

# UREĐAJI ENERGETSKE ELEKTRONIKE ZA SMANJENJE EMISIJA ČVRSTIH ČESTICA NA TERMOELEKTRANAMA

Željko V. Despotović<sup>1</sup>, Slobodan N. Vukosavić<sup>2</sup>, Nikola Z. Popov<sup>2</sup>

*1-Institut Mihajlo Pupin, Univerziteta u Beogradu, Volgina 15, Beograd 11060,*

*2-Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar Kralja Aleksandra 73, Beograd 11000*

**Rezime:** Kotlovska postrojenja termoelektrana (TE) predstavljaju najozbiljnije zagađivače i ozbiljno ugrožavaju kvalitet vazduha. Ugalj u ložištu kotlova sagoreva u sprasenom stanju, pa se kao rezultat sagorevanja javljaju značajne količine ugljene prašine i letećeg pepela, koje su u procentualnom iznosu znatno veće u odnosu na ostale otrovne dimne gasove. Elektrostatičkim izdvajanjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje njihov negativni uticaj na ekosistem. Svetske norme, koje su prihvaćene i kod nas, zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od  $50\text{mg}/\text{m}^3$ , a u nekim zemljama, čak manje i od  $25\text{mg}/\text{m}^3$ . Veoma bitan element u postrojenjima elektrostatičkih izdvajča (ESI) koja se primenjuju na TE predstavljaju napojne jedinice relativno velike snage (50kW-150kW), koje se koriste za dobijanje kontrolisanog jednosmernog visokog napona (30kV-100kV) iz raspoloživog mrežnog napajanja  $3 \times 380\text{V}$  (400V), 50Hz. Na postrojenjima TE postoji potreba za korišćenjem više ovakvih napojnih jedinica, tako da ima smisla razmatrati i razvijati energetske efikasne topologije visokonaponskih uređaja energetske elektronike. Stoga je u ovom radu akcenat dat na primeni uređaja energetske elektronike za rešavanje problema elektrostatičkog izdvajanja. U radu su prezentirani primenjeni naučni rezultati na postrojenjima TE u poslednjih 10 godina (period 2005-2015).

**Ključne reči:** Energetska elektronika, tiristor, IGBT, elektrostatičko izdvajanje, termoelektrane, ekologija

## POWER ELECTRONIC UNITS FOR REDUCING EMISSIONS OF SOLID PARTICLES ON THERMAL POWER PLANTS

**Abstract:** The boilers of thermal power plants (TPP's) are the most serious pollutants and seriously threatening air quality. The coal in the combustion chamber of boilers burns in pulverized state, and as a result of their combustion develops significantly amounts of coal dust and fly ash, which are a percentage significantly higher compared to other toxic flue gases. By electrostatic precipitation of coal dust and fly-ash particles, is significantly reducing their negative impact on the ecosystem. The world standards, which are accepted in our country, requires emission limit values (ELV's), less than  $50\text{mg}/\text{m}^3$ , and in some countries, even less than  $25\text{mg}/\text{m}^3$ . A very important element in electrostatic precipitators (ESP's) plants, which shall apply to TPP, are the power supply units a relatively high power (100kW-150kW), which are used to obtain a controlled DC high voltage (30kV-100kV) converted from the mains power  $3 \times 380$  (400V), 50Hz. At the TPP, and there is a need to use more of these power supply units, so it makes sense to consider and develop energy efficient topologies of high voltage high power

units. Therefore, in this paper, emphasis was given to the application of power electronics units for solving problems of electrostatic precipitation. In the paper are presented the applied research results in the TPP's, for the last 10 years (the period 2005-2015).

**Key words:** Power electronics, thyristor, IGBT, electrostatic precipitations, thermal power plants, ecology

## UVOD

Proizvodnja električne energije u termoelektranama (TE), uslovljena je korišćenjem ugljeva, najčešće lignita, niske kalorične moći. Stoga su najveći aero-zagađivači velika kotlovska ložišta TE. Pri sagorevanju uglja, zajedno sa oksidima ugljenika, vodonika i sumpora, u vazduh dospevaju relativno sitne čestice pepela i čađi, koje imaju veoma negativan uticaj na celokupni ekosistem, a naročito na respiratorni sistem i zdravlje žive populacije. Emisija ovih štetnih čestica zavisi od mineralnog sastava uglja, načina sagorevanja, tipa ložišta i efikasnosti njihovog izdvajanja (filtracije).

Ugalj u ložištu kotlova sagoreva u spraćenom stanju pa se kao rezultat sagorevanja dominantno javljaju velike količine ugljene prašine i letećeg pepela, koje su u procentualnom iznosu znatno veće u odnosu na ostale otrovne dimne gasove. 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 metali i gasovi kao što su fluor i hlor.

Izdvajanjem i taloženjem čestica ugljene prašine i pepela se značajno smanjuje negativni uticaj ovih otpadnih materija na ekosistem. Svetske norme, koje su prihvaćene i kod nas, zahtevaju granične vrednosti emisije (GVE) manje od 50mg/m<sup>3</sup>, a u nekim zemljama čak i ispod 25mg/m<sup>3</sup>. U budućnosti treba očekivati neprekidno smanjenje GVE, tako da primena novih perspektivnih tehnologija za smanjenje emisije pomenutih polutanata, dobija sve veći značaj.

Sprečavanje rasipanja čestica ugljene prašine i letećeg pepela iz postrojenja TE, odnosno njihovo sakupljanje i kolekcija se ostvaruje postrojenjima sa *elektrostatičkim precipitatorima*, poznatijim popularno kao *elektrostatički filtri* ili *elektrostatički izdvajачi* (ESI). Elektrostatičko izdvajanje je inače najpraktičnija metoda za kolekciju i sakupljanje čvrstih čestica (ugljene prašine i pepela) iz struje dimnih gasova na TE. Izdvajanje ovih čvrstih čestica se ostvaruje veoma jakim elektrostatičkim poljem (reda veličine 100-300 kV/m), koje se formira između čeličnih emisionih i taložnih elektroda koje se nalaze u taložnim komorama ESI. Uz taložne komore je smešten i uređaj za njihovo otresanje. Ispod taložnih komora se nalaze prihvatni levci iz kojih se vrši evakuacija izdvojenog pepela. Inače, elektrodni sistem, taložne komore, sistem za otresanje i sistem prihvatnih levaka predstavljaju dimenziono najveći, pa prema tome i najskuplji deo ESI postrojenja.

Najmanji dimenziono, ali veoma bitan deo ESI postrojenja, predstavljaju sofisticirani uređaji energetske elektronike – elektroenergetske ispravljačke (AC/DC) jedinice kojima se vrši pretvaranje neregulisanog naizmjeničnog (AC) dvofaznog ili trofaznog napona 380V(400V), 50Hz u kontrolisane i precizne jednosmerne (DC) visoke napone opsega 10kV-100kV, uključujući i pripadajuće upravljačke elektronske uređaje. Izlazne prividne snage ovih ispravljačkih napojnih jedinica se kreću od 50kVA-150kVA [1-5].

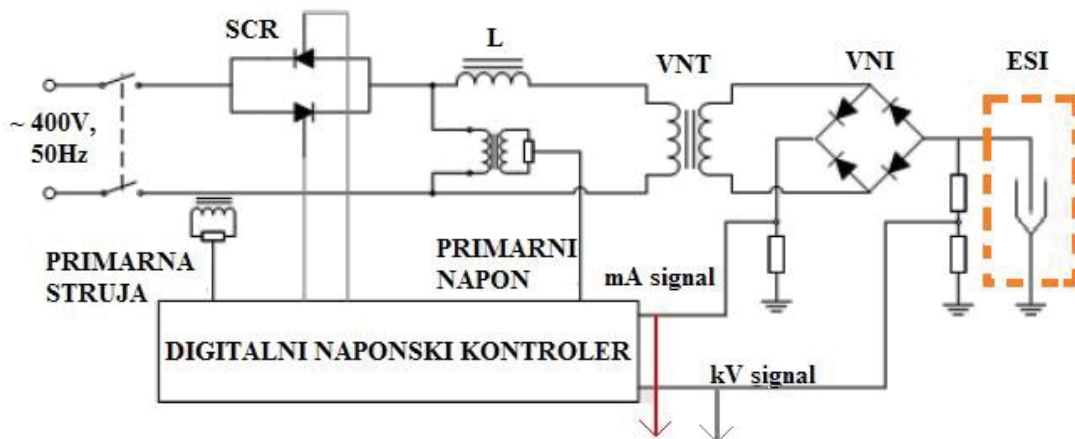
Za jedan termo-energetski blok u TE se obično koristi više ovakvih napojnih jedinica, zavisno od broja izdvajajkih sekcija koje su fizički locirane između kotla i izlaznog dimnjaka. Obzirom da snaga koja se troši na elektrostatičko izdvajanje nije zanemarljiva i da značajno doprinosi ukupnoj sopstvenoj potrošnji TE, upotreba uređaja energetske elektronike, odnosno visokonaponskih kontrolisanih ispravljača podrazumeva, pored ispunjavanja osnovnih zahteva elektrostatičkog izdvajanja, i rešavanje niz drugih problema koji se tiču energetske efikasnosti i kvaliteta mrežnog napajanja. Ova dva pokazatelja značajno utiču na performanse celokupnog ESI postrojenja.

U nastavku rada će biti opisane topologije energetske pretvarača, kao uređaja energetske elektronike, koji su razvijeni u okviru naučno-istraživačkih projekata i primenjeni na srpskim termoelektranama, u poslednjih 10 godina (2005-2015).

### **TOPOLOGIJE ENERGETSKIH PRETVARAČA ZA NAPAJANJE ESI**

Ispravljačka visokonaponska (VN) jedinica za napajanje ESI, bazirana na tiristorskoj kontroli, kao što prikazuje Slika 1, je sastavljena od: visokonaponskog transformatora (VNT), visokonaponskog ispravljača (VNI) i regulatora napona baziranog na digitalnom signalnom procesoru (DSP). Zahtev za dobijanje visokog jednosmernog napona je ostvaren tiristorskim (SCR) pretvaračem koji je baziran na faznoj kontroli [1-5],[6],[8-9]. Ulazno napajanje je međufazno 400V, 50Hz. Diodnim VNI primenjenim na sekundaru VNT proizvode se veoma visoki jednosmerni naponi. Talasnost ovog napona je relativno velika i zavisi od kapacitivnosti opterećenja, odnosno ekvivalentne kapacitivnosti i visoko-omske otpornosti elektrodnog sistema ESI. Kontrola izlazne snage i napona se postiže kontrolom ugla paljenja tiristorske grupe (faznom regulacijom), koja se nalazi na primarnoj strani VNT.

U okviru projekta TR6610-*Razvoj tehnologije i uređaja za efikasnu elektrofiltraciju dima u termoelektranama i toplanama*, u okviru programa tehnološkog razvoja u oblasti energetske tehnologije i rudarstva, Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja (periodu 2005-2008), u saradnji Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, Instituta "Nikola Tesla" i Instituta "Mihajlo Pupin", razvijena je nova tehnologija bazirana na tiristorskoj topologiji i intermitentnom režimu rada, čime je značajno uvećana efikasnost elektrostatičkog izdvajanja čvrstih materija na termo-energetskim blokovima Elektroprivrede Srbije (EPS). Tehnička rešenja u okviru ovog projekta su primenjena na više blokova u Termoelektrani „N.Tesla“ (TENT-A) [6-7], [9].



Slika1- Topologija visokonaponske ispravljačke napojne jedinice ESI bazirana na tiristorskom upravljanju

Figure1- The topology of high voltage rectifier power supply unit of ESP based on thyristor control

Na osnovu istraživanja u okviru pomenutog projekta je ustanovljeno niz korisnih zaključaka koji se tiču tiristorskog napajanja. Kod ovog tipa napajanja efikasna korona je prisutna pri vršnim vrednostima napona, odnosno svega 1-2ms na svakih 10ms. 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 ESI (tipično 50-100nF). Tipična energija luka je 150-200J. Vreme potrebno za evakuaciju usijanih i jonizovanih čestica gasa (tzv. *dejonizacija*) je tipično 100-150ms. Tokom dejonizacije napajanje mora biti isključeno. Velika energija luka degradira kako taložne tako i emisione elektrode.

Pored ovih problema konstatovano je niz nedostataka tiristorskog napajanja, a koje se tiče prvenstveno energetske efikasnosti, odnosno ulazne snage koju napojna jedinica uzima iz mreže 400V, 50Hz. Nakon brojnih merenja u toku eksploatacije, utvrđeno je da se dvofazno tiristorsko napajanje odlikuje relativno lošim faktorom snage, velikom reaktivnom, te stoga i prividnom snagom, kao i malim stepenom korisnog dejstva.

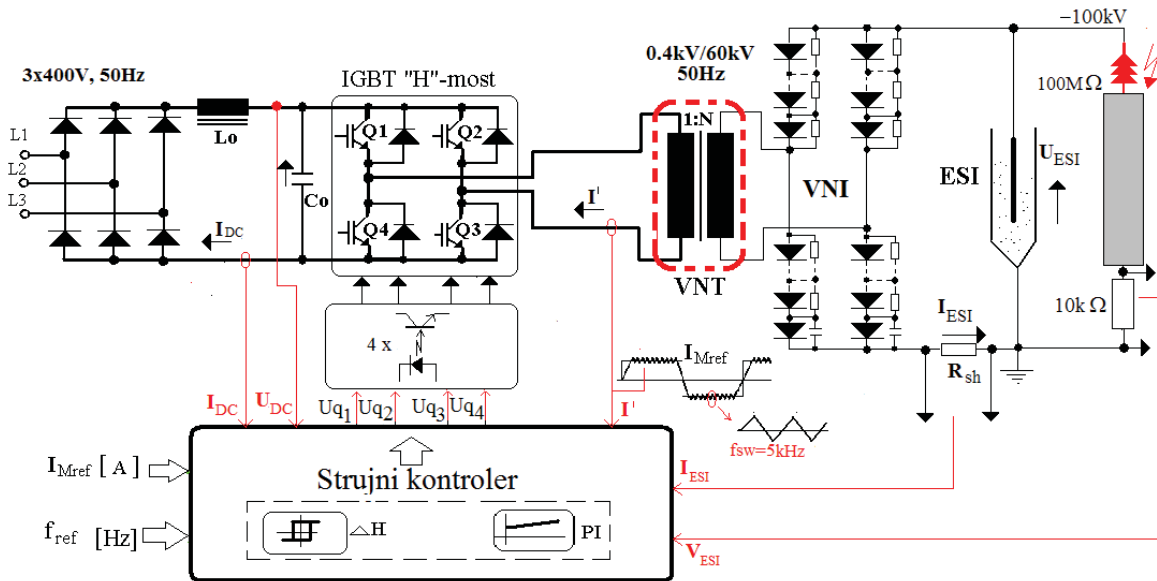
Na osnovu prethodno pomenutih nedostataka utvrđen je dalji pravac istraživanja koji se sastojao u njihovom otklanjanju. U okviru projekta TR21007, Ministarstva nauke i zaštite životne sredine, "*Razvoj i primena visokonaponske visokofrekventne ekološke opreme za otklanjanje aerozagađenja u industriji i elektroprivredi*", u okviru programa

istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2008-2011, su razvijena dva tipa savremenih visokonaponskih visokofrekventnih (VN VF) napajanja ESI:

(1) *Retrofitno (hibridno) napajanje* u sklopu kojeg se i dalje zadržava standardni 50Hz-ni VNT, koji je prikazan na Slici 1, ali sa značajnom izmenom pretvaračkog dela koji je se bazira na visokofrekventnoj topologiji energetskog pretvarača sa programiranom strujnom kontrolom i korišćenjem IGBT tranzistorskog H-mosta. Osnovna komponenta primarne struje VNT je učestanosti 200-800Hz, sa superponiranom talasnosti struje ( $< 5\%$ ) čija je učestanosti 5-10kHz [10-12].

(2) *VN VF napajanje* bazirano na multi-rezonantnoj topologiji u okviru koje se koristi visoko frekventni (VF) pretvarač kao u prethodnom slučaju, ali se umesto 50Hz-nog transformatora koristi VN VF transformator sa feritnim jezgrom i sa specijalno dimenzionisanom prigušnicom u primaru. Primarna struja je učestanosti 10kHz [13-15].

Principska šema razvijenog retrofitnog napajanja ESI je data na Slici 2. Osnovni upravljački blok je baziran na DSP kontroleru sa implementiranom regulacijom izlaznog napona i podešavanjem broja preskoka u minuti na elektrodama ESI. Pored ovoga interna kontrolna strujna petlja je u jednoj varijanti bazirana na PI kontroli, a u drugoj varijanti na histerezisnoj strujnoj kontroli, pripadajućeg IGBT mosnog pretvarača, koji se koristi za napajanje primara 50Hz-nog VNT. Napajanje IGBT pretvarača se ostvaruje iz mreže 3x380V (400V), 50Hz preko trofaznog diodnog ispravljača i  $L_o$ - $C_o$  filtra u jednosmernom međukolu, na čijem izlazu se dobija napon oko 540VDC. Ovaj napon se pretvara u posredstvom IGBT mosnog pretvarača, VNT i VNI, u jednosmerni napon 70kV. Zadavanje parametara strujne regulacije, kao i učestanosti i amplitude referentnog strujnog talasa se ostvaruju preko korisničkog (operator) panela. Na ovaj način se ostvaruje pravougaoni strujni talas kroz namotaje primara VNT, kome je moguće podešavati učestanost i amplitudu. Pobudni signali  $U_{q1}$ ,  $U_{q2}$ ,  $U_{q3}$  i  $U_{q4}$  IGBT prekidača u H-mostu se dobijaju iz digitalnog strujnog kontrolera. Ovi signali su galvanski odvojeni od samog IGBT mosta optokaplerima. Za potrebe strujne regulacije se koriste povratne sprege po signalima struje jednosmernog međukola, struje primara VNT, struje i napona ESI.

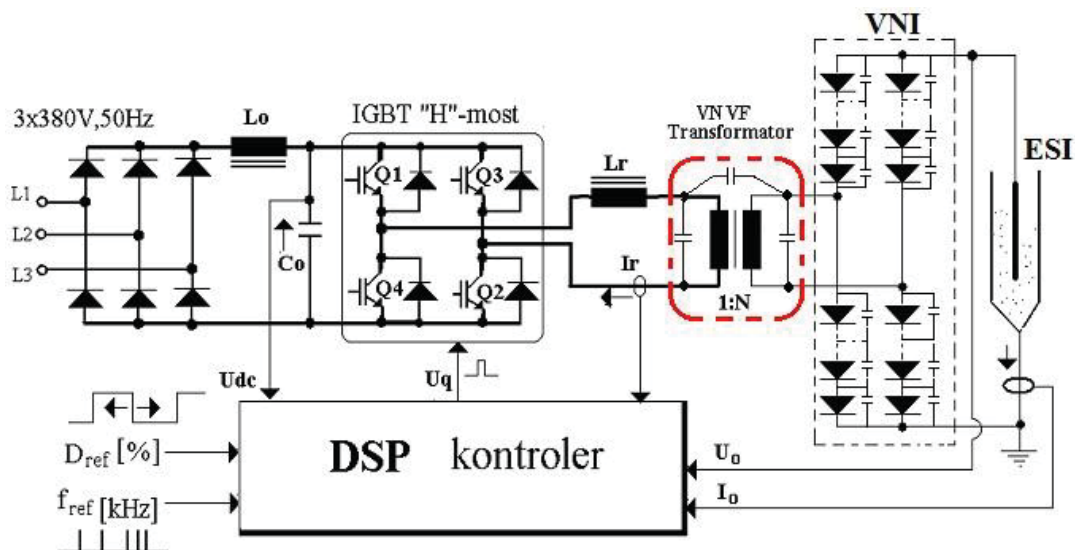


Slika 2- Topologija retrofitnog napajanja ESI bazirana na IGBT strujnoj kontroli  
 Figure 2- The topology of retrofit power supply of ESP based on IGBT current control

Principijska šema VNVF topologije bazirane na tzv. distribuiranoj multi-rezonantnoj topologiji je prikazana na Slici 3. Ova topologija podrazumeva korišćenje prigušnice  $L_r$  u primaru VNVF transformatora [16] i kapacitivnosti koje inherentno postoje u primaru i sekundaru ovog transformatora, kao i kapacitivnosti koje se paralelno vezuju sa ultra brzim diodama u VNI [16-17]. Kapacitivnosti u primaru i sekundaru transformatora nisu koncentrisane već su raspodeljene duž ovih namotaja, kao i kapacitivnosti u VNI koje su raspodeljene duž 128 dioda u svakoj od grana VNI. Prigušnica  $L_r$  i ove distribuirane kapacitivnosti čine ekvivalentno rezonantno kolo i podešavanjem prekidačke učestanosti je moguće postići brzu promenu polariteta napona primara VNVF transformatora i to pri nultoj primarnoj struji, što značajno dovodi do smanjenja prekidačkih gubitaka u pretvaraču i do značajnog povećanja energetske efikasnosti samog pretvarača i celokupnog sistema. Pored redukcije gubitaka značajno je redukovano i niz drugih efekata koji su povezani sa katalitičkom degradacijom transformatora i dielektričnim starenjem njegove izolacije [18].

Razvijeni sistemi napajanja ESI, bazirani na IGBT tehnologiji, su po prihvatljivoj ceni postali veoma konkurentni u odnosu na setove *transformator/ispravljač* sa tiristorskom kontrolom. VNVF prekidački izvori su obezbedili dramatično različite performanse i fizičke karakteristike ESI u odnosu na tiristorske izvore napajanja. Primenjeni u ESI aplikacijama novi VNVF prekidački pretvarači su ostvarili značajan uticaj na izdvajačke sisteme i to sa aspekata konstrukcije, rada i održavanja, ali i sa stanovišta energetske efikasnosti [19-22].



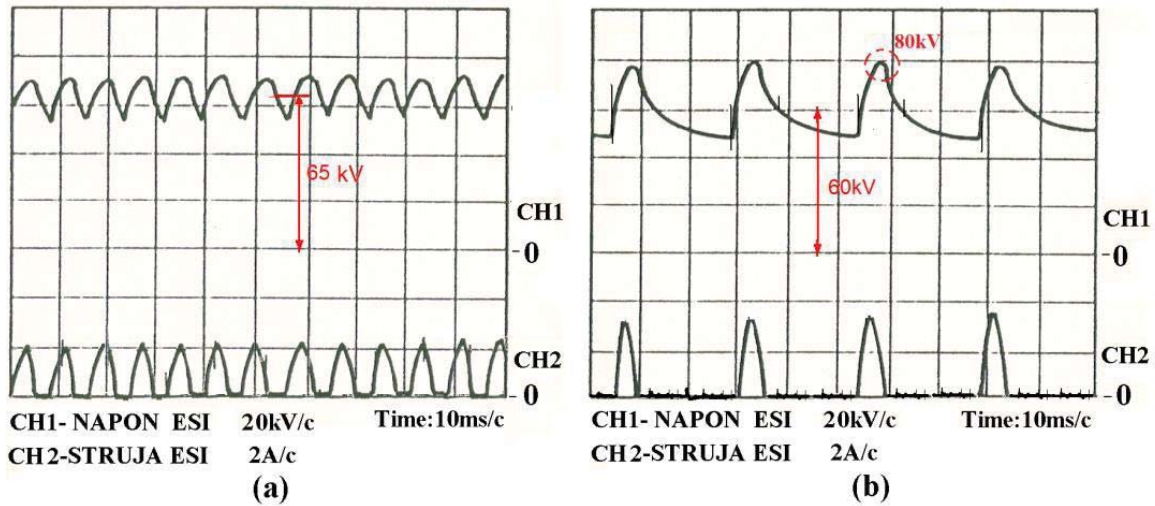


Slika 3- Napajanje ESI bazirano na distribuiranoj multi-rezonantnoj topologiji  
 Figure 3- The ESP power supply based on distributed multi-resonant topology

Naročito treba istaći nekoliko poboljšanja koja su postignuta primenom distribuirane multi-rezonantne topologije VNVF napajanja ESI. U poređenju sa tiristorskim sistemima, visokofrekventni rad dozvoljava mnogo *precizniju kontrolu* radnih parametara ESI (kao što su napon i struja). VNVF napajanjem je moguće ostvariti *znatno brži porast napona* ESI i *znatno brži odziv* na promene opterećenja u odnosu na konvencionalno tiristorsko napajanje. Osim ovoga, visoka učestanost obezbeđuje *značajno smanjenje veličine i težine* VNVF transformatora. Ova redukcija vodi kompaktnijem dizajnu uz *minimiziranje cene*, ugradnje i održavanja elektrodnog sistema. Visoka učestanost takođe obezbeđuje mnogo veću reaktansu transformatorskog jezgra i shodno tome bolju efikasnost izvora napajanja. Naročita prednost VNVF 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 specficiranom 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

## EKSPERIMENTALNI REZULTATI

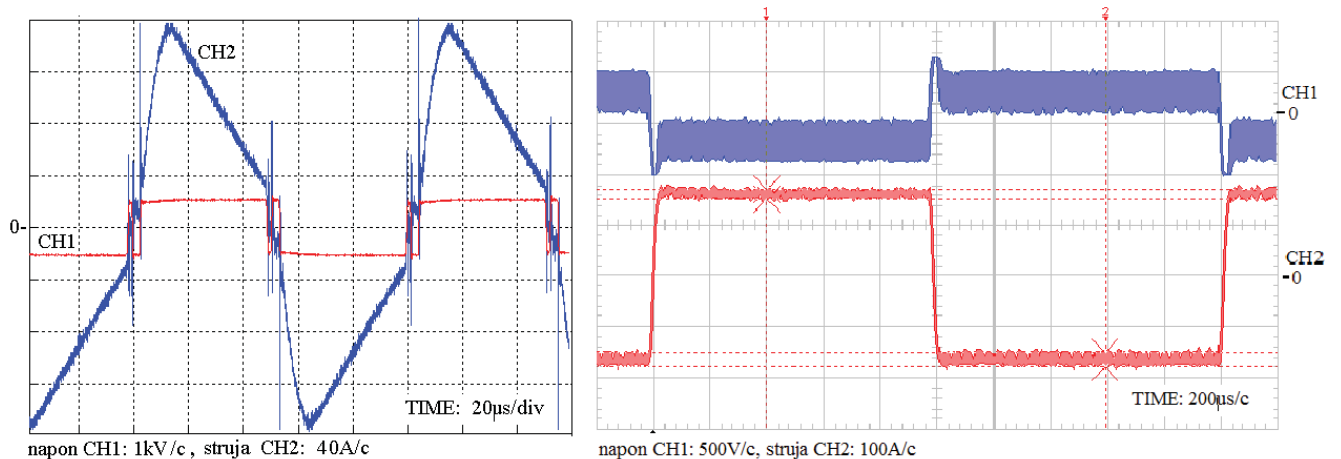
U ovom poglavlju je prikazan deo najznačajnijih eksperimentalnih rezultata, koji su dobijeni u sklopu ispitivanja i testiranja VNVF napojnih jedinica i njihovog poređenja sa tiristorskim sistemom napajanja, na TE "Morava" i TENT-A1.



Slika 4- Talasni oblici struje i napona ESI; (a) normalno napajanje, (b) intermitentno napajanje ( $D=3$ )

Figure 4- The wave shape of current and voltage of ESP; (a) normal power, (b) intermittent power ( $D=3$ )

Na Slici 4 su dati osciloskopski snimci napona i struje ESI koji su dobijeni na snimljenih na realnom ESI sistemu u TE "Nikola Tesla"-BlokA1. Na Sl.4(a) su prikazani karakteristični snimci za slučaj normalnog napajanja, dok je na Slici 4(b) prikazano intermitentno napajanje i to sa jednim strujnim impulsom u tri poluciklusa, odnosno stepenom intermitencije  $D=3$ . Zapaža se da je u slučaju intermitentnog režima vrednost maksimalnog napona na ESI značajno veća i obzirom da su ukinuta dva strujna impulsa, srednja i efektivna vrednost struje ESI je manja. Pored toga vrednost minimalnog napona na ESI je manja.



Slika 5-Talasni oblici struja i napona primara VNT ; (a) VNVF napajanje ESI (b) retrofit napajanje ESI

Figure 5 - The wave shape of primary current and voltage of high voltage transformer; (a) HVHF power of ESP, (b) Retrofit power of ESP

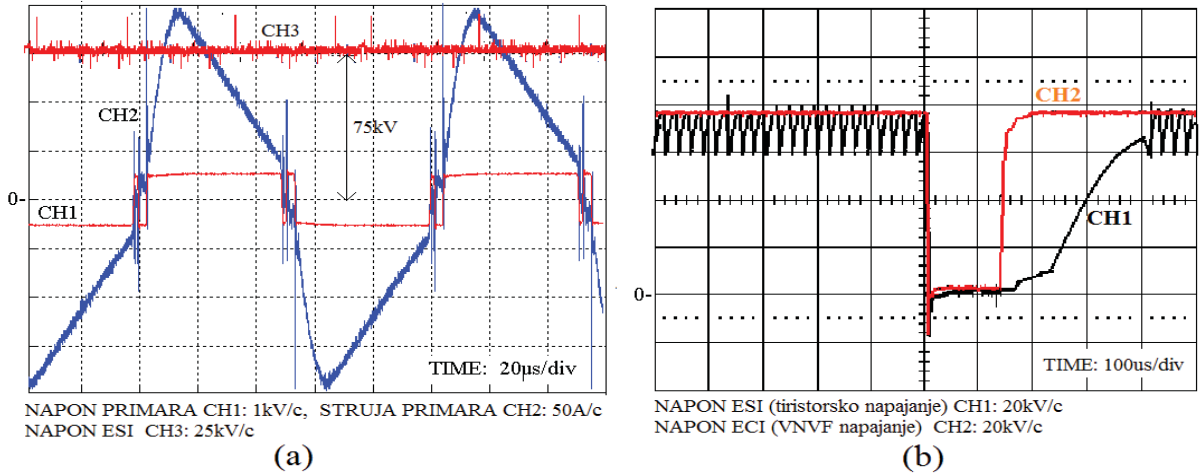


Na Slici 5(a) su dati snimljeni osciloskopski talasni oblici napona (kanal CH1) i struje (kanal CH2) primara VNVF transformatora u sklopu multi-rezonantnog napajanja pri punom opterećenju, odnosno pri naponu na elektrodama ESI od 75kV i pri struji ESI od 1A. Perioda naponskih impulsa je iznosila 100 $\mu$ s, odnosno radna učestanost pretvarača je iznosila 10kHz. Uočava se da je promena polariteta primarnog napona ostvarena pri veoma maloj struji, obzirom da je uspostavljen režim prekidanja IGBT prekidača pri približno nultoj struji. Na ovaj način su značajno smanjeni prekidački gubici pri datoj radnoj učestanosti, pri čemu je efikasnost napojne jedinice značajno uvećana.

Na Slici 5(b) su dati snimljeni osciloskopski talasni oblici napona (kanal CH1) i struje (kanal CH2) primara 50Hz-nog visoko naponskog transformatora (VNT ) retrofitnog napajanja, pri istim uslovima kao u prethodnom slučaju, odnosno pri punom opterećenju. Uočava se da se promena polariteta primarnog napona ostvaruje pri značajnoj struji. Takođe se uočava da je uspostavljen prekidački režim tokom cele poluperiode, odnosno programirana strujna kontrola sa naponskim PWM signalom (kanal CH1) i strujnim riplom (talasnošću) od oko 3% koji je superponiran na zadati pravougaoni talas struje. Učestanost PWM signala, kao i učestanost pripadajućeg strujnog ripla je iznosila oko 10kHz. Za ovaj režim retrofitnog napajanja se imaju relativno veliki gubici kako u stanju vođenja, tako i prekidački gubici, tako da je efikasnost samog pretvarača manja u odnosu na pretvarač sa multi-rezonantnom topologijom.

Na Slici 6(a) su dati snimljeni talasni oblici napona i struje primara VNVF transformatora (kanal CH1 i CH2 respektivno), kao i napon na elektrodama ESI (kanal CH3), u okviru energetskog pretvarača sa multi-rezonantnom topologijom. Uočava se da promena je polariteta primarnog napona ostvarena pri veoma maloj struji. Veoma bitna konstatacija se odnosi na to da napon na elektrodama ES ima veoma preciznu vrednost od 75kV, ali sa veoma malom talasnosti koja je za nekoliko redova veličine manja od one koja se ima pri 50Hz-noj tiristorskoj kontroli (Slika 4(a)).

Na Slici 6(b) je dato poređenje odziva tiristorskog 50Hz-nog i VNVF napajanja na preskok. Uočava se značajno brži odziv sistema sa VNVF napajanjem. Na ovom osciloskopskom snimku se takođe može uočiti da VNVF napajanje doprinosi značajnom smanjenju valovitosti napona. Kao posledica ovoga , između elektroda je moguće ostvariti značajno veću i precizniju srednju vrednost napona. Takođe iz istog osciloskopskog snimka se može zaključiti da VNVF napajanje omogućava znatno brže promene napona. Vreme reakcije na preskok, kao i vreme ponovnog uspostavljanja napona nakon dejonizacije je značajno manje u slučaju VNVF sistema napajanja, nego kod tiristorskog 50Hz-nog napajanja ESI.

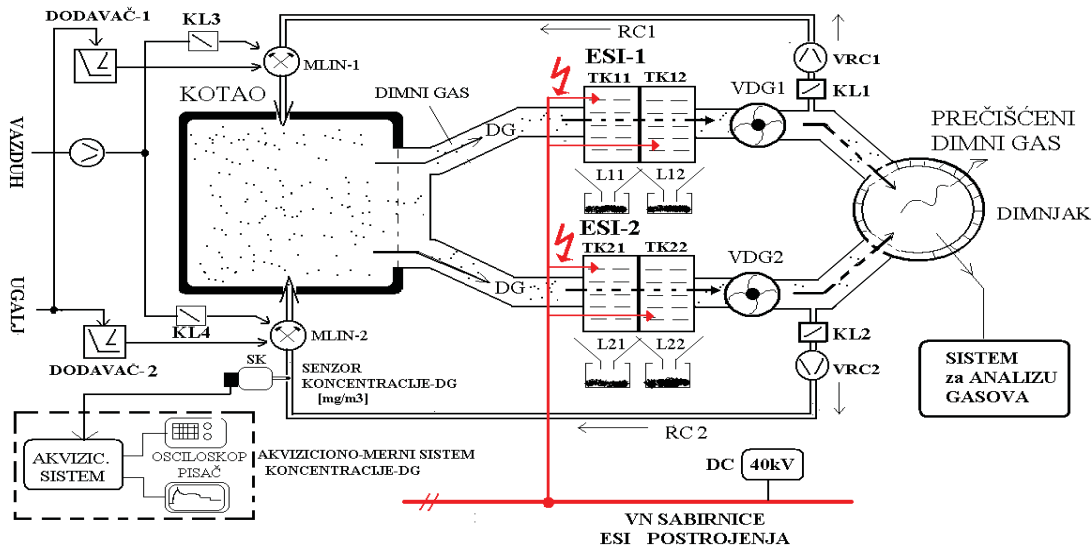


Slika 6-Talasnici struja i napona ESI napajanja; (a) VNVF napajanje (napon i struja primara, napon ESI),

(b) Poređenje odziva izlaznog napona tiristorskog i VNVF napajanja ESI

Figure 6 - The wave shape of current and voltage of ESP power; (a) HVHF power (primary voltage and current, ESP voltage), (b) Comparison of output voltage response for thyristor and HVHF power of ESP

Tokom 2010 godine izvršeno je poređenje rada tiristorskog 50Hz-nog sistema napajanja ESI i merenje emisije čvrstih materija na tehnološkom postrojenju za prečišćavanje dimnih gasova na TE „Morava“. Blok šema ovog tehnološkog postrojenja je prikazana na Slici 7. Ovo postrojenje čine ukupno četiri ESI sekcije 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 pripadajućim mehanizmima koji služe za njihovo otresanje.

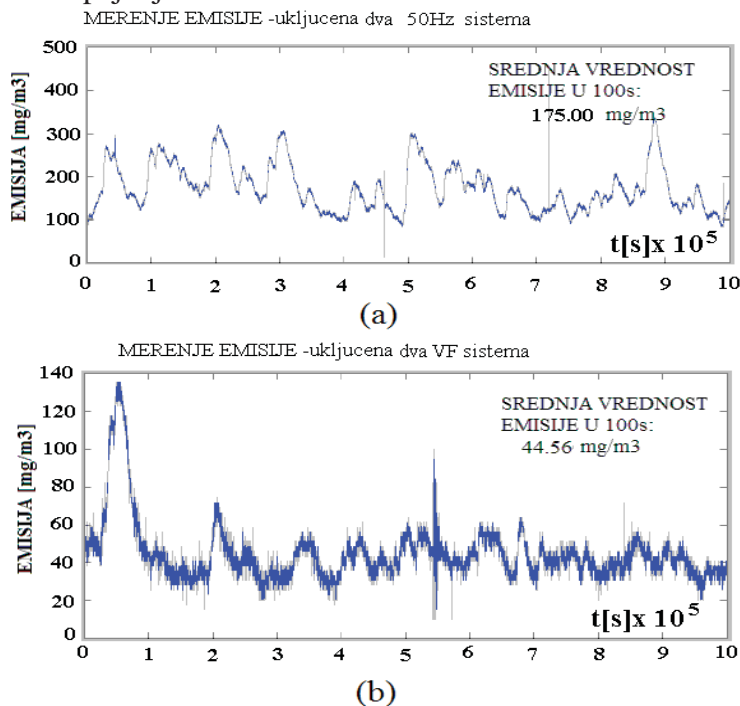


Slika 7- Prikaz tehnološkog postrojenja elektrostatičkih izdvajača na TE „Morava“

Figure 7- The scope of technological plant of electrostatic precipitators on TPP „Morava“

Otresanjem sa elektroda se 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 visokom 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. 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  $120^{\circ}\text{C} - 140^{\circ}\text{C}$ .

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 triboelektričnom efektu detaljno opisanom u [24-25]. Pretpostavljeno je da je koncentracija u recirkulaciji približno jednaka izlaznoj koncentraciji 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 VN VF napajanja u odnosu na tiristorski 50Hz-ni sistem.



Slika 8- Izmerene vrednosti emisije čestica u recirkulacionom kanalu ESI postrojenja; (a) tiristorsko napajanje 50Hz, (b) VNVF napajanje  
 figure 8- Measured vales of particle emission in recirculation channel of ESP plants; (a)thyristor power 50Hz, (b) HVHFpower

Na VN sabirnice 50kVDC 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 tiristorski 50Hz-ni sistem. U cilju poređenja 50Hz i VF napajanja je formirano novo postrojenje energetskih pretvarača. Pretvarači su vezani na zajedničke NN sabirnice 3x400V, 50Hz, dok je izbor tipa i konfiguracije ESI napajanja na visokonaponskoj strani 50kVDC obezbeđen rastavljačima tako da je na svakoj od taložnih komora TK11, TK12, TK21 i TK22 moguće obezbediti bilo 50Hz-ni sistem, bilo VF sistem napajanja.

Na Slici 8 su prikazani dobijeni rezultati koji se odnose na izmerene vrednosti emisija u zavisnosti primenjenog tipa napajanja. Prikazane su izmerene koncentracije u recirkulacionom kanalu desne grane postrojenja, pri uspostavljenom stacionarnom režimu. Merenja su vršena u intervalu od oko 3h. Na Slici 8(a) je dat snimak koncentracije za slučaj upotrebe tiristorskog 50Hz-nog napajanja, dok je na Slici 8 (b) prikazana koncentracija za slučaj upotrebe VNVF multi-rezonantnog napajanja. Sa ovih dijagrama su procenjene srednje vrednosti emisija. Vidi se da je srednja vrednost koncentracije čestica u dimnom gasu desne grane postrojenja u slučaju VNVF napajanja iznosila oko 44.56mg/m<sup>3</sup>, odnosno skoro četiri puta je manja u odnosu na tiristorsko napajanje, za koje je koncentracija čestica u dimnom gasu iznosila oko 180mg/m<sup>3</sup>.

## ZAKLJUČAK

U radu su predstavljeni uređaju energetske elektronike- energetski pretvarači i pripadajuće topologije koji su razvijeni za potrebe elektrostatičkog izdvajanja čvrstih čestica na domaćim termoelektranama.

U radu su pregledno dati problemi rada tiristorskih napojnih jedinica ESI, kao i načini za njihovim prevazilaženjem korišćenjem savremenih i sofisticiranih VNVF sistema napajanja. Optimizacijom VNVF napajanja ESI (retrofitno-hibridno napajanje i multi-rezonantna topologija) se mogu postići značajna poboljšanja u smislu izdvajanja čestica, energetske efikasnosti, minimiziranja dimenzija i cene samog ESI postrojenja, u odnosu na postojeće 50Hz-ne sisteme bazirane na tiristorskoj faznoj kontroli. U radu su predstavljeni rezultati eksploatacionih ispitivanja na postrojenjima ESI na TE "Morava" i TENT-A1 Obrenovac.

VNVF pretvarači predstavljeni u ovom radu su realizovani saradnjom Elektrotehničkog fakulteta u u Beogradu-*Laboratorija za mikroprocesorsko upravljanje energetskim pretvaračima* i Instituta "Mihajlo Pupin". Ceo ovaj desetogodišnji razvoj i istraživanja su podržani delom preko projekata Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije: TR6610 (period 2005-2008), TR21007 (period 2008-2011) i TR33022 (projekat koji je u toku; period 2011-2015) , 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] 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] K.R.Parker, "Applied Electrostatic Precipitation", Springer, 1997.
- [4] David A. Lloyd, "Electrostatic precipitator handbook", A.Hilger, 1988.
- [5] Z.Stojiljković, Ž.Despotović, "Regulisani ispravljač za napajanje elektrostatičkih filtera", XII simpozijum Energetska elektronika – Ee'03, Novi Sad, 5-7 Nov. 2003, Vol. T1-2.1, pp.1-5.
- [6] 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.
- [7] D.Arnautović, "Sistemi za napajanje i regulaciju elektrostatičkih filtera", Automatska Regulacija Elektroenergetskih objekata – Centar za automatiku i regulaciju, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, 2006, pp.37-38.
- [8] Kowshic.G, Elumalai.V, "High voltage power supply to electrostatic precipitators with transformer of helical winding structure", IEEE International Conference Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International, Atlanta GA.
- [9] 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.
- [10] S.Vukosavić, Ž.Despotović,"Retrofitno napajanje elektrostatičkih izdvajača čestica iz dimnih gasova na termoelektranama", TEHNIKA-Elektrotehnika, Vol.64, No4, pp. 597-605, 2011.
- [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.Vukosavić, Ž.Despotović, "Iskustva u eksploataciji hibridnog napajanja elektrostatičkih izdvajača na TE Morava", ELEKTROPRIVREDA, br.3, pp.241-249, 2011.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
  - [16] Ž.Despotović, S.Vukosavić, "Razvoj prototipa visokonaponskog visokofrekventnog transformatora za napajanje elektrostatičkih izdvajača", ELEKTROPRIVREDA, Godina:LXIII Vol.2, pp.107-116, Septembar 2010.
  - [17] Slobodan N.Vukosavic, Nikola Popov, Zeljko V.Despotovic (2010), Power Electronics Solution to Dust Emissions from Thermal Power Plants, 231-252. In Serbian Journal of Electrical Engineering 7 (2).
  - [18] H.A.Pohl, Dielectrophoresis. Cambridge: Cambridge University Press, 1978.
  - [19] 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.
  - [20] Norbert Grass, "150/300kV High Voltage Supply with IGBT Inverter for Large Industrial Electrostatic Precipitators", Industry Applications Conference, 2007, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE, 23/10/2007; DOI: 10.1109/IAS.2007.127, New Orleans, LA, September 2007.
  - [21] R.N.Guenther, "Analysis of kVA Savings with Power Plus under Certain Conditions", NWL-Transforming the Future of Power Technology, January 2009. [www.nwl.com/files/file/PowerPlus/P+kvasaving\(1\).pdf](http://www.nwl.com/files/file/PowerPlus/P+kvasaving(1).pdf)
  - [22] R.N.Guenther, "High Frequency Switch Mode Power Supplies for Electrostatic Precipitators-Operational and Installation Advantages", NWL inc. Bordentown NJ, November 2004. <http://www.luftbrasil.com.br/downloads/NWL/PowerPlus/Boletim/SMPS%20White%20Paper%203.pdf>
  - [23] Ž.V.Despotović, S.N.Vukosavić, M.Terzić, "Contemporary Approach to Power of Electrostatic Precipitators", Proceedings of International Symposium INFOTEH 2013-Jahorina, Vol.12, pp.260-265. <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2013/radovi/ENS-4/ENS-4-1.pdf>
  - [24] W. Averdieck, "Electrodynamic Technology for Particulate Monitoring", Technical Article 13, Issue 12/99, PCME Ltd.
  - [25] Ž.V.Despotović, „Some Experiences in the Exploitation of Triboelectric Sensors for Measuring Concentration of Particulate Matter on Thermal Power Plants”, Proceedings of International Symposium INFOTEH 2013-Jahorina, Vol.12, pp.1118-1124. <http://infoteh.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2013/radovi/TES/TES-2.pdf>