

**Univerzitet u Sarajevu
Elektrotehnički fakultet Sarajevo
Vijeće doktorskog studija
Zmaja od Bosne bb
71000 Sarajevo
Bosna i Hercegovina**

M. Eng Dejan Bešlija, dipl. el. ing.
Rosulje 19
71320 Vogošća
Bosna i Hercegovina
Mob: +387 61 566 330
E-mail: dejan.beslija@gmail.com

Predmet: Molba za odobrenje prijedloga teme doktorske disertacije

Poštovani,

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

"Istraživanje porasta pritiska i progaranja kućišta u metalom oklopljenim postrojenjima uslijed djelovanja unutrašnjeg luka"

Molim Vas da se izvrši imenovanje nastavnika/ mentora/ supervizora i da se zakaže termin odbrane prijedloga teme doktorske disertacije. Imajući u vidu dosadašnju dugogodišnju saradnju u naučno-istraživačkom radu, te problematiku koja će biti obrađivana u doktorskoj disertaciji, kao nastavnika/ mentora/supervizora predlažem prof. dr Mirsada Kapetanovića, dipl. el. ing., redovnog profesora na Odsjeku za elektroenergetiku Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu, od kojeg sam nakon obavljenih konsultacija dobio saglasnost za prijavu navedenog prijedloga teme doktorske disertacije. Vijeće doktorskog studija Elektrotehničkog fakulteta u Sarajevu je u skladu sa članom 31. Pravila studiranja za treći ciklus studija Univerziteta u Sarajevu, 01.06.2015. godine već donijelo odluku broj: 04-6-2459/15 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 molbu prilažem detaljno obrazloženje prijedloga teme doktorske disertacije s sljedećim sadržajem:

1. Biografija sa profesionalnim aktivnostima i publikacijama,
2. Pregled stanja u oblasti istraživanja,
3. Motivacija i ciljevi istraživanja,
4. Metodologija i plan istraživanja,
5. Očekivani naučni doprinos disertacije,
6. Pregled polazne literature.

S poštovanjem,
Sarajevo, 18.11.2016. godine

M. Eng. Dejan Bešlija, dipl.el.ing.

Obrazloženje prijedloga teme doktorske disertacije

Kandidat:

M. Eng. Dejan Bešlija, dipl.el.ing.

Radni naslov prijedloga teme doktorske disertacije:

"Istraživanje porasta pritiska i progaranja kućišta u metalom oklopljenim postrojenjima uslijed djelovanja unutrašnjeg luka"

1. BIOGRAFIJA I OBJAVLJENI RADOVI

1.1. Lični podaci

Prezime (ime oca) ime	Bešlija (Ismet) Dejan
Datum i mjesto rođenja	28. 06. 1989. godine, Zenica
Državljanstvo	Bosna i Hercegovina
Adresa stalnog boravka	Rosulje 19, Vogošća

1.2. Obrazovanje

2011 – 2013	Drugi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, Odsjek za elektroenergetiku Završni rad: "Proračun stacionarnog strujanja SF ₆ gasa kroz mlaznice visokonaponskih prekidača"
2008 – 2011	Prvi ciklus studija na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu, Odsjek za elektroenergetiku Završni rad: "Univerzalni model strujanja SF ₆ gasa"
2004 – 2008	Mješovita srednja škola za elektroenergetiku Sarajevo

1.3. Profesionalna aktivnost kandidata

2013 – danas	EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo – inženjer u razvoju
2014 – 2016	Elektrotehnički fakultet u Sarajevu – stručnjak iz prakse

1.4. Publikacije

1. **D. Bešlija**, M. Kapetanović, S. Delić, A. Ahmethodžić: "Proračun stacionarnog isticanja SF₆ gasa kroz mlaznicu 420kV prekidača i raspodjele električnog polja", XI Savjetovanje BH komiteta CIGRÉ, Neum, Bosna i Hercegovina, 2013.
2. **D. Bešlija**, M. Kapetanović, S. Delić, A. Ahmethodžić: "Proračun stacionarnog isticanja SF₆ gasa kroz mlaznicu 420kV prekidača i raspodjele električnog polja", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika, broj 7, u izdanju Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRÉ, 2013.
3. S. Delić, **D. Bešlija**, M. Muratović, M. H. Kim, M. Kapetanović, H. Zildžo: "New approach to Breakdown Voltage Estimation after Interruption of Capacitive Currents", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp. 462-465, Santa FE, New Mexico, USA, 2014.
4. **D. Bešlija**, S. Delić, K. H. Kim, 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, broj 11, pp. 1964-1973, New York, USA, 2014.
5. **D. Bešlija**, M. Muratović, S. Delić, K. H. Kim, R. Gačanović: "Koordinacija izolacije u VN prekidaču s aspekta sigurnosti od eksplozije", XII Savjetovanje BH komiteta CIGRÉ, Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
6. **D. Bešlija**, M. Muratović, S. Delić, K. H. Kim, R. Gačanović: "Koordinacija izolacije u VN prekidaču s aspekta sigurnosti od eksplozije", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika, broj 9, u izdanju Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRÉ, 2015.
7. A. Hajdarović, Dž. Hajradinović, D. Gorenc, **D. Bešlija**, S. Delić: "Optimizacija vanjske konture i naprezanja mlaznice visokonaponskog prekidača", XII Savjetovanje BH komiteta CIGRÉ, Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
8. V. Bećirović, **D. Bešlija**, A. Smajkić, E. Sokić, M. Kapetanović: "Sistem za istovremeno mjerenje više hodograma u kinematskom lancu VN prekidača", XII Savjetovanje BH komiteta CIGRÉ, Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
9. B. Bosović, **D. Bešlija**, M. H. Kim, M. Torlak, E. Džaferović, M. Kapetanović: "A real gas model for flow analysis in a high-voltage SF₆ circuit breaker", 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosna i Hercegovina, 2015.

10. S. Delić, **D. Bešlija**, A. Hajdarović, D. Gorenc, M. Kapetanović: "Procjena uspješnosti prekidanja kapacitivnih struja za 145kV 40kA GIS prekidač", XII Savjetovanje BH komiteta CIGRÉ, Neum, Bosna i Hercegovina, 2015.
11. S. Delić, **D. Bešlija**, D. Gorenc, A. Hajdarović, M. Kapetanović: "Capacitive current switching capability estimation for a 145 kV 40 kA GIS circuit breaker", 3rd International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology (ICEPE-ST), pp. 74-78, Busan, Koreja, 2015.
12. **D. Bešlija**, S. Delić, M. Kapetanović, D. Gorenc: "Pressure rise calculation due to an internal arc fault in HV metal-enclosed SF₆ GIS", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Francisco, CA, USA, 2016.
13. M. Batalović, **D. Bešlija**, M. H. Kim, K. H. Kim, M. Kapetanović: "Partial discharge measurement and IEC standards: justification of the use for their inclusion in after-laying test for extruded cable systems", IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Francisco, CA, USA, 2016.
14. E. Sokić, V. Bećirović, A. Smajkić, **D. Bešlija**, M. Muratović, B. Bosović, M. Kapetanović: "Dizajn, razvoj i implementacija senzorskog sistema za mjerenje pritiska u modelu visokonaponskog prekidača", Časopis Bosanskohercegovačka elektrotehnika, broj 10, u izdanju Bosanskohercegovačkog komiteta CIGRÉ, 2016.

2. PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

2.1. Uvod

Unutrašnji luk predstavlja jedan od najtežih vrsta kvara u metalom oklopljenim postrojenjima (*MOP*). U današnje vrijeme, kad je potražnja za električnom energijom, a time i raspoloživa energija kratkog spoja u sistemu, u konstantnom porastu, dok su nastojanja za reduciranjem troškova proizvodnje i s tim povezanom kompaktizacijom metalom oklopljenih SF₆ gasom izolovanih postrojenja (*GIS* – Gas Insulated Switchgear) sve snažnija, posljedice pojave unutrašnjeg luka postaju sve češće i ozbiljnije. Ovaj trend je, zbog smanjenja upotrebe SF₆ gasa, povoljan s aspekta zaštite okoliša, dok je s druge strane podložnost metalom oklopljenih postrojenja na unutrašnji luk značajno povećana. Posljedice pojave unutrašnjeg luka u *MOP*-u su najčešće destruktivne prirode. Trajanja luka od nekoliko stotina milisekundi za red veličine nadmašuje maksimalna trajanja luka koja se javljaju pri prekidanju struja kratkog spoja u visokonaponskim prekidačima. Ovo vrijeme je određeno performansama implementiranog zaštitnog sistema u prvom i drugom nivou njihovog djelovanja [1].

Za razliku od kontrolisanog gašenja električnog luka unutar mlaznice visokonaponskog prekidača, unutrašnji luk slobodno gori između oklopa i aktivnog provodnika u slučaju jednopolno oklopljenog postrojenja, odnosno naizmjenično između po dva provodnika u tropolno oklopljenom postrojenju [2]. Njegovo kretanje je dominantno određeno jakim elektrodinamičkim silama, koje se javljaju kod ovakve vrste kvara. Unutrašnji luk se pod uticajem ovih sila kreće aksijalno i radijalno unutar gasne zone u kojoj je iniciran [3], [4]. Unutrašnji luk može biti izazvan nizom različitih faktora, kao što su sklopni prenaponi, kvarovi izolacije uslijed unutrašnjih defekata, starenje, zagađenje ili vlažnost SF_6 gasa, pad pritiska uslijed curenja gasa, nekorektne manipulacije sklopnim aparatima i greške tokom montaže.

U slučaju pojave unutrašnjeg luka u GIS-u, električna energija plazme luka se putem više mehanizama prenosi na okolni prostor. Najveći dio ove energije se u vidu topline prenosi na gas u kojem gori luk, uslijed čega dolazi do porasta pritiska. Odnos toplotne energije Q koja zagrijava gas i dovodi do porasta pritiska i električne energije luka W_e je u literaturi poznat kao termički koeficijent k_p . Vrijednost ovog koeficijenta ovisi o velikom broju faktora, od kojih su najznačajniji materijal kućišta i provodnika, te vrsta i stanje gasa [5]. Autori u radu [6] u svom istraživanju razmatraju uticaj snage luka i poprečnog presjeka rasprskavajuće membrane na termički koeficijent k_p . Njihov uticaj na termički koeficijent k_p se najčešće određuje eksperimentalno. Značajan dio električne energije W_e se emitira radijacijom, dok dio energije otpada i na topljenje i isparavanje materijala kućišta i provodnika [7], [8]. Dodatni izvor toplotne energije, koji također uzrokuje porast pritiska, se javlja uslijed egzotermne reakcije materijala kućišta i provodnika na kojem gori korijen luka sa produktima razlaganja SF_6 gasa. Dodatno oslobađanje hemijske energije je posebno izraženo za kućišta i provodnike od aluminija, te može uzrokovati značajno dodatno povišenje pritiska u odnosu na bakar i željezo [9], koje se matematski manifestuje preko termičkog koeficijenta $k_p > 1$. Ovaj aspekt će biti detaljnije elaboriran u 2.4.

Postoje tri glavna negativna efekta pojave unutrašnjeg luka u metalom oklopljenom postrojenju. Među njih spada visok porast pritiska unutar kućišta, rasprskavanje (fragmentacija) kućišta, te eventualno progaranje kućišta. Prva linija odbrane od porasta pritiska u slučaju unutrašnjeg luka i daljih devastirajućih posljedica su tzv. rasprskavajući zaštitni diskovi (membrane). Zadatak ovih diskova je limitirati pritisak kontrolisanim i usmjerenim ispuštanjem gasa iz pogođene gasne zone pri unaprijed definisanom i podešenom pritisku aktiviranja. Ukoliko je rasterećenje gasne zone efikasno, pritisak ne može dosegnuti pritisak rasprskavanja kućišta. Treba pak imati na umu da u nekim slučajevima ni efikasno rasterećenje kućišta putem membrane nije dovoljno da bi se spriječilo rasprskavanje kućišta, posebno ukoliko se radi o trofazno oklopljenim postrojenjima i dužem trajanju kvara. Također je veoma bitno napomenuti da manifestacija bilo kojeg od tri navedena vanjska efekta unutrašnjeg luka za posljedicu ima ispuštanje SF_6 gasa u atmosferu. Stoga, metalom oklopljena postrojenja moraju biti dizajnirana da izdrže i najteže uslove koji se javljaju u slučaju ove vrste kvara, bez obzira da li je zaštitna membrana instalirana. Sigurnost i performanse metalom oklopljenih

postrojenja u slučaju pojave unutrašnjeg luka se demonstriraju ispitivanjima u laboratorijama velike snage. Prvenstveno iz razloga što su ova ispitivanja potencijalno destruktivne prirode, ona se moraju provoditi u striktno kontrolisanim uslovima. Istovremeno, iz ekoloških razloga mora biti osigurano da čak i u slučaju rasprskavanja ne dođe do ispuštanja SF₆ gasa u atmosferu, imajući na umu da je upravo SF₆ gas jedan od najpotentnijih stakleničkih gasova [10]. Ovo se postiže smještanjem ispitivanog objekta unutar dodatnog vanjskog zaštitnog kućišta, koje ima zadatak da prihvati gas iz ispitnog objekta tokom ispitivanja i na taj način onemogućiti njegovo ispuštanje u atmosferu.

Iz ovih razloga su istraživanja vezana za potencijalnu zamjenu SF₆ gasa kod ispitivanja metalom oklopljenih postrojenja u uslovima unutrašnjeg luka od izuzetne važnosti [11]. Ekvivalencija ispitivanja u zraku umjesto u SF₆ gasu još uvijek nije dovoljno istražena, posebno za naponske nivoe iznad 52 kV. Razlog tome je veliki broj skupih ispitivanja, koje bi bilo potrebno provesti, kako bi se s pouzdanošću mogla naći ekvivalentna ispitna procedura za SF₆ aparate koristeći alternativne gasove [12]. U tom pogledu su eksperimentalna istraživanja ka novim ispitnim procedurama vrlo rijetka. S druge strane, za srednjenaponska postrojenja već postoji standardom definisana ispitna procedura, gdje je kao ispitni medij umjesto SF₆ gasa moguće koristiti zrak [13], [14]. Zbog visokog rizika od ispuštanja SF₆ gasa u atmosferu, vrlo zahtjevne pripreme i složenosti ispitivanja, te imajući u vidu da je ova vrsta ispitivanja izuzetno skupa (zbog njihove destruktivne prirode), IEC dozvoljava zamjenu testiranja odgovarajućim proračunima validiranim korištenjem rezultata ispitivanja metalom oklopljenih postrojenja sličnog dizajna, uz uslov da je ovo prihvatljivo za krajnjeg korisnika postrojenja.

S druge strane, modeli i simulacije porasta pritiska se konstanto razvijaju i unapređuju u pogledu složenosti i tačnosti [15]. S obzirom da je planirana tema doktorske disertacije vezana upravo za modeliranje fizikalnih procesa u slučaju pojave unutrašnjeg luka u GIS-u, u nastavku je prema literaturi dostupnoj autoru prijedloga teme doktorske disertacije dat kritički pregled stanja u ovoj oblasti istraživanja.

2.2. Metode za proračun porasta pritiska u GIS-u u uslovima gorenja unutrašnjeg luka

Metode za proračun porasta pritiska uslijed djelovanja unutrašnjeg luka mogu se, prema složenosti i području primjene [15], [16], [17] svrstati u:

- Standardne metode [6], [18], [19], [20], [21], [22], [23];
- Unaprijeđene standardne metode [16], [24], [25];
- Metode zasnovane na praćenju prostiranja talasa pritiska (eng. *Ray-Tracing*) [26], [27],
- Pojednostavljene CFD metode (eng. *Computational Fluid Dynamics*) [17], [18], [28], [29];
- Unaprijeđene CFD metode [5], [16], [30], [31], [32], [33];
- Numerički CMHD metod (eng. *Computational Magnetohydrodynamics*)

Standardne metode za proračun porasta pritiska u MOP-u u uslovima unutrašnjeg luka obuhvataju pojednostavljene modele stanja gasa (idealni gas s temperaturno neovisnim parametrima), pojednostavljene modele luka (konstantan napon, nepromjenjiva dužina luka), prenosa energije luka na gas (konstantan termički koeficijent), te strujanja gasa (pojednostavljena funkcija strujanja). Standardne metode su primjenjive u slučaju malih zapremina i s ciljem grube procjene porasta pritiska u analiziranoj gasnoj zoni.

Unaprijeđene standardne metode su bazirane na istom matematskom modelu kao standardne metode. Međutim, zanemarenja i grube aproksimacije standardnih metoda su prevaziđene nizom poboljšanja i unapređenja te implementacijom modela relevantnih fizikalnosti. U ovim proračunima porasta pritiska se koriste realni modeli stanja gasa u širokom temperaturnom opsegu [34], te iterativni postupci pri proračunu strujanja gasa između volumena [35]. Primjenjivost ovih metoda je određena primijenjenim pretpostavkama i aproksimacijama. Sve standardne metode kao rezultat proračuna daju prostorno usrednjene vrijednosti pritiska i ostalih termodinamičkih veličina.

S ciljem prevazilaženja ovog nedostatka, uvedena je tzv. Ray-Tracing metoda, pri čemu se luk smatra "izvorom" pritiska koji emitira čestice, odnosno talase pritiska u svim smjerovima brzinom zvuka. Broj emitiranih čestica je proporcionalan trenutnoj vrijednosti energije električnog luka. Čestice se reflektuju o zidove gasne zone, a uviru u otvor rasprskavajućeg diska. Lokalni pritisak se određuje brojanjem čestica talasa pritiska.

CFD metode obuhvataju algoritme i procedure bazirane na jednačinama dinamike fluida, zakonima o održanju energije, mase i momenta, te jednačini stanja realnog gasa. Ove metode omogućavaju proračun porasta pritiska u složenim konfiguracijama GIS-a, a kao rezultat proračuna se dobija vremenski promjenjiva prostorna raspodjela pritiska unutar proračunskog domena. Ove metode se također međusobno razlikuju po složenosti primijenjenih aproksimacija i modela. Priprema modela, te izrada i prilagođavanje proračunske mreže je kod ovih metoda vrlo složena i dugotrajna. Osim toga, s obzirom na modelirani problem, veličinu proračunskog domena i finoću odabrane mreže, računarski resursi i potrebno proračunsko vrijeme postaju veoma bitni faktori pri odabiru metode za proračun. Imajući ovo u vidu, CFD metode se mogu podijeliti na pojednostavljene i unaprijeđene. Razlika između ove dvije podkategorije se ogleda u tome što se kod pojednostavljenih metoda u svrhu skraćanja trajanja proračuna ponekad zanemaruju fenomeni kao što je turbulencija gasa, termička provodnost i viskoznost, intermolekularno međudjelovanje čestica pri visokim pritiscima i temperaturama, topljenje i isparavanje materijala, radijacija itd.

CMHD metod pored modela i numeričkih algoritama sadržanih u unaprijeđenim CFD metodama, implementira i dinamički model električnog luka, koji između ostalog obuhvata i model uticaja elektromagnetnih polja na kretanje luka. CMHD model prema saznanjima radne grupe CIGRÉ A3.24. [15] do danas nije primijenjen na modeliranje fenomena unutrašnjeg luka.

U nastavku je dat pregled u literaturi dostupnih poređenja različitih metoda za proračun porasta pritiska uslijed unutrašnjeg luka.

Autori rada [26] su u okviru svojih istraživanja vršili poređenje nekoliko standardnih metoda različitih autora i metode zasnovane na praćenju prostiranja talasa pritiska, odnosno sa prostorno razlučenom raspodjelom pritiska u gasnoj zoni u kojoj gori unutrašnji luk. Na eksperimentalnim modelima su vršena mjerenja pritiska na više lokacija unutar gasne zone. Uočeno je da se lokalna razlika u pritisku za gasne zone velikih dimenzija ne može zanemariti.

U radu [36] se vrši poređenje unapređene standardne i CFD metode, koje su korištene u istraživanju autora disertacije [16] na primjeru AIS i SF₆ GIS-a. Razlike u rezultatima proračuna porasta pritiska su bile izraženije u slučaju AIS-a iz razloga što je porast pritiska pri istim uslovima u zraku mnogo brži nego u SF₆ gasu i jer je shodno tome uticaj prostiranja talasa na lokalni pritisak u analiziranoj gasnoj zoni manje izražen.

Poređenje unaprijeđene i pojednostavljene CFD sa standardnom metodom je provedeno u okviru rada [29]. Autori su došli do zaključka da su CFD metode generalno superiornije u odnosu na standardne metode. S druge strane, trajanje proračuna koristeći unaprijeđenu CFD metodu je značajno duže u odnosu na pojednostavljenu CFD i standardnu metodu. Iz tog razloga, autori uvode odgovarajuće aproksimacije i zanemarenja s ciljem reduciranja potrebnog vremena proračuna i dolaze do zaključka da se i pored toga rezultati proračuna porasta pritiska slažu sa mjerenjima.

U radu [6] autori koriste generičko CFD okruženje za modeliranje porasta pritiska u zrakom izolovanim postrojenjima (AIS – Air Insulated Switchgear) uslijed odavanja energije unutrašnjeg luka, nadograđeno korisničkim modelom luka. Rezultate lokalne raspodjele pritiska usrednjavaju s ciljem validacije vlastite standardne metode. Uspostavljena je dobra korelacija između rezultata proračuna porasta pritiska ove dvije metode. Autori zaključuju da se pojednostavljene inženjerske metode mogu koristiti za provođenje inicijalnih proračuna s ciljem procjene potrebne veličine rasteretnog otvora, s obzirom na mogućnost vrlo brzog dobijanja prostorno usrednjenih rezultata pritiska. S druge strane, standardne metode su limitirane ograničenjima implementiranih modela, te iz tih razloga za detaljnije analize i iznalaženje prostorne raspodjele pritiska u vremenu treba koristiti CFD metode. Ovo se posebno odnosi na postrojenja sa složenom geometrijom kućišta, gdje efekti refleksije i superponiranja talasa pritiska postaju veoma izraženi.

Autor rada [25] iznosi vrlo korisne smjernice za modeliranje unutrašnjeg luka. Posebno ističe značaj simulacija i proračuna s obzirom na visoku cijenu laboratorijskih ispitivanja. U radu je predstavljena unaprijeđena standardna metoda, koja u poređenju sa pojednostavljenim metodama, ne uzima u obzir uobičajeni termički koeficijent k_p , već primjenjuje metodu za proračun porasta temperature uslijed proticanja struje (uz limit od 12000K) uz korištenje Cassie-Mayr-ovog modela napona luka. Na osnovu ovoga se vrši proračun porasta pritiska u posmatranoj gasnoj zoni metalom oklopljenog postrojenja.

2.3. Progaranje kućišta

Progaranje kućišta je fenomen koji se javlja u slučaju da unutrašnji luk gori između provodnika i kućišta na istoj lokaciji duže od vremena potrebnog da stijenka kućišta pod termičkim uticajem korijena luka i mehaničkim uticajem nadpritiska u analiziranoj gasnoj komori doživi oštećenje u vidu punkcije ili procjepa. Pojava progaranja kućišta je relevantna kod jednopolno oklopljenih MOP-ova, s obzirom da se kod trolpolno oklopljenih, jednopolni kvar nakon vrlo kratkog vremena transformiše u trolpolni. Faktori koji utiču na progaranje kućišta su vrijednost struje i trajanje luka, debljina i materijal stijenke kućišta, te dinamika luka [37], [38].

Po pojavi unutrašnjeg luka, na njega djeluju jake elektrodinamičke sile, koje uzrokuju aksijalno i radijalno kretanje luka. Izolacioni diskovi između dvije gasne zone sprečavaju aksijalno kretanje luka, te je zaustavljanje luka na maloj udaljenosti od diska vrlo vjerovatno. Eventualna stabilizacija luka na jednoj lokaciji pogoduje bržem progaranju kućišta. Vrijeme progaranja kućišta sačinjava vrijeme tranzicije luka od mjesta iniciranja do lokacije stabilizacije luka i trajanja stacionarnog luka.

Najkompletniji teoretski opisi dinamike luka i progaranja kućišta su dati u [3]. Autori ovog rada su vrlo detaljno opisali dinamiku aksijalnog i radijalnog kretanja luka, posmatrajući elektrodinamičke sile u blizini korjenova luka. Ustanovili su da aksijalno kretanje luka u slučaju jednostranog napajanja mjesta kvara u koaksijalnim konfiguracijama GIS-a biva predvođeno korijenom luka na unutrašnjem vodiču. Radijalno kretanje luka je opisano istim matematskim modelom s dodatnim razmatranjem uticaja zakošenih izolacionih diskova. Eksperimentalna istraživanja su pokazala da se ovisno od nagiba izolacionog diska na strani gorenja unutrašnjeg luka može javiti stacionaran luk ili luk koji se radijalno kreće. Mehanizam progaranja je teoretski razmatran za slučaj gdje je erozija materijala kućišta dominantan proces u odnosu na slabljenje materijala i obrnuto. Progaranje kućišta s erozijom kao dominantnim efektom se javlja kod stacionarnih lukova i manifestuje se kao punkcija u kućištu. Vrijeme progaranja je u ovom slučaju proporcionalno odnosu debljine stijenke kućišta i efektivne vrijednosti struje kratkog spoja. Ukoliko se pak radi o nestacionarnom luku, progaranje kućišta se ne ispoljava kao punkcija, nego kao procjep duž putanje radijalnog kretanja korijena luka u neposrednoj blizini izolacionog diska. Vrijeme pojave ovog vida progaranja kućišta je, za razliku od vremena punkcije kod stacionarnog luka, proporcionalno odnosu kvadrata debljine stijenke kućišta i struje kratkog spoja, te obrnuto proporcionalno proizvodu pritiska u gasnoj zoni i širini (radijusu) pojasa koju obuhvata kretanje luka. Autori u skladu sa teoretskim istraživanjima daju smjernice pri dizajnu i odabiru kućišta GIS-a i zaštitnog sistema u prvom i drugom nivou djelovanja.

Detaljna teoretska i eksperimentalna istraživanja provedena u [4] također pokazuju da se vrijeme potrebno za progaranje kućišta može znatno produžiti ukoliko se spriječi stabilizacija korjenova luka, odnosno ukoliko se osigura kontinuirano rotaciono kretanje luka oko provodnika. Ovo se može postići

specijalnim dizajnom izolacionog diska s tzv. izdignutim ovratnikom (eng. raised collar) – dodatnim izolacionim izbočenjem koje tjera luk da se izduži, čime se stvara sprega elektrodinamičkih sila, koje uzrokuju rotaciju luka i sprečava njegovu stabilizaciju. Kosim prerezima na provodniku u neposrednoj blizini izolacionog diska se također postiže sličan efekat, što je posebno izraženo za nagibe prereza veće od 45° , za veći broj prereza, te za veće vrijednosti struje luka.

Statička analiza fenomena progaranja kućišta uslijed unutrašnjeg luka je prvi put provedena u [37]. Autori su razvili probabilistički model za procjenu vjerovatnoće progaranja GIS kućišta uslijed stacionarnih i nestacionarnih lukova, koji je baziran na metodi Monte-Carlo, kao i model za proračun vjerovatnoće prorade rasteretne membrane u GIS-u. Ovaj model je baziran na fizikalnim modelima dinamike luka, te odgovarajućim modelima trajanja progaranja kućišta. U obzir je uzeta jačina struje unutrašnjeg luka, tip aparata u kojem se desio kvar, debljina kućišta GIS-a, te trajanje prorade zaštite u prvom nivou. Jedno od bitnijih zapažanja sa aspekta fizikalnosti progaranja aluminijskih kućišta u uslovima gorenja unutrašnjeg luka je da zagrijani aluminijum ne može izdržati unutrašnji pritisak, čak i prije nego dođe do njegovog topljenja, što za posljedicu ima značajno smanjenje predviđenog trajanja progaranja kućišta GIS-a. Ovaj aspekt nije uzet u obzir u ovom istraživanju.

Autori rada [39] također koriste statističku analizu fenomena progaranja GIS kućišta koja su bazirana na preko 60 eksperimentalnih ispitivanja progaranja kućišta. U radu su identificirani glavni parametri i njihov uticaj na rizik progaranja kućišta. Uveden je pojam srednjeg vremena do progaranja kućišta uslijed unutrašnjeg luka, koje ovisi o materijalu kućišta, njegovoj debljini i vrijednosti struje unutrašnjeg luka, koje je opisano normalnom distribucijom i standardnom devijacijom. Pokazano je da se progaranje kućišta dešava kasnije, što je udaljenost između dva susjedna izolaciona diska veća, imajući u vidu duže trajanje faze tranzicije luka. Autori uvode dvije kategorije rizika od progaranja kućišta gasne zone GIS: intrinzični i osnovni. Kod intrinzičnog rizika je pretpostavka da unutrašnji luk vrlo brzo postaje stacionaran, te da u takvim uslovima samo debljina stijenke kućišta utiče na rizik od progaranja kućišta. Osnovni rizik progaranja kućišta gasne zone GIS-a uzima u obzir i podužno kretanje unutrašnjeg luka i kao takav može biti reduciran kako povećanjem debljine stijenke kućišta, tako i samom dužinom GIS sekcije. Ukoliko je pak od interesa rizik od progaranja kućišta jednog GIS polja ili stanice, onda je osim prethodno navedenih rizika za pojedinačnu gasnu zonu potrebno u obzir uzeti i rizik od dielektričkih kvarova. Ovo generalno vodi ka niskom riziku od kvara postrojenja zbog progaranja kućišta uslijed pojave unutrašnjeg luka.

U radu [40] su prezentirana eksperimentalna istraživanja dinamike luka u SF_6 gasu i zraku. Autori su ustanovili da je za ispitne objekte ispunjene SF_6 gasom aksijalna brzina direktno proporcionalna jačini struje kvara, te da se luk kreće manjom brzinom ukoliko unutar gasne zone vlada viši pritisak. Autori zaključuju da je u slučaju višeg pritiska, odnosno gustine gasa, aerodinamički

otpor kretanju luka znatno veći. Ista zapažanja vrijede i za zrakom izolovane ispitne objekte, s tim da je u tim slučajevima zabilježena znatno veća brzina kretanja luka. Uočena ovisnost pritiska i aksijalne brzine luka je linearna. Osim toga je ustanovljeno da je napon luka viši za više pritiske u gasnoj zoni. Na metalnim dijelovima ispitnih objekata ispunjenih SF₆ gasom su zapaženi neprekidni tragovi gorenja luka, čak i u trenucima kada struja prolazi kroz svoju prirodnu nulu, dok je kod zrakom izolovanih objekata luk ostavljao mjestimične tragove, što su autori opisali kao nasumično „poskakivanje“ luka. Što se tiče radijalnog kretanja unutrašnjeg luka, ustanovljeno je nedeterminističko kretanje luka. U većini slučajeva je primijećeno spiralno kretanje luka oko unutrašnjeg provodnika u koaksijalnoj konfiguraciji. Autori nisu dali objašnjenje smjera okretanja niti procjenu brzine spiralnog kretanja luka. Odgovori na ova pitanja su data u teoretskim razmatranjima u [3] i [4]. Također, autori su na osnovu provedenih ispitivanja zaključili da se unutrašnji luk brže kreće u slučaju jednostranog napajanja mjesta kvara, te da izolacione prepreke smanjuju brzinu i na taj način povećavaju vjerovatnoću progaranja kućišta.

U [38] je dat pregled empirijskih jednačina za procjenu progaranja uslijed unutrašnjeg luka, baziranih na eksperimentalnim istraživanjima. Rezultati proračuna pokazuju visok nivo rasipanja u odnosu na eksperimente progaranja u koaksijalnoj konfiguraciji, što ukazuje na zanemarenje kretanja luka za ovu konfiguraciju provodnika. Istražujući u literaturi dostupne pristupe za proračun brzine aksijalne brzine kretanja luka kroz koaksijalnu konfiguraciju provodnika, autori rada su zaključili da se prilikom modeliranja kretanja luka mora uzeti u obzir složena promjena presjeka i dužine luka, te da se luk ne može jednostavno opisati kao homogeni cilindar. U literaturi dostupni modeli progaranja kućišta su bazirani na modeliranju provođenja toplote kroz stijenku kućišta na mjestu trenutnog gorenja luka. Na osnovu toga se računa potrošeni materijal, oblik rupe u kućištu, te u konačnici vrijeme potrebno da dođe do progaranja. Većina ovih modela pak ne uzima u obzir kretanje luka. Usporedbom dostupnih teoretskih modela i empirijskih formula za proračun vremena progaranja kućišta, autori zaključuju da empirijski modeli imaju veći praktični značaj.

Autori rada [22] su u sklopu svog istraživanja predstavili model aksijalnog kretanja luka uslijed djelovanja elektrodinamičkih sila, te protusila uslijed prenosa impulsa kretanja putem elastičnih sudara stabla luka sa okolnim česticama i nesimetrične raspodjele pritiska oko stabla luka. Također je predstavljen i model vremena progaranja kućišta uzimajući u obzir radijalni prenos energije na dio volumena metala kućišta u neposrednoj blizini korijena luka. Rezultate mjerenja su iskoristili za određivanje koeficijenata korištenih u modelu. Koeficijenti u obzir uzimaju udaljenost između provodnika i kućišta, debljinu stijenke kućišta, te nestabilnost korijena luka, dok s druge strane vrsta materijala i uticaj pritiska unutar ispitivane gasne zone nisu uzeti u obzir.

2.4. Uticaj materijala izrade kućišta i provodnika na porast pritiska uslijed djelovanja unutrašnjeg luka

Autori rada [19] daju pregled i statističku analizu najčešćih uzroka unutrašnjeg luka u postrojenjima nazivnog napona 145 do 550 kV, te teoretske osnove porasta pritiska unutar kućišta, na osnovu kojih je razvijen i odgovarajući simulacijski model. Ovaj model je korišten za analizu rezultata ispitivanja SF₆ GIS-ova u uslovima unutrašnjeg luka u naponskom nivou od 145 do 420 kV i nazivnih struja kratkog spoja od 20 do 50 kA. Na osnovu ovih eksperimenata je izračunat set empirijskih parametara za proračun vremena progaranja aluminijskih i čeličnih kućišta, s ciljem njihove primjene na kućišta drugih metalom oklopljenih postrojenja, različite debljine stijenke kućišta i nazivne struje kratkog spoja. Autori su također ustanovili skoro zanemariv uticaj zapremine volumena unutar kojeg gori unutrašnji luk na vrijeme progaranja kućišta. Jedno od najznačajnijih zapažanja ovog istraživanja je primjer ispitivanja u kojem se progaranje aluminijskog kućišta desilo nekoliko sekundi nakon posljednje strujne nule. Autori su kao razlog naveli jaku egzotermnu hemijsku reakciju aluminijuma sa produktima razlaganja SF₆ gasa, koja se odvijala čak i nakon prestanka gorenja unutrašnjeg luka.

U radu [28] autori istražuju ponašanje inverznog strujnog mjernog transformatora u uslovima gorenja unutrašnjeg luka, te iznose poređenje mjerenja i numeričkog proračuna porasta pritiska. Jedan od nedostataka numeričkog modela, koji su prepoznali i autori, jeste da iako se radi o aluminijskoj kapi unutar koje se vrši propaljivanje luka, u obzir nije uzet uticaj oslobođene energije uslijed erozije aluminijuma.

Autori radova [7], [8] daju rezime istraživanja o energetsom balansu u zraku izolovanim metalom oklopljenim postrojenjima pri pojavi unutrašnjeg luka za struje reda nekoliko kA i reda desetina kA, za slučajeve kad je materijal od kojih je izrađen provodnik aluminij, bakar i željezo. Autori su došli do zaključka da je termički koeficijent k_p najveći za Al provodnike, zatim za Cu, te za čelik. Također je utvrđeno da termički koeficijent za Al i čelik raste sa povećanjem vrijednosti struje kvara, dok za provodnike izrađene od Cu opada, kao i da oksidacija, topljenje i isparavanje metala postaje izraženije.

3. MOTIVACIJA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Istraživanje fenomena pojave, ponašanja i posljedica unutrašnjeg luka dobija na sve većem značaju, s obzirom na stalni porast potreba za energijom, sve češćoj upotrebi SF₆ gasom izolovanih postrojenja, posebno u urbanim područjima, te nastojanja za daljom redukcijom dimenzija kućišta GIS-a.

Iz pregleda stanja u oblasti istraživanja se može primijetiti da trenutno u praktičnoj primjeni ne postoji numerički metod za proračun porasta pritiska i procjenu vremena progaranja kućišta metalom oklopljenog postrojenja, koji istovremeno u obzir uzima uticaj kretanja luka, količine isparenog materijala kućišta i provodnika, te intenzitet hemijske reakcije metala s produktima

razlaganja SF₆ gasa. U literaturi pak postoji više teoretskih modela dinamike luka i erozije materijala uslijed djelovanja unutrašnjeg luka, koji mogu biti iskorišteni u ovu svrhu. Istraživanja u ovoj oblasti se uglavnom bave modeliranjem i proračunima uticaja pojedinačnih efekata unutrašnjeg luka na porast pritiska u GIS-u. Pored toga, uticaj materijala kućišta i provodnika na porast pritiska i progaranje kućišta u slučaju pojave unutrašnjeg luka je još uvijek nedovoljno istražen.

Većina novijih publikacija na temu unutrašnjeg luka u metalom oklopljenim postrojenjima se odnosi na korištenje računarskih programa i složenih metoda baziranih na modeliranju dinamike fluida. Simulacijski paketi bazirani na CFD-u, su u današnje vrijeme prvi izbor istraživača za što tačnije modeliranje unutrašnjeg luka, njegovih efekata i posljedica. Međutim, njihova kompleksnost zahtijeva značajne računarske i vremenske resurse kako bi se došlo do upotrebljivih rezultata. S druge strane, upotreba metoda baziranih na grubim aproksimacijama i pojednostavljenjima fizikalnih procesa, kao i mnogobrojnim zanemarenjima i pretpostavkama, kakve su prisutne u svim standardnim metodama, kao i u znatnom broju unaprijeđenih standardnih metoda, također u današnjem digitalnom dobu nije više opravdano. Nedostatak sveobuhvatnih i ujedno relativno brzih numeričkih metoda za proračun svih relevantnih efekata gorenja unutrašnjeg luka u metalom oklopljenim postrojenjima predstavlja osnovni motiv za buduća istraživanja u okviru ovog rada. Iz ovih razloga je jedan od glavnih motiva doktorske disertacije razvoj modela za proračun pritiska u visokonaponskim metalom oklopljenim postrojenjima, koji će predstavljati kompromisno rješenje između kompleksnosti i brzine proračuna. Primjenom takve metode proračuna porasta pritiska će biti moguće izvršiti pouzdanu procjenu ponašanja unutrašnjeg luka i značajno olakšati optimizaciju parametara dizajna metalom oklopljenih postrojenja još u ranim fazama njihovog razvoja, što je od izuzetnog značaja, imajući u vidu kompleksnost i vrlo visoke cijene laboratorijskih ispitivanja.

4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Planirana istraživanja tokom izrade doktorske disertacije:

- razvoj numeričke metode za proračun porasta pritiska i progaranja kućišta u metalom oklopljenim postrojenjima u uslovima gorenja unutrašnjeg luka, uzimajući u obzir uticaj kretanja unutrašnjeg luka i odgovarajućeg trošenja materijala u koaksijalnoj konfiguraciji jednopolno oklopljenih postrojenja i implementacija u programskim okruženjima Visual Basic i MATLAB.
- sistematičan pregled u literaturi dostupnih mjerenja porasta pritiska i progaranja kućišta, te njihova primjena u validaciji rezultata proračuna nove metode za proračun porasta pritiska u MOP-u. Dosad je validacija izvršena za nekoliko slučajeva mjerenja pritiska tokom ispitivanja SF₆ MOP-ova visokog napona na pojavu unutrašnjeg luka [41], [42]. Rezultati ovog istraživanja su publikovani u [43].

- predviđanje ishoda ispitivanja metalom oklopljenih postrojenja u uslovima gorenja unutrašnjeg luka korištenjem razvijenog programa za proračun porasta pritiska u kombinaciji s proračunom posuda pod pritiskom s ciljem određivanja pritiska fragmentacije ispitivanog kućišta i eventualnih slabih tačaka dizajna,
- razvojna ispitivanja 145 kV MOP-a u uslovima gorenja unutrašnjeg luka nazivne struje kratkog spoja 40 kA za različite vrijednosti struja kvara (20 i 31.5 kA) i materijala provodnika (Al i Cu),
- tipska ispitivanjima 145 kV SF₆ gasom izolovanog postrojenja pri nazivnoj struji kratkog spoja 40 kA u uslovima unutrašnjeg luka u laboratoriji velike snage,
- analiza dostupnih modela alternativnih gasova, te njihova primjena u analizama proračuna pritiska uslijed unutrašnjeg luka.

5. OČEKIVANI NAUČNI DOPRINOS PREDLOŽENE TEME DOKTORSKE DISERTACIJE

Osnovni potencijalni naučni doprinosi predložene teme doktorske disertacije su:

1. novi metod za proračun porasta pritiska i procjenu vremena progaranja kućišta metalom oklopljenih postrojenja, koji u obzir uzima dinamiku kretanja unutrašnjeg luka uslijed djelovanja elektrodinamičkih sila.
2. nova saznanja o uticaju materijala kućišta i provodnika na porast pritiska i vrijeme progaranja kućišta metalom oklopljenih postrojenja.

6. PREGLED POLAZNE LITERATURE

- [1] International Standard IEC 62271-203:2011, High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV, 2011.
- [2] X. Zhang, J. Zhang, G. Pietsch, „Calculation of the Three-Phase Internal Fault Current in Medium-Voltage Electrical Installations,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No 3, pp. 1685-1686, 2008.
- [3] W.A. Boeck, K. Kruger, „Arc motion and burn through in GIS,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No 1, pp. 254-261, 1992.

- [4] R. Münch, „Investigation on rotation of electric arcs in SF₆-insulated devices (Untersuchungen zur Rotationsbewegung von Störlichtbögen in einpolig gekapselten, SF₆-isolierten Anlagen), doktorska disertacija na njemačkom jeziku, RWTH Aachen, 1990.
- [5] X. Zhang, Modeling of effects of internal arcing in electrical systems (Modelierung der Auswirkungen von Störlichtbogen in elektrischen Anlagen), doktorska disertacija na njemačkom jeziku, RWTH Aachen, 1990.
- [6] Douchin J., Gentils F., „Pressure rise in switchgear rooms in case of internal arc in AIS MV switchboards; importance of room design and simplified calculation method,” 22nd CIGRE, International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIGRE 2013), Stockholm, 2013.
- [7] M. Iwata, K. Anantavanich, G. J. Pietsch, „Influence of arc current on fraction K_p of electric arc energy leading to pressure rise in a closed container,” 17th International Conference on Gas Discharges and Their Applications, pp. 189-192, 2008.
- [8] M. Iwata, K. Anantavanich, G. J. Pietsch, „Influence of Current and Electrode Material on Fraction k_p of Electric Arc Energy Leading to Pressure Rise in a Closed Container During Internal Arcing,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, Issue 3, pp. 2028 – 2029, 2010.
- [9] J. Kulsetas, A. Rein, P. A. Holt, „Arcing in SF₆ – insulated equipment. Decomposition products and pressure rise,” Nordic Insulation Symposium, Liege, 1978.
- [10] M. Kapetanović, High Voltage Circuit Breakers, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2011.
- [11] R. P. P. Smeets, J. Hooijmans, H. Bannink, H. Barts, P. Laufkens, N. Uzelac, P. Milovac, D. Kennedy, G. J. Pietsch, K. Anantavanich, „Internal Arcing: Issues Related to Testing and Standardization,” Referat A3-207, International CIGRÉ Session, Paris, 2008.
- [12] J. A. J. Pettinga, „Pressure-rise due to a High-Current Internal Arc in a MV Cubicle Model,” 11th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIGRE 1989), 1988., KEMA Internal report 00880-DZO 88-2046 (88-10), 1989.
- [13] IEC 62271-200:2011, High-voltage switchgear and controlgear - Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV

- [14] IEC 62271-201:2014, High-voltage switchgear and controlgear - Part 201: AC solid-insulation enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV
- [15] N. Uzelac, M. Glinkowski, L. Del Rio, M. Kriegel, J. Douchin, E. Dullni, S. Feitoza Costa, E. Fjeld, H. K. Kim, J. Lopez-Roldan, R. Pater, G. J. Pietsch, T. Reiher, G. Schoonenberg, S. Singh, R. P. P. Smeets, T. Uchii, L. van der Sluis, P. Vinson, D. Yoshida, „Tools for the Simulation of the Effects of the Internal Arc in Transmission and Distribution Switchgear,” Brochure 602, CIGRÉ WG A3.24, 2015.
- [16] K. Anantavanich, „Calculation of Pressure Rise in Electrical Installations due to Internal Arcs Considering SF₆-Air Mixtures and Arc Energy Absorbers,” Aachener Beiträge zur Hochspannungstechnik, Band14, ISBN 3861306778, doktorska disertacija na njemačkom jeziku, RWTH Aachen, 2010.
- [17] G. Friberg, G. J. Pietsch, „Calculation of pressure rise due to arcing faults,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Issue 2, pp. 365 – 370, 1999.
- [18] D. König, T. Facklam, „Pressure rise in metal enclosed SF₆-insulated HV switchgear of single-phase enclosure type due to internal arc,” Electra No 93, 1984.
- [19] G. Babusci, E. Colombo, R. Speziali, G. Aldrovandi, R. Bergmann, M. Lissandrin, G. Cordioli, C. Piazza, „Assessment of the Behavior of gas-insulated Electrical Components in the Presence of Internal Arc,” International CIGRÉ Session, 1998.
- [20] P. Bojić, Theoretical-experimental analysis of processes upon occurrence of an internal arc in high-voltage metal-enclosed switchgear with SF₆ insulation-Possibility of limiting its effects through coordination of mechanical and electrical parameters of equipment (Teoretsko eksperimentalna analiza procesa kod pojave unutrašnjeg luka u metalom oklopljenim postrojenjima visokog naponu sa SF₆ izolacijom-Mogućnost ograničenja efekata njegovog djelovanja putem koordinacije mehaničkih i električnih parametara opreme), doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 1982.
- [21] Dullni, E., „Feeling the pressure - Simulating pressure rise in switchgear installation rooms,” ABB Review 3/13, pp. 54-59, 2013.
- [22] Kuwahara, H. Yoshinaga, K. Sakuma, S. Yamauchi, T. Miyamoto, „Fundamental investigation on internal arcs in SF₆ gas filled enclosure,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982.

- [23] N. Uzelac, E. Dullni, M. Kriegel, R. Pater, „Application of simplified model for the calculation of the pressure rise in MV switchgear due to internal arc fault,” 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013), 2013.
- [24] A. Dasbach, G. J. Pietsch, „Calculation of pressure waves in substation buildings due to arcing faults,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, Issue 4, pp. 1760-1765, 1990.
- [25] S. Feitoza Costa, „Guidelines for the use of simulations and calculations to replace some tests specified in international standards,” COGNITOR Guide 2010.
- [26] F. Lutz, G. J. Pietsch, „The Calculation of Overpressure in Metal-Enclosed Switchgear Due to Internal Arcing,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, Issue 11, pp. 4230 – 4236, 1982.
- [27] A. Dasbach, Investigation on power balance of internal arcs in terms of pressure stress of switchgear (Untersuchungen zur Leistungsbilanz von Störlichtbogen im Hinblick auf die Druckbeanspruchung von Schaltanlagen), doktorska disertacija na njemačkom jeziku, RWTH Aachen, 1987.
- [28] F. Bettinali, I. Bonfanti, U. Di Marco, A. Sala, G. Zafferani, „The problem of internal arc in SF₆ insulated current transformers,” International CIGRÉ Session, 1998.
- [29] G. Asanuma, T. Onchi, M. Isozaki, „Numerical Simulation of Pressure Rising with Internal Arc Fault for a Medium Voltage Metal Clad Switchgear,” 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Referat No 0517, pp. 1-5, 2015.
- [30] K. Anantavanich, G. J. Pietsch, „Calculation of pressure rise in electrical installations due to internal arcing taking into account arc energy absorbers,” IEEE Transactions on Power Delivery, Issue 99, 2015.
- [31] C. Besnard, „Numerical simulation for design of safe electrical equipment in case of internal arcing fault,” REE. 11, 35-38., 2007.
- [32] C. Besnard, „Internal arc simulation in MV/LV substations,” 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2009), Referat No 0536, 2009.
- [33] J. Douchin, E. Frangin, E. Salas, S. Hirade, „Modeling and Simulation Extrapolated Internal Arc Test Results: A Coupled Fluid-Structural Transient Methodology,” 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2015), Referat No 0517, pp. 1-5, 2015.

- [34] 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, pp. 1314-1322, 2011.
- [35] B. Bosović, D. Bešlija, M. H. Kim, M. Torlak, E. Džaferović, M. Kapetanović, „A real gas model for numerical flow analysis in a high-voltage SF₆ circuit breaker,” 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, 2015.
- [36] N. Chitamara, K. Anantavanich, G. J. Pietsch, T. Suwanasri, „Internal arcs in electrical installations - Validity range of a pressure calculation method,” 8th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 665 – 668, 2011.
- [37] F. Chu, G. Ford, C. K. Law, „Estimation of Burn-Through Probability in SF₆ Insulated Substations,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 1391-1399, 1982.
- [38] F. Lutz, F. Chu, „Burn-through of GIS Enclosure Due To Power Fault Arcs,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983.
- [39] N. G. Trinh, „Risk of Burn-Through – a Quantitative Assessment of the Capability of Gas Insulated Equipment to Withstand Internal Arcs,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7 No 1, 1992.
- [40] F. Chu, S. A. Boggs, C. K. Law, „Studies of Power Arc Faults in SF₆ Insulated Equipment,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, pp. 114-120, 1981.
- [41] P. Bojić, „Some results of internal arc investigation in metal-enclosed switchgear with SF₆ insulation (Neki rezultati istraživanja djelovanja unutrašnjeg luka u metalom oklopljenim postrojenjima sa SF₆ izolacijom),” Referat 13.07, XV CIGRÉ savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Beograd, 1981.
- [42] P. Bojić, „Analytical-experimental analysis of processes upon occurrence of an internal arc in high-voltage metal-enclosed switchgear with SF₆ insulation (Analitičko eksperimentalna analiza procesa pri djelovanju unutrašnjeg luka u metalom oklopljenom postrojenju sa SF₆ izolacijom),” XVI CIGRÉ savjetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Opatija, 1983.
- [43] D. Bešlija, S. Delić, M. Kapetanović, D. Gorenc, „Pressure rise calculation due to an internal arc fault in HV metal-enclosed SF₆ GIS,” IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference, San Francisco, 2016.