmernog napona i struje elektrofiltera, kao i vremena pauze u vođenju tiristora posle proboja mogu da posluže kao mera za određivanje parametara za detekciju proboja i načina njegovog najuspešnijeg eliminisanja.



Slika 7. Četvrti karakteristični proboj  
(pauza u vođenju tiristora usled proboja i pauza usled intermitencije su spojeni)

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je izvršena analiza promenljivih veličina elektrostatičkog filtra napajanog jednofaznim tiristorskim napajanjem. Proračun je urađen na električnom modelu pomoću odgovarajućeg softvera za analizu električnih kola.

Analizirano je ponašanje ovih veličina pri različitim vrstama proboja i određeni su odnosi na osnovu kojih se mogu definisati kriterijumi za detekciju proboja između elektroda elektrofiltera i trajanje pauze u vođenju tiristora posle detekcije proboja.

Proračun je pokazao da pri električnom luku u elektrofilteru dolazi do smanjenja DC napona i povećanja DC struje za iznos od minimalno 40% maksimalne vrednosti ovih promenljivih u prethodnoj poluperiodi. Ovo povećanje DC struje prati i odgovarajuće povećanje AC struje elektrofiltera.

Određeno je da minimalno potrebno vreme za detekciju električnog luka iznosi 5 ms kako bi se sprečilo njegovo proširenje na sledeću poluperiodu napona napajanja. Takođe se došlo do zaključka da je nakon proboja potrebna pauza u vođenju tiristora za gašenje luka od najmanje 10 ms.

Pri intermitentnom režimu rada napajanja elektrofiltra potrebno je pauzu u vođenju tiristora usled intermitencije adaptivno podešavati kako bi se onemogućilo njeno spajanja sa pauzom koja se javlja prilikom gašenja luka. Na taj način izbegava se nepotrebno dugo beznaponsko stanje elektrofiltra.

Konkretno vrednosti podešenja parametara regulatora u stvarnom pogonu zavise od brzine samog regulatora i karakteristika elektrodnog sistema elektrofiltra pa se mogu razlikovati od proračunatih u smeru njihovog povećanja radi sigurnosti.

#### LITERATURA

- [1] I. J. Stevanović, R. Đ. Prole, S. M. Dobričić, D. N. Jevtić, D. B. Arnautović, S. N. Vukosavić, "Development and Appliance of Devices for Intermittent Power Supply And Control of Electrostatic Dust Separator in Thermal Power Plants," Power Plants 2006, Vrnjačka Banja, 2006.
- [2] J. Stevanović, A. B. Nikolić, I. Z. Cvetković, S. N. Vukosavić: Prednosti intermitentnog napajanja elektrostatičkog filtra u odnosu na kontinualno, YUCO CIGRE, Vrnjačka Banja, 2007.
- [3] J. Stevanović, R. Đ. Prole, D. N. Jevtić, D. B. Arnautović, S. N. Vukosavić: Algoritmi upravljanja naponom kod elektrostatičkih filtera sa jednofaznim tiristorskim napajanjem, ETRAN 2009, Vrnjačka Banja, 2009.
- [4] State of the Art Electrostatic Precipitator Power Supplies, EPRI, Palo Alto, California, USA, 2003.

**Abstract:** Proper and safe detection of flashover, i.e. spark, and especially detection of the electric arc and short circuit between the electrodes in electrostatic precipitators is crucial for the proper operation. In addition, there are algorithms for the voltage control in electrostatic precipitators, except DC voltage and DC or AC current, that have used the number of sparks per minute as feedback. This paper analyzes some of the methods for detecting breakdowns in the electrostatic precipitators and adequate control algorithms. As an example for calculations and analysis, data gathered in electrostatic precipitators of units A1 and A4 in TPP „Nikola Tesla A“ are used, whose sections are feed by single phase thyristor type power supply, and operating in continuous and intermittent mode. The regulator parameter optimization is performed based on control algorithm response in dependence of detected breakdown type.

**Key words:** *electrostatic precipitator, spark and electric arc detection, control algorithms*

#### OPTIMIZATION OF FLASHOVER DETECTION IN ELECTROSTATIC PRECIPITATORS WITH SINGLE PHASE THYRISTOR TYPE POWER SUPPLY

Ilija Stevanović, Rajko Prole, Darko Jevtić, Slobodan Josifović,  
Mladen Ostojić, Dušan Arnautović

*Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade*