

# Specifičnosti visokonaponskih visokofrekventnih merenja na elektrodnom sistemu elektrostatičkih izdvajača u termoelektranama

Miloš R. Nedeljković

Katedra za električne pretvarače i pogone  
Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu  
Beograd, Srbija  
[nedeljkovic@etf.rs](mailto:nedeljkovic@etf.rs)

Željko V. Despotović

Institut "Mihajlo Pupin", Univerziteta u Beogradu  
Beograd, Srbija  
[zeljko.despotovic@pupin.rs](mailto:zeljko.despotovic@pupin.rs)

*Sadržaj*— Elektrostatičko izdvajanje je jedan od veoma efikasnih načina filtracije i odvajanja čvrstih čestica na blokovima termoelektrana i energana. Efikasnost ovih postrojenja je uslovljena kvalitetom regulacije napona i detekcijom korone na elektrodnom sistemu izdvajača. Rad elektrostatičkih izdvajača je nezamisliv bez upotrebe energetske pretvarača koji obično iz trofaznog mrežnog napajanja 3x400V, 50Hz ili iz dvofaznog napajanja 400V, 50Hz obezbeđuju visoke napone na elektrodnom sistemu u opsegu tipično 0kV-100 kV. Bilo da se radi o tiristorskim 50Hz-nim pretvaračima ili tranzistorskim visokofrekventnim pretvaračima (5kHz-10kHz) neophodno je pouzdano i tačno meriti napon i struju na elektrodnom sistemu izdvajača, kako bi se postigao efikasniji rad i što bolje praćenje granice probojnog napona. U radu su razmatrane specifičnosti visokonaponskih visokofrekventnih (VNVF) merenja na elektrodnom sistemu elektrostatičkih izdvajača koji se koriste na blokovima termoelektrana. Takođe u radu je dato konkretno rešenje mernog sistema kao i dobijeni eksperimentalni rezultati.

*Ključne reči*-VN ispravljač; elektrostatički izdvajač; VNVF merenja; korona; termoelektrane; ekologija

## I. UVOD

Nove tehnologije za uklanjanje zagađivača iz otpadnih gasova, koji potiču od strane industrijskih postrojenja i termoelektrana, obezbeđuju sredstva za uklanjanje CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, sumpornih jedinjenja i finih čestica prašine. Ove tehnologije pružaju vrlo kvalitetno napajanje bez kojeg ne bi bilo moguće ispuniti stroge zahteve u procesu prečišćavanja.

Izbor visokonaponskog (VN) napajanja može odigrati značajnu ulogu u povećanju efikasnosti elektrostatičkih izdvajača (ESI). Rasprave o problemima zagađenja životne sredine širom sveta su posledica porasta potrošnje energije i ubrzanog industrijskog rasta. Ukupna količina otpadnih gasova se povećava, uključujući i emisiju finih čestica prečnika 1 - 50 μm, koje su, kao što je poznato, naročito štetne za zdravlje. Stoga velika industrijska postrojenja i termoelektrane zahtevaju savremenu opremu za čišćenje prašine i kontinualno upravljanje zagađenjem. Neophodna je automatizovano upravljanje opreme, bez potrebe za intervencijom operatera. Istraživački ciljevi u ovoj oblasti

uključuju potrebu zadovoljenja ekoloških propisa, imajući u isto vreme potrebu upravljanja gubicima snage i ukupne potrošnje energije, kako bi se postigli ciljevi energetske efikasnosti.

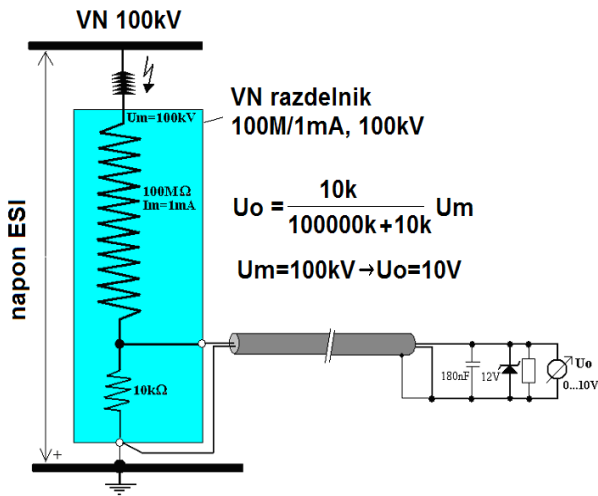
Sistem ESI pored taložnih komora sadrži i ispravljačke VN jedinice sa odgovarajućim uređajima, kojima se ostvaruje potpuno upravljanje visokim naponom u opsegu tipično 0-100kV. Ispravljačka VN jedinica za napajanje ESI, je obično sastavljena od: visokonaponskog transformatora (VNT), visokonaponskog ispravljača (VNI) i digitalnog regulatora napona. U većini slučajeva zahtev za visokim jednosmernim naponom se danas standardno ostvaruje jednofaznim tiristorskim-SCR pretvaračem koji je baziran na faznom upravljanju [1]- [6]. Ulazno napajanje je obično međufazno 400V, 50Hz. Regulator upravlja napajanjem ESI posredstvom VNT i odgovarajućeg VNI. Diodnim VNI primenjenim na sekundaru VNT proizvode se jednosmerni naponi veoma visokog nivoa. Valovitost toga napona je relativno velika i zavisi od kapacitivnosti opterećenja odnosno ekvivalentne kapacitivnosti ESI. Upravljanje izlaznom snagom i naponom se postiže podešavanjem ugla paljenja tiristorske grupe koja se nalazi na primarnoj strani VNT.

U novije vreme su na tehnološkom tržištu ESI sve više zastupljeniji visokofrekventni (VF) prekidački izvori napajanja. Oni se uvode u sisteme napajanja ESI po prihvatljivoj ceni i postaju veoma konkurentni u odnosu na setove *transformator/ispravljač* i tiristorsko upravljanje, koji se već dugo godina koriste u industriji. Novi VF prekidački izvori obezbeđuju dramatično različite performanse i fizičke karakteristike ESI od tiristorskih izvora napajanja. Primenjeni u ESI aplikacijama novi VF prekidački pretvarači imaju značajan uticaj na izdvajačke sisteme i to sa aspekata konstrukcije, rada i održavanja [7]- [13].

Bilo da se radi o tiristorskim 50Hz-nim pretvaračima ili tranzistorskim visokofrekventnim pretvaračima (5kHz-10kHz) neophodno je pouzdano i tačno meriti ekstremno visoki napon na elektrodnom sistemu izdvajača, kako bi se postigao efikasniji rad i što bolje praćenje granice probojnog napona.

## II. STANJE REŠENOSTI PROBLEMA VN MERENJA NA ESI U SVETU

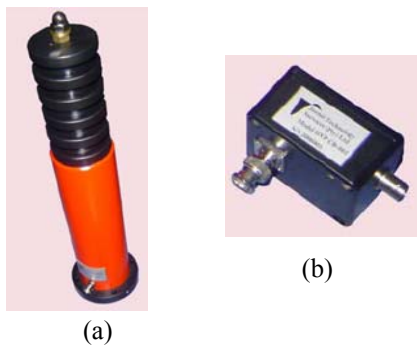
Standardno se problem merenja visokog napona ESI rešava otpornim razdelnikom [1]- [2], pri čemu je razdelnik sastavljen od dva otpornika kao što prikazuje Sl.1.



Slika 1. Konvencionalno merenje VN na elektrodama ESI

Gornji kraj VN otpornika je vezan preko VN izolatora na VN kraj (standardno 100kV za većinu ESI). Standardna vrednost ovog otpornika je 100MΩ, a nominalna struja 1mA. Otpornik koji je postavljen ka uzemljenom kraju elektroda ESI je značajno manje vrednosti i sa njega se vrši merenje napona na ESI prema odnosu razdelnika koji je dat na Sl.1. Sa otpornika 10kΩ se vodi naponski signal oklopljenim ("širmovanim") kablom do mernog instrumenta ili do analognog ulaza upravljačkog uređaja.

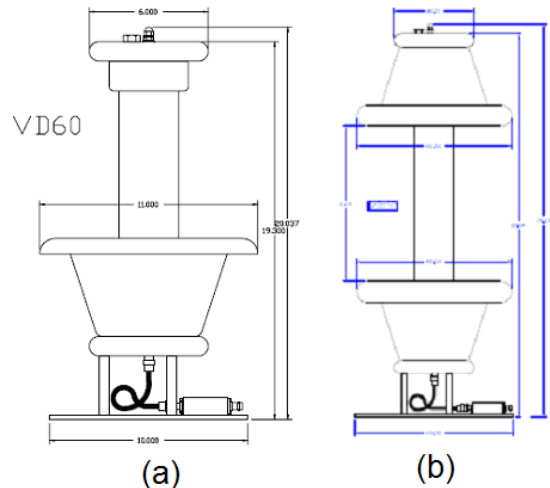
U svetu se ovaj problem VN merenja rešava prema principskoj šemi koja je data na Sl.1. Jedna od najpoznatijih firmi koja proizvodi VN razdelnike napona je *North Star High Voltage* koja se sa svojim proizvodnim programom predstavlja na internet sajtu <http://highvoltageprobes.com/high-voltage-probes.html>.



Slika 2. VN merni sistem firme Jeenel (a) VN razdelnik, (b) transmitter

U proizvodnom programu se susreću dva tipa VN sondi odnosno VN razdelnika napona: tip PVM i VD koji pokrivaju sve zahteve VN merenja na ESI. Pored ovog proizvođača na tehnološkom tržištu su zastupljeni VN razdelnici firme *Jeenel Technology Services*, koji se mogu videti na sajtu [www.jeenel.com](http://www.jeenel.com). Tipičan izgled jednog VN razdelnika sa pripadajućim transmitterom je dat na Sl.2.

Ostali proizvođači nude slična rešenja. Uglavnom su prenosni odnosi razdelnika 1:1000 ili 1:2000 i u tom slučaju se koristi odgovarajući transmitter koji normalizuje signal visokog napona ESI na nivo 0-10V. Svi ovi sistemi se odlikuju značajnim dimenzijama, a stoga i cenom. Pored ovoga oni zahtevaju specijalne uslove za montažu zbog svog specifičnog oblika kao što pokazuje Sl.3.



Slika 3. VN razdelnici firme North Star high Voltage, (a) tip VD60 za 60kV, (b) tip VD150 za 150kV

U nekim slučajevima se jednosmerni napon ESI tj. napon negativne elektrode meri preko VN otpornika od 80MΩ (ili 265MΩ zavisno od proizvođača) koji zajedno sa otpornikom od 6,8kΩ formira razdelnik napona.

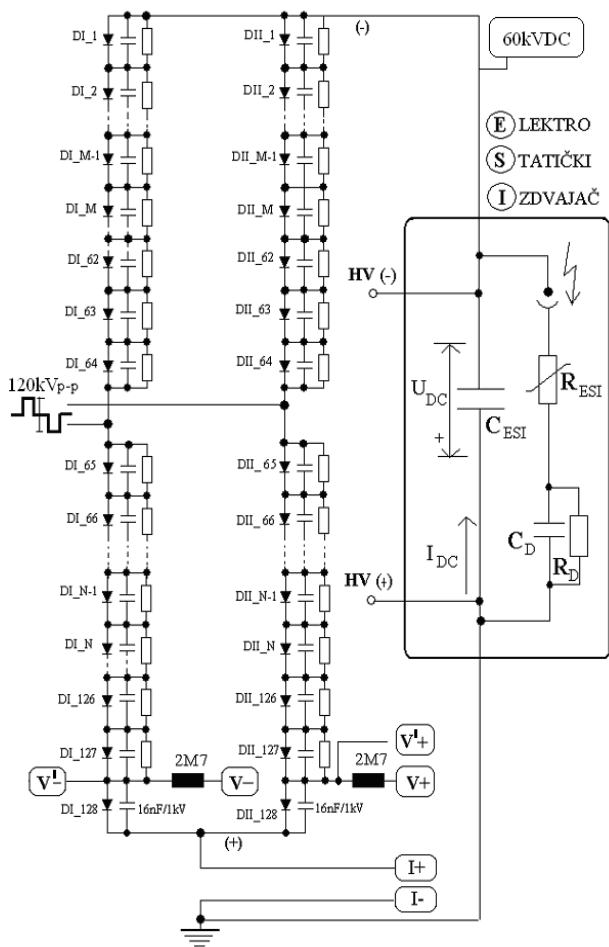
VN otpornik je napravljen od niza na red povezanih otpornika od 1MΩ, 6kV. Obično se nalazi u ulju u kotlu energetske jedinice transformator/ispravljač. Moguće je rešenje i sa samostalnim VN otpornikom koji se nalazi izvan posude sa uljem [3]. Spoljni izgled samostalnog VN otpornika koji je ugrađen u elektro-filteru bloka A5 u TE "Kolubara A" (realizacija Instituta „N.Tesla"-Beograd) je data u [14]. U ovom rešenju se predstavljaju kompletan stub sa otpornikom i štampane ploče sa lancem otpornika koje se smeštaju u ovaj stub ili u kotao transformatora.

Signal dobijen na razdelniku napona se dovodi u zaseban elektronski sklop (optički predajnik smešten na transformatoru/ispravljaču ili u ormanu za upravljanje) koji obezbeđuje da se, preko U/f konverzije, optičkog kabla i f/U konverzije u optičkom prijemniku koji se nalazi u reku elektronike, signal napona prenese na mikroprocesorski (DSP) modul u obliku naponskog signala vrednosti 0-10V. Primena visokonaponskih merenja u novije vreme dobija na značaju u sistemima za dijagnozu ESI u realnim radnim uslovima. Ovi

sistemi se takođe baziraju na VN razdelnicima napona koji su opisani u [15], sa jasno naznačenim dinamičkim osobinama i pouzdanošću njihovog korišćenja u realnim eksploatacionim uslovima.

### III. PREDLOŽENO TEHNIČKO REŠENJE VNVF MERENJA NA ESI TERMOELEKTRANA

U ovom poglavlju je predstavljeno jedno konkretno realizovano tehničko rešenje koje u suštini predstavlja kompaktni i integrisani elektronski modul za merenje trenutne vrednosti struje i napona ESI opsega 0-1A, 0-60kV respektivno, napajanih iz visokofrekventnih (VF) pretvarača. Kao jedan od glavnih ciljeva je bio, osmisliti pouzdan sistem za merenje trenutnog napona i struje. Osnovna struktura merenja je da se ono sastoji od „visokonaponskog“ i „niskonaponskog“ dela.

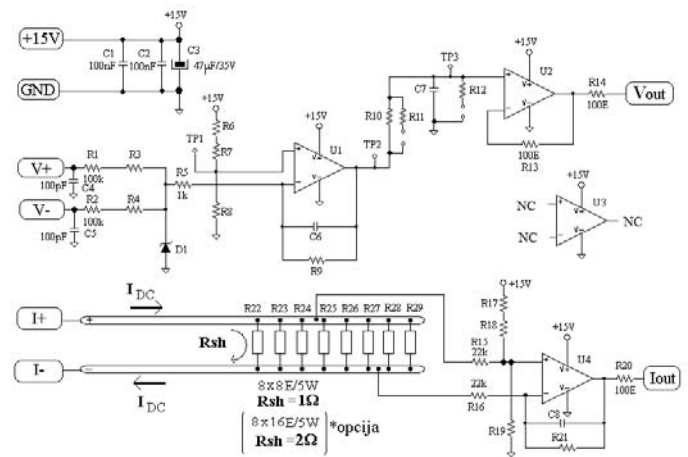


Slika 4. Visokonaponski deo realizovanog sistema a za merenje struje i napona ESI na termo-bloku

Visokonaponski deo čine izlazni napon ESI, skaliran impulsno preko naponskog razdelnika inherentno ugrađenog u diodni VN most i izlazna struja ESI filtra koja se dovodi

direktno sa mernog otpornog šanta (naponski signal 0-50 mV). Na Sl.4 je dat VN deo i rešenje analognog mernog sistema koji predstavlja suštinski doprinos ovog tehničkog rešenja.

Umesto konvencionalnog razdelnika za skaliranje visokog napona je iskorišćen razdelnik inherentno ugrađen u VN diodni ispravljač, obzirom da se paralelno svakoj od redno vezanih dioda dodaje po jedan RC član za izjednačenje inverznog napona na njima. U suštini kapacitivni razdelnik je dominantan tako da se sa poslednjih dioda u nizu DI\_128 i DII\_128 preko visoko-omskih otpornika izdvajaju signali koji se preko priključaka V+ i V- , respektivno vode u analogni merni sklop. Slično važi i za struju koja se sa visokonaponskog diodnog mesta uvodi na analogni merni sklop preko priključaka I+ i I-. Sam ESI kao što je prikazano na Sl.4 predstavlja izrazito nelinearno opterećenje.

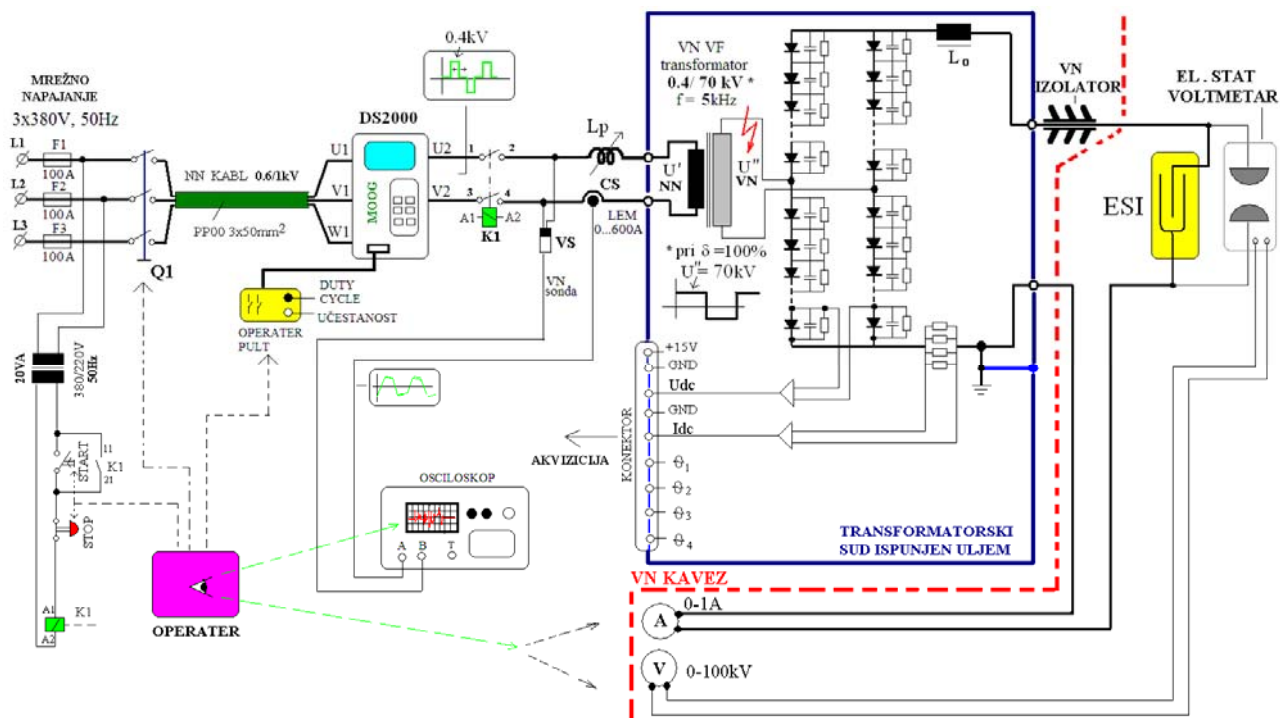


Slika 5. Analogni deo za merenje struje i napona na ESI

Na Sl.5 je prikazan analogni merni sklop razvijenog modula za merenje struje i napona ESI. Ovaj sklop se napaja naponom +15VDC eksterno. Takođe na ovaj sklop se dovode signali sa razdelnika iz VN diodnog mosta V+ i V-, signal struje takođe sa VN diodnog mosta preko priključaka I+ i I-. Izlazni signali su normalizovane izmerene vrednosti struje i napona u obliku naponskih signala  $V(V_{OUT})$  i  $V(I_{OUT})$ .

Ulazni naponski signali V+ i V- se dovode na pojačavač greške koga čini operacioni pojačavač U1 i njemu pripadajući otpornici. Ovi signali se sumiraju na invertujući ulaz operacionog pojačavača U1, preko otpornika R1-R5 kao što je prikazano na Sl.5. Dioda D1 služi za ograničenje naponskog signala u test tački TP1. Pored ovoga ona obezbeđuje potiskivanje negativnih napona. Referentna vrednost napona za pojačavač greške se dobija preko otpornog razdelnika koga čine otpornici R6-R8. Ova vrednost je podešena na  $U_{ref}=5V$  i ona se preslikava na izlaz kada je razlika signala V+ i V- jednaka 0. Ove vrednosti se dovode na neinvertujući ulaz operacionog pojačavača U1.

Propusni opseg i dinamičke karakteristike pojačavača greške su određene paralelnom vezom otpornika R9 i kondenzatora C6. Ova paralelna veza je spojena između izlaza (test tačka TP2) i invertujućeg ulaza pojačavača greške U1.



Slika 6. Eksperimentalni sistem za testiranje i verifikaciju mernog modula za VN VF merenja struje i napona ESI

Filtrirani izlazni napon sa pojačavača greške se vodi preko sprege sa veoma velikom ulaznom impedansom, koja je realizovana sa operacionim pojačavačem U2, na izlazne priključke. Izlaz operacionog pojačavača U2 je zaštićen od kratkog spoja otpornikom R14. Izlazni signal ustvari predstavlja skaliranu vrednost DC izlaznog napona ESI.

Slično prethodno opisanom merenju, se vrši i merenje signala struje koja dolazi preko priključaka I+ i I- na štampanu ploču. Otporni šant se sastoji od osam paralelno vezanih otpora vrednosti  $8\Omega$ , maksimalno dozvoljene snage disipacije 5W za svaki otpornik ponaosob, tako da je njegova ekvivalentna vrednost  $R_{sh}=1\Omega$ . Signal sa otpornog šanta se vodi na pojačavač greške koga čini operacioni pojačavač U4 sa pripadajućim otpornicima.

Propusni opseg i dinamičke karakteristike ovog pojačavača greške su određene paralelnom vezom otpornika R21 i kondenzatora C6. Ova paralelna veza se vodi sa izlaza pojačavača greške na invertujući ulaz U4. Signal sa pojačavača greške U4 se preko otpornika R20 vodi na izlazne priključke.

#### IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Eksperimentalna verifikacija i testiranje razvijenog mernog modula je izvršeno u laboratorijskim uslovima. Pri ovome je realizovano okruženje koje sasvim odgovara realnim eksploatacionim uslovima koji se imaju na termo-blokovima i energanama. Eksperimentalni sistem je prikazan na blok šemi na Sl.6.

Za pobudu primara VN VF transformatora je korišćen IGBT pretvarač prividne snage 100kVA. Napajanje IGBT pretvarača je ostvareno iz trofazne mreže 0.4kV/50Hz NN

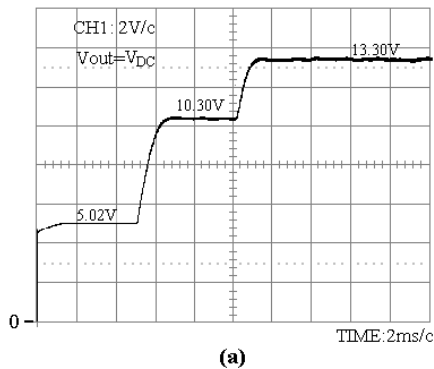
kablom  $3 \times 50 \text{mm}^2$ . Kao zaštita od kratkog spoja se koriste osigurači F1-F3. Uključenje mrežnog napajanja se ostvaruje prekidačem Q1. IGBT pretvarač sadrži sve potrebne strujne i naponske zaštite. Izlazni napon ovog pretvarača je pravougaoni promenljive učestanosti (0-5kHz) i promenljivog „duty-cycle“ (0-100%). Podešavanje ovih parametara se ostvaruje preko pulta koji je pod nadzorom operatera. Kontaktor K1 služi za priključenje opterećenja pretvarača (primar VN VF transformatora) preko promenljive prigušnice  $L_p$ . Upravljački namotaj kontakora se napaja iz 220V/50Hz preko komandnih tastera START/STOP i kola sa samodržanjem. Ovi tasteri su takođe pod nadzorom operatera. Sva merenja trenutnih vrednosti odnosno merenja signala struje i napona u dinamičkim režimima su vršena na osciloskopu koji je galvanski odvojen od ostatka sistema.

VN deo ispravljača je preko *provodnog izolatora* vezan na opterećenje (elektrodni sistem ESI sekcije). Tipične vrednosti ekvivalentne otpornosti jedne od sekcija ESI su iznosile oko  $68\text{k}\Omega$ , dok su ekvivalentne vrednosti kapaciteta iznosile oko 25-50nF. VN deo je fizički odvojen preko uzemljenog VN kaveza (*zastora*), kojim je obezbeđena sigurnost rada operatera u slučaju da dođe do eventualnog preskoka.

Akvizicija i merenja karakterističnih veličina na VN delu su ostvarena opisanim elektronskim modulom potopljenog u uljni medijum u kojem se nalaze transformator i diodni ispravljač. Prema Sl.8 ovim merenjem se dobijaju DC napon i struja na izlazu VN ispravljača. Signali koji se dobijaju na ovaj način su referisani prema analognoj masi koja je vezana na kraj za uzemljenje. Pored toga merene su i temperature u pojedinim tačkama magnetnog kola, namotaja primara i sekundara transformatora, kao i samog uljanog medijuma.

Obezbeđeno je i vizuelni monitoring napona i struje na izlazu ispravljača, elektrostatičkim voltmetrom 0-100kV tačnosti 1% i ampermetrom sa kretnim kalemom 0-1A tačnosti 0.5%.

U okviru testiranja mernog sistema je zadat postepeni porast napona na elektrodnom sistemu ESI od 0-60kV. Verifikacija VN merenja na ESI je data na Sl.7. Osciloskopski snimak porasta napona na izlaznim priključcima mernog modula  $V_{out} = V_{dc}$  je dat na Sl.7(a). Tabelarni prikaz izmerenih vrednosti napona na elektrostatičkom voltmetru i napona na izlazu mernog modula su dati na Sl.7(b).



(a)

NAPON NA EL.STATIČKOM VOLTMETRU (kV)	NAPON NA IZLAZNIM PRIKLJ. MODULA $V_{out} = V_{DC}$ (V)
3.00	5.02
35.20	10.30
53.50	13.30

(b)

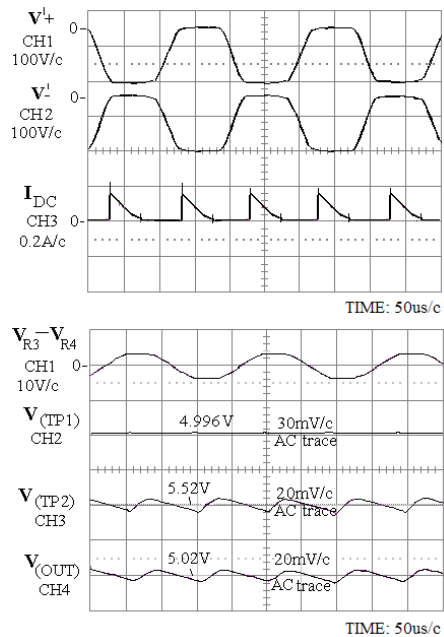
Slika 7. Verifikacija VN merenja na ESI; (a)-osciloskopski snimak porasta napona na elektrodama ESI, (b)-izmerene vrednosti napona na ESI i izlazni mernim priključcima modula u stacionarnom režimu

Posredstvom DSP upravljačkog kola IGBT konvertora ostvaren je postepeni porast napona na elektrodama ESI i to za tri vrednosti širine impulsa napona primara VNVF transformatora, odnosno za tri vrednosti koeficijenta radnog režima IGBT pretvarača tj. "duty cycle"- $\delta$ :  $\delta_1=5\%$ ,  $\delta_2=50\%$  i  $\delta_3=80\%$ . Učestanost IGBT pretvarača je podešena na 5kHz. Pri ovim uslovima su i dobijene vrednosti koje su prikazane na Sl.7. Za svaki od ovih opsega napona u stacionarnom režimu su prikazani talasni oblici izmerenih struja i napona na elektrodama jedne sekcije ESI postrojenja.

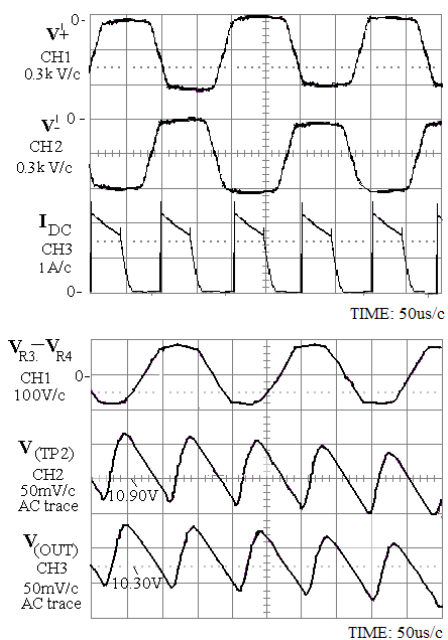
Na Sl.8 su prikazani osciloskopski snimci talasnih oblika struje i napona za slučaj koeficijenta radnog režima IGBT pretvarača tj. "duty cycle"-  $\delta_1=5\%$ . Uspostavljen je napon od 3kV na elektrodama ESI. Napon na izlaznim priključcima mernog modula je iznosio 5.02V.

Na Sl.9 su prikazani osciloskopski snimci talasnih oblika struje i napona za slučaj koeficijenta radnog režima IGBT pretvarača tj. "duty cycle"-  $\delta_2=50\%$ . Uspostavljen je napon od 35.2kV na elektrodama ESI. Napon na izlaznim priključcima mernog modula je iznosio 10.30V.

Pored ovih merenja su izvršena merenja u stacionarnom režimu pri čemu je naponskim PWM impulsima IGBT



Slika 8. Osciloskopski snimci u karakterističnim test tačkama mernog modula u stacionarnom režimu pri naponu od 3kV na elektrodama ESI; koeficijent radnog režima IGBT pretvarača  $\delta_1=5\%$ .

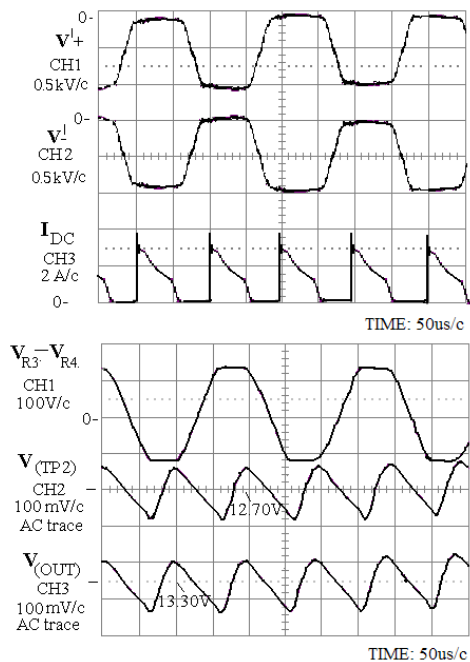


Slika 9. Osciloskopski snimci u karakterističnim test tačkama mernog modula u stacionarnom režimu pri naponu od 35.2kV na elektrodama ESI; koeficijent radnog režima IGBT pretvarača  $\delta_2=50\%$ .

Na Sl.10 su prikazani osciloskopski snimci talasnih oblika struje i napona za slučaj koeficijenta radnog režima IGBT pretvarača tj. "duty cycle"-  $\delta_3=80\%$ . Uspostavljen je napon od 53.5kV na elektrodama ESI. Napon na izlaznim priključcima mernog modula je iznosio 13.30V.

Pored ovih merenja su izvršena merenja u stacionarnom režimu pri čemu je naponskim PWM impulsima IGBT

pretvarača podešen opseg promene napona na opterećenju u opsegu 0-60kV. Merene su srednje vrednosti napona i struje ESI. Dobijene vrednosti su sredene tabelarno, kao što je prikazano u Tabeli I.



Slika 10. Osciloskopski snimci u karakterističnim test tačkama mernog modula u stacionarnom režimu pri naponu od 53.5kV na elektrodama ESI; koeficijent radnog režima IGBT pretvarača  $\delta=80\%$ .

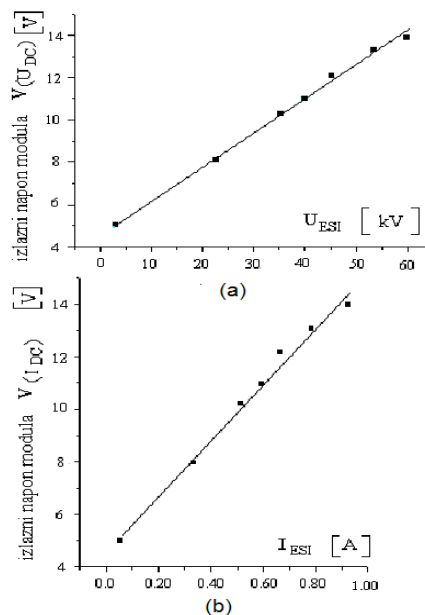
Napon na ESI izmeren elektrostatičkim voltmetrom (kV)	Napon $V(V_{DC})$ izmeren na priključcima mernog modula (V)	Napon $V(I_{DC})$ izmeren na priključcima mernog modula (V)	Struja $I_{DC}$ izmerena na ampermetru sa kretnim kalemom (A)
3.00	5.02	5.05	0.05
22.50	8.10	8.00	0.33
35.20	10.30	10.25	0.51
40.00	11.05	11.00	0.59
45.25	12.10	12.20	0.66
53.50	13.30	13.10	0.78
60.00	13.90	14.00	0.92

Tabela I- Prikaz rezultata merenja pri testiranju elektronskog mernog modula za merenje struje i napona ESI

Na osnovu tabelarno sredenih rezultata su prikazane zavisnosti  $V(V_{DC}) = F1(U_{ESI})$  i  $V(I_{DC}) = F2(I_{ESI})$  grafički kao što je prikazano na Sl.11.

Sa ovih grafičkih zavisnosti se vidi da se postiže veoma dobra linearnost mernog elektronskog modula za merenje napona i struje ESI.

Takođe na osnovu prethodno predstavljenih eksperimentalnih rezultata i rezultata merenja napona i struje ESI uočava se približno linearna zavisnost izlaznog napona ESI u zavisnosti od koeficijenta radnog režima IGBT pretvarača tj. "duty cycle"-  $\delta$  (%).



Slika 11. Grafički dobijene zavisnosti izmerenih naponskih signala mernog elektronskog modula za merenje napona i struje ESI, (a)- zavisnost  $V(V_{DC}) = F1(U_{ESI})$ , (b)-zavisnost  $V(I_{DC}) = F2(I_{ESI})$

## V. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljeno jedno moguće rešenje VNVF merenja struje i napona. Predstavljeno je eksperimentalno kolo za njegovo testiranje kao i niz eksperimentalnih rezultata i prenosne karakteristike struje i napona ESI.

Razvijeni modul ima mogućnost primene na VNVF postrojenjima ESI. Njegova primena se odnosi na sisteme za merenje i akviziciju veličina na VN delu ESI (napona i struje), ali i kao integralni deo povratne sprege VNVF digitalnih kontrolera za regulaciju napona, struje i broja preskoka u vremenu na elektrodnim sistemima elektrostatičkih izdvažača kao i u sistemima energetske pretvarača za napajanje elektro-filterskih postrojenja nezavisno od tipa postrojenja (čeličane, cementare, elektrane i sl. postrojenja).

Modul je prvenstveno namenjen za merenja u regulacionim krugovima u kolima ESI i kontinualni monitoring trenutnih vrednosti napona i struja na elektrodama ESI.

## ZAHVALNICA

Rad predstavlja jedan od rezultata projekta TR33022 koje je finansijski podržalo Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije, za period 2011-2015.

Autori se zahvaljuju anonimnim recenzentima čije su korisne sugestije doprinele poboljšanju kvaliteta rada.

## LITERATURA

- [1] K. Parker, 'Electrical operation of electrostatic precipitators, The Institution of Electrical Engineers-IEE, London, 2003.
- [2] N.V.P.R Durga Prasad, T.Lakshminaray, J.R.K Narasimham, T.M.Verman and C.S.R Kirshnam Raju, "Automatic Control and

- Management of Electrostatic Precipitator", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.35, No.3, May/June 1999, pp.561-567.
- [3] P.Boyle, G.Paradiso, P.Thelen, "Performance Improvements From Use of Low Ripple Three- Phases Power Supply for Electrostatic Precipitator", Proceedings of American Power Conference-Vol.61-1, Illinois Institute of Technologys, Feb.1999., Chicago , USA.
- [4] Z.Stojiljković, Ž.Despotović, "Regulisani ispravljač za napajanje elektrostatičkih filtera", Zbornik XII simpozijuma Energetska elektronika – Ee'03, Vol. T1-2.1, pp.1-5, N.Sad, 5-7.XI. 2003.
- [5] Norbert Grass, "150kV/300kW High Voltage Supply with IGBT Inverter for Large Industrial Electrostatic Precipitator", Industry Applications Conference, 2007, 42<sup>nd</sup> IAS Annual Meeting of the 2007, pp. 808-811.
- [6] Norbert Grass, Werner Hartmann, Michael Klöckner, "Application Of Different Types Of High-Voltage Supplies On Industrial Electrostatic Precipitators", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 40, no. 6, pp. 1513-1520, Nov/Dec 2004.
- [7] P. Ranstad, C. Mauritzson, M. Kirsten, and R. Ridgeway, "On experiences of the application of high-frequency power converters for ESP energization," International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP 2004.
- [8] Sanbao Zheng and Dariusz Czarkowski, "High-Voltage High-Power Resonant Converter For Electrostatic Precipitator", in APEC Conf. Record 2003.vol. 2, pp. 1100-1104.
- [9] Ž.Despotović, S.Vukosavić, D.Arnautović, I. Stevanović "Visokofrekventno napajanje i njegov uticaj na kvalitet rada ESI", ELEKTROPRIVREDA, Vol.4, pp.132-143, Dec. 2008 (*in serbian*).
- [10] Z.Despotovic, S.Vukosavic, "High Frequency Control of Electrostatic Precipitator", PROCEEDINGS of the XIV International Symposium on Power Electronics, Vol.T4-3.6, pp.1-6, N.Sad 7.-9.XI.2007.
- [11] S.Vukosavic, Z.Despotovic, N.Popov, "Retrofit Power Supply of Electrostatic Precipitators on Thermal Power Plant-Morava", PROCEEDINGS of the XVI International Symposium of the Power Electronics, N.Sad 26-28.X.2011, Vol.T1-1.9, pp. 1-5.
- [12] S.Vukosavic, N.Popov, Z. Despotovic, "Power Electronics Solution to Dust Emissions from Thermal Power Plants", Serbian Journal of Electrical Engineering, Vol.7, No2, pp.231-252, November 2010.
- [13] S.Vukosavić, Ž.Despotović, "Retrofitno napajanje elektrostatičkih izdvažača čestica iz dimnih gasova na termoelektranama", TEHNIKA-Elektrotehnika, Vol.64, No4, pp. 597-605, 2011.
- [14] S.Dobričić, I.Stevanović, R.Prole, D.Jevtić, "Primena optike u merenju visokonaponskih veličina kod elektrostatičkih filtera", 29 Savetovanje YUKO Cigre-rad R B4-06, Zlatibor, 31 maj-06 jun 2009.
- [15] M.Koralun, "High Voltage Measurements in Electrostatic Precipitator Energizing Circuit", *Journal of Electrostatics*, Vol.23, April 1989, pp.293-301. Special Issue Electrostatics 1989.

#### ABSTRACT

Electrostatic precipitation is one of the most effective ways of filtration and separation of solid particles on thermal power plants and energy plants. The efficiency of these plants is determined by the quality of the voltage control and the corona detection on the electrode system of electrostatic precipitator (ESP).

The operation of ESP is inconceivable without the use of power converters that usually provide high voltage to the electrode system in the range of 0kV-100kV, typically, from the three or two-phase mains supply 3x400V, 50Hz or 400V, 50Hz, respectively. Regardless of whether it is a thyristor converters 50Hz or high-frequency transistor converter (5kHz-10kHz) it is necessary to reliably and accurately measure the voltage and current on the high voltage electrode precipitator system, in order to achieve more efficient operation and better monitoring the breakdown voltage border.

The paper discusses the specifics of high-voltage high-frequency (HVHF) measuring on the electrostatic precipitator electrode system used in thermal power plants. Also in the paper is given a concrete solution of the measuring system and the obtained experimental results.

#### **SPECIFICS OF HIGH-VOLTAGE HIGH-FREQUENCY MEASUREMENTS ON ELECTROSTATICS PRECIPITATOR ELECTRODE SYSTEM IN THERMAL POWER PLANTS**

Miloš R. Nedeljković, Željko V. Despotović