

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Na 733. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, održanoj 14. juna 2011. godine, imenovani smo za članove Komisija za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije mr Zvonimira Milanovića dipl.el.ing., pod naslovom **Teoretsko generisanje statističkog uzorka slučajne promenljive "Impulsni probojni napon gasova"**. Na osnovu sugestije Nastavno-naučnog veća odlučeno je da se naslov promeni u **"Teoretsko generisanje impulsnih karakteristika gasnog proboja"**. Nakon uvida u dostavljeni materijal podnosimo Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta sledeći

I Z V E Š T A J

1. Podaci o kandidatu

Zvonimir Milanović je rođen 01.06.1963.god. u Novom Pazaru. gde živi i radi. Osnovnu školu i gimnaziju prirodno-matematičkog smera završio je u Novom Pazaru. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na odseku za Energetiku, 1989. godine. Zvanje magistra tehničkih nauka stekao je 2010. godine na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Od 1989. godine do danas zaposlen je u Elektrodistribuciji Novi Pazar. Govori engleski i ruski jezik.

U svom dosadašnjem radu mr Zvonimir Milanović je objavio sledeće radove:

1. Z. Milanović, K. Stanković, M. Vujisić, R. Radosavljević, P. Osmokrović, Calculation of impulse characteristics for gas-insulated systems with homogenous electric field, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [ISSN 1070-9878], [IF: 1.729] prihvaćeno za štampu
2. Z. Jeremić, Z. Milanović, M. Jurošević, S. Đekić, Č. Dolićanin, Analiza mogućnosti mernih metoda u ispitivanju elektroizolacionih sistema u pogonu, 30. savetovanje CIGRE Srbija 2011, Zbornik radova R D1-04.

2. Predmet i cilj istraživanja

Proboj gasova je samoodržavajući proces kontrolisan odnosom razvoja sudarnih procesa koji obuhvataju naelektrisane čestice i njihova transportna svojstva. Do iniciranja proboja gasa dolazi kada se jedan slobodni elektron (nastao ili jonizacijom sekundarnim kosmičkim zračenjem, ili sudarnim procesima između molekula gasa sa visokoenergetskog dela Maksvelove raspodele ili hladnom emisijom sa elektroda) nađe u kritičnoj zapremini, tj. u delu međuelektrodnog prostora unutar kojeg može na jednoj srednjoj slobodnoj dužini puta da preuzme, od električnog polja, dovoljno energije potrebne za izazivanje jonizacije prilikom narednog sudarnog procesa. Takav slobodni elektron se naziva inicijalni pošto inicira lavinski proces kojim se, geometrijskom progresijom, stvaraju elektroni i joni koji se kreću prema anodi odnosno prema katodi. Ukoliko se tokom takvog lavinskog procesa stvore uslovi za nastajanje novih slobodnih elektrona potrebnih za iniciranje sekundarnih lavina ostvaruje se uslov samoodržanja električnog pražnjenja što završava probojem. Ovi elektroni, neophodni za samoodržavanje proboja, nazivaju se sekundarnim elektronima, a jonizacioni procesi kojima oni nastaju sekundarnim procesima.

Proces inicijacije proboja kao i procesi formiranja primarne i sekundarnih lavina odvijaju se nekom karakterističnom vremenskom konstantom. Ako je ta konstanta mnogo manja od vremena karakterističnog za promenu (porast) naponskog opterećenja koje dovodi do proboja, javlja se statički (*dc*) proboj. Ako je ta konstanta istog reda veličine kao karakteristično vreme porasta naponskog opterećenja dolazi do dinamičkog (impulsnog) proboja. Vrednost *dc* probojnog napona je deterministička veličina koja se može odrediti eksperimentalno (sa mernom nesigurnošću tip B) ili numerički. Vrednost impulsnog proboja je stohastička veličina koja se za neki konkretni elektrodni sistem izolovan gasom prikazuje preko impulsnih karakteristika, tj. zavisnosti kvantila statističkog uzorka slučajnih promenljivih impulsnog probojnog napona od oblika promenjenog napona. Impulsne karakteristike se određuju eksperimentalno (uz kombinovanu mernu nesigurnost) sa velikim brojem

merjenja ili eksperimentalno-teoretski uz primenu vremenskog zakona porasta verovatnoće proboja ili zakona o konstantnosti površina u volt-sekundarnoj ravni.

Poznavanje impulsnih karakteristika nekog konkretnog elektrodnog sistema izolovanog gasom omogućava takvo njegovo dimenzionisanje da se, sa unapred određenom verovatnoćom, može sprečiti impulsni proboj usled prenaponskih talasa, što je za inženjersku praksu, posebno u visokonaponskoj tehnici, problem od prvorazrednog značaja. Pouzdano eksperimentalno određivanje impulsnih karakteristika bilo bi izuzetno neekonomično u vremenskom i ekonomskom smislu pošto bi podrazumevalo merenje velikog broja impulsnih probojnih napona korišćenjem impulsa različitog oblika. Ovo bi naročito došlo do izražaja u slučaju određivanja impulsnih karakteristika koje odgovaraju malim verovatnoćama događaja proboj (malih kvantila). Tu treba dodati i da bi tako veliki broj merjenja vrednosti impulsnog probojnog napona nužno doveo do ireverzibilnih promena posmatranog elektrodnog sistema (promenom topografije elektrodnih površina i čistoće izolacionog gasa) te se, stoga, u praksi, pribegava polu empirijskim algoritmima za određivanje impulsnih karakteristika posmatranih sistema. Najčešće primenjivani poluempirijski algoritam se zasniva na zakonu površina, a nedavno je predložen algoritam zasnovan na zakonu porasta verovatnoće proboja, kojim su otklonjeni neki nedostaci algoritma zasnovanog na zakonu površina. Međutim oba ova algoritma imaju zajednički nedostatak da su poluempirijska, tj. da je potrebno odrediti jedan reprezentativan statistički uzorak slučajne promenljive impulsni probojni napon dobijen precizno definisanim impulsnim naponom.

Cilj disertacije je da se razvije numerički algoritam koji omogućava proračun impulsnih karakteristika bez, često veoma komplikovanog, mernog postupka.

3. Polazne hipoteze

Pretpostavlja se da je moguće polazeći od Zakona zapremina-vreme posmatranjem evolucije lavinskog procesa kao Markovljevog procesa izvesti izraz za verovatnoću transformacije jednog slobodnog elektrona u inicijalni elektron i na osnovu toga i poznavanja vrednosti *dc* probojnog napona odrediti statistički uzorak slučajne promenljive Statističko vreme. Takođe se pretpostavlja da je moguće na osnovu poznavanja vrednosti Toplerove konstante. Na osnovu Toplerovog zakona odrediti formativno vreme koje prema dosadašnjim saznanjima istog reda veličine kao i vreme formiranja lavine. Na taj način se pretpostavlja da je moguće odrediti statistički uzorak slučajne veličine probojno vreme što omogućava da se odredi i odgovarajući statistički uzorak slučajne promenljive Impulsni probojni napon. Na osnovu tako dobijenih statističkih uzoraka slučajnih promenljivih probojno vreme i impulsni probojni napon moguće je odrediti odgovarajuće impulsne karakteristike posmatranog dvoelektrodnog sistema izolovanog SF₆ gasom. Rezultat ovog postupka će omogućiti određivanje impulsnih karakteristika za proizvoljne vrednosti kvantila verovatnoće bez ikakvih eksperimentalnih postupaka koji su u dosadašnjoj stručnoj i naučnoj praksi bili neophodni i doprinosili relativizaciji tačnosti samih takvih semiempirijskih algoritama. Rezultati doktorske disertacije biće, između ostalog, nastavak već publikovanih rezultata:

- [1] M.M. Pejović, G.S. Ristić, and J.P. Karamarković, "Electrical breakdown in low pressure gases", J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 35, No. 10, pp. 35-91, 2002.
- [2] M.M. Pejovic and M.M. Pejovic, "Investigations of breakdown voltage and time delay of gas-filled surge arresters", J. Phys. D: Appl. Phys, Vol. 39, No. 20, pp. 4417-4422, 2006.
- [3] P. Osmokrović, M. Vujisić, K. Stanković, A. Vasić, and B. Lončar, "Mechanism of electrical breakdown of gases for pressures from 10(-9) to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1 to 0.5mm", Plasma Sources Sci. T, Vol. 16, No. 3, pp. 643-655, 2007.
- [4] K. Stanković, M. Vujisić, and Lj. Delić, "Influence of tube volume on measurement uncertainty of GM counters", Nucl. Technol. Radiat., Vol. 25, No. 1, pp. 46-50, 2010.
- [5] P. Osmokrović, B. Lončar, and S. Stanković, "The new method of determining characteristics of elements for overvoltage protection of low-voltage system", IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 55, No. 1, pp. 257-265, 2006.
- [6] P. Osmokrović, G. Ilić, Ć Dolićanin, K. Stanković, and M. Vujisić, "Determination of pulse tolerable voltage in gas-insulated systems", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, No 12, pp. 8928-8934, 2008.

- [7] K. Stanković, M. Pešić, P. Osmokrović, and M. Vujisić, "Surface-time enlargement law for gas breakdown", IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul., Vol. 15, pp. 994-1005, 2008.
- [8] W. Boeck, "Volumen-Zeit-Gesetz beim Stossspannungsduchslag von SF₆", Elektrotechnische Zeitschrift Ausgabe A, Vol. 96, pp. 97-102, 1976.
- [9] M. Topler, "Zur Kenntnis der Gesetz der Gleitfunkenbildung", Ann. Phys. D 4, Vol. 21, pp. 193-222, 1906.
- [10] M. Topler, "Funkenkonstante, Zundfunken und Wanderwelle", Arch. Elektrotechnik, Vol. 16, pp. 305-318, 1925.
- [11] P. Osmokrović, "Electrical breakdown of SF₆ at small values of product pd", IEEE Trans. Power Deliver. Vol. 4, pp. 2095-2100, 1989.
- [12] M.M. Pejovic and G.S. Ristic, "Analysis of mechanisms which lead to electrical breakdown in a krypton-filled tube using the time delay method", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 33, pp. 2786-2790, 2000.
- [13] I.V. Spasic, M.K. Radovic, M.M. Pejovic, and C.A. Maluckov, "The statistical time-delay and the breakdown formative time contributions to the memory effect in Ne at 7 mbar pressure", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 36, pp. 2515-2520, 2003.
- [14] S.N. Ivanov, V.V. Lisenkov, and V.G. Shpak, "Streak investigations of the initial phase of a subnanosecond pulsed electrical breakdown of high-pressure gas gap", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 43, art.no. 315204, 2010.
- [15] S.R. Gocić, V.Lj. Marković, and S.N. Stamenković, "Determination of correlation coefficient of the statistical and formative time delay in nitrogen", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 42, pp. 2001, 2009.
- [16] H.B. Mann and D.R. Whitney, "On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other", The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 18, pp. 50-60, 1947.
- [17] P.J. Davis and P. Robinowitz, *Methods of Numerical Integration Computer Science and Applied Mathematics*, Academic Press, Inc., Orlando, p. 612, 1984.
- [18] X. Xu, S. Jayaram and S.A. Boggs, "Prediction of Breakdown in SF₆ under impulse Conditions", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 3, pp. 836-842, 1996.
- [19] J. Kindersberger, N. Weigart, S.A. Boggs, "Ion production rates in SF₆ and the relevance thereof to gas insulated switchgear", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, pp. 123-125, 1985.
- [20] K. Stanković, P. Osmokrović, Č. Dolićanin, M. Vujisić, A. Vasić, "Time Enlargement Law for Gas Pulse Breakdown", Plasma Sources Sci. Technol. Vol. 18, art. no. 025028 (12pp), 2009.

4. Naučne metode istraživanja

Biće proučavana stohastičnost fenomena pojave slobodnog elektrona. Nakon toga će biti na bazi metoda simulacije naelektrisanja razvijen postupak za izračunavanje kritične zapremine unutar osnosimetričnog dvoelektrodnog sistema izolovanog SF₆ gasom. Paralelno s tim će biti razvijen algoritam za proračun vrednosti *dc* probojnog napona SF₆ gasa prema Tauzendovom i strimerskom kriterijumu uz primenu Tauzendovih i/ili Takašijevih izraza za lavinske koeficijente. Takođe će biti razvijen statistički algoritam za izračunavanje probalističke vremenske zavisnosti ulaska prethodno generisanog slobodnog elektrona u kritičnu zapreminu kao i algoritma za prikaz na taj način pokrenutog lavinskog mehanizma Markovljevim lancem. Pored toga će biti razvijen algoritam za proračun formativnog vremena primenom Doplerovog zakona za SF₆ gas. Sabiranjem vremena do izjednačavanja impulsnog napona i vrednosti *dc* probojnog napona sa statističkim vremenom određenim na osnovu Markovljevih procesa i dvostruke vrednosti formativnog vremena biće određeno probojno vreme za unapred zadati kvantil verovatnoće proboja. Na osnovu tako određenog probojnog vremena koje odgovara tačno određenom kvantilu verovatnoće proboja odrediće se odgovarajuće vrednosti slučajne promenljive impulsnog probojnog napona na osnovu poznavanja oblika impulsnog napona zadatog na uobičajeni način razlikom dve eksponencijalne funkcije različitih izložilaca. Na taj način uređeni parovi (probojno vreme, impulsnog probojni napon za tačno određeni kvantil verovatnoće uz varijaciju primenjenog teoretskog impulsnog oblika određuju impulsnu karakteristiku koja odgovara tom kvantilu verovatnoće.

5. Očekivani naučni doprinos

Osnovni doprinos rada se sastoji u razvoju algoritma koji omogućava zamenu neracionalnog eksperimentalnog postupka za određivanje impulsnih karakteristika kao i algoritma neuporedivo efikasnijeg i tačnijeg od semiempirijskih algoritama zasnovanih na Zakonu površina-vrema i na Zakonu porasta verovatnoće proboja. Pored toga dobijeni rezultat omogućava generisanje statističkog uzorka slučajne promenljive Impulsni probojni napon koji ima prednost nad odgovarajućim eksperimentalno određenim uzorkom pošto prilikom teoretskog generisanja statističkog uzorka ne dolazi do ireverzibilnih promena topografije elektrodnih površina što bitno utiče na reproduktivnost i verodostojnost dobijenih eksperimentalnih rezultata. Ovo pogotovo dolazi do izražaja ukoliko se impulsne karakteristike, odnosno statistički uzorak, slučajne promenljive Impulsni probojni napon određuju impulsima veće energije.

6. Plan istraživanja i struktura rada

U cilju proračuna impulsnih karakteristika bez primene eksperimentalno dobijenog statističkog uzorka slučajne promenljive impulsni probojni napon nužno je isti numerički generisati. To je moguće tako što se prvo teoretski generiše statistički uzorak slučajne promenljive statističko vreme za pretpostavljeni oblik impulsnog napona. Nakon toga je jednostavno generisati statistički uzorak odgovarajuće slučajne promenljive probojno vreme, odnosno statistički uzorak slučajne promenljive impulsni probojni napon.

Impulsne karakteristike će, na osnovu predloženog teoretskog postupka, biti određivane tako što će biti: 1- računato električno polje u međuelektrodnom prostoru metodom simulacije naelektrisanja; 2- računata vrednost dc probojnog napona primenom teoretskih izraza u zavisnosti od očekivanog mehanizma proboja; 3- određivana promena kritične zapremina na osnovu proračunatog električnog polja i poznatih vrednosti za dc probojni napon, za posmatrani gas, pod pretpostavkom primene impulsnog napona linearnog oblika ($\mu = kt$), amplitude mnogo veće od vrednosti impulsnog probojnog napona (što u praksi obezbeđuje da se proboj dešava uvek na prednjoj ivici impulsa i odgovara uslovima sprovedenog eksperimenta); 4- računato probojno vreme primenom teoretskih izraza, i pod navedenim pretpostavkama i na osnovu pretpostavljenog izraza za oblik impulsa, određivaće se odgovarajuća vrednost probojnog napona za unapred usvojeni kvantil verovatnoće; 5- postupak ponovljen.

Tokom ovoga postupka za proračune, u slučaju SF_6 gasa, koristiće se zavisnosti Tauzendovih koeficijenta jonizacije i pripajanja preuzete iz literature i najpodesnije za oblast vrednosti pritiska pri kojima je vršen eksperiment. U slučaju gasova N_2 i Ar za Tauzendove koeficijente koristiće se eksponencijalni izrazi prema Tauzendu ili Takešiju.

Provera primenljivosti, ovde predloženog, teoretsko-numeričkog algoritma za generisanje statističkog uzorka slučajne veličine Impulsni probojni napon i , na osnovu toga, određivanje impulsnih karakteristika vršiće se u sledećim koracima: 1- eksperimentalno određivanje statističkog uzorka impulsni probojni napon; 2- teoretsko numeričko određivanje statističkog uzorka Impulsni probojni napon; 3- određivanje impulsnih karakteristika zakonom površina, zakonom prostorno vremenskog uvećanja i predloženim teoretskim numeričkim algoritmom; 4- eksperimentalna provera dobijenih rezultata naponima različitog oblika.

7. Zaključak i predlog

Mr Zvonimir Milanović, diplomirani inženjer elektrotehnike, prijavio je svoju doktorsku disertaciju pod naslovom "**Teoretsko generisanje impulsnih karakteristika gasnog proboja**" u skladu sa Pravilnikom o doktorskim studijama Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, podnevši na uvid sva, pomenutim pravilnikom, predviđena dokumenta. Na osnovu podnesenih dokumenata konstatovano je da je mr Zvonimir Milovanović diplomirao na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu i magistrirao na Elektroehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Ne postoje nikakve zakonske smetnje da prijavi doktorsku disertaciju. Kandidat ima radove koji su predstavljeni na domaćim i međunarodnim stručnim konferencijama, kao i jedan rad prihvaćen za štampu u istaknutom međunarodnom časopisu. Na osnovu obrazloženja predmeta i cilja istraživanja, polaznih hipoteza istraživanja, očekivanih naučnih doprinosa i plana istraživanja, može da se zaključi da tema prijavljene doktorske disertacije pod naslovom "**Teoretsko generisanje impulsnih karakteristika gasnog**"

proboja" omogućava da se u okviru nje ostvare značajni naučni i stručni doprinosi iz oblasti pražnjenja u gasovima. Predloženi mentor, prof. dr Predrag Osmokrović, ima veliki broj naučnih radova iz oblasti kojoj pripada prijavljena doktorska disertacija kandidata mr Zvonimira Milanovića, te u tom smislu smatramo da je kompetentan da obavlja funkciju mentora ove disertacije. Stoga predlažemo Nastavno-naučnom veću da odobri izradu doktorske disertacije kandidata mr Zvonimira Milanovića pod naslovom "**Teoretsko generisanje impulsnih karakteristika gasnog proboja**", pod mentorstvom prof. dr Predraga Osmokrovića.

U Beogradu, 7.3.2012.god.

Komisija

dr Predrag Osmokrović, red. prof.
Elektrotehnički fakultet u Beogradu

dr Jovan Cvetić, red. prof..
Elektrotehnički fakultet u Beogradu

dr Aleksandra Vasić-Milovanović, van. prof.
Mašinski fakultet u Beogradu