

PRORAČUN STACIONARNOG ISTICANJA SF_6 GASA KROZ MLAZNICU 420kV PREKIDAČA I RASPODJELE ELEKTRIČNOG POLJA

CALCULATION OF STEADY SF_6 GAS FLOW THROUGH A 420kV CIRCUIT BREAKER NOZZLE AND ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION

Dejan Bešlija¹, Mirsad Kapetanović¹, Sead Delić¹, Almir Ahmethadžić²

Sažetak: Posebna pažnja kod prekidanja struje se posvećuje procesima u blizini strujne nule, tzv. području interakcije, koje određuje performanse prekidača. Veličine od interesa u ovom intervalu su raspodjela temperature, gustine i pritiska, brzine i masenog protoka duž ose električnog luka, kao i raspodjela električnog napreznja u međukontaktom prostoru.

U radu su pomoću programa *ANSYS FLUENT*[®] izvršeni proračuni stacionarnog isticanja SF_6 gasa kroz mlaznicu u trenutku strujne nule na primjeru mlaznice 420 kV prekidača, za različita trajanja električnog luka. Rezultati proračuna su iskorišteni za uočavanje mogućnosti unapređenja modela isticanja SF_6 gasa korištenog u programu za računarsku simulaciju rada visokonaponskog (VN) prekidača. Proračun raspodjele električnog polja u programu *CEDRAT Flux2D*[®] na primjeru istog 420kV prekidača je korišten da se procijeni vrijednost probojnog napona u strujnoj nuli.

Ključne riječi: VN SF_6 prekidač, SF_6 gas, mlaznica, režim isticanja gasa, udarni talas, probojni napon.

Abstract: Special interest in current interruptions is dedicated to the processes close to the current zero instant, the so – called interaction region, which determines the circuit breakers performance. The quantities of interest in this region are the distribution of temperature, density and pressure, velocity and gas mass flow along the electric arc axis, as well as the distribution of electric stress between the contacts.

Calculations of steady flow of SF_6 gas through the nozzle of a 420kV circuit breaker at the current zero instant, for different arcing times, were carried out for this paper using the software *ANSYS FLUENT*[®]. The calculation results were used to get insight into improvement possibilities of the SF_6 gas flow model used in the software for computer simulation of high voltage (HV) circuit breakers. The calculation of electric field distribution in the software *CEDRAT Flux2D*[®] was used on the sample of the same 420kV circuit breaker to estimate the breakdown voltage at the current zero instant.

Keywords: HV SF_6 circuit breaker, SF_6 gas, nozzle, gas flow regime, shock wave, breakdown voltage.

UVOD

Ozbiljan pristup dizajniranju sklopnih uređaja zahtjeva temeljno poznavanje fizikalnih procesa vezanih za električni luk, njegovo formiranje i karakteristike. Pitanje nestabilnosti luka je ključno, ne samo kod sklopnih aparata, nego i mnogih drugih uređaja gdje se koristi kao ključna pojava, kao što su: lučne peći, lučno zavarivanje, itd. U ovom je slučaju od interesa održavanje stabilnosti stabla luka, dok se kod sklopnih aparata stremi upravo suprotnim uvjetima stanja luka, tj. njegovom nestabilnog gorenju [1].

Kod AC krugova, posebna pažnja se posvećuje procesima koji se dešavaju u trenutku prolaska struje kroz nultu vrijednost. Ovaj vremenski interval, oko 100 μs prije i

poslije strujne nule se naziva područje interakcije. Područje interakcije je interval vremena od početka intenzivne promjene napona luka prije strujne nule do trenutka kada prestane teći struja, uključujući i preostalu struju (ako postoji). Tokom ovog intervala strujna napreznja se mijenjaju u naponska. Interakcija prekidača i kola neposredno prije i poslije strujne nule igra ekstremno važnu ulogu u procesu prekidanja i određuje performanse prekidača. Procesi od interesa koji se dešavaju u području interakcije su: raspodjela temperature, gustine i pritiska, brzine gasa duž ose električnog luka, kao i raspodjela električnog napreznja u međukontaktom prostoru [2].

Ispravan dizajn komponenti prekidača je od izuzetne važnosti za prekidnu moć prekidača i dielektrični oporavak međukontaktom prostora (intenzivnije odvođenje vrelog gasa), iz razloga što gasni tok jako ovisi o obliku izlaznog dijela mlaznice. Interakcija gasnog toka s elek-

¹ EnergoBos ILJIN d.o.o, Bosna i Hercegovina

² Elektrotehnički fakultet Sarajevo, Bosna i Hercegovina
dejan.beslija@gmail.com

Rad dostavljen: oktobar 2013. Rad prihvaćen: novembar 2013.

tričnim poljem stvara kritične regione karakterizirane niskom vrijednošću gustine gasa i visokim vrijednostima jačine električnog polja. Vjerovatnost dieletričnog probodja je u ovim regionima veoma visoka. Prema tome, za datu raspodjelu električnih naprezanja međukontaktne prostora, poželjno je održati najveću moguću gustinu unutar gasnog toka. Pošto osobine lokalnog toka određuju dieletričnu čvrstoću izolacionog gasa, veoma je bitno u potpunosti razumjeti dinamiku isticanja gasa kroz mlaznice visokonaponskih SF₆ prekidača. CFD (*Computational Fluid Dynamics*) analiza pruža velike prednosti po pitanju simuliranja i vizualiziranja procesa isticanja u visokonaponskim prekidačima. Primjena CFD simulacija može uštediti veliki broj skupih testnih ciklusa i značajno ubrzati izradu prototipa prekidača, što je direktno povezano sa smanjenjem troškova razvoja prekidača. Pošto je metodologija dizajna visokonaponskih prekidača bazirana prvenstveno na iskustvu i ispitivanjima, potrebno je uložiti veliki napor u razvoju takvih računarskih simulacija rada SF₆ prekidača, kako bi se u konačnici poboljšale performanse ovih aparata.

1. MATEMATSKI MODEL STIŠLJIVOG STRUJANJA U ANSYS FLUENT®-u

ANSYS FLUENT® unutar svog matematskog modela za sve vrste isticanja rješava set osnovnih jednačina očuvanja mase, energije i Navier – Stokesovih jednačina konzervacije količine kretanja [2], [3]. Isticanje SF₆ gasa kroz mlaznice VN prekidača predstavlja potklasu stišljivih isticanja, gdje postoje velike varijacije pritiska i gustine. Prema tome, u ANSYS FLUENT®-u će se analizirati model ove vrste isticanja. Što se tiče stišljivog isticanja, postoje odgovarajuća ograničenja i specifičnosti. Stišljivost se pojavljuje u gasovima pri visokim brzinama i velikim promjenama pritiska. Kada se brzina isticanja približava brzini zvuka u gasu ili kada je promjena pritiska dovoljno velika, varijacija gustine ima značajan povratni utjecaj na pritisak, brzinu isticanja i temperaturu. Stišljivo isticanje se karakteriše posebnim setom fizikalnih jednačina integrisanih u proces rješavanja problema unutar ANSYS FLUENT®-a. Stoga je potrebno ispravno zadati granične uslove i postavke, specifične za ovakvu vrstu isticanja [4].

Model stišljivog isticanja je u matematskom modelu ANSYS FLUENT®-a karakteriziran Machovim brojem M , totalnim pritiskom p_0 i totalnom temperaturom T_0 . Ove veličine su povezane sa statičkim pritiskom p i statičkom temperaturom T preko sljedećih relacija:

$$\frac{p_0}{p} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \quad (2)$$

gdje je γ odnos specifičnih toplota pri konstantnom pritisku C_p i konstantnoj zapremini C_v , a M vrijednost Machovog broja (odnos brzine v i brzine zvuka c):

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3)$$

$$M = \frac{v}{c} \quad (4)$$

Navedene jednačine opisuju varijaciju statičkog pritiska i temperature pri promjeni brzine isticanja (Machovog broja) uz pretpostavku izenotropskog procesa. Naprimjer, uz zadani odnos pritisaka u nivou ulazne i izlazne ravni (totalni u odnosu na statički), relacija (1) se može koristiti za procjenu Machovog broja u nivou izlazne ravni koji bi postojao u jednodimenzionalnom izenotropskom toku. Za određenu vrijednost ovog odnosa za SF₆ gas relacija (1) predviđa zagušenje (Machov broj iznosi 1 – zvučno strujanje) koje se uspostavlja u nivou minimalnog poprečnog presjeka isticanja, npr. u grlu mlaznice. U poprečnim presjecima iza minimalnog, gas može dodatno ubrzati, čime se dolazi u režim nadzvučnog isticanja uz dodatni pad pritiska ili može usporiti, što dovodi do režima podzvučnog isticanja, uz popratno povećanje pritiska. Ukoliko je nadzvučni tok gasa izložen narinutom povećanju pritiska na nivou ulazne ravni, nastaje udarni val, uz nagli pad pritiska i usporavanja koje se uspostavlja okomito u odnosu na pravac prostiranja udarnog vala. U proračunima stišljivog strujanja u ANSYS FLUENT®-u je moguće zanemariti efekte viskoznosti SF₆ gasa, pri čemu se rješavaju Eulerove jednačine [3], što u slučaju prekidača nije preporučljivo zbog velikih brzina isticanja SF₆ gasa. Stoga će se u proračunima isticanja, radi demonstriranja utjecaja turbulentnog ponašanja SF₆ gasa pri isticanju kroz mlaznicu VN prekidača, primijeniti turbulentni ostvarivi $k - \epsilon$ model [2].

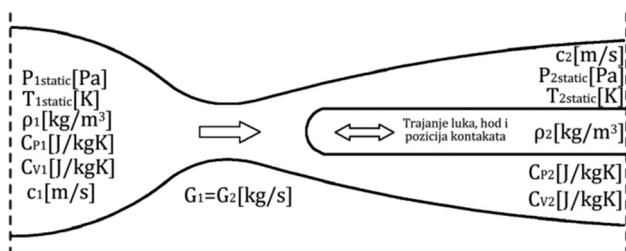
2. PRORAČUN STACIONARNOG ISTICANJA KROZ MLAZNICU 420kV PREKIDAČA

Ukupna historija procesa prekidanja je odgovorna za ponašanje električnog luka u strujnoj nuli, tako da računarska simulacija mora uzeti u obzir proces prekidanja od samog početka. SF₆ prekidač je uopšteno cilindričnog oblika, s postojećom aksijalnom simetrijom, što omogućava 2D simulaciju procesa isticanja, što može značajno uštediti računarske i vremenske resurse. Pri visokim pritiscima i temperaturama u prekidaču, pretpostavka lokalnog hemijskog ekvilibrijuma, kao i lokalnog termalnog ekvilibrijuma je opravdana [5]. Proračunski primjeri uzimaju u obzir prethodno rečeno, s tim da se cjelokupni proces do strujne nule računa pomoću programa za računarsku simulaciju rada prekidača visokog napona HV CB Simulation [6].

Podaci koji se dobijaju iz ovog programa predstavljat će ulazne podatke za proračun u ANSYS FLUENT®-u. Među njih spadaju vrijednosti sljedećih varijabli:

- pozicija nepokretnog lučnog kontakta unutar mlaznice u trenutku strujne nule (ovisna o trajanju luka, prodiranju lučnih kontakata i njihovom hodu),
- statički pritisak, statička temperatura i gustina u nivou ulazne ravni i izlazne/izlaznih ravni,
- ukupni maseni tok SF_6 gasa u nivou ulazne ravni,
- pojedinačni maseni tok/tokovi u nivou izlazne/izlaznih ravni,
- specifična toplota pri konstantnom pritisku u nivou ulazne i izlazne/izlaznih ravni,
- specifična toplota pri konstantnoj zapremini u nivou ulazne i izlazne/izlaznih ravni,
- brzina zvuka u nivou ulazne i izlazne/izlaznih ravni.

Prethodno opisano je ilustrovano na jednostavnom primjeru mlaznice prekidača s jednostranim oduvavanjem (Slika 1).



Slika 1: Prikaz mlaznice s jednostranim oduvavanjem i podataka potrebnih iz programa za simulaciju visokonaponskih prekidača HV CB Simulation

Vrijednosti svih navedenih varijabli, koje će predstavljati granične uslove za proračun stacionarnog isticanja u ANSYS FLUENT®-u, odnose se na trenutak strujne nule u kojoj se dešava konačno gašenje električnog luka. Varijable stanja gasa (pritisak, temperatura, specifična gustina) se u programu za računarsku simulaciju visokonaponskih prekidača tretiraju kao usrednjene vrijednosti tih parametara unutar pojedinih komora prekidača. Po pomenutoj pretpostavci, varijable stanja opisuju stanje gasa unutar cjelokupne komore prekidača. Navedena činjenica će biti od značaja pri izradi geometrije mlaznice visokonaponskih prekidača, u smislu produženja proračunskog domena na dio okolnih komora prekidača, kako bi se u obzir uzelo usrednjavanje varijabli stanja gasa u komorama. Ovo je posebno bitno primijeniti kod termalne zapremine, jer je porast pritiska u toj komori glavni uzrok uspostavljanja strujanja unutar mlaznice prekidača.

U nastavku će biti objašnjeno kako se nabrojani podaci koriste za iznalaženje geometrije mlaznice i određivanje graničnih uslova, na osnovu kojih se vrši proračun stacionarnog isticanja. U Tabeli I (Prilog) je dat prikaz rezultata proračuna za 420 kV prekidač nazivne struje 63 kA u programu HV CB Simulation za odabrani ispitni ciklus L75 i trajanja luka od 10, 15 i 20 ms.

Podaci u ovoj formi nisu prikladni za unos u ANSYS FLUENT® kao granični uslovi. Stoga je pomoću njih potrebno izvršiti nekoliko međuproračuna, kako bi se prilagodili

ulazu zahtijevanom od ANSYS FLUENT®-a. U tu svrhu se za svaku granicu primjenjuje set jednačina dat u nastavku.

Jednačine (1) i (2) služe za iznalaženje ukupnih temperatura svih ravni i ukupnog pritiska na nivou ulazne ravni, uz prateće jednačine (3) i (4), dok je za računanje koeficijenta laminarne dinamičke viskoznosti gasa odabrana jednačina [7]:

$$\mu = 1.533 \cdot 10^{-5} + 4.8 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 300) \quad (5)$$

gdje je T vrijednost temperature gasa. U svim je ovim jednačinama (osim jednačine za viskoznost) potrebna vrijednost brzine isticanja gasa na odgovarajućoj granici, koja se računa na osnovu sljedeće jednačine:

$$v = G \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1}{A} \quad (6)$$

gdje je A površina posmatranog poprečnog presjeka. Ovim su definisani ulazni podaci vezani za stišljivi model isticanja SF_6 gasa. Jednačine za računanje parametara turbulencije na nivou graničnih ravni, među koje spada Reynoldsov broj i intenzitet turbulencije [8], glase:

$$Re = \frac{\rho D_H v}{\mu} \quad (7)$$

$$I = 0.16 Re_{D_H}^{-\frac{1}{8}} \quad (8)$$

gdje je ρ gustina gasa na posmatranoj granici.

U jednačinama (7) i (8) figuriše tzv. hidraulički dijametar ulazne i izlaznih ravni mlaznice prekidača. Ovaj dijametar je za granicu u obliku kružne cijevi jednak dijimetru granice, a ukoliko se radi o koaksijalnoj kružnoj cijevi, s odgovarajućim unutrašnjim i vanjskim prečnikom, jednak razlici ovih dijametara [9].

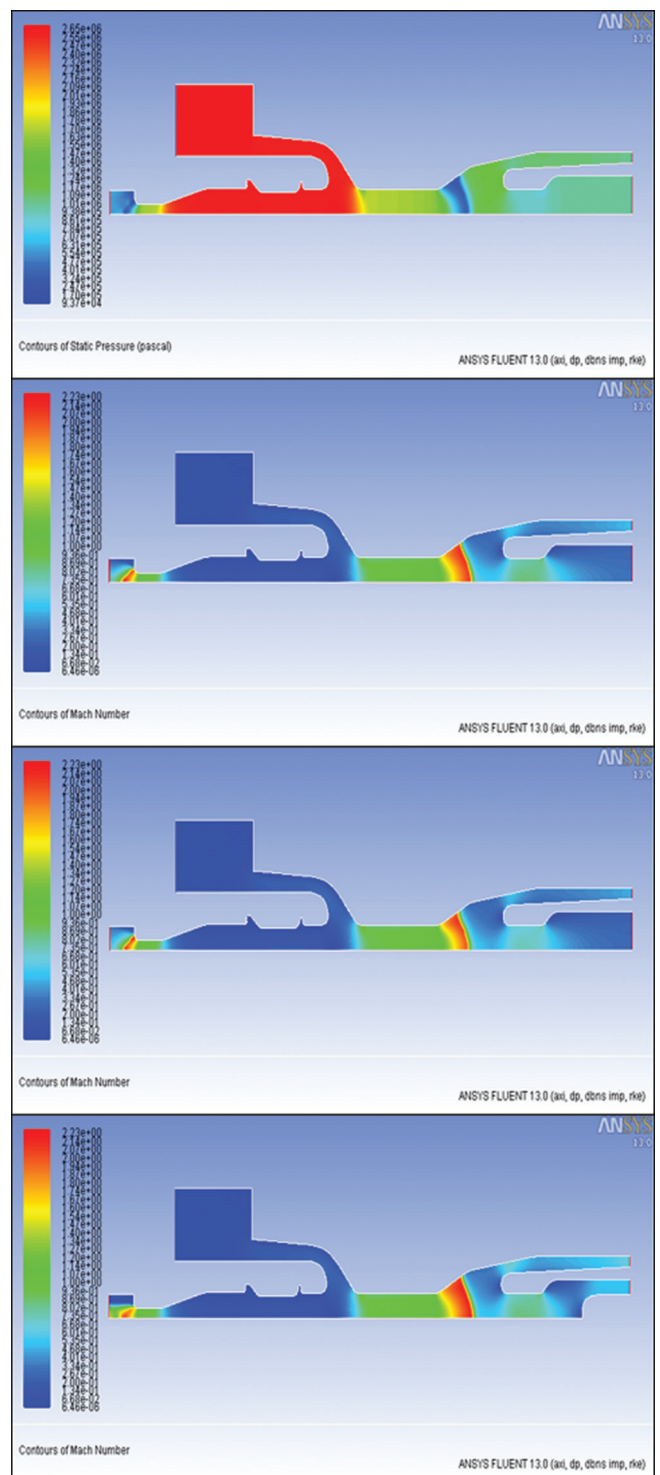
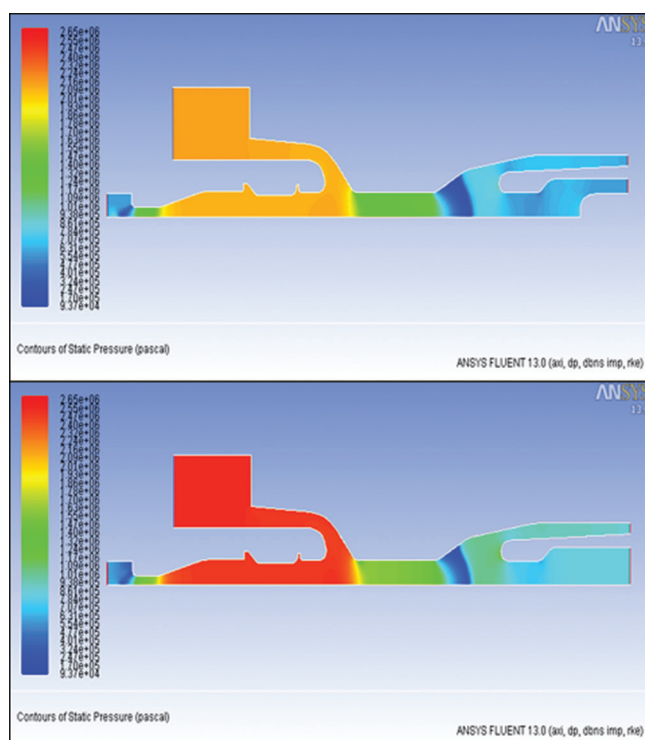
Model SF_6 gasa ne postoji u integrisanoj bazi materijala ANSYS FLUENT®-a. Kao alternativa se može koristiti model SF_6 gasa iz baze podataka NIST Standard Reference Database REFPROP v.9.0. [10]. Ovaj model ne sadrži karakteristike viskoznosti i toplotne provodnosti SF_6 gasa. Da bi se prevazišao ovaj nedostatak, implementiran je model realnog SF_6 gasa s modeliranim karakteristikama viskoznosti i toplotne provodnosti [11], i kao takav je korišten u proračunima. Nakon unosa geometrije, kreiranja mreže konačnih elemenata, unošenja graničnih vrijednosti izračunatih na osnovu podataka iz Tabele I i zadavanja osne simetrije, potrebno je unijeti model realnog SF_6 gasa i podesiti parametre kojima se isticanje definiše kao viskozno stišljivo isticanje [4]. Konačno, potrebno je izvršiti podešenje korištenog solvera i ostalih popratnih parametara kojima se utiče na proces rješavanja problema.

Karakteristično za ovaj tip prekidača u odnosu na konvencionalne izvedbe je postojanje tzv. pomoćnih lučnih kontakata za ograničenje dužine luka, lociranih u diver-

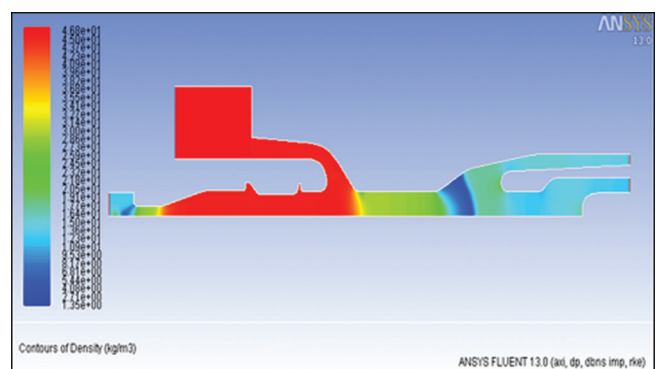
gentnom dijelu glavne mlaznice, a na koje se vrši prekomutacija struje pri unaprijed određenom međusobnom rastojanju glavnih lučnih kontakata. Također, drugi glavni lučni kontakt nije stacionaran, nego je zbog postojanja potrebe za velikim brzinama uspostavljanja rastojanja potrebna kretnja i ovog lučnog kontakta. Dakle, osim kretne prvog glavnog lučnog kontakta zajedno s mlaznicama u jednom smjeru, postoji i kretanje drugog glavnog lučnog kontakta u suprotnom smjeru. Njegova pozicija unutar glavne mlaznice, odnosno geometrija proračunskog domena u strujnoj nuli, je određena na osnovu poznate pozicije kontakata u zatvorenom položaju prekidača (prodiranje kontakata), trajanja luka i vrijednosti hoda kontakata u strujnoj nuli. Opisano se može primijetiti na Slikama 2 i 3, gdje je zbog velike međusobne brzine udaljavanja glavnih lučnih kontakata već za minimalno trajanje luka drugi lučni kontakt skoro u potpunosti napustio glavnu mlaznicu, dok je za preostala dva trajanja luka kontakt van proračunskog domena. Pad pritiska u divergentnim dijelovima glavne i pomoćne mlaznice upućuje na pojavu udarnog talasa i nadzvučnog regiona na tim lokacijama. Ovu činjenicu potvrđuje i raspodjela Machovog broja u izlaznom dijelu proračunskog domena 420kV prekidača, Slika 2. Ipak, odnosi pritisaka nisu dovoljno veliki da bi proširili nadzvučni region u područje lučnih kontakata za ograničenje luka, gdje se ima povećano električno naprezanje (zbog blizine samih lučnih kontakata).

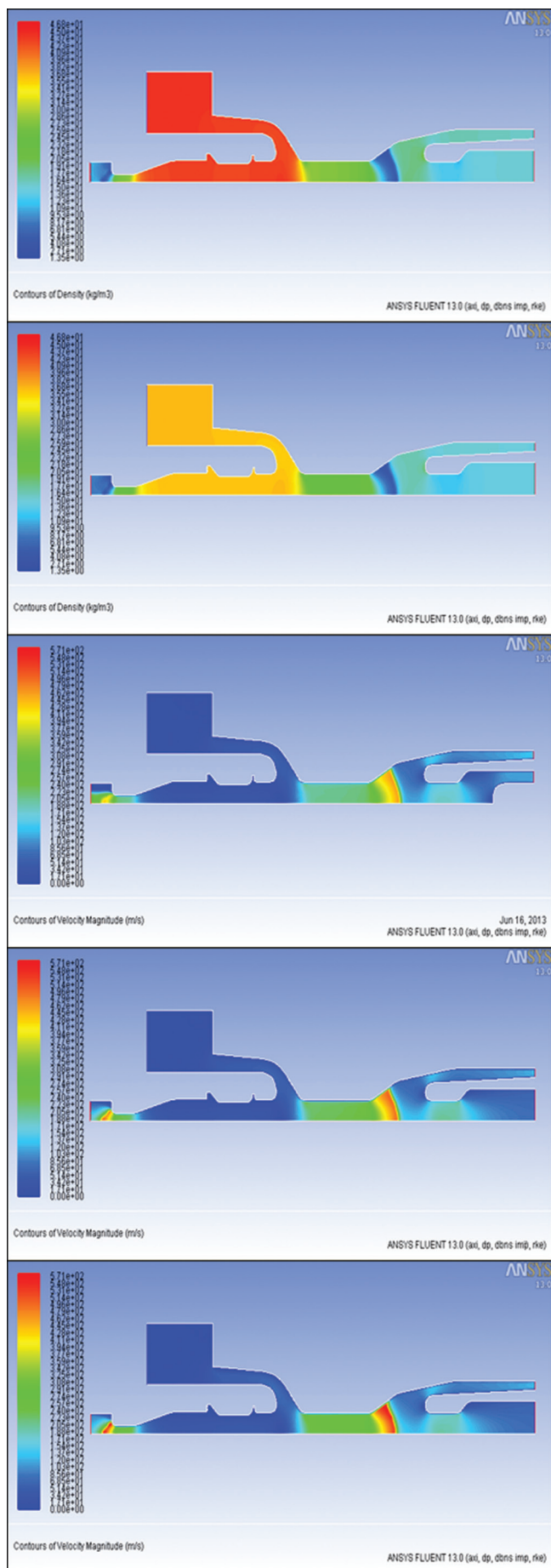
Na Slici 2 se također može uočiti da se u grlu glavne i pomoćne mlaznice uspostavlja vrijednost Machovog broja $M=1$, odnosno da je odnos pritisaka za oba smjera isticanja bio dovoljno velik da uzrokuje začepjenje obje mlaznice.

Zbog toga dolazi do ograničenja masenog protoka na vrijednosti date u Tabeli II (Prilog), koje su određene min-



Slika 2: Raspodjela statičkog pritiska i vrijednosti Machovog broja duž mlaznice 420kV prekidača za različita trajanja luka





Slika 3: Raspodjela gustine i brzine gasa duž mlaznice 420 kV prekidača za različita trajanja luka

imalnim poprečnim presjekom isticanja, odnosno dimenzijama i parametrima stanja u grlima mlaznica prekidača. Ako je vrijednost odnosa pritisaka veća, nadzvučni region se proširuje na divergentni dio mlaznice, odnosno front udarnog talasa se dislocira prema izlaznoj ravni mlaznice. Ovo vrijedi kako za glavnu, tako i za pomoćnu mlaznicu prekidača. Za minimalno trajanje luka pritisak izlazne ravni je najniži od tri analizirana, tako da je front udarnog talasa u ovom slučaju najudaljeniji od grla mlaznice. Kako se pritisak izlazne ravni glavne mlaznice povećava za duža trajanja luka, tako se i front udarnog talasa sve više povlači ka grlu glavne mlaznice, a i odgovarajuće područje nadzvučnog regiona se sužava. Kod pomoćne se mlaznice javlja situacija da je odnos pritisaka najveći za maksimalno trajanje luka, pa onda za srednje i minimalno trajanje luka, respektivno (što se može provjeriti i u Tabeli I).

Iz Tabele II masenih protoka se vidi da proračun u *ANSYS FLUENT*[®]-u predviđa manju vrijednost protoka u trenutku strujne nule. Ovo se može objasniti ukoliko se posmatra jednačina (6) iz koje se izrazi maseni protok G kao:

$$G = v \cdot \rho \cdot A \quad (9)$$

Vrijednost masenog protoka po jednačini (9) određuju brzina i gustina gasa, kao i poprečni presjek grla mlaznice. Pošto su grla pomoćne i glavne mlaznice 420 kV prekidača u trenutku strujne nule začepljene, to se u mlaznicama uspostavlja granični zvučni režim, a brzina gasa u grlima odgovara brzini zvuka ($M=1$). Ova vrijednost je jednaka u oba korištena programa, iz razloga što je u proračunima korišten isti model SF_6 gasa i pretpostavka izenotropskog procesa (brzina zvuka dominantno ovisi o temperaturi gasa, koja je u grlima približno jednaka za oba korištena programa). Zbog korištenja viskoznog modela isticanja kod proračuna u *ANSYS FLUENT*[®]-u, vrijednost efektivnog poprečnog presjeka se smanjuje uslijed trenja na zidovima grla mlaznice, pošto dolazi do radijalnog smanjenja brzine gasa od ose prema zidovima mlaznice. Ova činjenica je jedan od uzroka za nižu vrijednost proračunatog masenog protoka u *ANSYS FLUENT*[®]-u u odnosu na vrijednosti dobivene proračunom u *HV CB Simulation*. Drugi razlog predstavlja smanjenje gustine uslijed strujanja gasa u grlu mlaznice u odnosu na vrijednost u termalnoj komori prekidača. Naime, u programu *HV CB Simulation* se pretpostavlja da je stanje gasa u grlu mlaznice jednako stanju gasa u termalnoj komori, čime se u obzir ne uzima smanjenje gustine SF_6 gasa u grlima. Ova pretpostavka uzrokuje povećanu vrijednost masenog protoka. Ako se poredi maseni protoci za različite korištene programe iz Tabele II, bitno je uočiti da je međusobna razlika u odnosima mase gasa koji istekne kroz glavnu i pomoćnu mlaznicu u odnosu na ukupni maseni protok, za sva trajanja luka, manja od 5%, a da se samo vrijednosti masenih protoka međusobno razlikuju iz prethodno navedenih i

opisanih razloga. Dakle, na prethodnim slikama je moguće uočiti razne fenomene koji se u *HV CB Simulation* ne mogu uzeti u obzir. Pojava udarnih valova dešava se na divergentnim dijelovima mlaznica, što je od posebnog značaja na izlazu iz grla glavne mlaznice, gdje se u trenutku strujne nule nalazi drugi pokretni lučni kontakt. Od izuzetne je važnosti raspodjela temperature i gustine, pošto one u bitnoj mjeri određuju dielektrične osobine međukontaktne prostora.

Prethodna kratka analiza nekih od rezultata provedenog proračuna upućuje na to da je *CFD* analiza moćan alat pri dizajniranju mlaznica VN prekidača i uveliko pomaže pri razumijevanju složenih procesa isticanja gasa, koji se dešavaju u VN prekidačima.

3. ELEKTRIČNA NAPREZANJA 420kV PREKIDAČA

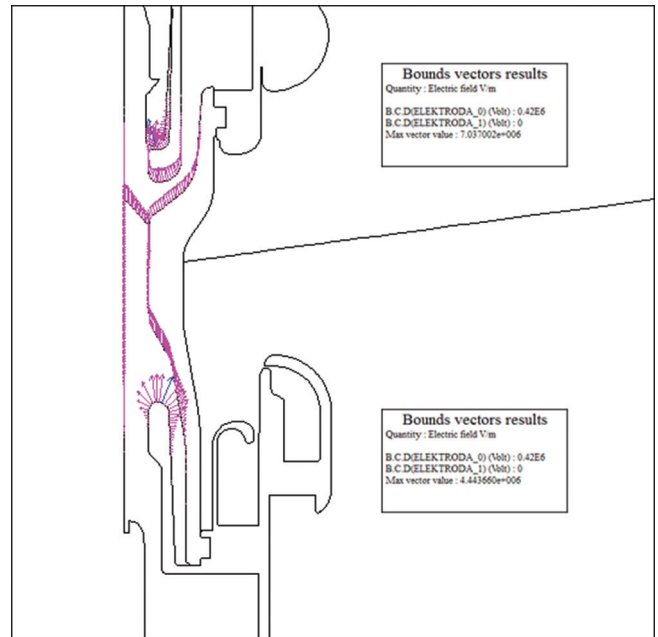
Procjena probojnog napona u visokonaponskim prekidačima je veoma izazovan i zahtjevan inženjerski problem. Probojni napon se procjenjuje na osnovu kriterija dielektrične čvrstoće SF_6 gasa, koji se određuje pomoću proračuna lokalnog isticanja (lokalno polje gustina) i raspodjele električnog naprežanja. Vrijednost probojnog napona se zatim određuje pomoću sljedećeg izraza:

$$U_p = C \left[\frac{\rho}{\hat{E}} \right]_{\min} \quad (10)$$

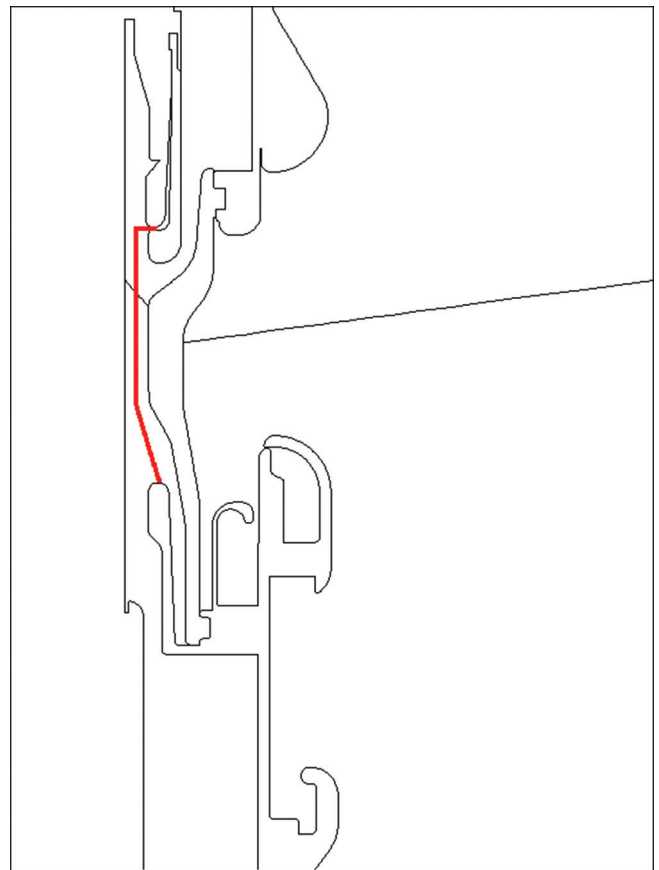
gdje je ρ lokalna gustina gasa, a $\hat{E}$ lokalna jačina električnog polja za nazivnu vrijednost primijenjenog napona. Konstanta C sadrži informacije o utjecajima hrapavosti površine lučnih kontakata, same vrijednosti površine kontakata i frekvencije primijenjenog napona na vrijednost probojnog napona. Vrijednost ovog koeficijenta određuje se na osnovu ispitivanja podnosivog napona bez opterećenja, odnosno određivanja tzv. hladne naponske karakteristike [12]. Da bi se pouzdano mogao odrediti probojni napon za datu geometriju mlaznice prekidača, mora se poznavati lokalna raspodjela parametara toka (gustine) i lokalna raspodjela električnog polja [13]. Proračun raspodjele lokalnog električnog polja na primjeru 420 kV prekidača za minimalno trajanje luka izvršen je u programu *CEDRAT Flux2D*[®] (Slika 4), dok je proračun isticanja za odabranu konfiguraciju dat u prethodnom poglavlju.

Na Slici 5 je prikazana odabrana kontura za koju će biti provedena analiza procjene probojnog napona. Rezultati ovog proračuna su dati na Slici 6, na kojoj je s vrha prema dnu prikazana raspodjela električnog polja i gustine po odabranom profilu. Odgovarajući odnos gustine gasa i jačine električnog polja (10) korigovan konstantom C u iznosu od $0.225 \text{ (MVm)}^2/\text{kg}$ prikazan je na Slici 7.

Kontura je odabrana tako da se u razmatranje uzmu maksimalne vrijednosti polja na lučnim kontaktima, kao i područje udarnog talasa u divergentnom dijelu glavne

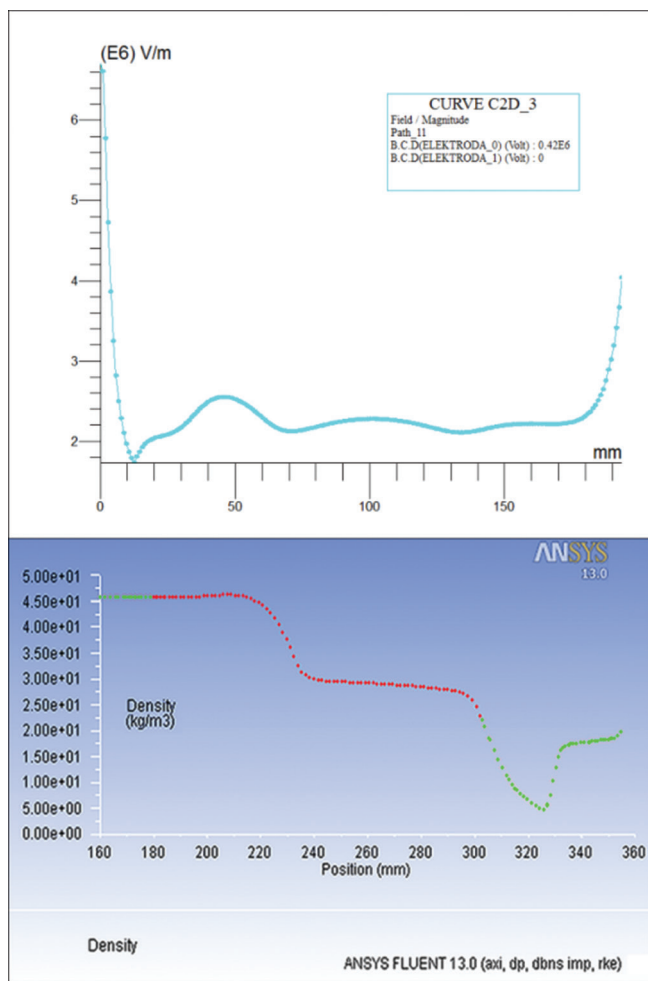


Slika 4: Raspodjela jačine električnog polja na granici domena 420kV prekidača pri minimalnom trajanju luka

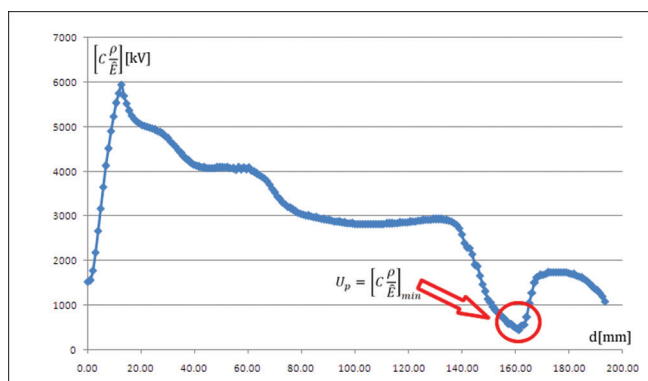


Slika 5: Odabrana kontura za analizu probojnog napona

mlaznice. Gornji dio Slike 6 prikazuje raspodjelu električnog polja duž konture s izraženim vrijednostima u blizini lučnih kontakata, dok donji dio daje raspodjelu gustine duž konture, na kojem je izražen pad gustine u dijelu glavne mlaznice gdje se javlja udarni talas. Na osnovu jednačine (10) i ove dvije krive se može procijeniti vrijednost probojnog napona duž konture. Na Slici 7 se može



Slika 6: Raspodjela lokalnog električnog polja i gustine za odabranu konturu



Slika 7: Odnos gustine i jačine električnog polja duž odabrane konture

primijetiti da u početnom dijelu konture odnos gustine i lokalnog električnog polja dominantno prati krivu električnog polja, pošto je gustina relativno konstantna. Lokalni minimum odnosa gustine i električnog polja na ovom dijelu odabrane konture se nalazi uz sami kontakt, zbog najveće vrijednosti električnog polja. Udaljavajući se od kontakta, gustina ostaje približno konstantna, a odnos gustine i polja raste, jer električno polje opada. U drugom dijelu konture, u kojem je raspodjela električnog polja približno konstantna, dominantan utjecaj na promjenu analiziranog odnosa gustine i električnog polja

ima gustina gasa. Ovaj dio konture prolazi i kroz nadzvučni region nastao uslijed pojave udarnog talasa, koji je karakteriziran značajnim padom gustine. Na ovom mjestu se dostiže i najniža vrijednost odnosa gustine i električnog polja, a koja po jednačini (10) određuje vrijednost probojnog napona.

U trećem dijelu konture dolazi do slabog porasta gustine gasa, dok jačina električnog polja zbog približavanja pomoćnim lučnim kontaktima za ograničenje dužine luka ponovo raste. Uslijed toga dolazi do opadanja odnosa gustine i električnog polja. Dakle, znatno reduciranje odnosa gustine i jačine električnog polja, čija minimalna vrijednost u konačnici određuje visinu probojnog napona, može se očekivati u zonama jakog električnog polja (okolina lučnih kontakata) i u području pada gustine (nadzvučni region udarnog talasa). Za analizirani slučaj minimalni se odnos javlja u nadzvučnom regionu.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je demonstriran način povezivanja proračuna dvaju programa u vidu sistema jednačina koje služe za preračunavanje određenih izlaznih veličina iz *HV CB Simulation* u oblik prilagođen unosu u *ANSYS FLUENT®*. On se pokazao kao veoma brz i efikasan, jer nije potrebno provoditi višesatne simulacije historije procesa prije strujne nule.

Model SF_6 gasa u proračunima mora vjerno reproducirati ponašanje realnog SF_6 gasa, imati dovoljno širok temperaturni dijapazon primjenjivosti unutar kojeg je potrebno obezbijediti što niže odstupanje parametara stanja od stvarnih vrijednosti i posjedovati modelirane sve za proračun bitne karakteristike. U ovom je radu implementiran takav jedan model realnog SF_6 gasa, za koji se pokazalo da posjeduje veliki broj prednosti u odnosu na model realnog SF_6 gasa koji je integrisan u *NIST* bazi materijala. Ove prednosti se ogledaju u više od dvostruko većem temperaturnom dijapazonu primjene modela (što je posebno bitno za procese koji se dešavaju u prekidačima visokog napona, gdje se ponekad javljaju temperature više do 1000K) i modeliranim transportnim koeficijentima termalne provodnosti i viskoznosti SF_6 gasa. Oni za sobom povlače sve efekte viskoznog isticanja, među koje spadaju razdvajanje toka, recirkulacija, povratno strujanje gasa, utjecaj zidova proračunskog domena na usporenje toka, povećanje temperature u blizini zidova, turbulentno ponašanje toka pri nailasku gasa na prepreke, itd.

Proračuni stacionarnog isticanja kroz mlaznicu realne izvedbe 420 kV prekidača za različita trajanja električnog luka potvrđuju ponašanje stišljivog viskoznog strujanja fluida, karakteristično za divergentno – konvergentne mlaznice, koje se ogleda u pojavi začepjenja mlaznica, regiona nadzvučnog strujanja i udarnih talasa u njihovom divergentnom dijelu, smanjenja brzine strujanja u blizini zidova, itd. Uočeno je da su vrijednosti proračunatih masenih protoka u *ANSYS FLUENT®*-u niže u odnosu na

proračune iz *HV CB Simulation*, što je objašnjeno smanjenjem gustine i efektivnog poprečnog presjeka u grlima mlaznica. Ova analiza daje smjernice ka mogućem unapređenju programa *HV CB Simulation*, koje se ogleda u tome da se za svaki vremenski trenutak proračuna stanje gasa u grlu mlaznice i na taj način ograniči evidentno visok maseni protok. Druga mogućnost u tom pogledu je implementacija nekog vida turbulentnog modela SF₆ gasa u proračun kako bi se moglo simulirati i efektivno smanjenje poprečnog presjeka isticanja zbog trenja na zidovima mlaznice. Model udarnog talasa i s tim povezanog nadzvučnog strujanja u divergentnom dijelu mlaznice predstavlja dodatni izazov za unapređenje ove aplikacije. Proračuni stacionarnog isticanja SF₆ gasa kroz mlaznice visokonaponskih prekidača čine osnovu raznim dodatnim analizama koje je moguće izvršiti na osnovu kombinovanog proračuna u *HV CB Simulation* i *ANSYS FLUENT*[®]-u. Ovo je demonstrirano na primjeru procjene probojnog napona za 420 kV prekidač pri minimalnom trajanju luka. Pri ovome je potrebno poznavati raspodjelu lokalnog električnog polja i gustine gasa u posmatranom regionu. Raspodjela jačine električnog polja se u ovom radu računa u programu *CEDRAT Flux2D*[®], dok se polje gustina dobija kao rezultat proračuna stacionarnog isticanja u *ANSYS FLUENT*[®]-u. Ova se analiza može primijeniti za određivanje promjene probojnog napona pri sklapanju kapacitivnih struja i za prekidanja pod opterećenjem nakon strujne nule, jer u ovim slučajevima nema prisustva električnog luka (ili je utjecaj luka zanemariv). Rezultati procjene probojnog napona pokazuju da se u regionu nadzvučnog strujanja u divergentnom dijelu glavne mlaznice može očekivati znatan pad odnosa gustine i jačine električnog polja, pošto je ovaj region karakterističan po naglom padu gustine gasa.

U konačnici se može reći da su razmatranjima i analizama datim u ovom radu postavljeni temelji za dalja istraživanja u smjeru dielektričnih naprezanja međukontaktnog prostora, stanja gasa duž mlaznice prekidača visokog napona, kao i određenih unapređenja programa *HV CB Simulation*.

LITERATURA

- [1] M. Kapetanović: High Voltage Circuit Breakers, Elektrotehnički fakultet, Sarajevo, 2011.
- [2] 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.
- [3] *ANSYS FLUENT*[®] 12.0, Theory Guide, ANSYS Inc., pp. 27 – 28 43 – 45, 112 – 125, 2009.
- [4] *ANSYS FLUENT*[®] 12.0, User's Guide, ANSYS Inc., pp. 657 – 658, 2009.
- [5] J. Mou, J. Guo, X. Jiang, X. Li, B. Chen, Z. Xin, Y. You: Computer simulation tool for the design and optimization for UHV SF₆ circuit breakers, CIGRÉ Conf., paper A3 – 203, 2012.
- [6] A. Ahmethadžić, Z. Gajić, M. Kapetanović: Computer Simulation of High Voltage SF₆ Circuit Breakers: Approach

to Modeling and Application Results, IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 4, 2011.

- [7] L. Graber: Modellbasierte Bestimmung der SF₆-Verluste in Gasisolierten Schaltanlagen, DISS ETH Nr. 18635, ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2009.
- [8] H. Steinrück, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung – TU Wien website. [Online]. Available: <http://cdlab2.fluid.tuwien.ac.at/>, 2013.
- [9] Computational Fluid Dynamics Online website. [Online]. Available: http://www.cfd-online.com/Wiki/Hydraulic_diameter, 2013.
- [10] The National Institute of Standards and Technology website. [Online]. Available: <http://www.nist.gov/>, 2012.
- [11] N. Blagojević: Proračun sastava produkata razlaganja idealnih i realnih gasova, ENERGOINVEST-IRCE, Sarajevo, Elaborat 1789, 1989.
- [12] M. Kapetanović: Visokonaponski prekidači, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, pp. 105 – 108, 2002.
- [13] J. P. Van Doormaal, G.D. Raithby: Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows, Numerical Heat Transfer, Vol. 7, No. 2, pp. 147 – 163, 1984.

BIOGRAFIJA

Dejan Bešlija rođen je 1989. godine u Zenici. Godine 2011. godine je završio I ciklus, a 2013. II ciklus studija (Master studij) na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Trenutno je zaposlen u EnergoBos ILJIN d.o.o Sarajevo. Od 2013. godine je član BH K CIGRÉ. Područja interesovanja su mu računarsko modeliranje i razvoj VN prekidača.

Mirsad Kapetanović rođen je 1953. godine u Visokom. Diplomirao je 1976. godine, a doktorsku disertaciju odbranio 1997. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Autor je više knjiga i radova iz oblasti VN prekidača, kao i različitih projekata iz ove oblasti. Od 1990. godine je član radne grupe CIGRÉ WG 13.01 (Practical Application of Arc Physics in Circuit Breakers), a od 1996. do 2002. godine je bio punopravni član studijskog komiteta SC 13 (Switching Equipment), dok je od 2002. do 2008. godine punopravni član studijskog komiteta SC A3 (High Voltage Equipment) međunarodne CIGRÉ. Trenutno radi kao profesor na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu i kao rukovodilac razvoja u EnergoBos ILJIN d.o.o. Sarajevo.

Sead Deliće rođen je 1972. godine u Tuzli. Diplomirao je na Fakultetu elektrotehnike i mašinstva u Tuzli 1997. godine, a magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu 2009. godine. Član je BH K CIGRÉ i redovni član studijskog komiteta SC A3 međunarodne CIGRÉ. U periodu 1997. – 2011. radio je u Energoinvestu na razvoju VN prekidača i MOP-a. Trenutno je uposlen u EnergoBos ILJIN d.o.o Sarajevo. Student je na doktorskom studiju na Elektrotehničkom fakultetu u Sarajevu. Područja profesionalne orijentacije su mu razvoj VN prekidača i MOP-a, razvoj softvera za simulaciju rada VN prekidača i proračun električnih polja.

Almir Ahmethadžić rođen je 1972. godine u Sarajevu. Diplomirao je 2002. godine, a doktorsku disertaciju odbranio 2011. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. U periodu 1996. – 2001. radio je u Energoinvestovom institutu IRCE u Sarajevu, a od 1997. godine radi kao asistent na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Sarajevu. Njegovo područje istraživanja obuhvata računarsku simulaciju ponašanja VN prekidača tokom sklapanja struja kratkih spojeva.

PRILOZI

Tabela I. Pregled izlaznih varijabli od interesa za analizirani 420kV prekidač za odabrana trajanja luka i ispitni ciklus

IZLAZNE VARIJABLE IZ PROGRAMA HV CB SIMULATION	ANALIZIRANA MLAZNICA 420kV, 63kA (L75 47.25kA)		
	10	15	20
Hod = Međukontaktna udaljenost + Prodiranje [mm]	252.412+92	342.811+92	409.431+92
Trajanje luka [ms]	10	15	20
Hidraulički dijametar ulazne ravni [mm]	100.088	100.088	100.088
Hidraulički dijametar izlazne ravni glavne mlaznice [mm]	35.0558	67.8348	67.8348
Hidraulički dijametar izlazne ravni pomoćne mlaznice [mm]	32.7538	32.7538	32.7538
Površina ulazne ravni [m ²]	0.0204304	0.0204304	0.0204304
Površina izlazne ravni glavne mlaznice [m ²]	0.00319121	0.00402898	0.00402898
Površina izlazne ravni pomoćne mlaznice [m ²]	0.00084239	0.00084239	0.00084239
Statički pritisak u nivou ulazne ravni [Pa]	2155782	2534408	2647433
Statička temperatura u nivou ulazne ravni [K]	802.366	991.919	1241.45
Specifična zapremina gasa u nivou ulazne ravni [m ³ /kg]	0.0254	0.022694	0.027277
Specifična toplota pri konstantnom pritisku u nivou ulazne ravni [J/kg·K]	994.877	1022.265	1046.984
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini u nivou ulazne ravni [J/kg·K]	936.731	964.848	989.912
Brzina zvuka u nivou ulazne ravni [m/s]	222.723	249.08	279.024
Maseni protok u nivou ulazne ravni [kg/s]	10.49	11.201	10.572
Statički pritisak u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [Pa]	599374.75	861570.5	1018623.2
Statička temperatura u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [K]	322.374	464.194	544.431
Specifična zapremina gasa u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [m ³ /kg]	0.028894	0.030071	0.030129
Specifična toplota pri konstantnom pritisku u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [J/kg·K]	731.796	861.434	908.939
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [J/kg·K]	654.882	799.862	849.438
Brzina zvuka u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [m/s]	135.806	165.554	180.452
Maseni protok u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [kg/s]	9.085	9.719	9.191
Statički pritisak u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [Pa]	609167	609038.75	608226.81
Statička temperatura u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [K]	801.704	463.792	544.154
Specifična zapremina gasa u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [m ³ /kg]	0.075124	0.042748	0.050617
Specifična toplota pri konstantnom pritisku u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [J/kg·K]	992.874	857.358	905.996
Specifična toplota pri konstantnoj zapremini u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [J/kg·K]	935.842	798.142	848.152
Brzina zvuka u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [m/s]	220.67	166.205	180.915
Maseni protok u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [kg/s]	1.405	1.482	1.381

Tabela II. Proračunati maseni tokovi na granicama proračunskog domena za 420 kV prekidač u trenutku strujne nule

Korišteni programi	HV CB Simulation			ANSYS FLUENT®		
	10	15	20	10	15	20
Maseni protok u nivou ulazne ravni [kg/s]	10.49	11.2	10.57	6.12	6.45	6.16
Maseni protok u nivou izlazne ravni glavne mlaznice [kg/s]	9.09	9.72	9.19	5.32	5.61	5.37
Maseni protok u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice [kg/s]	1.41	1.48	1.381	0.76	0.84	0.796
Odnos masenog protoka u nivou izlazne ravni glavne mlaznice i nivou ulazne ravni	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.871
Odnos masenog protoka u nivou izlazne ravni pomoćne mlaznice i nivou ulazne ravni	0.134	0.13	0.131	0.13	0.13	0.129