

**Univerzitet u Sarajevu**  
**Elektrotehnički fakultet Sarajevo**  
**VIJEĆE DOKTORSKOG STUDIJA**  
**Zmaja od Bosne bb**  
**71000 Sarajevo**  
**Bosna i Hercegovina**

**Mahir Muratović, M.Eng. - dipl. el. ing.**  
Ramiza Salčina 95/1, Novi Grad Sarajevo  
71000 Sarajevo  
Bosna i Hercegovina  
Mob: +387 61 462 753  
e-mail: mahir.muratovic@gmail.com

**Datum: Sarajevo, 26. 12. 2014. godine**

**Predmet: Molba za odobrenje prijedloga teme doktorske disertacije (projekta)**

Poštovani,

Obraćam Vam se sa molbom da u skladu sa članom 32. Pravila studiranja za treći ciklus studija Univerziteta u Sarajevu, prema kojima Vijeće doktorskog studija obrazuje komisiju za razmatanje prihvatljivosti predložene teme i određuje nastavnika/ mentora/ supervizora tokom pripreme doktorske disertacije (projekta), razmotrite i odobrite prijedlog teme doktorske disertacije (projekta) sa radnim naslovom:

**"Procjena prekidne moći visokonaponskih SF6 prekidača sa samooduvavanjem i ograničenim rastojanjem lučnih kontakata"**

Molim Vas da se izvrši imenovanje nastavnika/ mentora/ supervizora i da se zakaže termin odbrane prijedloga teme doktorske disertacije.

S obzirom na tematiku koja će biti obrađivana u doktorskoj disertaciji, kao nastavnika/ mentora/ supervizora predlažem Vanr. prof. dr Mirsada Kapetanovića, dipl. el. ing. vanrednog profesora na odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu sa kojim sam obavio konsultacije i dobio saglasnost za prijavu navedenog prijedloga teme doktorske disertacije. Vijeće doktorskog studija Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu je je donijelo odluku broj: 04-6-4795/14 prema kojoj mi je Vanr. prof. dr Mirsad Kapetanović određen za akademskog savjetnika u cilju definiranja uže oblasti doktorske teze i okvirnog koncepta teme doktorske disertacije. Saglasnost na ovaj prijedlog dali su i Red. prof. dr Hamid Zildžo, dipl. el. ing. redovni profesor na odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu i dr Almir Ahmethodžić, dipl. el. ing. stručnjak iz prakse i nastavnik na odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu.

Uz prijavu prijedloga teme doktorske disertacije (projekta) prilažem obrazloženje prijedloga teme doktorske disertacije sa:

1. CV kandidata sa profesionalnim aktivnostima, objavljenim radovima - referencama i učešću na projektima,
2. Pregledom stanja u oblasti istraživanja,
3. Motivacijom i ciljevima za istraživanje,
4. Metodologijom i planom istraživanja,
5. Očekivanim naučnim doprinosom disertacije,
6. Pregledom polazne literature.

S poštovanjem,

Mahir Muratović, M.Eng. - dipl.el.ing.

---

## **Obrazloženje prijedloga teme doktorske disertacije (projekta)**

### **1. CURRICULUM VITAE**

#### **Lični podaci**

Prezime (ime oca) ime	Muratović (Zikrija) Mahir
Datum i mjesto rođenja	27. 09. 1987., Sarajevo
Državljanstvo	Bosna i Hercegovina
Adresa stalnog boravka	Ramiza Salčina 95/1, Novi Grad Sarajevo
Bračni status	Oženjen

#### **Obrazovanje**

Juli 2011. Završio drugi ciklus studija - Magistar elektrotehnike – Diplomirani inženjer elektrotehnike - Elektrotehnički fakultet Sarajevo, odsjek za elektroenergetiku, Završni rad na temu: "Ablacija mlaznice sklopnog elementa MOP prekidača 245 kV"

Juli 2009. – Završio prvi ciklus studija - Bakalaureat/Bachelor – Inženjer elektrotehnike - Elektrotehnički fakultet Sarajevo, odsjek za elektroenergetiku, Završni rad na temu: "Strategija inteligentnog isklopa kod prekidanja struje reaktora"

Maj 2006. – Završio elektrotehničku školu u Visokom - Mješovita srednja škola Hazim Šabanović Visoko

Maj 2002. – Završio osnovnu školu u Visokom - Osnovna škola Kulin ban Visoko

#### **Profesionalna aktivnost kandidata**

2011.-	Energobos ILJIN d.o.o. Sarajevo - R&D engineer - inženjer u razvoju
2011.-	Elektrotehnički fakultet Sarajevo - Stručnjak iz prakse

### **1.1. OBJAVLJENI RADOVI- REFERENCE**

1. **M. Muratović**, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, S. Delić, W. B. Suh: "Nozzle ablation model: Calculation of nozzle ablation intensity and its influence on state of SF6 gas in thermal chamber", 11th IEEE ICSD International Conference on Solid Dielectrics, pp. 692-697, Bolonja, Italija, 2013.
2. **M. Muratović**, K. Sokolija, M. Kapetanović "Modelling of high voltage SF6 circuit breaker reliability based on Bayesian statistics", 7th IEEE GCC Conference and Exhibition, pp. 303-308, Doha, Katar, 2013.
3. **M. Muratović**, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, S. Delić, W. B. Suh: "Model ablacije mlaznice: Proračun intenziteta ablacije mlaznice i uticaj na stanje SF6 gasa u termalnom prostoru", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, IA3.01., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.

4. A. Smajkić, M. Kapetanović, **M. Muratović**: "VN prekidači sa dvostrukim kretanjem konataka-Karakteristike i primjena", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, RA3.02., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
5. A. Hajdarović, M. Kapetanović, S. Delić, **M. Muratović**: "Analiza promjene pritiska SF6 gasa duž mlaznice realnog visokonaponskog SF6 prekidača", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, RA3.01., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
6. A. Hajdarović, M. Kapetanović, S. Delić, **M. Muratović**: "Analiza promjene pritiska SF6 gasa duž mlaznice realnog visokonaponskog SF6 prekidača", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika, broj 7, u izdanju Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRE, 2013.
7. M. Kokoruš, **M. Muratović**, N. Hajdarhodžić, K. Balta: "Substation earthing system calculation", CIGRE 11. Konferenca slovenskih elektroenergetikov, Laško, Slovenija, 2013.
8. M. Kokoruš, V. Bečirović, **M. Muratović**, N. Hajdarhodžić, M. Hrustić: "Harmonijska analiza valnog oblika struje energetski efikasnih rasvjetnih tijela i uticaj iste na kvalitet električne energije", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, RC4.13., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
9. M. Kokoruš, S. Delić, **M. Muratović**: "Analiza magnetskih polja oko zračnih prijenosnih linija i moguća rješenja smanjenja njihovih vrijednosti", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, RC4.12., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
10. M. Kokoruš, **M. Muratović**, N. Hajdarhodžić, K. Balta: "Proračun sistema uzemljenja transformatorske stanice", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, IA3.02., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
11. M. Kokoruš, S. Delić, A. Mujezinović, **M. Muratović**, A. Čaršimamović: "Analysis of Possible Solutions for Reduction of Electrical and Magnetic Fields near 400 kV Overhead Transmission Lines", Wessex Institute, 2nd International Conference on Environmental and Economic Impact on Sustainable Development, Ankona, Italija, 2014.

## 1.2. PROJEKTI I STUDIJE

1. "Development of new software for ILJIN's circuit breakers - HV CB Simulation", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2011.- (projekat u toku)
2. "Joint development and design of circuit breaker for 245kV, 40 kA, 50 Hz GIS", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2011.-2013.
3. "Joint development of interrupter for 245kV, 50kA, 50 Hz GIS", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
4. "Joint development and design of circuit breaker for 420kV, 63kA, 50 Hz, GIS", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013- (projekat u toku).

5. "Development of improved mechanism type EMOP in more compact design", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
6. "New approach to arc modeling and computer software for HV SF6 circuit breaker simulation", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
7. "Technical support for development and design of circuit breaker for 145kV, 40 kA, 50 Hz GIS - Elektrobudowa sa Katowice, Poland", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2012.-2013.
8. "Tehnička podrška u razvoju VN 145 kV prekidača za gasom izolovana postrojenja - Končar EVA", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
9. "Razvoj i prilagodba softvera za simulaciju Končarovih prekidača - HV CB Simulation - K", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
10. "Razvoj sistema za mjerenje više hodograma VN prekidača istovremeno", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.
11. "Eksperimentalni rad na modelima i prototipovima za VN SF6 prekidač 420 kV", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).
12. "Analiza mjerenja u okolini strujne nule (Current zero measurements - CZM), verifikacija rezultata MatLAB simulacija u okolini strujne nule s ciljem predviđanja ishoda ispitivanja u laboratoriji velike snage", saradnik na projektu, EnergoBos ILJIN d.o.o., 2013.- (projekat u toku).

## 2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

Prema [1], visokonaponski prekidači spadaju u grupu veličanstvenih izuma dvadesetog stoljeća koji omogućavaju pouzdan rad elektroenergetskog sistema, najkompleksnijeg ikada rukom izgrađenog sistema, sistema koji daje nemjerljiv doprinos razvoju moderne civilizacije i savremenog društva, sistema koji omogućava kontinuirano napajanje električnom energijom svake tačke na zemljinoj kugli, bez čega bi današnji kvalitet života ljudi bio nezamisliv. Visokonaponski prekidač je karakterisan električnim lukom, koji prema [1,2] je vid pražnjenja u gasu, vrlo složen i kompleksan kombinovani električni i toplotni proces koji se karakteriše pojavom plazme. Visokonaponski prekidač kao takav i tehnički izazovi koji se vežu za ovaj aparat predstavljaju stalnu motivaciju istraživačima diljem svijeta sa svrhom rješavanja postojećih problema, razvoja i optimizacije novih principa rada, povećanju pouzdanosti i raspoloživosti, razvoju ispitnih metoda i simulacijskih alata, definisanju pravaca rješavanja određenih problema i sl.

Jedan od izazova u tehnologiji VN SF6 prekidača jeste izbjeći pojavu termičkog i dielektričkog proboja nakon gašenja luka struje kratkog spoja. Za izbjegavanje pojave dielektričkog proboja postoje jasni putovi, ali oni ne postoje za izbjegavanje termičkog proboja u VN SF6 prekidačima. Iz tog razloga, mnogi istraživači nastoje naći tačan i pouzdan metod procjene prekidne moći VN SF6 prekidača, odnosno predviđanja ishoda prekidanja struje kratkog spoja u regionu termičkog proboja. Razvijeno je mnogo simulacijskih alata na temelju CFD proračuna i analizi toka vrelih gasova (Hot Gas Flow Analysis) sa odgovarajućim modelom luka, međutim generalno je mišljenje da se ovim ne može procijeniti prekidna moć VN SF6 prekidača i ovaj pristup je limitiran na uporedne analize različitih varijanti predmetnog prekidnog elementa u cilju ocjene koje rješenje je najbolje. Drugi, češći pristup procjene prekidne moći VN SF6 prekidača baziran je na analizi specijelističkih mjerenja u okolini strujne nule (Current Zero Measurement – CZM) tokom kratkospojnih ispitivanja u laboratorijama velike snage. I dok ovaj pristup daje odgovore na to koliko je prekidač "daleko" od uspješnog ili neuspješnog gašenja luka struje kratkog spoja i mala promjena u dizajnu prekidača u odnosu na onaj na kojem su vršena mjerenja ne dozvoljava procjenu prekidne moći predmetnog VN SF6 prekidača bez provedenih novih mjerenja u okolini strujne nule. Principijelno, dr Almir Ahmethodžić je u svojoj doktorskoj disertaciji [3] riješio ovaj problem za prekidač sa potisnim "puffer" sistemom kombinirajući rezultate simulacije posebno razvijenog računarskog programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača zasnovanom na pojednostavljenom integralnom fizikalnom modelu električnog luka (potrebnih za proračun parametara black box modela električnog kola) i simulacija modela ispitnog kola (sa kompozitnim black box modelom električnog luka) u okolini strujne nule u MatLAB Simulinku. Na ovaj način, apriorno ispitivanju u laboratoriji velike snage, moguće je predvidjeti ishod prekidanja struje kratkog spoja datih karakteristika uzimajući u obzir sve parametre dizajna VN SF6 prekidača i interakciju između električnog luka u prekidaču i ispitnog kola.

Prema dostupnoj literaturi autoru prijedloga teme doktorske disertacije (projekta) na doktorskom studiju na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, Univerzitet u Sarajevu, dat je pregled stanja u oblasti istraživanja u kojoj je situirana doktorska disertacija. Pregled literature u oblasti istraživanja u sklopu prijedloga teme doktorske disertacije (projekta) može se grupirati u tri dijela:

- pregled referenci autora buduće doktorske disertacije (sa ovdje predloženim radnim naslovom) i ostalih članova tima u okviru kojeg djeluje i sam autor, a sve u cilju da se pokaže dosadašnji rad autora i spomenutog tima u ovoj oblasti, a u osnovi ti radovi predstavljaju i polaznu tačku za doktorsku disertaciju sa ovdje predloženim radnim naslovom,
- pregled aktuelnih i drugih referenci koje se odnose na predviđanje uspješnosti prekidanja struje kratkog spoja u VN SF6 prekidača i različite metode (sa svim svojim prednostima i nedostacima) procjene prekidne moći VN SF6 prekidača i
- pregled aktuelnih referenci koji predstavljaju nove principe, sisteme ili rješenja u prekidnom elementu VN SF6 prekidača.

U radu [4] autori *A. Ahmethodžić, Z. Gajić, M. Kapetanović* predstavljaju računarski program za simulaciju rada visokonaponskih prekidača razvijen na bazi pojednostavljenog integralnog fizikalnog modela električnog luka (baziran na široko prihvaćenom pojednostavljenom *enthalpy flow arc model*, često nazivan i Frost-Liebermann model luka [5]) koji omogućava određivanje pozicije pokretnih kontakata, porast pritiska u ekspanzionim i kompresionim komorama prekidača, strujanje gasa SF6 kroz mlaznicu i mnogo drugih izlaznih parametara kao funkcije u vremenu tokom procesa prekidanja struje kratkog spoja u visokonaponskim SF6 prekidačima. Program je prilagođen za računarsku simulaciju različitih principa gašenja luka (klasični "puffer", "selfblast" i "self-compensated") u interakciji sa motornoopružnim pogonskim mehanizmima. U spomenutom radu prikazana je i verifikacija proračuna hodograma prekidača na osnovu rezultata eksperimentalnih mjerenja.

U radu [6] autori su dali dodatnu verifikaciju rezultata računarskog programa predstavljenog u [4] na osnovu mjerenja intenziteta ablacije mlaznice i porasta pritiska tokom prekidanja struje kratkog spoja. U istom radu, predstavljen je unaprijeđeni model ablacije mlaznice, na osnovu modela datog u [7], a isti će biti korišten i tokom izrade doktorske disertacije (projekta).

U tekućoj godini autor prijedloga doktorske disertacije je prezentirao još dva rada na IEEE konferencijama koji sadrže dodatne elemente verifikacije računarskog programa predstavljenog u [4]. Rad "Simulations of an Improved Operating Mechanism for High Voltage SF6 GIS Circuit Breaker" (autori: *M. Muratovic, M. Kapetanovic, S. Delic, S. Staszak, Z. Janiak*) prezentiran na konferenciji ICHVE u Poznanu (Poljska) i rad "Pressure Distribution along the Nozzle of a HV SF6 Circuit Breaker" (autori: *M. Muratovic, S. Delić, A. Hajdarović, M. Kapetanović, Y. Guan*) prezentiran na konferenciji IPMHVC u Santa FE-u (SAD) daju verifikaciju rezultata proračuna (hodogram kontakata i porast pritiska u komorama VN SF6 prekidača, respektivno) računarskog programa predstavljenog u [4]. Rezultati proračuna pritiska u ovom slučaju su verificirani na osnovu rezultata eksperimentalnih mjerenja porasta pritiska tokom prekidanja struje kratkog spoja datih u [8]. Oba rada, sa ovdje datim naslovima, još uvijek nisu uvrštena u *IEEE Xplore Digital Library* i stoga nisu navedena u dijelu 1.1 ove prijave (*Objavljeni radovi - reference*) niti u dijelu 6 (*Pregled polazne literature*).

*A. Ahmethodžić* u doktorskoj disertaciji [3] i zajedno sa ostalim autorima u [9] je eksperimentalno potvrdio (na osnovu mjerenja u okolini strujne nule - Current Zero Measurement) korelaciju između parametara integralnog fizikalnog i black box modela luka

na realnom SF6 prekidaču, tipa "puffer". Nakon potvrđene korelacije, prema kriteriju datom u radu [10] - vrijednost provodnosti stabla luka 200 ns prije strujne nule, uspješnost predviđanja gašenja luka u uslovima bliskog kratkog spoja (90 % nazivne struje kratkog spoja) je iznosila 90 % (18 tačnih pogađanja od ukupno 20 provedenih operacija prekidanja struje kratkog spoja). Upravo, *A. Ahmethodžić* u zaključku svoje doktorske disertacije navodi daljnje pravce istraživanja, a koji predstavljaju neke od ciljeva doktorske disertacije sa ovdje predloženom temom.

Autori *R. P. P. Smeets* i *V. Kertesz* u [10] fokusiraju se na rezultate mjerenja provodnosti električnog luka neposredno prije strujne nule (200 ns). Korišteni su rezultati više stotina mjerenja u okolini strujne nule tokom ispitivanja u laboratoriji velike snage VN prekidača nazivnih napona od 72.5 do 550 kV i nazivnih struja kratkog spoja od 16 do 80 kA. Autori su ustanovili da bez obzira na princip rada i nazivne karakteristike prekidača postoji pojas kritične vrijednosti provodnosti luka neposredno prije strujne nule. Ukoliko je provodnost stabla luka 200 ns prije strujne nule veća od kritične vrijednosti prekidač neće ugaziti struju, ukoliko je pak provodnost stabla luka niža od kritične VN prekidač će uspješno ugaziti luk struje kratkog spoja. U istom radu predstavljena je i matematska procjena parametara black box modela luka (na osnovu rezultata mjerenja u okolini strujne nule), a koji se dalje mogu koristiti u procjeni gašenja struje kratkog spoja pri manjim promjenama parametara ispitnog kola, npr.: kapacitet paralelan ispitivanom prekidnom elementu.

Prethodno, isti autori kao u [10] su u [11] predstavili empirijski model električnog luka (black box arc model - tri modificirane Mayr-ove jednačine) koji ima samo tri nezavisna parametra čije se vrijednosti evaluiraju (procijenjuju) na osnovu rezultata mjerenja u okolini strujne nule. Validacija predstavljenog modela električnog luka, u smislu uspješnog predviđanja ishoda gašenja luka u uslovima bliskog kratkog spoja, je izvršena na osnovu mjerenja u okolini strujne nula za oko 180 prekidanja struje kratkog spoja u laboratoriji velike snage.

Isti autori kao u [10] i [11] zajedno sa *P. H. Schavemaker* i *L. van der Sluis* u [12], predstavili su procjenu parametara black box modela luka i dali diskusiju na uticaj paralelnog kapaciteta na prekidnu moć VN SF6 prekidača u uslovima bliskog kratkog spoja.

Autori rada [13] potvrđuju uspješnu primjenu procijenjenih parametara black box modela luka u predviđanju ishoda gašenja luka u uslovima bliskog kratkog spoja (predstavljeno u [11,12]) sa akcentom na tehniku mjerenja u okolini strujne nule. Novina u ovom radu jeste kvantitativni metod za procjenu električne trajnosti VN SF6 prekidača na osnovu mjerenja i procjene parametara luka u okolini strujne nule.

U radu [14], autori su pokazali uspješnu primjenu analize rezultata mjerenja u okolini strujne nule za određivanje vrijednosti paralelnog kapaciteta potrebnog za uspješno prekidanje struje kratkog spoja. Rad je nastao kao ekstrakt razvoja novog prekidnog elementa nazivne struje kratkog spoja od 80 kA. Prethodno, autori su imali rezultate mjerenja u okolini strujne nule za prekidni element 50 kA (sličnog dizajna kao i kod 80 kA) i procijenjene parametre black box modela luka. Na osnovu procijenjenih parametara luka i simulacije ispitnog kola u okolini strujne nule u EMTP ATP-u određena je rezerva, u smislu prekidne moći, prekidnog elementa 50 kA (i za 63 kA sa poznatom vrijednošću paralelnog kapaciteta), a zatim i potrebna vrijednost kapaciteta za uspješno testiranje bliskog kratkog spoja prekidnog

elementa 80 kA. Predviđanje ishoda ispitivanja prekidnog elementa u uslovima 90% bliskog kratkog spoja je i eksperimentalno potvrđeno tokom ispitivanja u laboratoriji velike snage.

Isti autori (kao u [14]) isključujući *R. P. P. Smeets* u [15] predstavljaju modificirani metod, u odnosu na metod koji koriste u laboratoriji velike snage KEMA, za evaluaciju parametara luka iz rezultata mjerenja u okolini strujne nule. Autori ističu da je potreba za modifikacijom postojećeg metoda za evaluaciju parametara luka nastala u cilju postizanja veće tačnosti tokom predviđanja ishoda gašenja struje kratkog spoja. Parametri luka su procijenjeni na osnovu proračuna ekvivalentnog ispitnog kola i (nelinearne) metode najmanjih kvadrata - *Non-linear least squares* prilikom utičnjavanja rezultata simulacije sa rezultatima mjerenja u okolini strujne nule. Primjena predloženog modela je potvrđena na istom primjeru prekidača kao i u [14].

U radu [16], također, su predstavljena mjerenja visoke rezolucije u okolini strujne nule za dva tipa prekidača. Autori ovog rada navode da postoje kritične vrijednosti luka (otpor luka ili strmnina struje -  $di/dt$ ) neposredno prije prolaska struje kroz nulu u smislu uspješnog gašenja struje kratkog spoja. Isti autori objavili su rad [17] na temu mjerenja u okolini strujne nule s ciljem evaluacije parametara krivulja napona luka, odnosno provodnosti stabla luka neposredno prije strujne nule.

Autori rada [18] vršili su optimizaciju prekidnog elementa 63 kA 50 Hz sa posebno predstavljenom procedurom optimizacije. Optimizacija je vršena s ciljem povećanja gustoće gasa u ekspanzionoj komori VN SF6 prekidača, iako, autori kažu, kao direktan kriterij u uslovima bliskog kratkog spoja (90 %) potrebno je uzeti provodnost stabla luka neposredno prije strujne nule. Uspješnost predložene procedure optimizacije prekidnog elementa potvrđena je kroz mjerenja u okolini strujne nule za početni dizajn i optimizirani dizajn prekidnog elementa (prekidne komore). Ista procedura optimizacije je korištena i u [19] na primjeru prekidača 245 kV 50 kA 60 Hz sa pricipom samooduvavanja ("selfblast").

Rad [20] predstavlja primjenu CFD proračuna u cilju proračuna napona luka i provodnosti luka neposredno prije strujne nule (200 ns). Autori ovog rada svijesni ograničenja CFD-a u proračunu napona luka neposredno prije strujne nule koriste i matematski model električnog luka (modificirani Mayr-ov model luka gdje snaga hlađenja ovisi o izlaznoj energiji luka). Na osnovu matematskog modela luka, proračunata je i provodnost luka 200 ns prije strujne nule čijim poređenjem sa kritičnom vrijednošću iz [10] ocijenjeno da li će prekidač ugasi struju kratkog spoja zadatih karakteristika. U radu su dati i rezultati proračuna provodnosti električnog luka za dvije varijante VN SF6 prekidača 145 kV 40 kA 60 Hz.

Autori *C. M. Franck* i *M. Seeger* u [21] su, također, koristili CFD proračune sa dva modela luka: pojednostavljeni ekvivaletni model luka za struju industrijske frekvencije (50 ili 60 Hz) i detaljni model luka u okolini strujne nule sa: efektima omskog zagrijavanja, radijativnim prenosom energije, turbulentnim hlađenjem (na ivici luka) u prostoru i vremenu. Predloženi model predviđanja uspješnosti gašenja luka struje kratkog spoja je eksperimentalno potvrđen.

Autori *A. Karimi*, *K. Niayesh*, *M. A. Bahmani* u [22] tvrde da je moguće tačno procijeniti prekidnu moć SF6 prekidača na jednostavniji način u odnosu na konvencionalne metode sintetskog ispitivanja izbjegavajući uticaj napona luka na pomoćnom prekidaču. Autori ističu da su postigli dobra slaganja eksperimentalnih rezultata i rezultata procjene prekidne moći sa predloženim metodom na primjeru prekidača 24 kV 25 kA.



Autori *M. Walter* i *C. M. Franck* u [23] ističu da su black box modeli električnog luka vrlo moćan alat za simulaciju dinamičke interakcije električni luk – elektroenergetski sistem (mreža). Cilj rada jeste unaprijediti tačnost procjene parametara luka na osnovu mjerenja u okolini strujne nule. U tu svrhu korišten je poseban izvor struje (oblik struje kao stepenice sa porastom vrijednosti) pri čemu se mjeri napon "stacionarnog" i "tranzijentnog" (pri promjeni vrijednosti struje) luka. Na ovaj način omogućena je validacija izbora black box modela luka ali i veća tačnost u procjeni parametara odabranog black box modela luka.

Autori *R. P. P. Smeets* i *V. Kertesz* u [24] koriste isti metod kao u [11] za procjenu uspješnosti prekidanja istosmjernje struje u smislu prekidanja negativnih oscilacija struje sa porastom amplitude do prolaska struje kroz nultu vrijednost.

Radovi [25-29] su sadržani u dijelu 6 *Pregled polazne literature* jer se neki od gore spomenutih radova u bitnijim dijelovima pozivaju na iste.

Autor prijedloga teme doktorske disertacije je pregledom dostupne literature pokušao doći do aktuelnih radova koji predstavljaju nove principe rada ili nove sisteme u samom prekidnom elementu (prekidnoj komori) VN SF6 prekidača. Međutim, to se pokazalo skoro nemoguće, prije svega zato što kompanije – proizvođači VN SF6 prekidača nova rješenja drže u tajnosti. Postoje neki novi principi, kao naprimjer dva ekspanziona prostora, međutim oni još uvijek se koriste samo za eksperimentalna istraživanja.

Autori *A. Ahmethodžić* i *M. Kapetanović* u [31] i zajedno sa drugima u [30] su predstavili novi princip rada VN SF6 prekidača za dvostuku brzinu kontakata – *double speed mechanism*. Prvenstveno ovaj novi mehanizam je izveden na strani pogonskog mehanizma, međutim postoje rješenja sa da se ovaj mehanizam izvede i na strani prekidnog elementa.

Autor prijedloga doktorske disertacije je u radu "Pressure Distribution along the Nozzle of a HV SF6 Circuit Breaker" (autori: *M. Muratovic*, *S. Delić*, *A. Hajdarović*, *M. Kapetanović*, *Y. Guan*) predstavio je na konferenciji IPMHVC u Santa Fe-u (SAD) koncept novog sistema za rasterećenje pritiska gasa u kompresionoj komori VN SF6 prekidača bez pokretnih dijelova povećavajući pouzdanost samog prekidača uz još neke druge prednosti.

Iz ovog pregleda kandidatu dostupne literature, može se uočiti da nema radova koji koriste integralni fizikalni model za uspostavljanje kriterija uspješnog prekidanja struje kratkog spoja i procjene prekidne moći (u regionu termičkog proboja) bez obzira na princip rada VN SF6 prekidača uzimajući u obzir sve fizičke parametre prekidača ali i interakciju električni luk – ispitno kolo. Također, ne postoje ni radovi, iz pregleda kandidatu dostupne literature, koji su predstavili novi princip rada VN SF6 prekidača koji bi se mogao poistovijetiti sa principom samooduvavanja sa ograničenim rastojanjem lučnih kontakata.

### 3. MOTIVACIJA I CILJEVI ZA ISTRAŽIVANJE

Visokonaponski (VN) prekidači su najbitniji elementi zaštite elektroenergetskog sistema budući da su to jedini visokonaponski aparati koji uklapaju, trajno vode i prekidaju struje u normalnim pogonskim uvjetima i koji uklapaju, kratkotrajno podnose i prekidaju nazivnu vrijednost struje kratkog spoja. Prema tome prekidač je jedini sklopni aparat koji može odgovoriti na najveći broj zahtijeva i zadataka u sistemu, te je prije eksploatacije novih proizvoda VN prekidača u sistemu potrebno dokazati njihovu funkcionalnost kroz brojna ispitivanja: počevši od ispitivanja na klimatske uslove, ispitivanja otpornosti na zemljotres, ispitivanja mehaničke trajnosti, dielektrička ispitivanja, kratkospojna ispitivanja i brojna druga ispitivanja. Svakako najizazovnija ispitivanja za istraživače iz ove oblasti su kratkospojna ispitivanja prvenstveno zbog postojanja električnog luka. Budući da je najčešće korištena SF6 tehnologija u VN prekidačima, doktorska disertacija sa ovdje predloženom temom bavila bi se fenomenom električnog luka u gasu. Prema [1], električni luk je vid pražnjenja u gasu, vrlo složen i kompleksan kombinovani električni i toplotni proces koji se karakteriše pojavom plazme.

Cilj istraživača iz ove oblasti tokom kratkospojnih ispitivanja jeste ugaziti struju odgovarajuće vrijednosti prema ispitnom ciklusu u prozoru prekidanja ("arcing window"), odnosno izbjeći pojavu termičkog ili dielektričkog proboja. Za razliku od dielektričkog proboja, gdje jasni pravci rješavanja problema postoje (povišenje pritiska punjenja SF6 gasa, povećanje razmaka između elektroda na različitim potencijalima, optimizacija oblika dijelova pod naponom), direktni pravci za eliminaciju termičkog proboja u VN SF6 prekidačima ne postoje. Upravo ova problematika, nepostojanja jasnih pravaca za eliminaciju termičkog proboja u VN SF6 prekidačima tokom prekidanja struje kratkog spoja, predstavlja motivaciju za izradu doktorske disertacije (projekta) sa predloženom temom. Razvoj pouzdanog i dokazanog metoda i kriterija procjene prekidne moći VN SF6 prekidača uz pouzdanost, sa postojanjem određene statističke nesigurnosti, apriorno predviđanje ishoda prekidanja struje kratkog spoja će u mnogome olakšati izazove istraživačima i dizajnerima VN SF6 prekidača. Time se sigurno smanjuje obim razvojnih ispitivanja, čime se smanjuju troškovi razvoja novog proizvoda i povećava vjerovatnost uspješnih tipskih ispitivanja.

Dodatna motivacija za izradu doktorske disertacije (projekta) sa ovdje predloženom temom jeste utvrđivanje prekidne moći novog principa gašenja luka u VN SF6 prekidačima zasnovanim na samooduvavanju sa ograničenim rastojanjem između lučnih kontakata (u cilju obezbjeđivanja jednakih uslova za gašenje struje bez obzira na trajanje luka) i novim sistemom za rasterećenje pritiska gasa u kompresionoj komori prekidača (bez pokretnih dijelova) u čijim razvojnim procesima je učestvovao i sam autor prijedloga teme doktorske disertacije (projekta).

Princip sa ograničenim rastojanjem između lučnih kontakata u VN SF6 prekidačima jeste princip samooduvavanja sa zadržavanjem rastojanja između lučnih kontakata (zadržavanjem dužine luka) od trenutka kada razmak između kontakata bude dovoljno velik da izdrži odgovarajuća dielektrička naprezanja. Na ovaj način, smanjuje se napon luka (koji zavisi od njegove dužine), čime se značajno reducira energija luka oslobođena u međukontakti prostor, a što olakšava evakuaciju energije iz tog prostora čime se dalje olakšavaju uvjeti gašenja struje kratkog spoja. Konstrukciono, na naponima do 170 kV princip ograničenog

rastojanja lučnih kontakata se rješava naglim zaustavljanjem kretnje kontakata odmah nakon napuštanja grla mlaznice, dok za više napone potrebno je dizajnirati dodatni, pomoćni lučni kontakt sa nepromjenljivim rastojanjem prema pokretnom lučnom kontaktu. Novi sistem za rasterećenje pritiska kompresione komore VN SF6 prekidača nema pokretnih dijelova čime se pouzdanost prekidnog elementa znatno povećava, u odnosu na klasični sistem sa ventilom reguliranim oprugama. Za razliku od klasičnog rasteretnog ventila kompresione komore kod principa samooduvavanja čija prorada ovisi o pritisku, prorada novog sistema ovisi o hodogramu prekidača. Kod novog sistema za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori moguće je zadržati jednake uslove u slučaju gašenja malih (kapacitivnih i induktivnih struja) i nazivnih struja kratkog spoja, ali i znatno olakšati uslove gašenja struje kratkog spoja za vrijednosti 30 do 60 % nazivne struje kratkog spoja u odnosu na klasični rasteretni ventil sa oprugama. Može se reći da novi princip VN SF6 prekidača samooduvavanja sa ograničenim rastojanjem između lučnih kontakata u kombinaciji sa novim sistemom za rasterećenje pritiska kombinuju ono najbolje od potisnog "puffer" principa i (čistog) principa samooduvavanja ("selfblast").

Brojne simulacije rada VN SF6 prekidača i gašenja električnog luka, odnosno struje kratkog spoja su razvijeni s ciljem da se procijeni prekidna moć VN SF6 prekidača. Najčešće, te simulacije su razvijene na analizi toka vrelih gasova (Hot Gas Flow Analysis) sa odgovarajućim modelom električnog luka, ali nisu pouzdane i globalna ocjena je da se njima ne može procijeniti prekidna moć VN SF6 prekidača. Dodatni problem kod ovih simulacija jeste što jako dugo traju (od 10tak sati do nekoliko dana). Drugi pristup procjene prekidne moći VN SF6 prekidača je na osnovu specijalističkih mjerenja u okolini strujne nule, odnosno na evaluiranim parametrima kompozitnog black box modela luka. Ovaj pristup ima prednost u odnosu na gore spomenuti zato što uzima u obzir i interakciju električni luk – ispitno kolo, ali i veliki nedostatak jer u slučaju i manje izmjene dizajna prekidača nije moguće procijeniti prekidnu moć već je ponovno potrebno vršiti mjerenja u okolini strujne nule.

Za razliku od ova dva pristupa, dr. Almir Ahmethodžić je u svojoj doktorskoj disertaciji [3] predložio potpuno novi pristup predviđanja gašenja struje kratkog spoja i verificirao rezultate tog pristupa za potisni ("puffer") princip rada VN SF6 prekidača. Novi pristup se temelji na dokazanoj korelaciji parametara black box i integralnog fizikalnog modela luka, a realizira se kroz kombinaciju posebno razvijenog računarskog programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača zasnovanom na pojednostavljenom integralnom fizikalnom modelu električnog luka – HV CB Simulation i mjerenjima i simulacijama u okolini strujne nule. Na osnovi mjerenja i simulacija u okolini strujne nule zadržan je uticaj interakcije električni luk – ispitno kolo, a promjene dizajna predmetnog VN SF6 prekidača su uzete u obzir kroz simulacije u HV CB Simulation koja u obzir uzima sve fizičke parametre VN SF6 prekidača.

Osnovni cilj za istraživanje jeste potvrditi pristup predviđanja uspješnosti gašenja struje kratkog spoja dat u [2] na primjeru prekidača sa principom samooduvavanja ("selfblast") i ograničenim rastojanjem lučnih kontakata čime se u potpunosti otvara put za utvrđivanje metoda i kriterija procjene prekidne moći VN SF6 prekidača apriorno ispitivanju u laboratoriji velike snage uzimajući u obzir sve fizičke parametre prekidača ali i interakciju električni luk – ispitno kolo.

#### 4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Planirana istraživanja tokom izrade doktorske disertacije (projekta):

- odgovarajuća ispitivanja na modelima VN SF6 prekidača u EnergoBos-ovoj laboratoriji u Sarajevu,
- mjerenje porasta pritiska u komorama VN SF6 prekidača tokom prekidanja struje kratkog spoja,
- verifikacija rezultata (hodogram kontakata i porast pritiska gasa u komorama VN SF6 prekidača) računarske simulacije rada visokonaponskih prekidača baziranoj na integralnom fizikalnom modelu - HV CB Simulation,
- kratkospojna ispitivanja na više realnih VN SF6 prekidača (potisni "puffer" princip i princip samooduvavanja ("selfblast")), uključujući i novi princip sa ograničenim rastojanjem između lučnih kontakata),
- proračuni karakterističnih veličina prekidanja struje (rastojanje između lučnih kontakata, pritisak u ekspanzionoj komori i poprečni presjek isticanja kroz mlaznice u trenutku strujne nule) u HV CB Simulation prema ispitivanjima u laboratoriji velike snage,
- uspostavljanje kriterija uspješnosti prekidanja struje kratkog spoja na osnovu rezultata simulacija u HV CB Simulation i rezultata kratkospojnih ispitivanja u laboratoriji velike snage,
- specijalistička mjerenja u okolini strujne nule (Current Zero Measurement - CZM) za ispitne cikluse koji se smatraju posebno zahtjevnim po pitanju prekidne moći VN SF6 prekidača, prvenstveno misli se na bliski kratki spoj,
- potvrđivanje korelacije za različite principe rada SF6 prekidača i proračun parametara black box modela električnog luka na osnovu karakterističnih veličina prekidanja iz HV CB Simulation potrebnih za MatLAB Simulink simulacije ispitnog kola i verifikacija na osnovu rezultata mjerenja u okolini strujne nule i
- apriorna predviđanja (pomoću HV CB Simulation i modela ispitnog kola u MatLAB Simulink-u) rezultata ishoda kratkospojnih ispitivanja VN SF6 prekidača u laboratoriji velike snage i procjena prekidne moći uzimajući u obzir sve fizičke parametre VN SF6 prekidača i interakciju električni luk - ispitno kolo.

Planirana ispitivanja će biti obavljena na modelima i prototipovima VN SF6 prekidača opsega nazivnih napona 145 - 420 kV i nazivnih struja kratkog spoja 40 - 63 kA koji koriste dva najčešća principa rada: potisni "puffer" princip i princip samooduvavanja ("selfblast"). Mjerenje hodograma kontakata u EnergoBos ovoj laboratoriji u Sarajevu i porasta pritiska u komorama VN SF6 prekidača tokom prekidanja struje kratkog spoja (u laboratoriji velike

snage) biće korištena u svrhu verifikacije proračuna istih veličina pri potpunoj simulaciji rada VN SF6 prekidača u HV CB Simulation. Nakon toga na osnovu razvojnih i/ili tipskih ispitivanja u laboratoriji velike snage i proračuna karakterističnih veličina prekidanja moguće je uspostaviti kriterij uspješnog gašenja struje kratkog spoja u VN SF6 prekidačima. Za ispitne cikluse koji se smatraju posebno zahtjevnim po pitanju prekidne moći VN SF6 prekidača, prvenstveno misli se na bliski kratki spoj, potrebno je izvršiti specijalistička mjerenja u okolini strujne nule. S druge strane, na osnovu simulacija ispitivanja tih ciklusa u HV CB Simulationu i rezultata karakterističnih veličina prekidanja u strujnoj nuli moguće je proračunati parametre kompozitnog black box modela električnog luka koji se koriste u modelu ispitnog kola u MatLAB Simulinku. Model ispitnog kola u MatLAB simulinku daje direktne rezultate, u smislu prekidač je ugasio struju kratkog spoja (datih karakteristika) ili nije. Rezultate simulacije ispitnog kola u MatLAB Simulinku potrebno je verifikirati na osnovu rezultata mjerenja u okolini strujne nule tokom ispitivanja u laboratoriji velike snage.

Metod uspostavljanja kriterija uspješnog gašenja struje kratkog spoja (samo na osnovu HV CB Simulation ili na osnovu simulacije ispitnog kola u okolini strujne nule koja omogućava i interakciju električni luk - ispitno kolo) će biti praktično primijenjen na apriorno predviđanje ishoda kratkospojnih ispitivanja u laboratoriji velike snage i procjeni prekidne moći predmetnih VN SF6 prekidača. Poseban akcenat u praktičnoj primjeni ovog metoda će biti na slučaju VN SF6 prekidača sa novim principom samooduvavanja i ograničenog rastojanja između lučnih kontakata i novim sistemom za rasterećenje pritiska gasa u kompresionoj komori.

Prethodno, dizajn novog principa ograničenog rastojanja između lučnih kontakata i novog sistema za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori u visokonaponskim SF6 prekidačima će biti provjeren kroz analizu rezultata različitih simulacija u: HV CB Simulation, ANSYS Fluent, MatLAB Simulink i dr., dok će moguća primjena ovog principa biti dokazana kroz brojna funkcionalna ispitivanja u EnergoBos-ovoj laboratoriji u Sarajevu i u drugim laboratorijama u svijetu.

## 5. OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOSI PREDLOŽENE TEZE DISERTACIJE

Osnovni naučni doprinosi predložene teze doktorske disertacije (projekta) jesu:

1. metod uspostavljanja kriterija uspješnog prekidanja struje kratkog spoja i procjene prekidne moći (u regionu termičkog proboja) bez obzira na princip rada VN SF6 prekidača uzimajući u obzir sve fizičke parametre prekidača ali i interakciju električni luk – ispitno kolo i
2. razvoj, dizajn i primjena novog principa samooduvavanja sa ograničenim rastojanjem lučnih kontakata i novim sistemom za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori na realnim visokonaponskim SF6 prekidačima.

Novi princip samooduvavanja sa ograničenim rastojanjem između lučnih kontakata (ovdje često spomenut i kao *princip sa ograničenim rastojanjem lučnih kontakata*) i novi sistem za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori VN SF6 prekidača objašnjen je u dijelu 3 *Motivacija i ciljevi za istraživanje*.

Osnovni naučni doprinosi predložene teze doktorske disertacije (projekta) bazirani su na:

- analizi rezultata kratkospojnih ispitivanja u laboratoriji velike snage za različite ispitne cikluse prema [33],
- primjeni posebno razvijenog računarskog programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača zasnovanom na pojednostavljenom integralnom fizikalnom modelu električnog luka – HV CB Simulation,
- za ispitne cikluse koji se smatraju posebno zahtijevnim po pitanju prekidne moći VN SF6 prekidača, prvenstveno misli se na bliski kratki spoj - na analizi specijalističkih mjerenja u okolini strujne nule (Current Zero Measurement - CZM),
- za ispitne cikluse koji se smatraju posebno zahtijevnim po pitanju prekidne moći VN SF6 prekidača, prvenstveno misli se na bliski kratki spoj - na primjeni posebno razvijenog računarskog programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača zasnovanom na pojednostavljenom integralnom fizikalnom modelu električnog luka za proračun karakterističnih veličina prekidanja u cilju proračuna parametara kompozitnog black box modela električnog luka potrebnih za simulaciju modela ispitnog kola u MatLAB Simulink-u, a sve u cilju predviđanja ishoda prekidanja struje kratkog spoja i procjene prekidne moći VN SF6 prekidača (u regionu termičkog proboja),
- analizi rezultata različitih simulacija (u HV CB Simulation, ANSYS Fluent, MatLAB Simulink i dr.) u cilju provjere ispravnosti dizajna i optimizacije novog principa ograničenog rastojanja između lučnih kontakata i novog sistema za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori u visokonaponskim SF6 prekidačima,
- analizi rezultata funkcionalnih i brojnih drugih ispitivanja (u EnergoBos-ovoj laboratoriji i drugim laboratorijama u svijetu) novog principa ograničenog rastojanja

između lučnih kontakata i novog sistema za rasterećenje pritiska u kompresionoj komori u visokonaponskim SF6 prekidačima i

- primjeni metoda za procjenu prekidne moći na VN SF6 prekidačima sa novim principom ograničenog rastojanja između lučnih kontakata i novim sistemom za rasterećenje pritiska gasa u kompresionoj komori.

Primjena metoda i kriterija za procjenu prekidne moći VN SF6 prekidača (bez obzira na princip rada prekidača) nudi potpunu korelaciju između parametara VN SF6 prekidača i rezultata simulacija posebno razvijenog računarskog programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača i simulacija modela ispitnog kola u MatLAB simulinku u okolini strujne nule u smislu uspješnog ili neuspješnog gašenja struje kratkog spoja. Na ovaj način, apriorno kratkospojnim ispitivanjima VN SF6 prekidača u laboratoriji velike snage, istraživači poznaju ishod ispitivanja uz postojanje određene statističke nesigurnosti, prvenstveno zbog stohastičke prirode električnog luka.

Bitno je napomenuti, da će planirana istraživanja biti izvršena na prekidačima širokog opsega po pitanju njihovih nazivnih karakteristika (nazivni napon 145 - 420 kV, nazivna struja kratkog spoja 40 - 63 kA) sa dva najčešće korištena principa rada: potisni ("puffer") princip i princip samooduvavanja ("selfblast"). Poseban akcenat će biti na rezultatima ispitivanja prekidača sa novim principima u SF6 tehnici VN prekidača, a to je prije svega princip samooduvavanja sa ograničenim rastojanjem lučnih kontakata u cilju obezbjeđivanja jednakih uslova za gašenje struje bez obzira na trajanje luka i sa novim sistemom za ograničavanje pritiska gasa u kompresionoj komori VN SF6 prekidača.

## 6. PREGLED POLAZNE LITERATURE

1. M. Kapetanović: "Visokonaponski prekidači", Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2002.
2. M. Kapetanović: "High Voltage Circuit Breakers", Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2011.
3. A. Ahmethodžić: "Korelacija parametara black box i integralnog fizikalnog modela luka na realnom SF6 prekidaču", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2011.
4. A. Ahmethodžić, M. Kapetanović, Z. Gajić: "Computer Simulation of High-voltage SF6 Circuit Breakers: Approach to Modeling and Application Results", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 04, pp. 1314-1322, 2011.
5. L. S. Frost, R. W. Liebermann: "Composition and transport properties of SF6 and their use in a simplified enthalpy flow arc model", Proc. IEEE, Vol. 59, pp. 474-485; 1971.
6. M. Muratović, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, S. Delić, W. B. Suh, "Nozzle Ablation Model: Calculation of Nozzle Ablation Intensity and its Influence on State of SF6 Gas in Thermal Chamber", International Conference on Solid Dielectrics, pp. 692-697, Bologna 2013.
7. N. Osawa, Y. Yoshioka: "Analysis of Nozzle Ablation Characteristics of Gas Circuit Breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 02, pp. 755-761, 2010.
8. Y. Guan, W. Liu, Junhui Wu, Junyong Wu: "Pressure Measurement and Characteristic Analysis on a 252-kV Puffer-Type SF6 Circuit Breaker", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 28, No. 04, pp. 2616-2622, 2013.
9. A. Ahmethodžić, M. Kapetanović, K. Sokolija, R. P. P. Smeets, V. Kertesz: "Linking a physical arc model with a black box arc model and verification", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 04, pp. 1029-1037, 2011.
10. R. P. P. Smeets, V Kertesz: "A New Arc Parameter Database for Characterization of Short-Line Fault Interruption Capability of High-Voltage Circuit Breaker", CIGRE Paris, report A3-110, 2006.
11. R. P. P. Smeets, V Kertesz: "Evaluation of high-voltage circuit breaker performance with a validated arc model", Proc. IEEE, Vol. 147, No. 02, pp. 121-125; 2000.
12. P. H. Schavemaker, L. van der Sluis, R. P. P. Smeets, V. Kertesz: "Digital testing of high-voltage circuit breakers", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 13, No. 02, pp. 52-56, 2000.



13. R. P. P. Smeets, V. Kertesz, S. Nishiwaki, K. Suzuki: "Performance evaluation of high-voltage circuit breakers by means of current zero analysis", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Asia Pacific. Vol. 01. pp. 424-429, 2002.
14. H. Urai, Y. Ooshita, M. Koizumi, N. Yaginuma, M. Tsukushi, R. P. P. Smeets: "Estimation of 80kA short-line fault interrupting capability in an SF6 gas circuit breaker based on arc model calculation", 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, pp. 129-132, Cardiff, 2008.
15. H. Urai, Y. Ooshita, M. Koizumi, N. Yaginuma, M. Tsukushi, "Estimation of interruption performance in high-voltage circuit breakers with a modified method for arc parameter evaluation", 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 559-565, Xian, 2011.
16. H. Knoblock, U Habedank: "Behaviour of SF6 high-voltage circuit breakers with different arc-extinguishing systems at short-line fault switching", IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, Vol. 148, No. 06, pp.273-279, 2001.
17. U. Habedank, H. Knoblock: "Zero-crossing measurements as a tool in the development of high-voltage circuit breakers", IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, Vol. 148, No. 06, pp.268-272, 2001.
18. T. Shinkai, K. Udagawa, H. Furuta, A. Schimamura: "Optimization Procedure for Improvement of Thermal Interruption Capability of Tandem-puffer Interrupting Chamber", IEEE Transactions on Power and Energy, Vol. 130, pp.819-825, 2010.
19. T. Shinkai, T. Koshiduka, T. Mori, T. Uchii, T. Tanaka, H. Ikeda: "Improvement of Thermal Interruption Capability in Self-blast Interrupting Chamber for New 245kV-50kA GCB", IEEE Transactions on Power and Energy, Vol. 127, pp.731-738, 2007.
20. Y.S. Cho, H. K. Kim, J. K. Chong, W. Y. Lee: "Investigation of SLF Interruption Capability of Gas Circuit Breaker with CFD and a Mathematical Arc Model", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 08, No. 02, pp. 354-358, 2013.
21. C. M. Franck, M. Seeger: "Application of High Current and Current Zero Simulations of High-Voltage Circuit Breakers", Beiträge aus der Plasmaphysik, Vol. 46, pp. 787-797, 2006.
22. A. Karimi, K. Niayesh, M. A. Bahmani: "An accurate evaluation method of the thermal interruption limit of power circuit breakers", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-4, Chicago, 2008.
23. M. Walter, C. M. Franck: "Improved Method for Direct Black-Box Arc Parameter Determination and Model Validation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 29, No. 02, pp. 580-588, 2014.

24. R. P. P. Smeets, V. Kertesz: "Application of a validated AC black-box arc model to DC current interruption", 2nd International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 1-4, Matsue, 2013.
25. R. P. P. Smeets, V. Kertesz, S. Nishiwaki, T. Koshizuka, K. Suzuki: "Short-Line Fault Interruption Assessment of High-Voltage Circuit Breakers by Means of Current Zero Analysis", CIGRE International Colloquium: Asset Management of Switching Equipment and New Trends in Switching Technologies, paper 20, Sarajevo, 2003.
26. P. H. Schavemaker, L. van der Sluis: "An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 2, pp. 580-584, 2000.
27. O. Mayr: "Beiträge zur theorie desstatischen und des dynamischen lichtbogens", Arch.f. El.-Tech., vd., Vol. 37, pp.588, 1943.
28. Z. Gajić: "Experience in Development and Application of a Computer Simulation Method for the Interrupter and Operating Mechanism Interaction of SF<sub>6</sub> Circuit Breakers", Colloquium Cigre SC-13, Paper No. 13-89, Sarajevo, 1989.
29. L. van der Sluis, W. R. Rutgers: "Comparison of test circuits for high-voltage circuit breakers by numerical calculations with arc models", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 07, No. 04, pp. 2037-2045, 1992.
30. A. Ahmethodžić, R. P. P. Smeets, V. Kertesz, M. Kapetanović, K. Sokolija: "Design Improvement of a 245-kV SF<sub>6</sub> Circuit Breaker With Double-Speed Mechanism Through Current Zero Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 25, No. 04, pp. 2496-2503, 2010.
31. M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Model of the New Mechanism for Double-Motion of Contacts in a Single Break HV SF<sub>6</sub> Circuit Breaker", CIGRE 2006, A3-101, Paris, 2006.
32. R. P. P. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanović, D. F. Peelo, A. Janssen: "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", Wiley, 2014.
33. International Standard IEC 62271-100, High-voltage switchgear and controlgear – Part 100: Alternating-current circuit-breaker, Edition 2.0 2008-04.