

UTICAJ VREMENA TERMOJONIZACIJE KANALA VARNICE NA IMPULSNE KARAKTERISTIKE DVOELEKTRODNIH GASNIH ODVODNIKA PRENAPONA

INFLUENCE OF SPARK CHANNEL THERMOIONIZATION TIME ON THE IMPULSE CHARACTERISTICS OF TWO ELECTRODE GAS SURGE ARRESTERS

Dorđe Lazarević

Elektrotehnički institut Nikola Tesla,
Univerzitet u Beogradu
Srbija

Tomislav Stojić

Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
Srbija
tstojic@mas.bg.ac.rs

Predrag Osmokrović

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu
Srbija

SAŽETAK

Gasni odvodnici prenapona su jedni od najboljih i najčešće korišćenih nelinearnih elemenata za zaštitu od prenapona na niskonaponskom nivou. Impulsna karakteristika odvodnika opisuje njegovu sposobnost da previsoke napone preusmeri na zaštitno uzemljenje i tako zaštititi čuvanu opremu. U ovom radu je prikazan jednostavan poluempirijski algoritam za određivanje impulsnih karakteristika koji ne zahteva veliki broj merenja. Algoritam tretira vreme termojonizacije kanala varnice kao konstantnu veličinu. Eksperimentalno su proverene obe varijante algoritma, sa i bez uzimanja u obzir vremena termojonizacije, i dobijeni su dobri rezultati. Očekivano, uzimanje u obzir vremena termojonizacije kanala varnice je dalo tačnije rezultate, a dalje poboljšanje se može ostvariti posmatranjem vremena termojonizacije kao slučajne veličine.

Ključne riječi: gasni odvodnik prenapona, impulsna karakteristika, stohastičnost, termojonizacija

SUMMARY

Gas surge arresters are one of the best and most commonly used non-linear elements for low-voltage surge protection. The impulse characteristic of an arrester describes its ability to divert overvoltages to protective ground and thus protect the equipment under protection. This paper presents a simple semi-empirical algorithm for determining impulse characteristics that does not require a large number of measurements. The algorithm treats the thermal ionization time of the spark channel as a constant quantity. Both variants of the algorithm were tested experimentally, with and without taking into account the thermoionization time, and good results were obtained. As expected, taking into account the thermoionization time of the spark channel obtained more accurate results, and further improvement can be achieved by considering the thermoionization time as a random variable.

Key words: gas surge arrester, impulse characteristic, stochasticity, thermoionization

1. UVOD

U slučaju da je vreme porasta napona između elektroda izolovanih gasom reda veličine vremenske konstante elementarnih procesa električnog pražnjenja u gasovima, takav napon se naziva impulsnim. Sa porastom elektromagnetne kontaminacije životne sredine atmosferskim, komutacionim i ostalim nepredvidljivim tipovima električnih pojava, pojava impulsnih napona postala je značajna na svim naponskim nivoima. Pošto pojava nepredvidljivih električnih pražnjenja za posledicu ima indukciju prenapona impulsnog oblika u svim žičanim strukturama, zaštita od njih je značajna za ispravno funkcionisanje svih električnih uređaja. Ovo je od posebnog značaja na niskonaponskom nivou zbog rastućeg stepena minijaturizacije elektronskih komponenti i sklopova. To čini zaštitu od prenapona na niskonaponskom nivou (takozvanu koordinaciju izolacije na niskonaponskom nivou) važnom stručno-naučnom oblašću koju je nužno poznavati [1,2].

Koordinacija izolacije se načelno realizuje tako što se štice sistemom (bez obzira na naponski nivo) paralelno, prema uzemljenju, postavlja zaštitno kolo. Zbog ovakvog načina postavljanja zaštitnog kola ovaj sistem zaštite se naziva i paralelnim osiguračem. Jasno je da koordinacija izolacije funkcioniše na sprovođenju prenapona većeg od nominalnog napona štice sistema na uzemljenje [3].

Za zaštitu od prenapona koriste se nelinearne komponente, linearne komponente i hibridna kola [4]. Nelinearne komponente koje se koriste za zaštitu od prenapona su: zaštitne diode, varistori i gasni odvodnici prenapona. Linearne komponente koje se koriste za zaštitu od prenapona su različite vrste filtera. Hibridna kola su kombinacije linearnih i nelinearnih komponenti. Sve ove vrste komponentata se koriste za sve naponske nivoe, naravno uz odgovarajuća prilagođenja [5].

Najvažnije osobine zaštitnih kola koja se koriste su: reverzibilnost karakteristika nakon prorade, snaga koju mogu sprovesti, brzina odziva i konstantna kondicioniranost [6]. Nelinearne komponente se znatno razlikuju po navedenim karakteristikama, a linearne komponente po podnošljivom maksimalnom naponu [7]. Iz tog razloga se često pribegava korišćenju hibridnih zaštitnih kola [8].

Za koordinaciju izolacije na niskonaponskom nivou najbrži odziv i najslabiju reverzibilnost ima odvodna dioda. U poređenju sa odvodnom diodom najsporiji odziv ima gasni odvodnik prenapona koji može da provede velike snage, reverzibilnih je karakteristika i konstantnost kondicioniranosti je uglavnom obezbeđena [9]. Svim nelinearnim komponentama za zaštitu od prenapona zajednička nepoželjna osobina je stohastičnost provodnog napona [10]. Najčešće korišćena nelinearna komponenta za zaštitu od prenapona je gasni odvodnik prenapona (GFSA).

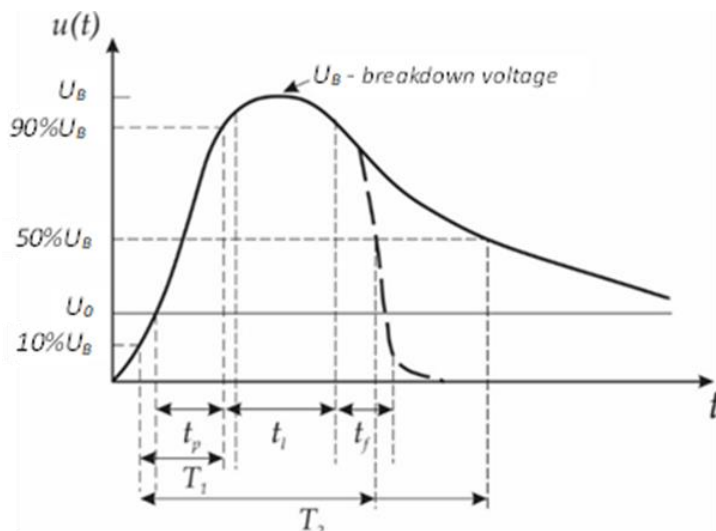
Cilj ovog rada je da se izvede semiepirijski algoritam za proračun impulsnih karakteristika u okolini Pašenovog minimuma. Poznavanje impulsnih karakteristika u okolini Pašenovog minimuma omogućava lakše projektovanje pouzdanih GFSA pošto se njihova radna tačka nalazi u toj oblasti.

2. MEHANIZAM FUNKCIONISANJA GASNOG ODVODNIKA PRENAPONA

Gasni odvodnik prenapona radi na principu impulsnog probojnog napona. GFSA predviđen za koordinaciju izolacije na niskonaponskom nivou je najčešće cilindričnog oblika (aksijalne simetrije). Osnove cilindra čine elektrode oblika Rogovskog (za izbegavanje ivičnih efekata). Međuelektrodno rastojanje je reda veličine 1mm (i manje). Izolacioni gas je, skoro uvek, plemeniti gas i to najčešće helijum (iz tog razloga se u nemačkoj literaturi GFSA nazivaju i osigurači sa plemenitim gasom). Radna tačka GFSA se postavlja u okolini minimuma Pašenove krive (Pašenova kriva je zavisnost vrednosti dc probojnog napona od proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja $p \cdot d$ (što je dobra promenljiva za električno pražnjenje u gasovima) [11]).

Da bi se razmatrala mogućnost poboljšanja karakteristika GFSA treba poći od mehanizma njegovog funkcionisanja. Kao što je rečeno, GFSA funkcioniše na principu impulsnog proboja gasa i da pri tome proboj gasa igra bitnu ulogu. Ovde treba razlikovati dc i impulsni proboj gasa. DC proboj gasa nastupa ako je vreme porasta napona između elektroda znatno duže od vremena karakterističnog za procese električnog pražnjenja u gasovima. Tada se može smatrati da u svakom trenutku u međuelektrodnom prostoru postoji više slobodnih elektrona koji mogu, na jednoj srednjoj slobodnoj dužini puta, da pokrenu lavinu koja će samoodržavajućim procesom (pozitivnom povratnom spregom) da izazove lavinski mehanizam koji se velikom brzinom završava probojem [12,13]. Vrednost dc probojnog napona je deterministička veličina (tj. njoj pridružena merna nesigurnost tip A je nula). Ako je vreme porasta napona između elektroda istog reda veličine kao i vreme karakteristično za električna pražnjenja u gasovima, tada se ne može smatrati da će se u svakom trenutku u međuelektrodnom prostoru naći slobodni elektron (tzv.

inicijalni elektron) koji može inicirati lavinski proces koji će se pozitivnom povratnom spregom okončati probojem. Dok se takav elektron ne generiše u međuelektrodnom prostoru napon između elektroda će da raste. Usled toga vrednost impulsnog probojnog napona je stohastička veličina (tj. njoj pridružena merna nesigurnost tip A nije nula) [14,15]. Na Slici 1 prikazan je karakterističan tok impulsnog napona kojim je ostvaren proboj. Oblik impulsnog napona prikazanog na Slici 1 se naziva dvostruko eksponencijalnim i lako se ostvaruje u laboratoriji (tako da odgovara impulsnim naponima koji se javljaju u prirodi) [16].



Slika 1. Karakteristični vremenski oblik impulsnog probojnog napona oblika T_1/T_2

Pošto je vrednost impulsnog probojnog napona stohastička veličina njoj se mora pridružiti određeni kvantil verovatnoće određen brojem slučajnih veličina "impulsni probojni napon" u stohastičkom uzorku koji se određuje statistički organizovanim eksperimentom. Međutim, to ne bi odgovaralo realnosti inženjerske prakse u kojoj se javljaju impulsni naponi (prenaponi) nepredvidljivog oblika. Iz tog razloga određeni kvantil verovatnoće impulsnog proboja ne predstavlja tačku, već predstavlja krivu u naponsko-vremenskoj ravni. Ta kriva se naziva impulsnom karakteristikom. Impulsna karakteristika, kao posledica fizičke pojave koju predstavlja, je glatka opadajuća kriva koja ima horizontalnu asimptotu na vrednosti dc probojnog napona [17]. Nominalni napon šticebnog elektronskog sklopa se nalazi po pravilu znatno ispod vrednosti dc probojnog napona. Optimizacija karakteristika GFSA se svodi na optimizaciju impulsnih karakteristika [18].

3. IMPULSNE KARAKTERISTIKE GASNOG ODVODNIKA PRENAPONA

Kada se govori o impulsnim karakteristikama treba imati u vidu da se tu ne radi o jednoj krivoj već da se radi o skupu krivih od kojih svaka pripada tačno određenom kvantilu verovatnoće. Impulsne karakteristike su međusobno slične pri čemu se razlika manifestuje u njihovim ordinatnim položajima. Iz tog razloga se u praksi za konkretni GFSA daju dve impulsne karakteristike ekstremno velikih (99.99%) i ekstremno malih kvantila verovatnoće (0.01%). Takve dve impulsne karakteristike ograničavaju prostor u naponsko-vremenskoj ravni unutar kojeg se, sa velikom verovatnoćom, nalaze sve vrednosti uređenog para (impulsni probojni napon, probojno vreme). Impulsne karakteristike GFSA se mogu smatrati optimalnim ako su granične impulsne karakteristike (ekstremno velikih i ekstremno malih kvantila verovatnoće) bliske i ako su im radijusi krivine (naročito pri malim vrednostima vremena) velike vrednosti. Pored toga je, možda i najvažnije, da proboj GFSA traje što je moguće kraće. Ovakve optimizovane karakteristike GFSA obezbeđuju: 1 - niže vrednosti amplitude prenapona, 2 - manje rasipanje vrednosti amplitude prenapona i 3 - manju disperiranu snagu unutar GFSA tokom proboja [19,20].

Optimizacija impulsnih karakteristika zavisi od svih parametara od kojih zavisi osnovni mehanizam funkcionisanja GFSA, tj. impulsni proboj gasa pri niskom pritisku i malom međuelektrodnom rastojanju. Ti parametri su: vrsta gasa, pritisak gasa, oblik elektroda, međuelektrodno rastojanje, materijal elektroda i način obrade aktivnih elektrodnih površina. Tražiti optimalne impulsne karakteristike u naponsko-vremenskoj ravni 99.99% kvantila i 0.01% kvantila verovatnoće proboja ireverzibilnim eksperimentalnim postupkom uz varijaciju svih pomenutih parametara koji na njih utiču je nemoguće (samo određivanje jedne impulsne karakteristike 0.01% kvantila verovatnoće uz zadovoljenje minimalno potrebnog statističkog uzorka prema t-testu zahtevalo bi 1012 reproduktivnih eksperimenata) [21-24].

Iz tog razloga je prvo neophodno formirati algoritam koji omogućava na osnovu manjeg broja eksperimenata da se odrede impulsne karakteristike GFSA sa mogućnošću određivanja reprezentativnih uzoraka slučajnih promenljivih: uređeni parovi (impulsni probojni napon, probojno vreme), statističko vreme t_p , vreme formiranja lavine t_l i vreme termojonizacije t_f . Slučajne promenljive statističko vreme, vreme formiranja lavine i vreme termojonizacije su prikazane i označene na Slici 1. Statističko vreme predstavlja vreme od trenutka u kome se impulsni napon ne izjednači sa vrednošću dc probojnog napona do pojave prvog inicijalnog elektrona.

Vreme formiranja lavine predstavlja vreme od pojave prvog inicijalnog elektrona do premošćenja međuelektrodske prostora prvim nisko provodnim strimerom. Vreme termojonizacije je vreme od premošćenja međuelektrodske prostora prvim nisko provodnim strimerom do pretvaranja (Džulovim efektom) u kanal visoko temperature plazme čijom eksplozijom se impulsni proboj okončava.

4. SEMIEMPIRIJSKI ALGORITAM ZA ODREĐIVANJE IMPULSNE KARAKTERISTIKE DVOELEKTRODNOG SISTEMA IZOLOVANOG GASOM

Statističko vreme i vreme izgradnje lavine su statističke veličine određene sudarnim procesima između slobodnih elektrona i neutralnih atoma ili molekula. Za ova dva vremena osnovno je da srednja brzina elektrona na jednoj srednjoj slobodnoj dužini puta odgovara kinetičkoj energiji koja je veća od energije jonizacije. Pošto je srednja brzina proporcionalna jačini električnog polja može se pisati [25]:

$$v = \frac{dx}{dt} = k \cdot E(x, t) \quad (1)$$

gde je v srednja brzina elektrona, x prostorna koordinata, t vremenska koordinata, E jačina električnog polja i k konstanta proporcionalnosti. Za izraz (1) se (sa puno argumenata) može pisati da je funkcija $E(x, t)$ multiplikativna funkcija dve funkcije jedne promenljive, tj.

$$E(x, t) = u(t) \cdot g(x) \quad (2)$$

Zamenom jednačine (2) u jednačinu (1) dobija se:

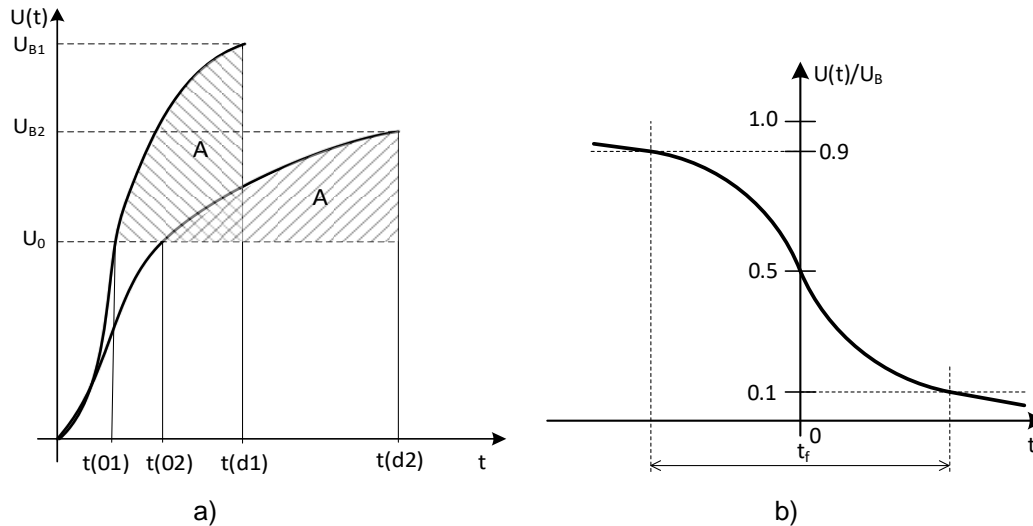
$$\frac{1}{k} \int_{t(0)}^{t(d)} \frac{dx}{g(x)} = \int_{t(0)}^{t(d)} [u(t) - U_0] dt = const. \quad (3)$$

Jednačina (3) je dobijena pod pretpostavkama da je k iste vrednosti u celom međuelektrodnom prostoru i da je formativno vreme zanemarljivo. Na osnovu jednačine (3) se dobija da je površina između krive zavisnosti impulsnog napona od vremena i krive vrednosti dc impulsnog probojnog napona konstantna za svaki kvantil verovatnoće proboja impulsnim naponom i da ne zavisi od oblika impulsnog napona [26]. Ovo omogućava da se na osnovu eksperimentalnog određivanja statističke raspodele slučajne promenljive „impulsni probojni napon“ za jedan oblik impulsa nekog sistema izolovanog gasom, može odrediti impulsna karakteristika svakog kvantila verovatnoće istog sistema izolovanog gasom za proizvoljni oblik impulsa. Na Slici 2.a prikazan je proces termalne jonizacije, koji je trenutni, tj. t_f (formativno vreme) je nula.

Prikazani algoritam daje zadovoljavajuće rezultate za slučaj brzog odvijanja proboja. Međutim, termojonizacija kanala strimera je termodinamički proces koji nije nužno kratak, a sigurno nije trenutni. Iz tog razloga je upitno da li je pretpostavka o mogućnosti zanemarivanja formativnog vremena korektna. Pored toga, ako se prihvati zanemarljivost stohastičnosti termodinamičkih pojava tokom formativnog vremena, ostaju električne pojave koje se odvijaju u realnom vremenu. Može se smatrati da su otpornost kanala strimera R_k , međuelektrodno rastojanje d i protekla količina naelektrisanja povezani izrazom [27]:

$$R_k = \frac{K_T \cdot d}{\int_0^t i(t) dt} \quad (4)$$

gde je K_T takozvana Toplerova konstanta, a $i(t)$ struja koja protiče kroz kanal strimera.



Slika 2.a Impulsni napon sa kojim je ostvaren proboj (formativno vreme nije uzeto u obzir) i Slika 2.b . Promene napona tokom termojonizacije (formativno vreme)

Pretpostavljajući da se posmatrani elektrodni sistem može smatrati idealnim kondenzatorom dobija se da je promena napona na elektrodama kondenzatora u vremenu određena jednačinom:

$$u(t) = \frac{U_B}{1 + \exp\left(\frac{U(t)}{d \cdot K_T}\right)} \quad (5)$$

Trenutak $t=0$ je trenutak u kome je proteklo pola formativnog vremena. Ako se formativno vreme definiše kao period za koji se napon između elektroda promeni od 90% do 10% amplitude, Slika 2.b, na osnovu jednačina (4) i (5) se dobija:

$$t_f = 4.4 \frac{d \cdot K_T}{U_B} \quad (6)$$

Da bi se ostvario cilj ovoga rada treba eksperimentalno i analitički odrediti da li se formativno vreme deterministički određeno jednačinom (6) može opravdano zanemariti prilikom određivanja impulsne karakteristike na osnovi zakona o konstantnosti površine u naponsko vremenskoj ravni, jednačina (3) i Slika 2.a.

5. EKSPERIMENT

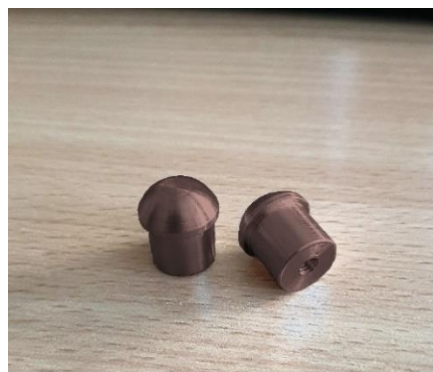
Tokom eksperimenta korišćen je model gasnog odvodnika prenapona prikazan na Slici 3.a. Elektrodni sistem u komori sa Slike 3.a, sastojao se od dve osno-simetrične elektrode oblika Rogovskog, Slika 3.b. Profil elektroda oblika Rogovskog je određivan u zavisnosti od međuelektrodnog rastojanja. U tu svrhu je korišćen proračun električnog polja metodom simulacije naelektrisanja. Međuelektroдно rastojanje se tokom eksperimenta menjalo od 0.1mm do 1mm. Vrednost nultog međuelektrodnog rastojanja je određivana merenjem međuelektrodnog otpora. Međuelektroдно rastojanje određivano je elektronskim mikrometrom. Za punjenje komore gasom (He) korišćen je univerzalni gasni krug, Slika 4.

Pre podešavanja radnog pritiska u komori vršeno je višestruko vakuumiranje komore uz punjenje komore radnim gasom He. Nakon takvog „ispiranja komore“ ona je punjena na radnu vrednost pritiska, svedenu na vrednost pri 0°C. Vrednost pritiska u komori se menjala od 10⁻³ mbar do 1 bar (svedeno na vrednost pri 0°C). Zaptivanje komore je bilo izuzetno dobro (obebeđena je konstantnost pritiska u trajanju od minimum 48 sati). Određivanje vrednosti dc probojnog napona vršeno je jednosmernim izvorom sa brzinom porasta napona od 8V/s. Za jednu vrednost probojnog napona mereno je 20 uzastopnih vrednosti dc probojnog napona. Između dva uzastopna proboja pravljena je pauza od 1 minuta. Određivanje vrednosti impulsnog probojnog napona vršeno je jednostepenim Marksovim generatorom promenljive otpornosti (što je

omogućavalo promenu oblika impulsa). Impulsni proboji su se uvek odvijali na prednjoj ivici impulsa (što je obezbeđivano velikom vrednošću amplitude). Nagib prednje ivice impulsnog napona se mogao menjati od $1 \text{ KV}/\mu\text{s}$ do $1000 \text{ KV}/\mu\text{s}$. Za jednu vrednost impulsnog probojnog napona mereno je 100 uzastopnih vrednosti impulsnog probojnog napona jednim oblikom impulsa. Između dva uzastopna proboja pravljena je pauza od 1 minuta. Pored 100 merenja vrednosti impulsnog probojnog napona (koje je vršeno impulsima nagiba $1 \text{ KV}/\mu\text{s}$), vršeno je po 1000 merenja vrednosti impulsnog probojnog napona svim raspoloživim oblicima impulsa.

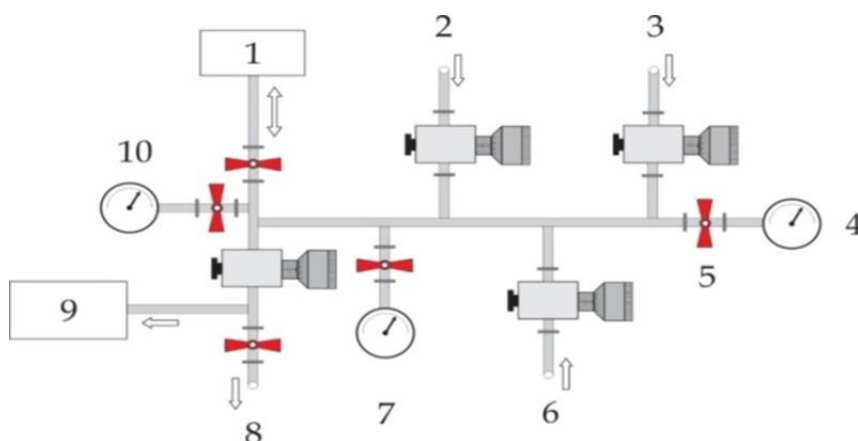


a)



b)

Slika 3.a. Fotografija gasne komore korišćene kao model gasnog odvodnika prenapona i Slika 3.b. Fotografija elektroda oblika Rogovskog.

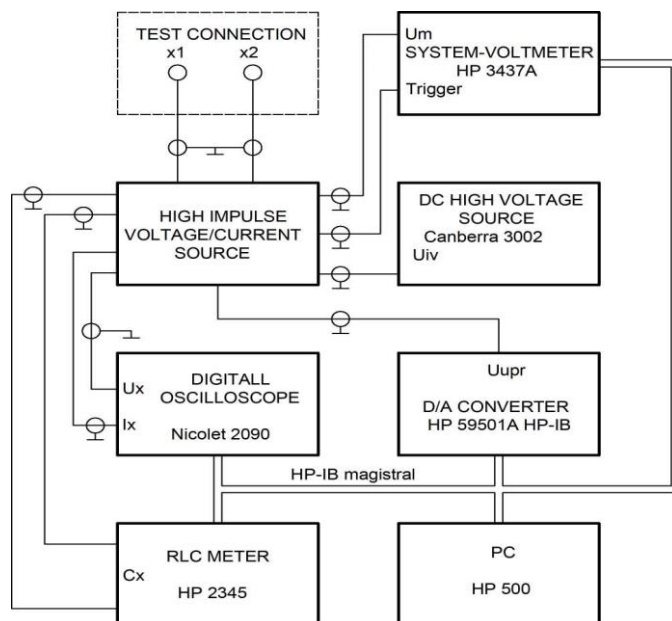


Slika 4. Šema gasnog kola; 1 - komora, 2 - He gas, 3 - plemeniti gas, 4 – vakumetar, 5 - dvopoložajni ventil, 6 - vazduh, 7 - manometar, 8 - ozračivanje, 9 - vakuumaska pumpa, 10 - precizni vakumetar

Tokom merenja merni instrumenti su se nalazili u mernoj kabini zaštite veće od 100dB. Merna kabina nije imala galvansku vezu sa mernim mestom. Merenje vrednosti dc probojnog napona je vršeno omskim deliteljem napona i visoko preciznim voltmetrom. Merenje vrednosti impulsnog probojnog napona vršeno je kompenzovanim kapacitivnim razdelnikom i 100 GHz digitalnim osciloskopom. Postupak merenja i akvizicija eksperimentalno dobijenih rezultata bili su potpuno automatizovani. Na Slici 5 prikazana je blok šema korišćenog mernog sistema.

Dobijeni eksperimentalni rezultati su obrađivani na sledeći način: 1 - određivana je srednja vrednost dc probojnog napona na osnovu statističkog uzorka od 20 uzastopnih slučajnih promenljivih „vrednost dc probojni napon“ (statističko odstupanje je bilo najčešće nula); 2 - određivanje statističke raspodele slučajne promenljive „impulsni probojni napon“ (u svim slučajevima najbolji rezultat je dobijen primenom dvoparametarske Weibull-ove raspodele); 3 - primenom algoritma za određivanje impulsnih karakteristika određivane su impulsne karakteristike kvantila verovatnoće 0.1% i 99.9%; 4 – primenon izraza (6) određivano je formativno vreme; 5 – prethodno određene impulsne karakteristike korigovane su uzimanjem u obzir formativnog vremena; 6 – na isti naponsko-vremenski dijagram ucrtane su impulsne karakteristike

0.1% i 99.9% kvantila verovatnoće nekorigovane i korigovane sa vrednošću formativnog vremena zajedno sa vrednostima impulsnog probojnog napona dobijenog svim raspoloživim oblicima impulsa.

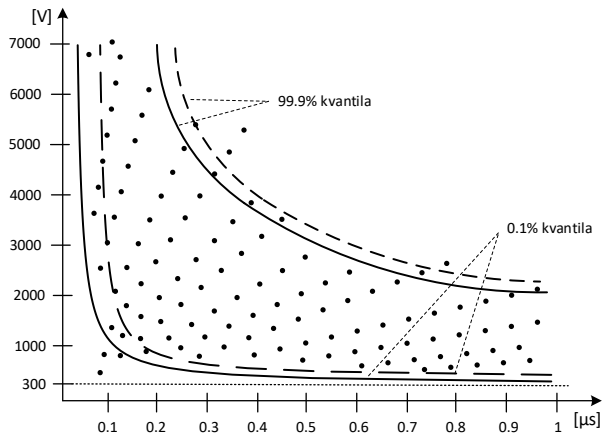


Slika 5. Blok šema korišćenog mernog sistema

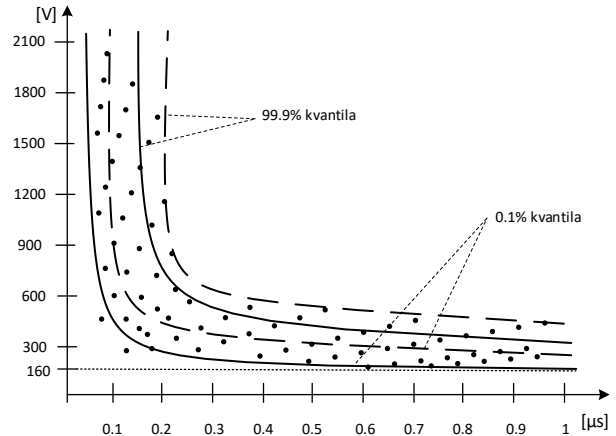
6. REZULTATI I DISKUSIJA

Eksperimenti su vršeni sa gasom Helijumom u karakterističnim tačkama u blizini Pašenovog minimuma. Korišćen je impulсни napon nagiba $1\text{KV}/\mu\text{s}$, ali za neka dodatna ispitivanja su korišćeni i drugi naponski oblici. Te karakteristične tačke su bile na Pašenovoj krivoj: (0.3 mbarmm, 300V), (0.4 mbarmm, 160V), (0.8 mbarmm, 165V) i (1 mbarmm, 180V). Prve dve od ovih tačaka se nalaze sa leve strane Pašenovog minimuma, a druge dve sa desne strane Pašenovog minimuma. Karakterističnost ovih tačaka je u tome što se u njima proboj Helijuma odvija različitim mehanizmima. U tački (0.3 mbarmm, 300V) proboj se odvija vakuumskim lavinskim mehanizmom. U tački (0.4 mbarmm, 160V) proboj se odvija anomalnim Pašenovim mehanizmom. U tački (0.8 mbarmm, 165V) proboj se odvija Tausendovim mehanizmom. U tački (1 mbarmm, 180V) proboj se odvija strimerskim mehanizmom. Vakuumski lavinski mehanizam se inicira u gasnim slojevima absorbovanim za elektrodne površine, a samoodržava se procesima aktivnim na elektrodama, električnim pražnjenjem u smesi gasa i pare istopljenog elektrodsog materijala. Vakuumski lavinski mehanizam spada u vakuumske mehanizme proboja. Anomalni Pašenov efekat se pretežno odvija dužim linijama električnog polja, čija dužina pomnožena sa pritiskom odgovara vrednosti u Pašenovom minimumu. Anomalni Pašenov mehanizam proboja je gasni mehanizam i u oblasti u kojoj se proboj odvija ovim mehanizmom povoljno je postaviti radnu tačku GFSA iz razloga stabilnosti. Tausendov mehanizam proboja se inicira u gasu, a samoodržava se procesima, aktivnim na elektrodama. Tausendov mehanizam proboja spada u gasne mehanizme proboja. Strimerski mehanizam se inicira i samoodržava procesima u gasu i spada u gasne mehanizme proboja [28]. Ispitivanje primenljivosti algoritma za proračun impulsne karakteristike i potreba uzimanja u obzir formativnog vremena za različite mehanizme proboja je važno pošto se različiti mehanizmi proboja odvijaju u različitim realnim vremenima [29].

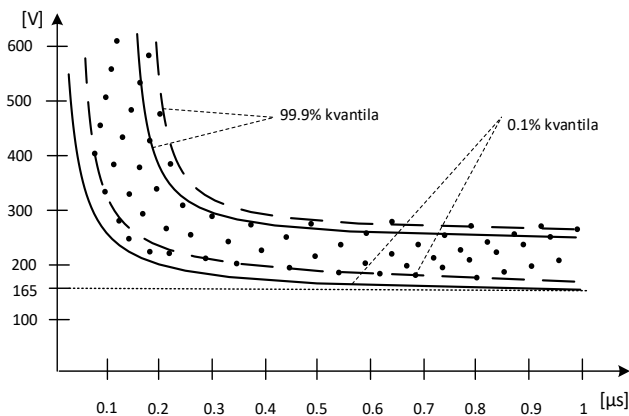
Na Slikama 6.a-d prikazane su impulsne karakteristike određene predloženim algoritmom sa i bez uzimanja u obzir formativnog vremena, u navedenim tačkama sa vrednostima proizvoda pritiska i međuelektrodsog rastojanja. Pored impulsnih karakteristika u istim tačkama su nanese i karakteristične tačke (vrednost impulsnog probojnog napona, probojno vreme) dobijene drugim oblicima impulsnog napona.



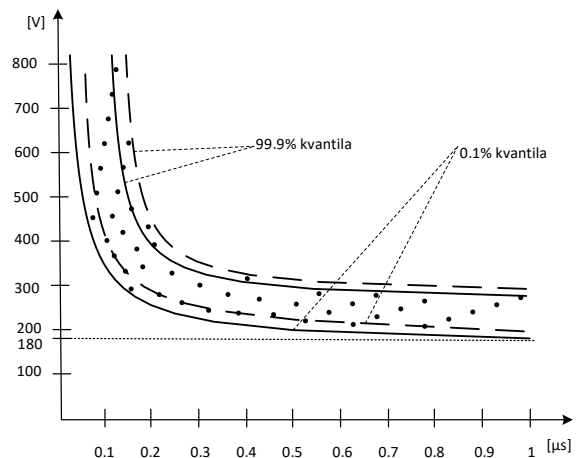
Slika 6.a tačka (0.3 mbarmm, 300V)



Slika 6.b tačka (0.4 mbarmm, 160V)



Slika 6.c tačka (0.8 mbarmm, 165V)



Slika 6.d tačka (1 mbarmm, 180V)

Slika 6 a-d. Impulsne karakteristike 0.1% i 99.9% kvantila verovatnoće za navedene tačke Pašenove krive određene predloženim algoritmom na osnovu statističkog uzorka slučajne promenljive (impulsni probojni napon, probojno vreme) dobijene impulsima oblika $1KV/\mu s$; — bez uzimanja u obzir formativnog vremena; - - - sa uzimanjem u obzir formativnog vremena; • tačke u kojima je došlo do probijanja impulsnim naponima drugog oblika.

Na osnovu slika 6.a-d. jasno je da, u ovome radu predloženi algoritam, daje zadovoljavajuće rezultate u oblasti malih vrednosti proizvoda pritiska i međuelektrodnog rastojanja. Impulsne karakteristike 0.1% i 99.9% kvantila verovatnoće kod kojih nije uzeto u obzir formativno vreme daju dobre rezultate za inženjersku praksu, tj. dizajniranje GFSA. Impulsne karakteristike, istih kvantila verovatnoće, dobijene uz uzimanje u obzir formativnog vremena imaju poboljšanu sveobuhvatnost. Naime impulsne karakteristike dobijene predloženim algoritmom ne obuhvataju tačke (impulsni probojni napon, probojno vreme) u blizini impulsne karakteristike 99.9% kvantila verovatnoće. To jest, oko 1% eksperimentalnih tačaka dobijenih drugim oblicima impulsa nalaze se iznad impulsne karakteristike 99.9% kvantila verovatnoće. Ta pojava je izražena pri većim brzinama impulsa. Ovaj rezultat je posledica ustanovljene činjenice da pri brzim impulsima slučajna promenljiva „impulsni probojni napon“ nije pripadala Weibull-ovoj raspodeli nego troparametarskoj normalnoj raspodeli (brza promena napona ne dozvoljava da se proboj generiše na najslabijem mestu izolacije, već se inicira na proizvoljnom mestu izolacije). Usled toga se određeni broj tačaka (impulsni probojni napon, probojno vreme) nalazi iznad karakteristike 99.9% kvantila verovatnoće. Rezultati pokazuju da se ova pojava kompenzuje uzimanjem u obzir formativnog vremena izračunatog na način prikazan u ovom radu. To ima značaja pri koordinaciji izolacije na niskonaponskom nivou, pošto pri izradi savremenih elektronskih komponenti ne dolazi u obzir predimenzionisanje izolacije (što je na srednjenaponskom i visokonaponskom nivou moguće).

7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan algoritam koji omogućava proračun impulsne karakteristike proizvoljnog kvantila verovatnoće nezavisno od oblika primenjenog impulsnog napona. Algoritam omogućava dobijanje željenih impulsnih karakteristika uz uzimanje u obzir formativnog vremena i bez uzimanja u obzir formativnog vremena. Teoretski izvedeni algoritam je eksperimentalno proveren u blizini Pašenovog minimuma i dobijeni su jako dobri rezultati. Dobijeni rezultati su od interesa za dizajn gasnih odvodnika prenapona (GFSA) za koordinaciju izolacije na niskonaponskom nivou. Iz tog razloga su u radu prikazani rezultati dobijeni sa dvoelektrodnim sistemima homogenog električnog polja izolovanog gasom Helijumom.

Međutim, na istom eksperimentalnom sistemu je eksperimentisano i sa drugim gasovima i sa nehomogenim električnim poljima. I tako urađeni eksperimenti, kao i eksperimenti pri višim pritiscima (desno od Pašenovog minimuma) su davali dobro slaganje sa proračunatim impulsnim karakteristikama uz posebno uzimanje u obzir formativnog vremena. Neke razlike između teoretski određenih impulsnih karakteristika i eksperimentalnih rezultata, koje su uočene, posledica su, verovatno, uvođenja formativnog vremena u model algoritma kao determinističke veličine. U tom pogledu je potrebno doraditi predloženi algoritam pošto formativno vreme je sigurno stohastičke prirode. Stohastička priroda formativnog vremena ne bi trebalo da pripada raspodeli ekstremnih vrednosti kao što je Weibull-ova raspodela, već nekoj simetričnoj raspodeli pošto potiče od termodinamičkih procesa.

U svakom slučaju, treba napraviti napor za uzimanje u obzir stohastičnosti slučajne veličine formativno vreme i ugraditi je u algoritam za proračun impulsnih karakteristika. To bi svakako popravilo algoritam koji i bez te korekcije daje rezultate koji su potpuno zadovoljavajući sa aspekta inženjerske prakse. Treba napomenuti i to da prikazani algoritam ne daje zadovoljavajuće rezultate u oblastima udaljenim od Pašenovog minimuma u levu stranu. Naime, u tačkama levo od Pašenovog minimuma nakon lavinskog mehanizma proboja dolazi do izražaja čist vakuumski mehanizam proboja i tu važe zakonitosti koje nisu (i ne mogu biti) kompatibilne sa predloženim algoritmom.

LITERATURA

- [1] R.B. Standler, „Protection of Electronic Circuits from Overvoltages,” Dover Publications, 2002.
- [2] M. Beyer, W. Boeck, “Hochspannungstechnik,” Theoretische und Praktische Grundlagen, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [3] P. Osmokrović, B. Lončar, S. Stanković, „Investigation of the optimal method for improvement of the protective characteristics of gas-filled surge arresters - With/without the built-in radioactive sources,” IEEE Transactions on Plasma Science, 30 (2002), (5 I), pp. 1876-1880.
- [4] M. Vujisić, P. Osmokrović, K. Stanković, B. Lončar, “Influence of working conditions on over-voltage diode operation,” Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 9 (2007), (12), pp. 3881-3884.
- [5] T. M. Nedic, et al.: Influence of radiation on the stability of electrical filters characteristics as components for overvoltage protection, Nucl. Technol. Radiat., Vol. 37, (2022), No. 2, pp. 111-118.
- [6] I A. Metwally, “Computation of Transient Overvoltages in Low-Voltage Installations During Direct Strikes to Different Lightning Protection Systems,” IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 49 (2007), (3), pp. 602-613.
- [7] P. Osmokrović, B. Lončar, R. Šašić, “Influence of the electrode parameters on pulse shape characteristic of gas-filled surge arresters at small pressure and inter-electrode gap values,” IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (2005), (5 II), pp. 1729-1735.
- [8] N. M. Kartalovic, et al.: Influence of the synergy of neutron and gamma radiation and functional aging on the efficiency of a hybrid protection circuit, Nucl. Technol. Radiat., Vol.37, (2022), No. 3, pp. 201-206.
- [9] K.D. Stanković, L. Perazić, “Determination of gas-filled surge arresters lifetime,” IEEE Transactions on Plasma Science, 47 (2019) , (1), art. no. 8515076, pp. 935-943.
- [10] P. Osmokrović, I. Krivokapić, S. Krstić, “Mechanism Of Electrical Breakdown Left Of Paschen Minimum,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1 (1994), (1), pp. 77-81.
- [11] P. Osmokrović, “Electrical breakdown of SF6 at small values of the product pd,” IEEE Transactions on Power Delivery, 4 (1989), (4), pp. 2095-2099.

- [12] N. Kartalović, T. Stojić, D. Brajović, P. Osmokrović: „The determination of the mean value of the non-homogenous background radiation and the measurement uncertainty using Welch-Satterthwaite equation“, *Nucl. Technol. Radiat.*, Vol. 32, (2017), No. 4, pp. 371-374.
- [13] K. Stanković, M. Alimpijević, “Free-Electron Gas Spectrum Uniqueness in the Mixture of Noble Gases,” *Contributions to Plasma Physics*, 56 (2016), (2), pp. 126-133.
- [14] Y.P. Raizer, “Gas Discharge Physics,” Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 1991.
- [15] K. Stanković, et al., Statistical Analysis of the Characteristics of the Some Basic Mass-Produced Passive Electrical Circuits Used in Measurements, *Measurement*, 44 (2011), 9, pp. 1713-1.
- [16] I.A. Metwally, F.H. Heidler, “Lightning transients in low-voltage installations inside different types of class II lightning protection systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24 (2009), (2), pp. 930-938.
- [17] P. Osmokrović, M. Vujisić, K. Stanković, A. Vasić, B. Lončar, “Mechanism of electrical breakdown of gases for pressures from 10⁻⁹ to 1 bar and inter-electrode gaps from 0.1 to 0.5 mm,” *Plasma Sources Science and Technology*, 16 (2007), (3), art. no. 025, pp. 643-655.
- [18] P. Osmokrović, B. Lončar, S. Stanković, “The new method of determining characteristics of elements for overvoltage protection of low-voltage system,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 55 (2006), (1), pp. 257-265.
- [19] I.A. Metwally, F.H. Heidler, “Reduction of lightning-induced magnetic fields and voltages inside struck double-layer grid-like shields,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 50 (2008), (4), pp. 905-912.
- [20] Č.I. Belić, K.D. Stanković, M.M. Pejović, P.V. Osmokrović, “The influence of the magnetic field on DC and the impulse breakdown of noble gases,” *Materials*, 12 (2019), (5), art. no. 752.
- [21] B. Vulević, P. Osmokrović, “Evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields,” *Radiation Protection Dosimetry*, 141 (2010), (2), art. no. ncq158, pp. 173-177.
- [22] P. Osmokrović, I. Krivokapić, D. Matijašević, N. Kartalović, “Stability of the gas filled surge arresters characteristics under service conditions,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (1996), (1), pp. 260-266.
- [23] C. Howard, “New avalanche diode for transient protection“ *Electronic Product Design*, 1983.
- [24] M. Vujisić, et al., A Statistical Analysis of Measurement Results Obtained from Nonlinear Physical Laws, *Applied Mathematical Modeling*, 35 (2011), 7, pp. 3128-3135.
- [25] M. Pejović, K. Stanković, I. Fetahović, M. Pejović, “Processes in insulating gas induced by electrical breakdown responsible for commercial gas-filled surge arresters delay response,” *Vacuum*, 137 (2017), pp. 85-91.
- [26] P. Osmokrović, T. Ivić, B. Lončar, A. Vasić, “The validity of the general similarity law for electrical breakdown of gases,” *Plasma Sources Science and Technology*, 15 (2006), (4), art. no. 015, pp. 703-713.
- [27] P. Osmokrović, et al., Influence of GIS Parameters on the Topley Constant, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 27 (1992), 2, pp. 214-220.
- [28] P. Osmokrović, R. Marić, K. Stanković, D. Ilić, M. Vujisić, Validity of the Space-Time Enlargement Law for vacuum breakdown, *Vacuum*, 85 (2010) (2), pp. 221 – 230.
- [29] P. Osmokrović, I. Krivokapić, D. Matijašević, N. Kartalović, “Stability of the gas filled surge arresters characteristics under service conditions,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11 (1996) (1), pp. 260-266.