

mr. Amer Smajkić, dipl. el. ing.

Antuna Branka Šimića 10, Novi Grad Sarajevo

71000 Sarajevo

Bosna i Hercegovina

Sarajevo, 18. novembar 2016. godine

n/r Vijeću Doktorskog studija

Predmet: Prijava prijedloga teme doktorske disertacije

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 razmatranje prihvatljivosti predložene teme i određuje nastavnika/ mentora/ supervizora tokom pripreme doktorske disertacije (projekta), razmotrite i odobrite prijedlog teme doktorske disertacije (projekta) sa radnim naslovom:

"Univerzalni algoritam proračuna toka gasa i porasta pritiska u komorama VN prekidača"

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 Dr. Mirsada Kapetanovića, dipl. el. ing. redovnog 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: 04-6-2460/15 prema kojoj mi je prof. dr Mirsad Kapetanović određen za akademskog savjetnika u cilju definiranja uže oblasti doktorske teze i okvirnog koncepta teme doktorske disertacije.

Uz prijavu prijedloga teme doktorske disertacije 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,

mr. Amer Smajkić, dipl.el.ing.

Obrazloženje prijedloga teme doktorske disertacije

1. CURRICULUM VITAE

Osobni podaci

Prezime (ime oca) ime	Smajkić (Husein) Amer
Datum i mjesto rođenja	28. februar 1990., Mostar
Državljanstvo	Bosna i Hercegovina
Adresa stalnog boravka	Antuna Branka Šimića 10, Novi Grad Sarajevo

Obrazovanje

2004. Završio osnovnu školu Gnojnice u Mostaru (učenik generacije)

2008. Završio srednju elektrotehničku školu u Mostaru (učenik generacije)

2011. Završio prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, odsjek za elektroenergetiku, Završni rad na temu: "Uticaj mehanizma za dvostruku brzinu kontakata na prekidnu moć VN prekidača u uslovima BKS", prosjek ocjena 9.82

2013. Završio drugi ciklus studija - Magistar elektrotehnike - Diplomirani inženjer elektrotehnike - Elektrotehnički fakultet Sarajevo, odsjek za elektroenergetiku, Završni rad na temu: "Računarska simulacija rada VN SF6 prekidača sa dvostrukim kretanjem kontakata", prosjek ocjena 9.95 (dobitnik priznanja Zlatna značka univerziteta u Sarajevu)

Profesionalna aktivnost kandidata

2013.-	Energobos ILJIN d.o.o. Sarajevo - R&D engineer - inženjer u odjelu razvoja
2014.-	Elektrotehnički fakultet Sarajevo - Stručnjak iz prakse

1.1. OBJAVLJENI RADOVI- REFERENCE

1. **A. Smajkić**, M. H. Kim, M. Muratović, A. Hajdarović, R. Gačanović, "Mehanička ispitivanja pouzdanosti mehanizma za dvostruko kretanje kontakata VN prekidača", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika br. 9, pp. 20-25, 2015.
2. M. Muratović, **A. Smajkić**, K. H. Kim, M. H. Kim, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Criteria for successful short circuit current interruption on a real 245 kV 40/50 kA SF6 circuit breaker", 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 54-59, Busan, Korea, 2015.
3. M. H. Kim, K. H. Kim, **A. Smajkić**, M. Kapetanović, M. Muratović, "Influence of contact erosion on the state of SF6 gas in interrupter chambers of HV SF6 circuit breakers" IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 466-469, Santa Fe, USA, 2014.
4. **A. Smajkić**, M. H. Kim, M. Muratović, A. Hajdarović, R. Gačanović, "Mehanička ispitivanja pouzdanosti mehanizma za dvostruko kretanje kontakata VN prekidača" XII Savjetovanje BH komiteta CIGRE, R A3.01., Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
5. V. Bećirović, D. Bešlija, **A. Smajkić**, E. Sokić, M. Kapetanović, "Sistem za istovremeno mjerenje više hodograma u kinematskom lancu VN prekidača", 12. Bosanskohercegovačko savjetovanje BH K Cigre, STK A3, R A3.02., XII Savjetovanje BH komiteta CIGRE, Neum, 2015.
6. A. Hajdarović, **A. Smajkić**, D. Gorenc, M. Kapetanović, "Proračun erozije lučnih kontakata visokonaponskog SF6 prekidača", R A3.04., XII Savjetovanje BH komiteta CIGRE Neum, oktobar 2015.
7. M. Muratović, **A. Smajkić**, D. Gorenc, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Uspostavljanje kriterija uspješnog prekidanja struje kratkog spoja na primjeru VN SF6 prekidača 145 kV 40 kA", XII Savjetovanje BH komiteta CIGRE, R A3.06., Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
8. D. Gorenc, M. Muratović, **A. Smajkić**, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Određivanje kriterija za uspješno prekidanje struje kratkog spoja u VN SF6 prekidaču novog GIS-a 145 kV", XII Savjetovanje HRO CIGRE, R A3-08., Šibenik, 2015.
9. **A. Smajkić**, M. Kapetanović, M. Muratović, "VN prekidači sa dvostrukim kretanjem kontakata - Karakteristike i primjena", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRE, R A3.02., Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.

1.2. PROJEKTI I STUDIJE

1. Joint development and design of ILJIN's GIS circuit breaker 245kV, 50kA, 50Hz, 2013.-2015.
2. Joint development and design of ILJIN's GIS circuit breaker 420kV, 63kA, 50Hz , 2013.-
3. New approach to arc modeling and computer software for HV SF6 circuit breaker simulation, 2013.-
4. Outside double motion mechanism for ILJIN's 420 GCB, 2013.
5. Inside double motion mechanism for ILJIN's 420 GCB, 2013.
6. Computer simulation of the CB and analyses of the test performed at KEMA on KONČAR EVA GIS CB 145 kV 40 kA, 2014.
7. Joint development and design of KONČAR EVA GIS CB 145 kV 40 kA, 2014.
8. Arc modeling and computer software for KONČAR EVA GIS 145 kV 40 kA circuit breaker simulation, including executable computer program for KONCAR EVA's circuit breakers and training of KONCAR EVA engineers, 2014.
9. Assistance in preparation and analysis of all ILJIN's tests at high power laboratories KERI, CESI and KEMA, 2015.
10. Design of models for separate, preliminary investigation of specific phenomena, 2015.
11. Development of the model of 420 kV GCB for Reliability testing of inside double motion (IDM) mechanism, 2015.
12. Reliability testing of inside double motion (IDM) mechanism for ILJIN's 420 GCB, 2015.
13. Joint development and design of KONCAR EVA 123 kV Live Tank CB, 2015.
14. Razvoj mjernog sistema za istovremeno mjerenje više hodograma u kinematskom lancu, pritiska u komorama sklopnog elementa i drugih karakterističnih veličina VN prekidača, 2015.
15. Razvoj univerzalnog algoritma isticanja SF6 gasa i analiza porasta pritiska u komorama VN prekidača, 2015.-
16. Development of the model of 420 kV GCB for SF6 gas pressure measurements inside interrupter chambers during no-load operations, 2015.
17. Kratkospojna ispitivanja VN SF6 GIS prekidača ILJIN 420 kV 63 kA u laboratoriji velike snage CESI, 2015.
18. Joint development and design of KONČAR EVA GIS CB 145 kV 40 kA 60 Hz, 2016.-

2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

Električni luk je osnovni element u procesu prekidanja struje u sistemima za prenos i distribuciju električne energije. Iako je do sada objavljen veliki broj metoda proračuna i matematskih modela luka koji su manje ili više uspješno primijenjeni u razvoju, ispitivanju ili eksploataciji prekidača, ne postoji još uvijek generalno prihvaćeni metod proračuna sklopnog luka u prekidačima [1][2].

Prekidači su mehanički sklopni aparati koji uklapaju, trajno vode i prekidaju struje u normalnim pogonskim uslovima i koji uklapaju, kratkotrajno podnose i prekidaju nazivnu vrijednost struje kratkog spoja. Prema tome, može se zaključiti da je prekidač sklopni aparat koji može odgovoriti na najveći broj zahtjeva i zadataka u sistemu [1], [2].

Kako bi se minimizirao broj jako skupih ispitivanja VN prekidača u laboratorijama velike snage javila se potreba za razvojem programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača [3]. Osnovni cilj upotrebe računarskih programa je značajno smanjenje dužine i troškova razvojnih projekata i poboljšanja njihovog kvaliteta [4]. U nastavku je dat pregled autoru dostupne literature koja se bavi računarskim simulacijama rada VN prekidača.

U radu [5] autori A. Ahmethović, 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*, Frost-Liebermann model luka [6]). Ovaj računarski program omogućava određivanje pozicije pokretnih kontakata, porast pritiska u termalnim i kompresionim komorama prekidača, tok SF6 gasa kroz mlaznicu i mnogo drugih izlaznih parametara kao funkcije u vremenu tokom procesa prekidanja struje kratkog spoja u visokonaponskim SF6 prekidačima. Omogućena je simulacija prekidača zasnovanih na klasičnom potisnom „puffer“ i samokompenzirajućem „self-compensated“ principu gašenja luka i interakciju sa motornoopružnim pogonskim mehanizmima. Autori naglašavaju da računarski program ne nudi mogućnost simulacije prekidača zasnovanih na principu samooduvavanja „self blast“.

Autori u [7] predstavljaju računarski program za simulaciju rada unaprijeđenog pogonskog mehanizma za 123/145kV 31.5/40kA prekidač zasnovan na klasičnom potisnom „puffer“ principu rada. U radu je analiziran uticaj promjene pojedinih parametara na hod kontakta i prekidnu moć prekidača. Proračun hoda kontakta je validiran za slučajeve operacije isklopa bez strujnog opterećenja (no load), kao i za slučaj prekidanja struje tokom ispitnog ciklusa T100s.

Z. Gajić u [4] i [8] predstavlja računarski program koji nudi mogućnost proračuna hoda pokretnog kontakta, porasta pritiska u kompresionoj komori, masenog protoka SF6 gasa kroz mlaznicu, itd. Program je validiran za više srodnih prekidača zasnovanih na klasičnom potisnom „puffer“ principu i samokompenzirajućem „self-compensated“ principu gašenja luka.

Slični računarski programi, zasnovani na integralnom fizikalnom modelu luka, su predstavljeni i validirani u radovima [9] i [10]. Glavna razlika u odnosu na prethodno pobrojane radove ogleda se u tome što su modelirani VN SF6 prekidači zasnovani na principu samooduvavanja „self blast“, te obuhvataju i određene dodatne mogućnosti.

U radu [9] predstavljen je model ablacije mlaznice koji je implementiran u računarski program za simulaciju rada VN prekidača. Model je validiran na osnovu mjerenja intenziteta ablacije mlaznice i porasta pritiska tokom prekidanja struje kratkog spoja.

U radu [10] predstavljen je model erozije kontakata i analiziran uticaj erozije kontakata na stanje gasa u komorama sklopnog elementa. Osim toga razmatran je i uticaj ranijeg uspostavljanja luka usljed skraćanja kontakata na prekidnu moć prekidača. Model erozije kontakata je validiran usporedbom rezultata simulacija i mjerenja intenziteta erozije nakon više ispitivanja u laboratoriji velike snage. Računarski program sadrži implementiran i model ablacije predstavljen u [9].

Autori *N. Osawa* i *Y. Yoshioka* u [11] predstavljaju računarski program koji omogućava proračun porasta pritiska u kompresionoj komori i pojedinim dijelovima mlaznice VN prekidača. U obzir je uzeta kompresija SF₆ gasa, ablacija mlaznice, energija luka, začepljenje grla mlaznice (mehaničko i usljed presjeka luka) i interakcija sa pogonskim mehanizmom.

Često se vrši kombinovanje dva ili više različitih računarskih programa kako bi se iskoristile prednosti svakog od njih. Autori u [12] kombinuju računarski program zasnovan na integralnom fizikalnom modelu električnog luka [6] sa programom koji omogućava dinamički proračun mehanizma. Oba programa rade paralelno pri čemu se razmjena podataka odvija kroz jednu neutralnu datoteku kojoj pristupaju oba programa. Usporedba simulacije i izmjerenog hodograma je izvršena za dva prekidača različitih naponskih nivoa.

M. Muratović i ostali u [13] kombinuju računarski program zasnovan na integralnom fizikalnom modelu luka i CFD (*Computational Fluid Dynamics*) program za proračun toka gasa kako bi odredili raspodjelu pritiska duž mlaznice VN prekidača. Proračun je validiran mjerenjima pritiska za no-load operaciju i on-load operacije isklopa.

A. Ahmethodžić u doktorskoj disertaciji [14] i zajedno sa ostalim autorima u [15] koristi računarski program predstavljen u [5] kako bi dobio međukontaktno rastojanje, pritisak u kompresionoj komori i maseni protok kroz mlaznicu u trenutku strujne nule. Na osnovu ovih vrijednosti vrše se proračuni parametara *black box* modela luka koji služe kao ulaz za Matlab simulaciju.

Autori u [16] uspostavljaju kriterij za uspješno prekidanje struje u uslovima bliskog kratkog spoja na osnovu proračuna hoda kontakata i pritiska u termalnoj komori. Pored toga uspješno je primijenjen metod povezivanja između parametara integralnog fizikalnog i *black box* modela luka na realnom SF₆ prekidaču kao u [15], te je isti korišten za predviđanje ishoda prekidanja struje u uslovima bliskog kratkog spoja.

S. Delić, D. Bešlija, M. Kapetanović i ostali u [17]-[20] kombinuju tri računarska programa u cilju određivanja probojnog napona tokom sklapanja malih kapacitivnih struja. Računarski program zasnovan na integralnom fizikalnom modelu luka daje početne uslove za stacionarne proračune toka SF₆ gasa u CFD programu. Bitno je naglasiti da je isti model SF₆ gasa korišten u oba programa. Proračuni se obavljaju u diskretnim trenucima počevši od trenutka razdvajanja kontakata. Za iste vremenske trenutke vrše se i proračuni električnog polja, te se dobiveni rezultati gustoće SF₆ gasa i jakosti električnog polja kombinuju kako bi se odredio probojni napon u svakom vremenskom trenutku. Metod je primijenjen na prekidače različitih naponskih nivoa od 145kV do 420kV i nazivnih struja kratkog spoja od 40kA do 63kA.

Autori u [21] prikazuju modeliranje povezanog proračuna turbulentnog toka gasa SF₆ i proračuna jakosti polja u visokonaponskom prekidaču tokom prekidanja malih kapacitivnih struja uz primjenu računarskog programa COMSOL Multiphysics. Na osnovu proračunatih vrijednosti gustine gasa SF₆ i raspodjele jakosti električnog polja proveden je proračun dielektričnih naprezanja na oba lučna kontakta tokom prekidanja malih kapacitivnih struja.

Autor *H. Zildžo* u doktorskoj disertaciji [22] vrši istraživanje sa ciljem numeričkog proračuna karakteristika nestacionarnog turbulentnog 2D toka stišljivog viskoznog fluida. Uz primjenu razvijenog računarskog programa "DD" razmatrani su fenomeni koji se javljaju u međukontaktom prostoru visokonaponskog prekidača pri prekidanju malih kapacitivnih struja.

U radu [23] autori predstavljaju alat razvijen na bazi magneto- hidrodinamskog (MHD- *Magnetohydrodynamics*) 2D modela električnog luka i CFD računarskog programa. Validacija je izvršena na osnovu kratkospojnih ispitivanja provedenih na prekidaču 550kV.

Autori u [24] koriste MHD model luka u kombinaciji sa modelom ablacije mlaznice kako bi utvrdili korelaciju ablacije mlaznice sa strujom kratkog spoja i trajanjem luka. Proces je podjeljen u dva dijela, pri čemu prvo dolazi do zagrijavanja zidova mlaznice, a zatim do same ablacije mlaznice. Pokazano je kako intenzitet ablacije značajno raste s porastom struje kratkog spoja i trajanjem luka.

Autori u [25] i [26] definiraju odnos kritične vrijednosti jakosti električnog polja i parcijalne gustine SF₆ gasa. Ovaj metod je moguće primijeniti na razne ispitne cikluse kod prekidanja struja kratkog spoja, odnosno za različite oblike prelaznog povratnog napona (PPN). Analizom je pokazano da je vjerovatnoća nastanka proboja u trenutku 110μs značajno manja nego u trenutku 80 μs nakon strujne nule.

H.K. Kim i ostali u radovima [27]-[29] prikazuju paralelne numeričke proračune nestacionarnog toka gasa i raspodjele jakosti električnog polja za veliki broj pozicija kontakata. Proračuni su vršeni kako za slučaj prekidanja velikih struja, tako i za slučaj malih kapacitivnih struja u cilju optimizacije dizajna prekidača. Nakon strujne nule autori su računali podnosivo električno polje kao funkciju pritiska i temperature SF₆ gasa u međukontaktom prostoru. Uspostavljen je kriterij dielektričnog proboja međukontaktog rastojanja.

Paralelne numeričke proračune nestacionarnog toka SF₆ gasa i raspodjele električnog polja koriste i autori u [30] i [31]. Proračuni su vršeni u cilju određivanja optimalne vrijednosti prečnika grla mlaznice visokonaponskog prekidača. Na dijagramima rezultata prikazana je dielektrična čvrstoća u zavisnosti od hoda kontakata i vremena.

Iz autoru dostupne literature nije bilo moguće uočiti da računarski programi zasnovani na integralnom fizikalnom modelu luka uzimaju u obzir koeficijente protoka za tok SF₆ gasa između pojedinih komora sklopnog elementa. Zavisno od oblika veze (ventila) kojima su komore povezane ovo može imati značajan uticaj na maseni protok gasa između pojedinih komora. U nastavku je dat pregled literature koja se bavi određivanjem koeficijenata protoka za druga područja primjene, a što će u konačnici biti primijenjeno i u sklopu ovog rada.

B. Pikula u doktorskoj disertaciji [32] analizira tok goriva duž cijelog brizgača goriva. Proticanje goriva je analizirano kroz različite konstruktivne oblike unutrašnjosti brizgača, kao što su: štap filter, proširenja i suženja, zapremine različitih oblika, s posebnim osvrtom na proticanje kroz konusni procjep i zapreminu ispod igle brizgača i mlaznice.

Za sve ove konstruktivne oblike su na osnovu analitičkih izraza i eksperimentalnih mjerenja na realnom brizgaču određeni koeficijenti protoka.

Autori u [33] predstavljaju empirijski model za određivanje koeficijenata protoka koji je moguće primijeniti na različite geometrije ventila. Naglašeno je da se koeficijenti protoka za relativno velike presjeke isticanja smatraju konstantnim, te su u ovom radu razmatrani ventili samo sa malim poprečnim presjekom.

Autori u [34] određuju koeficijente protoka za ventil sa pokretnom iglom (*needle valve*) za različitu otvorenost ventila, odnosno različitu poziciju igle. U ovom radu su poređeni koeficijenti protoka dobiveni proračunima u ANSYS Fluent 14.5 i odgovarajućim eksperimentima.

Sličnu proceduru provode i autori u [35], s tim da je razmatran protok vode kroz venturijevu mlaznicu. Razlika između koeficijenata protoka dobivenih mjerenjem i proračunom kreće se u granicama od 5%.

Rad [36] analizira dvije vrste ventila: jednostavno suženje i izduženu mlaznicu. Za obje vrste ventila su izračunati koeficijenti protoka za različite vrijednosti Reynoldsovog broja i različite modele turbulencije ($k-\epsilon$ i $k-\omega$). Nakon toga je izvršena usporedba dobivenih vrijednosti sa vrijednostima iz standarda ISO 5167:2003, pri čemu su konstatovana manja odstupanja za $k-\omega$ model turbulencije.

Autori u [37] određuju koeficijent protoka za ventil u obliku suženja za različite dijametre cijevi i za različit odnos dijametra ventila i dijametra cijevi. Ukupno je razmatrano 9 različitih geometrija, te su koeficijenti određeni za vrijednosti Reynoldsovog broja u dijapazonu od 100 do 10000. Zaključeno je da je koeficijent protoka približno konstantan za vrijednosti Reynoldsovog broja iznad 25000.

Autori u [38] analiziraju isticanja kroz mlaznicu, te zaključuju da vrijednost koeficijenta protoka značajno opada za niže vrijednosti Reynoldsovog broja. Proračuni su vršeni kako analitički, tako i koristeći ANSYS Fluent, te su dobiveni rezultati uspoređeni sa eksperimentalnim rezultatima predstavljenim u [39].

Iz ovog pregleda kandidatu dostupne literature, može se uočiti da nema radova koji koriste integralni fizikalni model koji omogućava modeliranje VN prekidača bez obzira na princip rada, te koji bi ujedno omogućavao povezivanje komora sklopnog elementa prekidača različitim vezama (ventilima).

3. MOTIVACIJA I CILJEVI ZA ISTRAŽIVANJE

Visokonaponski prekidači predstavljaju jedini element u električnom postrojenju koji ima mogućnost da odkloni struju kratkog spoja koja može dostići vrijednosti višestruko veće od nazivne struje. Uzimajući to u obzir, neophodno je da visokonaponski prekidači dokažu svoju učinkovitost kroz niz zahtjevnih ispitivanja. Ispitivanja su podijeljena u različite vrste koje se razlikuju po tipu i složenosti. Stoga, postoje ispitivanja na klimatske uslove, mehanička ispitivanja, ispitivanja otpornosti na zemljotres, dielektrička ispitivanja, kratkospojna ispitivanja i brojna druga ispitivanja. Najzahtjevnija ispitivanja su kratkospojna u laboratorijama velike snage, čija se zahtjevnost ogleda u pojavi električnog luka kojeg je potrebno ugasiti. Upravo zbog toga su ova ispitivanja ujedno i jako skupa. Kako bi se minimizirao broj ispitivanja VN prekidača u laboratorijama velike snage javila se potreba za razvojem programa za simulaciju rada VN SF6 prekidača.

Simulacije kao izlazni rezultat daju više podataka, kao što su:

- hod pokretnog lučnog kontakta (ili oba lučna kontakta u slučaju postojanja mehanizma za dvostruko kretanje kontakata)
- porast pritiska u pojedinim komorama VN prekidača tokom no load operacija
- uticaj gorenja električnog luka na porast pritiska u pojedinim komorama VN prekidača tokom prekidanja struja kratkih spojeva
- maseni protok gasa između pojedinih komora sklopnog elementa
- uticaj gorenja električnog luka na hod kontak(a)ta
- uticaj gorenja električnog luka na ablaciju mlaznice i eroziju kontakata, itd...

Sve prethodno pobrojano ima i međusobnu zavisnost, tako da je modeliranje istih pojava izuzetno zahtjevno. Postoje posebno razvijeni softverski alati kojima je moguće simulirati samo neke od prethodno pobrojanih procesa, dok se ostali procesi djelimično ili u potpunosti zanemaruju. Naprimjer, kod većine simulacija koje se bave prekidanjem malih kapacitivnih struja simulacija je zasnovana na CFD numeričkom modeliranju nestacionarnog toka SF6 gasa, čiji se rezultati kombiniraju sa proračunima elektrostatskog polja. Većina takvih simulacija ne uzima u obzir pojavu električnog luka, što predstavlja nezatno zanemarenje obzirom na relativno male vrijednosti struje. Također, hod kontakata se zadaje kao ulazni podatak čime se interakcija sa pogonskim mehanizmom zanemaruje.

Kada su u pitanju simulacije operacije isklopa tokom prekidanja struja kratkih spojeva, neophodno je modelirati i dejstvo električnog luka. Usljed toga javila se potreba da se pored jednačina koje opisuju tok gasa u CFD proračunima dodaju i odgovarajuće jednačine magneto- hidrodinamskog modela električnog luka. Računarski programi koji koriste MHD modele su dosta složeniji i zahtjevaju značajno veće vrijeme proračuna u odnosu na pojednostavljene CFD programe.

Postoje i računarski programi zasnovani na integralnom fizikalnom modelu električnog luka. Kao i programi zasnovani na MHD proračunima i ovi programi se u velikoj mjeri mogu međusobno razlikovati po kompleksnosti i funkcionalnostima koje nude. Zajednička karakteristika svih računarskih programa iz ove grupe jeste značajno kraće vrijeme proračuna. Glavni nedostatak ovih programa se ogleda u tome što ne pružaju mogućnost diskretizacije prostora, što se najviše manifestuje na rezultate proračuna toka gasa.

Kao rezultat daju usrednjene vrijednosti stanja gasa u pojedinim komorama, dok se zanemaruje prostorna raspodjela pojedinih veličina. S druge strane, programi ovakvog tipa omogućavaju modeliranje kompletnog procesa rada VN prekidača, od pogonskog mehanizma, kretanja kontakata, porasta pritiska u svakoj pojedinoj komori sklopnog elementa, toka gasa između pojedinih komora, itd. Zbog ovoga moguće je uzeti u obzir uticaj promjene bilo kojeg konstrukcionog parametra na sve pobrojane i mnoge druge veličine koje se dobiju kao rezultat proračuna.

Računarski programi zasnovani na integralnom fizikalnom modelu luka su uglavnom razvijeni za jednog proizvođača, te tako imaju mogućnost modeliranja jednog prekidača ili eventualno grupe sličnih prekidača. Međutim, ukoliko je potrebno modelirati VN prekidače koji su zasnovani na različitim principima gašenja luka (potisni „puffer“, princip samooduvavanja „self blast“ ili hibridni „puffer“), koji imaju različit broj komora koje su na različite načine međusobno povezane, te ako tome još dodamo da neki prekidači posjeduju mehanizam za dvostruko kretanje kontakata, dolazi do potrebe za izmjenama u samom algoritmu programa.

Osnovni cilj istraživanja ove doktorske disertacije jeste ponuditi unaprijeđenje nekog od postojećih ili izraditi novi algoritam proračuna toka gasa i porasta pritiska u komorama sklopnog elementa VN prekidača koji će omogućiti međusobno povezivanje svih komora VN prekidača na više načina, uzimajući u obzir tok gasa, energiju oslobođenu u stablu električnog luka, ablaciju mlaznice, eroziju kontakata, kao i interakciju sklopnog elementa sa pogonskim mehanizmom. Ovim se postiže univerzalnost i mogućnost modeliranja bilo kojeg gasnog VN prekidača bez obzira na princip rada, broj komora, načina međusobne povezanosti komora, kretanja jednog ili oba kontakta, itd. Ovaj algoritam će biti implementiran u računarski program za simulaciju rada VN prekidača HV CB Simulation zasnovanom na integralnom fizikalnom modelu luka.

4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Planirana istraživanja tokom izrade disertacije bazirana su na:

- odgovarajućim ispitivanjima na modelima VN SF6 prekidača u EnergoBos-ovoj laboratoriji u Sarajevu,
- izradi mjernog sistema za istovremeno mjerenje hoda kontakata i pritiska u komorama VN prekidača,
- mjerenjima pritiska u komorama VN prekidača tokom operacija bez struje (no-load);
- eksperimentalnim istraživanjima i ispitivanjima na realnim VN SF6 prekidačima u visokonaponskim laboratorijima i laboratorijama velike snage,
- mjerenjima porasta pritiska u komorama VN SF6 prekidača tokom prekidanja struje kratkog spoja,
- numeričkim proračunima stacionarnog toka realnog SF6 gasa kroz pojedine veze (ventile) između komora sklopnog elementa,
- analizi dobivenih rezultata računarskih simulacija i numeričkih proračuna, te određivanja koeficijenata protoka,
- računarskoj simulaciji rada visokonaponskih prekidača baziranoj na integralnom fizikalnom modelu,
- validaciji rezultata dobivenih proračunima poređenjem sa rezultatima eksperimentalnih istraživanja.

Ispitivanja obavljena u sklopu ove disertacije će biti sprovedena 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 ("self blast").

Mjerenja hodograma kontakata i porasta pritiska tokom no load operacija u komorama VN SF6 prekidača u EnergoBosovoj laboratoriji u Sarajevu, te tokom prekidanja struje kratkog spoja (u laboratorijama velike snage) bit će korištena u svrhu validacije proračuna istih veličina u simulaciji rada VN SF6 prekidača u HV CB Simulation softveru.

U program će biti implementiran univerzalni algoritam toka gasa koji će omogućiti međusobno povezivanje svih komora VN prekidača na više načina. Algoritam će omogućiti modeliranje bilo kojeg gasnog VN prekidača bez obzira na princip rada, broj komora, načina međusobne povezanosti komora, kretanja jednog ili oba kontakta, te uzeti u obzir sve konstruktivne parametare prekidača koji utiču na procese u međukontaktom prostoru tokom operacije isklopa, uključujući parametre pogonskog mehanizma i geometriju sklopnog elementa. Rezultati računarskih simulacija su vremenske promjene relevantnih fizikalnih parametara tokom kompletne operacija isklopa.

Budući da je ovaj program zasnovan na integralnom fizikalnom modelu luka i da se ne vrši diskretizacija prostora, za proračun toka gasa između komora sklopnog elementa VN prekidača potrebno je uzeti u obzir koeficijente protoka za sve veze (ventile) kojima su komore međusobno povezane. Za određivanje koeficijenata protoka bit će korišteni numerički proračuni stacionarnog toka realnog gasa za sve veze (ventile) u sklopnom elementu VN prekidača.

Maseni protoci gasa dobiveni ovim proračunima u jednom od CFD softverskih alata bit će upoređeni sa masenim protocima dobivenim u HV CB Simulation-u, što će predstavljati metod za određivanje koeficijenti protoka. Ovako određeni koeficijenti protoka će dalje biti korišteni kao ulazni podaci za program.

Univerzalni algoritam toka gasa će biti validiran poređenjem rezultata proračuna sa eksperimentalnim istraživanjima i ispitivanjima.

5. OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOS PREDLOŽENE TEZE DISERTACIJE

Osnovni potencijalni naučni doprinos predložene teze doktorske disertacije (projekta) jeste poboljšanje postojećih ili izrada novog algoritma proračuna toka gasa i porasta pritiska u komorama sklopnog elementa gasnih VN prekidača. Algoritam će omogućiti međusobno povezivanje svih komora VN prekidača na više načina, uzimajući u obzir tok gasa, energiju oslobođenu u stablu električnog luka, ablaciju mlaznice, eroziju kontakata, kao i interakciju sklopnog elementa sa pogonskim mehanizmom. Algoritam će biti primijenjen na računarski program za simulaciju rada VN prekidača „HV CB Simulation“.

Pored navedenog očekuje se definiranje novih pravaca za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

6. PREGLED POLAZNE LITERATURE

- [1] M. Kapetanović, "High Voltage Circuit Breakers", Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2011.
- [2] M. Kapetanović, "Visokonaponski prekidači", Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2002.
- [3] A. Smajkić, "Računarska simulacija rada VN SF6 prekidača sa dvostrukim kretanjem kontakata", završni rad drugog ciklusa studija, Sarajevo, 2013.
- [4] Z. Gajić, "Određivanje uticaja geometrije sklopnih elemenata potisnih i srodnih SF6 prekidača i struje prekidanja na isklonnu pogonsku energiju u procesu gašenja električnog luka", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 1988.
- [5] A. Ahmethodžić, M. Kapetanović, Z. Gajić, "Computer Simulation of High-voltage SF6 Circuit Breakers: Approach to Modeling and Application Results", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18 No. 4, 2011.
- [6] 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.
- [7] M. Muratović, M. Kapetanović, S. Delić, S. Staszak, Z. Janiak, "Simulations of an Improved Operating Mechanism for High Voltage SF6 GIS Circuit Breaker", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp. 1-4, Poznan, Poland, 2014.
- [8] Z. Gajić, "Experience in Development and Application of a Computer Simulation Method for the Interrupter and Operating Mechanism Interaction of SF6 Circuit Breakers", Colloquium Cigre SC-13, Paper No. 13-89, Sarajevo, 1989.
- [9] 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", IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), pp. 692-697, Bologna, Italy, 2013.
- [10] M. H. Kim, K. H. Kim, A. Smajkić, M. Kapetanović, M. Muratović, "Influence of Contact Erosion on the State of SF6 Gas in Interrupter Chambers of HV SF6 Circuit Breakers", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 466-469, Santa Fe, USA, 2014.
- [11] N. Osawa, Y. Yoshioka: "Calculation of transient puffer pressure rise taking mechanical compression, nozzle ablation and arc energy into consideration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, pp. 143-148, January 2005.
- [12] M. Cui, C.Y. Bae, J.Y. Park, J. Choi, S.W. Park, Y.G. Kim, "Coupled Fluid-Mechanical Analysis Method in High-Voltage Circuit Breakers Design", CIGRE Conference, paper A3-301, Paris, 2016.
- [13] M. Muratović, S. Delić, A. Hajdarović, M. Kapetanović, Y. Guan, "Pressure Distribution along the Nozzle of a HV SF6 Circuit Breaker", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 470-473, Santa Fe, USA, 2014.

- [14] A. Ahmethodžić, "Korelacija parametara black box i integralnog fizikalnog modela luka na realnom SF6 prekidaču", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2011.
- [15] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18 No. 4, August 2011.
- [16] M. Muratović, A. Smajkić, K. H. Kim, M. H. Kim, M. Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Criteria for Successful Short Circuit Current Interruption on a Real 245 kV 40/50 kA SF6 Circuit Breaker", 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 54-59, Busan, Korea, 2015.
- [17] S. Delić, D. Bešlija, D. Gorenc, A. Hajdarović, M. Kapetanović, "Capacitive Current Breaking Capability Estimation for a 145 kV 40 kA GIS Circuit Breaker", 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 54-59, Busan, Korea, 2015.
- [18] S. Delić, D. Bešlija, M. Muratović, M. H. Kim, M. Kapetanović, H. Zildžo, "New Approach to Breakdown Voltage Estimation after Interruption of Capacitive Current", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 462-465, Santa Fe, USA, 2014.
- [19] D. Bešlija, S. Delić, Kim Kyong-Hoe, M Kapetanović, A. Ahmethodžić, "Calculation of Steady SF6 Gas Flow through a 420 kV Circuit Breaker Nozzle and Electric Field Distribution", Journal of Energy and Power Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 1964-1973, November 2014.
- [20] D. Bešlija, M. Kapetanović, S. Delić, A. Ahmethodžić, "Proračun stacionarnog isticanja SF6 gasa kroz mlaznicu 420 kV prekidača i raspodjele električnog polja", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika br. 7, pp. 4-12, 2013.
- [21] H. Zildžo, R. Gačanović, H. Matoruga, "Electro- gas model breaking of capacitive currents within high voltage SF6 circuit breaker", ICAT, 2011 XXIII International Symposium, 2011.
- [22] H. Zildžo, "Rješavanje problema hlađenja kod SF6 prekidača visokog napona metodom konačnih elemenata", doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Sarajevo, 1995.
- [23] J. Mou, J. Guo, X. Jiang, X. Li, B. Chen, Z. Xin, Y. You, "Computer simulation tool for the design and optimtion for UHV SF6 circuit breakers", CIGRE Conference, paper A3 – 203, 2012.
- [24] J. Zhang, C. Lu, Y. Guan, W. Liu, "Calculation of Nozzle Ablation During Arcing Period in an SF6 Auto-Expansion Circuit Breaker", Plasma Science and Technology, Vol. 18, No. 5, pp. 506-511, May 2016.
- [25] X. Jiang, X. Li, H. Zhao, S. Jia, J. D. Yan, K. Zhu, "Analysis of the Dielectric Breakdown Characteristics for a 252-kV Gas Circuit Breaker", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, No. 3, July 2013.
- [26] X. Li, H. Zhao, X. Jiang, S. Jia, Q. Wang, "Breakdown Electric Field Calculation of Hot SF6 and its Application on High Voltage Circuit Breakers", IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), USA, 2012.

- [27] H.K. Kim, J. K. Chong, K. D. Song, K. Y. Park, "Analysis of dielectric breakdown of SF6 gas circuit breaker during large current interruption", 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, 2008.
- [28] H.K. Kim, J. K. Chong, K. D. Song, "Analysis of Dielectric Breakdown of Hot SF6 Gas in a Gas Circuit Breaker", Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 2, pp. 264-269, 2010.
- [29] H.K. Kim, K. Y. Park, C. H. Im, H. K. Jung, "Optimal Design of Gas Circuit Breaker for Increasing the Small Current Interruption Capacity", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 3, May 2003.
- [30] Y. Cao, X. Luo, H. Chunguang, L. Jing, X. Jiang, "The Research on Effect of Nozzle Throat Diameter of High Voltage SF6 Circuit Breaker on Breaking Capability", International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008.
- [31] Y. Cao, X. Liu, J. Li, C. Hou, "Research on Dielectric Recovery Characteristic and Band Width Phenomena in High Voltage SF6 Circuit Breaker", WAC 2008., World Automation Congress, 2008.
- [32] B. Pikula, "Istraživanje karakteristika sistema za ubrizgavanje pri upotrebi dizela, biodizela i njihovih mješavina u različitim eksploatacionim uslovima", doktorska disertacija, Mašinski fakultet Sarajevo, Sarajevo, 2007.
- [33] D. Wu, R. Burton, G. Schoenau, "An Empirical Discharge Coefficient Model for Orifice Flow", International Journal of Fluid Power, 3:3, 13-19, 2002.
- [34] R. Khowal, D.N. Jadhav, T. Chaudhari, "Flow Coefficient Valve Calculation using CFD Analysis for Needle Valve", Special Issue on International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering (IJTARME), Vol. 5, No. 2, pp. 66-69, 2016.
- [35] N. Tamhankar, A. Pandhare, A. Joglekar, V. Bansode, "Experimental and CFD analysis of flow through venturimeter to determine the coefficient of discharge", International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology, Vol. 3(4), Paper 34, March 2014.
- [36] F. H. J. Imada, F. Saltara, J. L. Baliño, "Numerical determination of discharge coefficients of orifice plates and nozzles", 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), pp. 1755-1760, Brasil, 2013.
- [37] A. Naveenji, S. Malavarayan, M. Kaushik, "CFD analysis on discharge coefficient during non-Newtonian flows through orifice meter", International Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 2(7), pp. 3151-3164, 2010.
- [38] R. Arun, K.J. Yogesh Kumar, V. Seshadri, "Prediction of discharge coefficient of Venturimeter at low Reynolds numbers by analytical and CFD Method", International Journal of Engineering and Technical Research, Vol. 3(5), pp. 168-173, May 2015.
- [39] G. Stobie, C. Phillips, R. Hart, S. Svedeman, "Erosion in a Venturi Meter with Laminar and Turbulent Flow and Low Reynolds Number Discharge Coefficient Measurements", 25th International North Sea Flow Measurement Workshop, Norway, 2007
- [40] Y. Guan, W. Liu, Junhui Wu, Junyong Wu, "Pressure Measurements and Characteristic Analysis on a 252-kV Puffer-Type SF6 Circuit Breaker", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, No. 4, October 2013.

- [41] Y. Guan, W. Liu, J. Wu, W. Li, "Interrupter Pressure Measurement of a 252 kV SF6 Circuit Breaker", 1st International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology – Xi'an – China, 2011.
- [42] A. Kornhaas, "Experimentelle Untersuchungen zur Druckentwicklung in einem SF6-Selbstblusschalter beim Schalten großer Ströme", doctoral thesis, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2013.
- [43] 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.
- [44] Tadashi Mori, "Development of Gas Circuit Breaker Chambers with Low Operating Energy Based on Gas-Flow Simulation", doctoral thesis, Nagoya University, Japan, 2011.
- [45] T. Mori, H. Kawano, K. Iwamoto, Y. Tanaka, E. Keneko, "Gas- Flow Simulation With Contact Moving in GCB Considering High-Pressure and High-Temperature Transport Properties of SF6 Gas", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005.
- [46] 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", IEEJ Transactions on Power and Energy, Vol. 127, pp.731-738, 2007.
- [47] R. P. P. Smeets, L. van der Sluis, M. Kapetanović, D. F. Peelo, A. Janssen, "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", Wiley, 2014.