

SAVREMENI ELEKTROSTATIČKI IZDVAJAČI

Željko Despotović, *Institut „M.Pupin“, Beograd, Srbija*
Slobodan Vukosavić, *Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija*
Miroljub Bakić, *Institut „N.Tesla“, Beograd, Srbija*

Rezime

Nove tehnologije za uklanjanje zagađivača iz otpadnih gasova, koji potiču od strane industrijskih postrojenja i termoelektrana, obezbeđuju sredstva za uklanjanje CO_x , NO_x , 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 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 kontinualnu kontrolu zagađenja. Neophodna je automatizovana kontrola opreme, bez potrebe za intervencijom operatera. Istraživački ciljevi o ovoj oblasti uključuju potrebu zadovoljenja ekoloških propisa, imajući u isto vreme potrebu kontrole gubitaka snage i ukupne potrošnje energije, kako bi se postigli ciljevi energetske efikasnosti. U ovom radu su prikazani pregledno problemi koji se odnose na performanse savremenih elektrostatičkih izdvajača kao i pregled trenutno raspoloživih tehnologija i rešenja. Eksperimentalni rezultati su dobijeni na elektrofiltarskom postrojenju na TE „Morava“– Svilajnac, na kojem je u realnim eksploatacionim uslovima izvršeno poređenje klasičnog 50Hz–nog sistema i visokofrekventnog sistema napajanja.

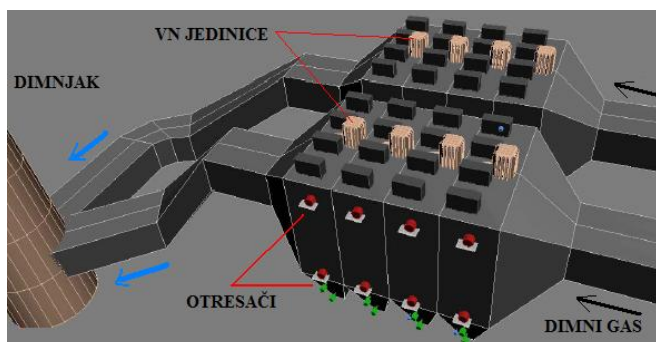
1.Uvod

Snažan zamah proizvodnje električne energije poslednjih decenija, na bazi sagorevanja fosilnih goriva, a naročito uglja, povećao je interesovanje društva za moguće posledice ovog razvoja i to naročito na one koje proističu iz emisije znatnih količina materija štetnih po čoveka, biljni i životinjski svet.

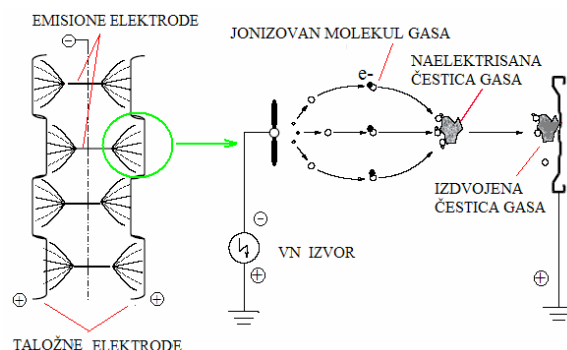
Proizvodnja električne energije u termoelektranama (TE), proizvodnja toplotne energije u gradskim toplanama ali i u industrijskim postrojenjima, uslovljena je korišćenjem ugljeva, najčešće lignita niske kalorične moći. Stoga su najveći izvori emisije štetnih materija u atmosferi velika kotlovska ložišta TE i toplana, postrojenja cementara, metalurgije, čeličane i sl. Pri sagorevanju čvrstih goriva, uporedo sa oksidima sagorljivih elemenata (ugljenika, vodonika i sumpora), u atmosferu dospevaju čestice pepela, nesagorelog uglja, oksidi azota, gasovi na bazi isparljivih organskih jedinjenja, gasovi na bazi policikličnih aromatičnih hidrokarbonata, teški metali od kojih dominiraju živa (Hg) i njena jedinjenja, kao i drugi polutanti u manjim količinama. Emisija ovih štetnih materija pri sagorevanju čvrstih goriva zavisi od mineralnog sastava goriva, načina sagorevanja, tipa ložišta i efikasnosti njihovog izdvajanja. Tipično za ugalj donje ogrevne moći od 25MJ/kg procentualni sastav otpadnih materija je : ugljena prašina 62%, pepeo 13%, vlaga 9%, kiseonik 9%, vodonik 4%, azot 1.5%, sumpor 1% i ostatak teški metal i gasovi fluor i hlor. Tipične vrednosti emisije čvrstih čestica na izlazu kotlova na većini termoblokova EPS-a se kreću u opsegu 20-40g/m³.

Izdvajanjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje negativni uticaj otpadnih materija, koje nastaju kao produkt sagorevanja u pomenutim postrojenjima. Svetske norme koje se sve više prihvataju i kod nas zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od 50mg/m³. I pored značajnog efekta, izdvajanje čvrstih materija nije dovoljno da zadovolji sve potrebne zahteve zaštite

životne sredine. Kao što je rečeno značajan uticaj na zagađenje imaju sumpor koji zajedno sa kiseonikom formira štetni gas SO_2 . Slično važi i za azot koji sa kiseonikom formira NO_x . Pošto treba očekivati neprekidno smanjenje GVE u bliskoj budućnosti, pravi je trenutak za razmatranje prihvatljivih i perspektivnih tehnologija za smanjenje emisije pomenutih polutanata.



Sl.1. Izgled tipičnog ESI postrojenja sa dve grane i četiri sekcije



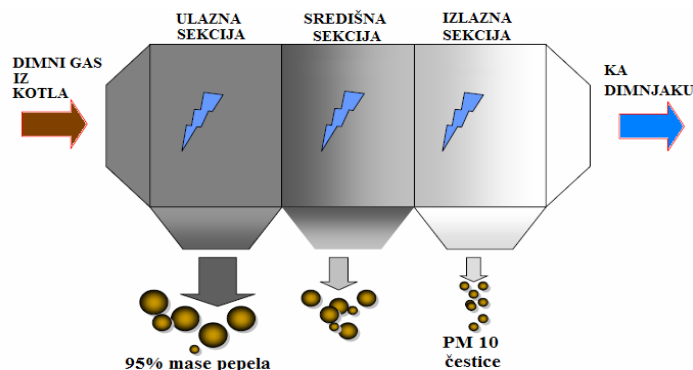
Sl.2. Izgled taložne komore ESI; mehanizam naelektrisanja čestica

Sprečavanje rasipanja čestica ugljene prašine i letećeg pepela iz dimnjaka pomenutih postrojenja, odnosno njihova "kolekcija" se ostvaruje *elektrostatičkim precipitatorima*, poznatijim popularno kao *elektrostatički izdvajачи* (ESI). Jedno tipično ESI postrojenje je prikazano na Sl.1. Pored izdvajanja čestica, u novije vreme ESI su optimizovani i za odvajanje taložnih čvrstih produkata praha sastavljenog od submikronskih čestica sulfata i nitrata (produkti odsumporavanja i denitrifikacije), kao i u sistemima reaktora sa neuravnoteženom niskotemperaturnom plazmom (NTP) i elektrokatalitičkom oksidacijom.

Odvajanje svih pomenutih tipova čvrstih produkata se ostvaruje jakim elektrostatičkim poljem koje se formira u taložnoj komori kao što je prikazano na Sl.2. U taložnoj komori nalaze se dve vrste elektroda: taložne i emisione, kao i uređaji za otresanje izdvojenih čestica sa taložnih elektroda.

Taložne elektrode priključuju se na pozitivni, a emisione na negativni pol izvora jednosmernog visokog napona (VN). Usled njegovog uticaja dolazi do naelektrisanja čestica pepela i to *difuzijom* i *efektom polja* [1-2]. Naelektrisane čestice se, pod dejstvom električnog polja kreću ka taložnim elektrodama i na njima se zadržavaju. Sa elektroda se vrši periodično otresanje u levkove odakle se izdvojene čestice kontinualno odvođe.

Emisione elektrode se dovode pod napon od tipično -50kV do -100kV. Negativna korona na emisionim elektrodama stvara jonizovane čestice. Ultra fine čestice prašine (prečnika $D < 1\mu\text{m}$) se naelektravaju difuzijom, dok se PM čestice i krupnije ($D > 1\mu\text{m}$) naelektravaju efektom polja. Delovanjem električnog polja ostvaruje se migracija čestica pepela prema taložnoj elektrodi brzinom 10-20cm/s.

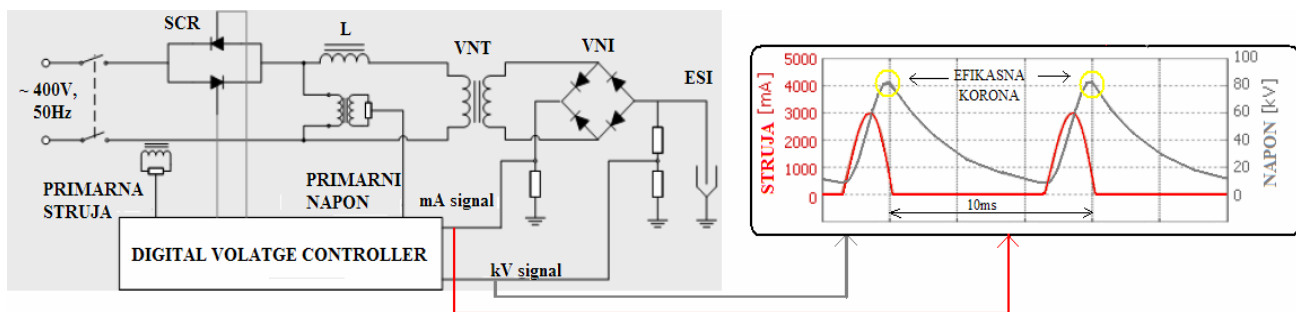


Sl.3. Izgled jedne grane ESI postrojenja sa tri sekcije

Tipičan izgled jedne trosekcijske grane ESI postrojenja je dat na Sl.3. Čestice dimnog gasa koji dolazi iz kotla, koje su ujedno i najvećeg prečnika, se izdvajaju u okviru ulazne sekcije. Treba napomenuti da se u okviru ulazne sekcije izdvaja oko 95% ukupne mase letećeg pepela i čađi. Preostale čestice su manjeg prečnika i one se izdvajaju u središnjoj sekciji, dok se one najsitnije tipa PM10 izdvajaju na izlaznoj sekciji. Broj preostalih čestica je veoma veliki, ali je njihova masa veoma mala.

2. Konvencionalno napajanje ESI

Sistem ESI pored taložnih komora sadrži i ispravljačke VN jedinice sa odgovarajućim uređajima, kojima se ostvaruje potpuna kontrola visokog napona. Ispravljačka VN jedinica za napajanje ESI, kao što prikazuje Sl.4, 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 faznoj kontroli [3-5]. Ulazno napajanje je obično međufazno 400V, 50Hz. Regulator kontroliše napajanje ESI posredstvom VNT i odgovarajućeg VNI. Diodnim VNI primenjenim na sekundaru VNT proizvode se veoma visoki naponi jednosmernog nivoa. Valovitost toga napona je relativno velika i zavisi od kapacitivnosti opterećenja odnosno ekvivalentne kapacitivnosti ESI. Kontrola izlazne snage i napona se postiže kontrolom ugla paljenja tiristorske grupe koja se nalazi na primarnoj strani VNT.



Sl.4. Konvencionalno 50Hz-no napajanje ESI

Kod konvencionalnog SCR napajanja efikasna korona je prisutna pri vršnim vrednostima napona, odnosno svega 1-2ms na svakih 10ms kao što prikazuje Sl.4. Dugi intervali dejonizacije nakon varničenja smanjuju efikasnost izdvajanja. Pored ovoga, kod uspostavljanja luka struja se ne može prekinuti tokom jedne mrežne poluperiode, do komutacije tiristora. Energija luka dobija se iz izvora zahvaljujući primarnoj struji koja postoji sve do komutacije tiristora. Osim ovoga luk se snabdeva i energijom akumuliranom u ekvivalentnoj kapacitivnosti filtra (tipično 50-100nF). Tipična energija luka je 150-200J. Vreme potrebno za evakuaciju usijanih i jonizovanih čestica gasa (tzv. *dejonizacija*) je tipično 40-100ms. Tokom dejonizacije napajanje je isključeno. Velika energija luka degradira kako taložne tako i emisije elektrode.

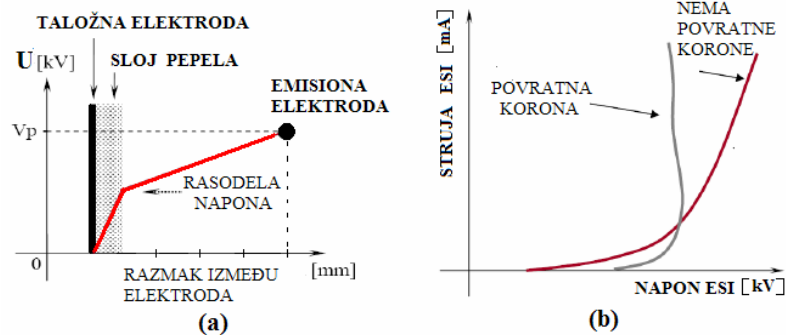
Pored ovih problema konvencionalno dvofazno 50Hz-no napajanje se odlikuje lošim faktorom oblika linijske struje, velikom reaktivnom te stoga i prividnom snagom, kao i malim stepenom korisnog dejstva. Trofazno 50Hz-no napajanje i primena punoupnjivog SCR mosta i trofaznog VN transformatora daje bolji faktor oblika linijskih struja ali je znatno komplikovanije upravljanje[6] .

3. Efekti povratne korone

Usled dugotrajnog izdvajanja čestica dimnog gasa na taložnim elektrodama se formira sloj pepela, koji kada dostigne odgovarajuću debljinu, nepovoljno utiče na dalje izdvajanje. Ključni efekat

koje se pri tome javlja je povratna korona, koja postaje dominantna pogotovu kada se radi o slabo provodnom pepelu [1-2].

Efekat povratne korone u taložnoj komori je prikazan na Sl.5. U realnim eksploatacionim uslovima sloj pepela od 10mm ima pad napona od 8kV. Slabo provodni pepeo rezultuje velikoj jačini polja i velikim padom napona. Pored ovoga narušava se homogenost električnog polja što je posledica neravnomerne raspodele napona između taložnih i emisionih elektroda kao što pokazuje Sl.5(a). Na taložnoj elektrodi kod pepela srednje provodnosti (oko $10^{12}\Omega\text{m}$) stvaraju se krateri sa lokalnim žarenjem pepela, jonizacijom i izbacivanje materijala u međuelektrodni prostor. Stoga se pored efekta neravnomerne raspodele polja javlja efekat struje u među elektrodnom prostoru (tzv. *električni vetar*).



Sl.5. Efekat povratne korone u taložnoj komori; (a) raspodela potencijala, (b) I-V karakteristika

Pozitivni joni na taložnim elektrodama smanjuju probojni napon kao što je prikazano na Sl.5(b). Posledica ovoga je smanjenje brzine migracije čestica. U izlaznoj sekciji brzina migracije može biti redukovana sa 20cm/s na svega 2-3cm/s. Kao posledica ovih efekata je i značajno umanjeno izdvajanje čestica.

Povratna korona na emisionim elektrodama smanjuje efekat korone i jonizaciju. To umanjeno može biti i do 40%. Pepeo male provodnosti se teže jonizuje usled male provodnosti unutar samih čestica dok se u nataloženim slojevima javlja povratna korona. Smanjena provodnost umanjuje zasićeno naelektrisanje na 1/3. Većina ovih problema kao i povećanje efekata filtracije se mogu rešiti uvećanjem ukupne površine elektroda i zapremine filtra. Međutim ovo rešenje je ekonomski veoma nepovoljno.

Zone/sekcije ESI imaju čestice različitih prečnika, provodnosti, sa drugačijom efikasnošću naelektrisanja. U izlaznoj sekciji se talože PM10 i ultrafine čestice, te je ekvivalentna otpornost veća, usled čestih prelazaka struje iz jedne u drugu česticu. Radna temperatura je u realnim uslovima oko 150°C, što dodatno dovodi do povećanja otpornosti.

Prilagođenjem napajanja proces izdvajanja se može optimizovati, a brzina migracije povećati. Primena adekvatnog napajanja omogućava uvećanje ostvarive srednje vrednosti napona, povećanje srednje vrednosti struje, smanjenje potrebne površine i težine elektroda, smanjenje energije luka i značajno skraćivanje intervala dejonizacije (beznaponske pauze). Adekvatno napajanje daje veće migracione brzine, čime se stvara veći i čvršći aglomerat prašine na elektrodama izlazne sekcije što uvećava efikasnost izdvajanja PM10 čestica.

4. Mere za suzbijanje povratne korone

Kao glavna mera za suzbijanje nepovoljnih efekata povratne korone se nameće povećanje provodnosti dimnog gasa. Provodnost se može povećati unošenjem 30-90ppm vode u struju gasa, SiO_2 ili amonijaka po cenu efekta korozije na čelične elemente. Pored ovoga provodnost se može povećati pregrevanjem i/ili hlađenjem gasa.

Povratna korona se značajno može redukovati korišćenjem intermitentnog napajanja sa dovoljnim trajanjem intervala isključenosti- tzv. *vreme dejonizacije*, u toku kojih se pozitivni joni mogu rekombinovati. Inteligentnom intermitencijom kao i metodom rane detekcije povratne korone, koje su detaljno opisane u [4], [7], migraciona brzina se može značajno uvećati (tipično sa 4-5cm/s na 10-15cm/s).

Impulsnim napajanjem ulaznih ESI sekcija, koje su najkritičnije sa stanovišta količine izdvojenog pepela i veličine čestica, se može značajno uvećati naelektrisanje čestica [8]. Potrebni parametri impulsnog napajanja su $\Delta t=5-10\mu s$, $\Delta I=5-7kA$, $U_{max}=200kV$. Neuzemljena rešetka u međuelektrodnom prostoru daje uravnoteženu raspodelu polja.

Primena visokofrekventnog visokonaponskog (VFVN) napajanja sa adaptivnom intermitencijom vođenom u skladu sa ranom detekcijom povratne korone pomoću parametarske estimacije spektra, daje najbolje rezultate. U slučaju primene VFVN napajanja na ulaznim sekcijama, čestice koje dolaze do izlazne sekcije su dovoljno naelektrisane, tako konstruktivno gledano, sve elektrode u ovoj sekciji mogu biti jednostavne konstrukcije (pločaste).

Pored prethodno pomenutih mera za značajno smanjenje povratne korone i postizanje efikasnijeg izdvajanja, neophodno je optimizirati sistem za otresanje kako taložnih tako i emisionih elektroda kao što je dato u [7].

Ulazna, središnja i izlazna sekcija ESI grane imaju različite veličine provodnosti i masu čestica, pa zahtevaju i različito napajanje i upravljanje. Drugim rečima potrebno je obezbediti optimalno napajanje različitih ESI zona. Ulazna sekcija/zona ESI se karakteriše značajnom koncentracijom i veoma velikom masom čestica. Kod dobro podešenog ESI ova zona/sekcija izdvaja preko 90% ukupne mase letećeg pepela. Prečnik čestica je relativno veliki, otpornost mala, tako da se povratna korona ne javlja. Preskoci su veoma česti. Optimalno napajanje je VFVN u kontinualnom režimu rada. U izlaznoj sekciji/zoni ESI se većinom izdvajaju ultra-fine i PM10 čestice. Povratna korona na emisionoj elektrodi umanjuje stvaranje negativnih jona, povratna korona na taložnoj elektrodi stvara pozitivne jone koji umanjuju brzinu migracije. Jednovremeno deformacije električnog vetra, neuniformno polje i umanjeње polja u međuelektrodnom prostoru značajno umanjuju izdvajanje. VFVN napajanje je neophodno kako bi se stvarao kompaktan aglomerat pepela i tako smanjio povratak u struju gasa. Adaptivna intermitencija je neophodna radi relaksacije povratne korone.

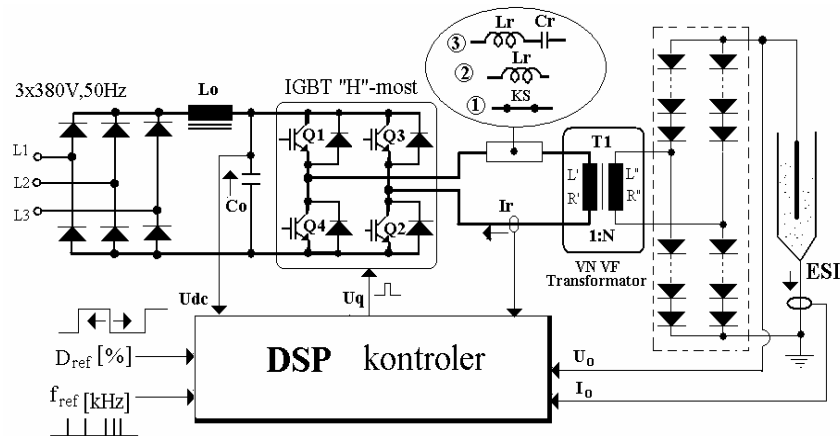
Na osnovu svega do sada rečenog kao moguće topologije napajanja ESI se nameću VFVN napajanje sa primarnom učestanošću 10-20kHz, VF transformatorom i VFVN ispravljačem u VN delu[9-11]. Impulсно napajanje stvara kratkotrajne naponske impulse iznad praga proboja, tako da ne postoji mogućnost da se razvije strimer pražnjenje[8]. VFVN napajanje sa naizmeničnim izlaznim naponom učestanosti 10-20kHz, pogodno je za stvaranje dielektričnog barijernog pražnjenja (DBD), u procesu proizvodnje hladne plazme koja se unosi u struju gasa.

5. Visokofrekventno napajanje ESI

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 tiristorsku kontrolu, koja se već dugo godina koristi 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 [10-12].

Jedna tipična topologija VF napajanja ESI je data na Sl.6. U ovim aplikacijama VNT mora biti projektovan tako da se napaja iz jednosmernog naponskog izvora preko "H-mosta" sa IGBT

prekidačima. Ovim je moguće postići značajnu fleksibilnost koristeći strategiju naponske kontrole tj. kontrolu širine impulsa [9-10].



Sl.6. VF prekidački izvor napajanja za pobudu ESI

Izlaz IGBT pretvarača se direktno vezuje na primar VN VF transformatora (opcija -1), preko prigušnice L_r (opcija-2) i preko rezonantnog L_r - C_r kola (opcija-3). Rezonantni pretvarač je jako povoljan sa stanovišta naponskog naprezanja transformatora pošto su naponske ivice značajno zaobljene u odnosu na *opcije 1 i 2*. Način rada jednog takvog pretvarača je opisan detaljno u referencama [10], [12].

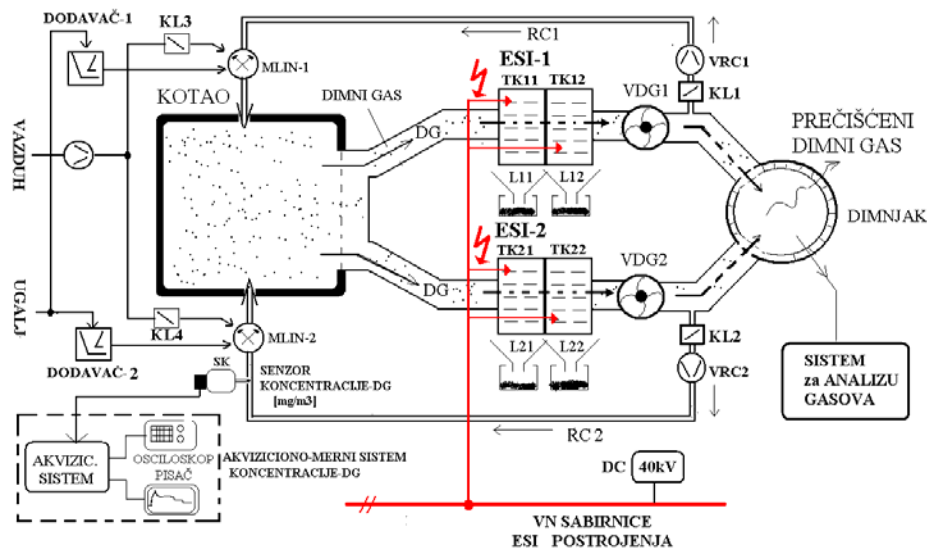
Nekoliko je poboljšanja koja se mogu očekivati od usvajanja VF prekidačkog rada. VF prekidački rad dozvoljava mnogo *precizniju kontrolu* radnih parametara ESI (kao što su napon i struja), od konvencionalnog 50Hz-*nog* tiristorskog napajanja. VF napajanjem je moguće ostvariti *znatno brži porast napona* ESI i *znatno brži odziv* na promene opterećenja u odnosu na konvencionalno tiristorsko 50Hz-*no* napajanje. Osim ovoga, visoka učestanost obezbeđuje *značajno smanjenje veličine i težine* VN transformatora. Ova redukcija vodi kompaktnijem dizajnu uz *minimiziranje cene* ugradnje i održavanja. Visoka učestanost takođe obezbeđuje mnogo veću reaktansu transformatorskog jezgra i shodno tome bolju efikasnost izvora napajanja. Naročita prednost VF napajanja ESI se odnosi na *sposobnost modulacije izlaznog napona*. U nekim aplikacijama, mogućnost ostvarenja pulsacija izlaznog DC napona od jednog naponskog nivoa do drugog, pri specificiranom i podešljivom intenzitetu, vremenu vođenja i periodi, ima znatne prednosti koje se odnose na poboljšanje punjenja čestica prašine/gasa i njihovo efikasnije sakupljanje u ESI. Sve do sada pomenute činjenice predstavljaju značajan motiv za detaljnu analizu i proučavanje VF napajanja ESI, kao najpogodnijeg načina za optimizaciju njihovog rada.

6. Konkretna realizacija VF postrojenja za napajanje ESI

U nastavku će biti opisano jedno konkretno realizovano VFVN postrojenje ESI na TE "Morava". Tehnološko postrojenje za prečišćavanje dimnih gasova na TE „Morava“ je prikazano na Sl.7. Njega čine ukupno četiri sekcije elektrostatičkih izdvajaa koje su tako raspoređene da u se u svakoj od potisnih grana dimnog gasa-DG nalaze po dva sistema ESI-1 i ESI-2, a svaki od njih sadrži po dve taložne komore TK11, TK12 i TK21,TK22 respektivno. Ustvari, svaki od ovih sistema je opremljen sistemom taložnih i emisionih elektroda kao i njima pripadajućim mehanizmima koji služe za njihovo otresanje.

Otresanjem se sa elektroda odvajaju nagomilane i nataložene čestice iz dimnog gasa u taložne levke (L11 i L12 za prvi sistem i L21,L22 za drugi sistem) koji se nalaze neposredno ispod svake od taložnih komora ESI. Neprečišćeni dimni gas (DG) sa veoma viskom koncentracijom aero-polutanata i čvrstih čestica ($> 3000\text{mg/m}^3$) dolazi na ulazne taložne komore TK11 i TK21 direktno iz glavnog

kotla (ložišta). Stoga su ove komore jako opterećene. Nakon odvajanja na njima na izlazne sekcije dolazi DG znatno niže koncentracije tako da su taložne komore TK12 i TK22 manje opterećene. Na njihovom izlazu su postavljeni ventilatori za odvođenje dimnih gasova VDG-1 za prvi, i VDG-2 za drugi sistem.



Sl.7. Prikaz tehnološkog postrojenja elektrostatičkih izdvajaača na TE „Morava“

Pomoću njih se prečišćeni DG najvećim delom odvodi do glavnog dimnjaka preko koga se ispušta u atmosferu, a jedan mali deo ovog gasa se vraća recirkulacionim vodovima RC1 i RC2 posredstvom odgovarajućih klapni (KL1 i KL2) i recirkulacionih ventilatora (VRC1 i VRC2) u mlinove kotla. Ovaj gas u recirkulaciji ustvari služi za sušenje smeše u mlinovima pošto je njegova temperatura reda veličine 120°C -140°C.

U toku ovih eksploatacionih ispitivanja je u recirkulacionom vodu je ugrađen senzor SK kojim se vrši merenje koncentracije dimnog gasa. Ovaj senzor je baziran na tribo-električnom efektu detaljno opisanom u [13]. Pretpostavljeno je da je koncentracija u recirkulaciji približno jednaka izlaznoj u dimnjaku. Pored ovoga je bilo tehnički najpovoljnije ugraditi senzor na tom mestu. Inače cilj ovih merenja je bio da se utvrde ne toliko apsolutne koncentracije, već relativni odnosi kao i relativna efikasnost izdvajanja VF u odnosu na konvencionalni 50Hz-ni sistem.

Na VN sabirnice 40kVDC su vezani izlazi energetskih pretvarača kojima se ostvaruju potrebni naponi. Prvobitno postrojenje ESI na TE „Morava“ je imalo na svakoj od četiri taložne komore po jedan pretvarački sistem 50Hz sa faznom kontrolom. U cilju poređenja 50Hz i VF napajanja je formirano novo postrojenje energetskih pretvarača čija je dispozicija prikazana na Sl.8. Pretvarači su vezani na zajedničke NN sabirnice 3x400V, 50Hz, ali preko dve trofazne merne grupe u *Aronovoj* sprezi: MG1 preko koje se napaja VF sistem i MG2 preko koje se napaja 50Hz-ni sistem. Na svakoj od ovih MG se očitavaju ukupna utrošena aktivna i reaktivna energija- E_{p1}, E_{p2} [kWh] i E_{q1}, E_{q2} [kVARh] za svaki od ovih sistema ponaosob.

Izbor tipa i konfiguracije napajanja ESI postrojenja se ostvaruje VN rastavljačima R1, R2, R3 i R4, kao što je prikazano na Sl.8. 50Hz-ni sistem je realizovan topologijom sa Sl.4. U sklopu VF sistema su realizovana tri tipa napajanja prema topologiji sa Sl.6.

Napajanje taložnih komora TK11 i TK12 je realizovan sa rezonantnim konvertorom NWL-1 i NWL-2, respektivno, čija je radna učestanost 10kHz. Između IGBT mosta i primara VFVN transformatora se postavlja jedno rezonantno kolo sa kondenzatorom C_r i prigušnicom L_r . Detaljan opis rada ovog rezonantnog pretvarača i karakteristični talasni oblici su dati detaljno u [10]. Taložna komora TK21 se napaja takođe VF energetskim pretvaračem sa H-mostom koga čine IGBT prekidači,

The diagram illustrates a power distribution system for a railway station, showing the connection between overhead contact lines (TK 11, TK 12, TK 21, TK 22) and substations (ESI-1, ESI-2). The system includes transformers (R1, R2, R3, R4) and various power electronic converters (VF, 50Hz, DBS 180, DS2000, ELEX-1, ELEX-2, ELEX-3, ELEX-4) connected to a common busbar system (L1, L2, L3). The busbar system feeds two energy storage units (MERNA GRUPA-1, MERNA GRUPA-2). The diagram also shows various electrical components like capacitors, inductors, and diodes.

7. Eksperimentalni rezultati

Figure 1 consists of two subplots, (a) and (b), showing the output of the VF system and the 50Hz-ri system. Both plots have a grid with a vertical center line. The y-axis is labeled 'CH1' and 'CH2' with a scale of 10kV/c. The x-axis is labeled 'TIME' with a scale of 10ms/c for (a) and 100ms/c for (b).

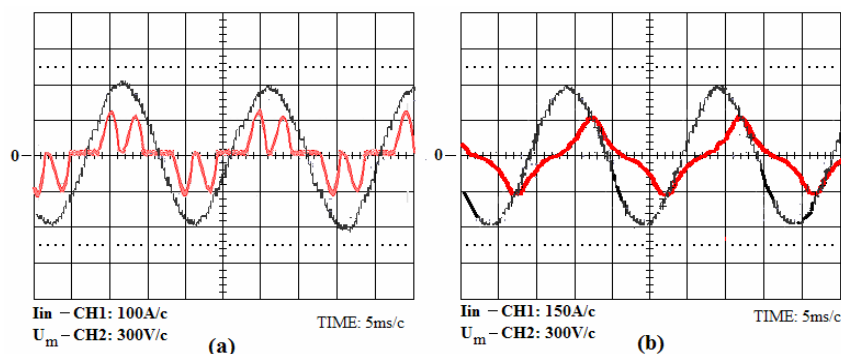
Subplot (a) shows a continuous waveform. The black trace (50Hz-ri system) is a periodic waveform with a peak-to-peak amplitude of approximately 10kV. The red trace (VF system) is a flat line at approximately 5kV. The scale is 10kV/c and 10ms/c.

Subplot (b) shows a transient response. The black trace (50Hz-ri system) is a periodic waveform with a peak-to-peak amplitude of approximately 10kV. The red trace (VF system) is a flat line at approximately 5kV. The scale is 10kV/c and 100ms/c.

Sl.9. Poređenje 50Hz i VF sistema napajanja ESI; (a)-kontinualni režim, (b)-režim sa preskokom

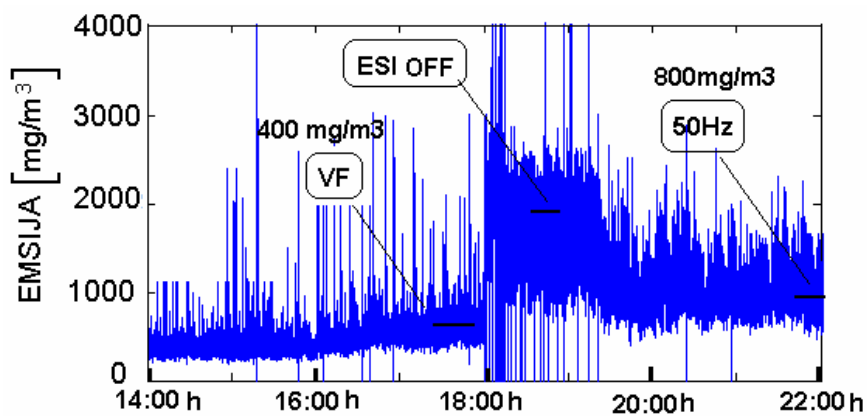
Na Sl.9 su prikazani osciloskopski snimci napona na elektrodama taložne komore TK11 za slučaj dva različita položaja rastavljača R1. U jednom položaju je priključen VF sistem, dok je u drugom položaju priključen 50Hz-ni sistem.

Na Sl.9(a) su prikazani talasni oblici napona u kontinualnom režimu bez preskoka, dok su na Sl.9(b) prikazani talasni oblici napona pri preskoku. Iz ovih snimaka se vidi da je talasnost izlaznog napona pri VF napajanju značajno manja u odnosu na 50Hz-ni sistem. Pored ovoga vreme reakcije na preskok, kao i vreme ponovnog uspostavljanja napona nakon dejonizacije od oko 120ms, je značajno manje u slučaju VF sistema napajanja, kao što pokazuje snimak na Sl.9(b).



Sl.10. Poređenje mrežne struje i mrežnog napona; (a)-VF napajanje, (b)-50Hz-nog napajanje

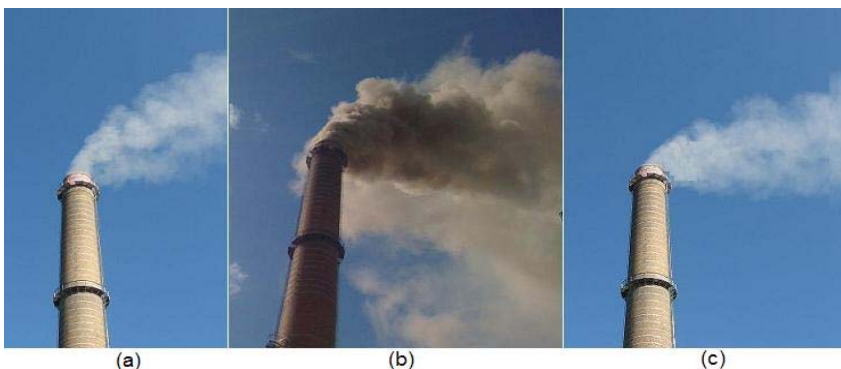
Na Sl.10 su prikazani osciloskopski snimci ulazne mrežne struje i mrežnog napona za slučaj VF i 50Hz-nog napajanja. Na Sl.10(a) se uočava da je faktor snage pri VF napajanju blizak jedinici, odnosno da je reaktivna snaga koju ovaj sistem uzima iz mreže jako mala. Na Sl.10(b) se uočava da je pri 50Hz-nom napajanju faktor snage značajno manji, te da je reaktivna snaga koju ovaj sistem uzima iz mreže značajno veća u odnosu na VF sistem. Ovo je takođe potvrđeno i merenjima aktivne i reaktivne energije na mernim grupama iz kojih je dobijeno da je faktor snage u prvom slučaju oko 0.98 dok je u drugom slučaju on iznosio 0.57.



Sl.11. Uticaj VF i 50Hz-nog sistema napajanja na emisiju čvrstih čestica

Na Sl.11 je prikazana koncentracija čestica u DG u recirkulacionom vodu RC2, za posmatrani period od 8h rada postrojenja ESI. Senzor koncentracije DG je postavljen na vodu koji ulazi u kotao. Mesto ugradnje senzora je odabrano tako da nema krivina u recirkulacionom vodu na rastojanju $h(+)$ ispred i $h(-)$ iza mernog mesta, odnosno $h(+)=h(-)=5D$, gde je D prečnik recirkulacionog cevovoda. Ovim je izbegnuta turbulencija DG tako da se može uzeti da je strujanje DG laminarno. Obzirom da je 5-10% izlaznog dimnog gasa u ovom vodu, pretpostavljeno je da je izmerena koncentracija merodavna i da može biti korišćena kao kriterijum za poređenje VF i 50Hz-nog sistema.

U periodu od 14:00h do 18:00h je radio VF sistem napajanja. Izmerena koncentracija je iznosila oko 400mg/m^3 . U periodu od 18:00h do 18:20h su bili isključeni oba sistema napajanja. U ovom periodu su izmerene koncentracije bile iznad gornje granice mernog opsega od 2000mg/m^3 . Počev od 18:20h je bio uključen 50Hz-ni sistem koji je radio do 22:00h. Izmerena koncentracija u ovom slučaju je bila dvostruko veća, u odnosu na slučaj VF napajanja, odnosno 800mg/m^3 .



Sl.12. Vizuelno praćenje izlaznog dima; (a)-VF napajanje, (b)-isključeni ESI, (c)- 50Hz-no napajanje

Kvalitativni prikaz DG dobijen vizuelnim praćenjem na izlazu iz dimnjaka za prethodno opisane slučajeve je dat na Sl.12, gde su razlike dobijene merenjima evidentne.

8. Zaključak

U radu su pregledno dati problemi u radu konvencionalnih ESI sistema, kao i načini za njihovm prevazilaženjem korišćenjem savremenih VF sistema napajanja. Optimizacijom VF napajanja ESI se mogu postići značajna poboljšanja u smislu izdvajanja čestica, energetske efikasnosti i minimiziranja dimenzija i cene samog izdvačkog postrojenja, u odnosu na postojeće 50Hz-ne sisteme bazirane na faznoj kontroli. U radu su predstavljeni rezultati eksploatacionih ispitivanja na postrojenju ESI na TE "Morava". Na konkretno realizovanom sistemu uočene brojne prednosti koje nudi VF sistem napajanja u odnosu na konvencionalni 50Hz. Eksperimentalnim rezultatima je pokazano da se korišćenjem VF napajanja mnogo *preciznija kontrola* struje i napona ESI. Pored toga kod VF napajanja je moguće ostvariti *veoma brz odziv* pri pojavi preskoka (korone). Značajno poboljšanje VF sistema se ogleda i u *značajno boljem faktoru snage*, koji je u ovom slučaju blizak jedinici. Nakon ovoga su prikazani rezultati koji se odnose na merenje koncentracija čestica DG u povratnom vodu ESI postrojenja. Merenjima je pokazano je da se VF napajanjem postižu *značajno bolji efekti u smanjenju emisije čestica*.

VF pretvarači korišćeni u ovom sistemu su projektovani na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu-Laboratorija za mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima. Ostali rezultati vezani za ovaj razvoj su dostupni na adresi WEB sajta <http://ddc.etf.bg.ac.yu>. Ceo ovaj projekat je finansijski podržan delom od Ministarstva za nauku Republike Srbije kroz Projekat tehnološkog razvoja TR-21007 - "Razvoj i primena visokonaponske visokofrekventne opreme za otklanjanje aerozagađenja u industriji i elektroprivredi", a delom od strane P.D TE "Nikola Tesla"- Obrenovac.

LITERATURA

- [1] K. Parker, "Electrical operation of electrostatic precipitators", The Institution of Electrical Engineers, London, 2003.
- [2] S.Vukosavic, I.Cvetkovic, I.Stevanovic, D.Arnautovic, "High Frequency Power Supply For Electrostatic Precipitators", XIV International Symposium on Power Electronics – Ee'07, N.Sad, 7-9 November, 2007, Vol. IP1-1, pp.1-10.

- [3] Z.Stojiljković, Ž.Despotović, "Regulisani ispravljač za napajanje elektrostatičkih filtera", *XII simpozijum Energetska elektronika – Ee'03*, N.Sad, 5-7 Nov. 2003, Vol. T1-2.1, pp.1-5.
- [4] Z.Despotovic, I.Cvetkovic, S.Vukosavic, "New Technology for Electrostatic Precipitator Control" PROCEEDINGS of the XIV International Symposium of the Power Electronics, N.Sad 7.XI-9.XI.2007, Vol.T4-3.5, pp. 1-6.
- [5] 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.
- [6] 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 Technology, Feb.1999., Chicago, USA.
- [7] I.Stevanović, A.Nikolić, I.Cvetković, S.Vukosavić, "Prednosti intermitentnog napajanja elektrostatičkog filtra u odnosu na kontinualno", *ELEKTROPRIVREDA*, Beograd, br.4, 2007, pp.59-367
- [8] C.Buccella, "Quasi-Static and Dynamical Computation of V-I Characteristics of a Dust -Loaded Pulse-Energized Electrostatic Precipitator", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.35, No.2, March/April 1999, pp.366-372.
- [9] John.C. Fothergill, Philip W.Devine and Paul W. Lefley "A Novel Prototype Design for a Transformer for High Voltage, High Frequency, High Power Use", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.16, No.1, January 2001, pp.89-98.
- [10] Ž. Despotović, S.Vukosavić, D.Arnautović, I. Stevanović, "Visokofrekventno napajanje i njegov uticaj na kvalitet rada elektrostatičkih izdvajča", *ELEKTROPRIVREDA*, Vol.4, pp.132-143, Decembar 2008.
- [11] Z.Despotovic, S.Vukosavic, "High Frequency Control of Electrostatic Precipitator" PROCEEDINGS of the XIV International Symposium of the Power Electronics, N.Sad 7.XI-9.XI.2007, Vol.T4-3.6, pp.1-6.
- [12] R.Reyes, B.Wallgren, A.Wramdemark, "A Novel and Versatile Switched Mode Power Supply for ESPs", *Proceedings of the International Conference-Electrostatic Precipitators*, 1998, Kyongju, Korea.
- [13] W.Averdieck, "Electrodynamic Technology for Particulate Monitoring", PCME Ltd., Tech.Article 13, issue 12/99.

THE MODERN ELECTROSTATIC PRECIPITATORS

ABSTRACT: The new technologies for removing pollutants from waste gasses, released by industry and thermal power plants (TPP), provide the means for removing CO_x, NO_x, sulfur and fine dust particles. These technologies impose very stringent requirements on the power supply. The choice of the high-voltage supply can play an important role in the optimization of electrostatic precipitators (ESP). Widely discussed, the environmental pollution problems are the outcome of the world wide increase in energy consumption and industrial growth. The overall amount of waste gasses has increased, including the emission of fine, 1 – 50 μm particles, particularly harmful and being a well known health risk. Therefore, both large industrial sites and the power plants require dust cleaning equipment and *on-line* pollution control. Automated control is required for the equipment to operate on its own, without the need for a continuous operator intervention. The research goals include the need to meet the environmental regulations, keeping at the same time the power losses and the overall energy consumption under control, in order to reach the energy efficiency goals. In this article, an overview of ESP performance problems are discussed, and the summary of available technologies and solutions are outlined. The experimental results were obtained in ESP plant on TPP "Morava"-Svilajnac. At this plant was comparing 50Hz and high frequency (HF) power supply systems in real exploitation conditions.