

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA UNIVERZITETA U BEOGRADU

Na 755. sednici Nastavno-naučnog veća Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, održanoj 6. novembra 2012. godine, imenovani smo za članove Komisija za ocenu uslova i prihvatanje teme doktorske disertacije Mr Mirka Stojkanovića, dipl.el.ing., pod naslovom „**Statička i dinamička sinergija izolacionih osobina gasne smeše SF₆/N₂**“. Nakon uvida u dostavljeni materijal podnosimo Nastavno-naučnom veću Elektrotehničkog fakulteta sledeći

I Z V E Š T A J

1. Podaci o kandidatu

Mirko Stojkanović je rođen 12.10.1980. godine u Sarajevu. Po završetku gimnazije u Sremskoj Mitrovici, 1999. godine, upisao je Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, na kojem je i diplomirao septembra 2005. godine. Poslediplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu, energetski odsek, smer elektroenergetska postrojenja i oprema, upisao je u oktobru 2005. godine, a magistrirao u septembru 2009. godine sa tezom “Detekcija objekta u video sekvenci u LabVIEW radnom okruženju i primena u termoviziji” i stekao akademski naziv magistra elektrotehničkih nauka.

U svom dosadašnjem radu Mr Mirko Stojkanović, dipl.el.ing, je objavio sledeće radove:

- [1] P. Osmokrović, **M. Stojkanović**, K. Stanković, M. Vujisić, D. Kovačević, Synergistic Effect of SF₆ and N₂ Gas Mixtures on the Dynamics of Electrical Breakdown, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 19 (2012), No. 2, pp. 677-688 [ISSN 1070-9878], [IF: 1.729], M21.
- [2] **M. Stojkanovic**, G. Djukic, K. Stankovic, M. Vujisic, P. Osmokrovic, Design, deployment and verification of the capacitive voltage divider for measuring fast transient occurrences in the nanosecond range, *International journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 43 (2012), pp. 1479–1486 [ISSN 0142-0615], [IF: 2.247], M21.
- [3] D. Brajovic, M. Vujisic, **M. Stojkanovic**, A. Vasic, Stabilization of gas-filled surge arrester's characteristics by use of ionizing radiation, *Nuclear Technology & Radiation Protection*, Vol. 27, No. 3, pp. **in press** (2012) [ISSN 1451-3994] [IF: 1.156], M22.
- [4] **M. Stojkanovic**, K. Stankovic, P. Osmokrovic, Dijagnosika parcijalnog pražnjenja kod asinhronih mašina, *Elektro distribucija*, Vol. 38, No. 1, pp. 58-66
- [5] **M. Stojkanović**, M. Vujisić, I. Fetahović, I. Milovanović, D. Petković, Projektovanje, razvoj, ispitivanje i verifikacija odziva kapacitivnog razdelnika za merenje brzih prelaznih pojava u nanosekundnoj oblasti, 30. savetovanje CIGRE Srbija 2011, Zbornik radova R D1-07.

2. Prikaz aktivnosti Mirka Stojkanovića tokom izrade doktorske disertacije

Tokom dosadašnjeg rada na doktorskoj disertaciji kandidat je proveo deo vremena vršeći eksperimente u Visokonaponskoj laboratoriji Energoinvesta (Istočno Sarajevo), Visokonaponskoj laboratoriji Univerziteta u Drezdenu i laboratoriji zaštite od zračenja Instituta Vinča u Beogradu.

3. Predmet i cilj istraživanja

Električni proboj gasova je samoodržavajući proces do kojeg dolazi kada se uspostavi pozitivna povratna sprega između primarnih i sekundarnih efekata električnog pražnjenja u gasovima. Primarni procesi električnog pražnjenja u gasovima određeni su procesima nastanka i nestanka slobodnih elektrona koji se karakterišu takozvanim Tausendovim koeficijentima, tj. koeficijentom jonizacije α i koeficijentom pripajanja η . Primarni Tausendovi koeficijenti α i η predstavljaju broj slobodnih elektrona nastalih jonizacionim procesima, odnosno nestalih procesima pripajanja elektronegativnim molekulima gasa, po jedinici puta u pravcu polja, respektivno. Procesi jonizacije i pripajanja su probabilističke prirode i verovatnoća da do njih dođe izražava se tzv. efikasnim presekom. Slobodni elektroni u gasu ili smeši gasova se tretiraju kao poseban gas koji se može okarakterisati svim parametrima Maksvelove raspodele, između ostalog i ekvivalentnom temperaturom. Jonizacija elektronima, osnovni elementarni proces svih električnih fenomena u gasovima, je u slučaju SF_6 često povezan sa disocijacijom, putem koje nastali molekularni i atomski joni uzimaju učešće u daljem razvoju pražnjenja te mu komplikuju fizičko modelovanje. Od presudnog značaja za primenu SF_6 gasa je njegova osobina elektronegativnosti, tj. sklonosti ka zahvatanju slobodnih elektrona i stvaranju negativnih jona. Ovim procesom se zamenjuju laki elektroni teškim jonima koji ne učestvuju dalje u procesu jonizacije i smanjuje se ukupna gustina slobodnih elektrona. Proces elektronskog zahvata je probabilističke prirode i karakteriše se efikasnim presekom koji je mera verovatnoće da dođe do zahvata. Efikasni presek za zahvat elektrona nije konstantna veličina već zavisi od vremena koje elektron provede u blizini elektronegativnog atoma. Što je to vreme duže, odnosno odgovarajuća brzina elektrona manja, verovatnoća zahvata je veća. Pošto slobodni elektroni u gasovima nemaju konstantnu brzinu, odnosno energiju, već poseduju spektar Maksvelovskog tipa, celishodno ga je, u cilju povećanja efekta elektronskog zahvata, moderacionim postupkom pomeriti u levo ka nižim energijama odnosno svesti ga na nižu efektivnu temperaturu. Moderaciju elektronskog spektra je moguće postići dodavanjem elektronegativnom gasu nekog molekularnog gasa kojem elektronski spektar, u sudarnoj interakciji, pobuđuje rotaciona i vibraciona stanja, ili ga disocira, čime gubi energiju i pomera se ka nižim efektivnim temperaturama. U tom smislu dodavanje N_2 gasa SF_6 gasu izaziva pozitivan sinergistički efekat pošto tim putem formirana mešavina ima bolje izolacione karakteristike od čistog SF_6 gasa. Naravno, to važi u slučaju da se ne doda suviše veliki procenat N_2 molekula, pošto se radi o elektro-pozitivnim molekulima čijom jonizacijom se povećava koncentracija slobodnih elektrona što može anulirati pozitivan sinergistički efekat moderacije elektronskog spektra.

Cilj ovog rada je da se, polazeći od mikroskopskih efekata električnog pražnjenja u gasovima, izraženim preko ekvivalentne probojne temperature gasa, odrede uslovi postizanja optimalnog pozitivnog sinergističkog efekta kao i njegova ograničenja u uslovima važenja strimerskog mehanizma proboja. Međutim kako se proces zahvata i proces moderacije odvijaju u vremenu, od interesa je ispitati efekte pomenute sinergije za slučaj opterećenja gasne smeše brzim naponskim impulsima. Na taj način je moguće odrediti i vremensku konstantu moderacionog efekta. Ovaj problem, koji je vrlo interesantan sa aspekta inženjerske prakse zbog zaštite od prenapona, takođe je cilj ovog rada.

4. Polazne hipoteze

U cilju ispitivanja statičkih i dinamičkih sinergističkih efekata gasnih smeša SF_6/N_2 poći će se od pretpostavke da dodavanjem N_2 gasa SF_6 gasu dovodi do pomeranja odgovarajućeg Maksvelovog spektra slobodnih elektrona ka nižim energijama, odnosno do smanjenja njegove ekvivalentne temperature, što je proces koji se odvija u realnom vremenu i treba da se karakteriše nekom vremenskom konstantom. Taj proces liči na moderacioni proces poznat iz neutronske fizike pa se i sam može smatrati moderacionim procesom. Polazeći od hipoteze da vrednost impulsnog probojnog napona mora zavisiti od brzine porasta impulsa i vremenske konstante moderacionog efekta u radu će biti, eksperimentalno, određena vremenska konstanta moderacionog procesa. U radu će se, takođe, na osnovu pretpostavke da je efikasni presek za elektronski zahvat od strane elektronegativnog molekula gasa proporcionalan vremenu koji slobodni elektron provede u njegovoj blizini, izvesti izraz koji povezuje vrednost jednosmernog dc probojnog napona, ekvivalentnu temperaturu i procentualni sastav smeše. Ovaj izraz će biti proveren poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima zavisnosti vrednosti dc probojnog napona od proizvoda pd (pritisak $\times$ međuelektrodno rastojanje) pri čemu će vrednost dc probojnog napona biti povezana sa odgovarajućom ekvivalentnom (probojnom) temperaturom gasa slobodnih elektrona preko faktora forme primenjenog Maksvelovog spektra.

Rezultati doktorske disertacije biće, između ostalog, nastavak već publikovanih rezultata:

- [1] 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, pp. 643-655, 2007.
- [2] P. Osmokrović, G. Ilić, Č. Dolićanin, K. Stanković, and M. Vujisić, "Determination of pulse tolerable voltage in gas-insulated systems", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 47, pp. 8928-8934, 2008.
- [3] P. Osmokrović, "Electrical breakdown of SF₆ at small values of product pd ", IEEE Trans. Power Deliver. Vol. 4, pp. 2095-2100, 1989.
- [4] Osmokrović P, Ilić G, Stanković K, Dolićanin Č, Vujisić M. Determination of pulse tolerable voltage in gas-insulated systems. Jpn J Appl Phys 2008;47:8928-34.
- [5] Osmokrović P, Marić R, Stanković K, Ilić D, Vujisić M. Validity of the space-time enlargement law for vacuum breakdown. Vacuum 2010;85:221-30.
- [6] Stanković K, Osmokrović P, Dolićanin Č, Vujisić M, Vasić A. Time enlargement law for gas pulse breakdown. Plasma Sources Sci T 2009;18:art.no.025028 (12pp).
- [7] Osmokrović P, Vujisić M, Stanković K, Vasić A, Lončar B. Mechanisms of electrical breakdown of gases for pressures from 10⁻⁹ to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1-0.5mm. Plasma Sources Sci T 2007;16:643-55.
- [8] Osmokrović P, Petković D, Marković O. Measuring probe for fast transients monitoring in gas - insulated substations. ETEP/IEEE Trans Instrum Meas 1997;46:36-45.
- [9] P. Osmokrović, "Mechanism of electrical breakdown of gases at very low pressure and inter-electrode gap values", IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 21, pp. 645-654, 1993
- [10] K. Stanković, M. Pešić, P. Osmokrović, M. Vujisić, Surface Time enlargement law for gas pulse breakdown, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.15, No.4, (2008), pp. 994-1005
- [11] P. Osmokrović, R. Marić, K. Stanković, D. Ilić, M. Vujisić, Validity of the Space-Time Enlargement Law for vacuum breakdown, Vacuum Vol. 85 (2010), pp. 221-230
- [12] P. Osmokrović, G. Ilić, K. Stanković, Č. Dolićanin, M. Vujisić, Determination of Pulse Tolerable Voltage in Gas-Insulated Systems, Japanese Journal Of Applied Physics Vol. 47 (2008), pp. 8928-8934

5. Naučne metode istraživanja

Da bi se postigao postavljeni cilj rada biće potrebno izvršiti teoretska i eksperimentalna istraživanja koje će se međusobno podržavati. U okviru teoretskih razmatranja biće razvijen izraz za zavisnost dc proboja gasne smeše od ekvivalentne temperature gasa slobodnih elektrona u smeši. Poređenjem teoretski očekivanih rezultata na osnovu prethodno izvedene zavisnosti sa odgovarajućim eksperimentalnim rezultatima proveriće se sam model i indentifikovati oblast u kojoj se može očekivati optimum sinergističkog efekta u zavisnosti od parametara: procentualni sastav smeše, pritisak i međuelektrodno rastojanje. U tako identifikovanim oblastima će se vršiti dalje ispitivanje sinergističkog efekta u slučaju primene impulsnog napona. U tu svrhu će biti konstruisan merni sistem koji će omogućiti merenje veoma brzih impulsnih napona sa kombinovanom mernom nesigurnosti manjom od 3%.

6. Očekivani naučni doprinos

Očekuje se dobijanje rezultata koji bi sa makroskopskog, za inženjersku praksu interesantnog stanovišta, sugerisali oblast procentualnog sastava i pritiska smeše unutar kojeg se preporučuje zamena SF₆ izolacije SF₆/N₂ izolacijom. Dobijeni rezultati će biti protumačeni sa aspekta fizike električnog pražnjenja u gasovima, a biće ukazano i na njihove potencijalne implikacije u inženjerskoj praksi, tj. na makroskopskom nivou.

7. Plan istraživanja i struktura rada

U radu će se prvo posmatrati rezultati merenja, izvedena pod dobro kontrolisanim laboratorijskim uslovima, koji će se odnositi na zavisnost impulsnog probojnog napona od brzine porasta primenjenog impulsa uz procentualni sastav smeše kao parametra. Ova zavisnost će se posmatrati na osnovu reperezentativnog statističkog uzorka slučajne promenljive impulsnog probojnog napona i preko odgovarajućih impulsnih karakteristika. Na taj način će biti moguće odrediti vremensku konstantu moderacionog procesa. Kako se očekuje da je ova vremenska konstanta u mikrosekundnoj i submikrosekundnoj vremenskoj oblasti u svrhu ovih eksperimenata će biti konstruisan specijalni merni sistem koji će omogućiti da se odziv nanosekundnih brzih impulsa meri sa kombinovanom mernom nesigurnošću manjom od 3%. Nakon toga će biti eksperimentalno izvedene krive zavisnosti dc probojnog napona i proizvoda pd sa procentualnim sastavom smeše kao parametrom. Takođe će biti određen i faktor forme (form factor) Maksvelovog spektra slobodnih elektrona što će omogućiti poređenje dobijene zavisnosti dc probojnog napona od vrednosti proizvoda pd sa prethodno izvedenim izrazom za zavisnost vrednosti dc probojnog napona od ekvivalentne probojne temperature Maksvelovog spektra slobodnih elektrona u smeši. Tokom ovih razmatranja procentualni sastav smeše će biti parametar. Na ovaj način biće moguće odrediti moderacionu vremensku konstantu gasne smeše SF₆/N₂ i zavisnost ekvivalentne temperature Maksvelovog spektra gasa slobodnih elektrona od svih parametara eksperimenta pod uslovima strimerskog mehanizma proboja.

8. Zaključak i predlog

Mr Mirko Stojkanović, dipl. el. ing, prijavio je svoju doktorsku disertaciju pod naslovom „**Statička i dinamička sinergija izolacionih osobina gasne smeše SF₆/N₂**“ 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 Mirko Stojkanović diplomirao i magistrirao na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Na osnovu toga zaključujemo da ne postoje nikakve zakonske smetnje da prijavi doktorsku disertaciju. Kandidat ima radove koji su publikovani u časopisima sa SCI liste, na domaćim i međunarodnim stručnim konferencijama. 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 „**Statička i dinamička sinergija izolacionih osobina gasne smeše SF₆/N₂**“ omogućava da se u okviru nje ostvare značajni naučni i stručni doprinosi iz oblasti električnog pražnjenja u gasovima. Predloženi mentor, prof. dr Predrag Osmokrović, ima veliki broj naučnih radova iz oblasti kojoj pripada prijavljena doktorska disertacija kandidata Mirka Stojkanovića, 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 Mirka Stojkanovića pod naslovom „**Statička i dinamička sinergija izolacionih osobina gasne smeše SF₆/N₂**“, pod mentorstvom prof. dr Predraga Osmokrovića.

U Beogradu,
04.12.2012. godine

Komisija

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

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

dr Milorad Kurajica, van. prof.
Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu