Numeri ko modelovanje parametara parcijalnih pražnjenja

NENAD M. KARTALOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd
KOVILJKA STANKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd
BORIS B. LONČAR, Univerzitet u Beogradu,
Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 621.315.61.015.5
DOI: 10.5937/tehnika1603423K

U novije vreme ispitivanje parcijalnih pražnjenja odnosno korišćenje za dijagnostiku stanja visokonaponske izolacije generatora, transformatora, kablova i visokonaponske opreme ubrzano se razvija. Sa jedne strane tome doprinosi razvoj akvizicione elektronike, a sa druge strane razvoj saznanja o procesima parcijalnih pražnjenja. Oblast merenja parcijalnih pražnjenja nije standardizovana u meri kao neke druge klasične dijagnostičke metode zbog dinamike razvoja i raznovrsnosti pristupa problemu. Cilj ovog rada je da doprinese boljem razumevanju fenomena parcijalnih pražnjenja preko razmatranja relevantnih fizičkih procesa u izolacionim materijalima i izolacionim sistemima. Razmatrani su određeni pretprobajni procesi, kao i procesi razvoja lokalnog pražnjenja i njihov uticaj na određeni izolacioni materijal. Takav pristup fenomenu parcijalnih pražnjenja treba da omogući i bolje sagledavanje relevantnih parametara pražnjenja odnosno bolji numerički model parcijalnih pražnjenja.

Ključne reči: parcijalna pražnjenja, pretprobajni procesi, proboj, model parcijalnih pražnjenja

1. UVOD

Parcijalna pražnjenja podrazumevaju lokalna pražnjenja u dielektriku koja samo delimično premošćuju izolaciju (delimično ni proboj izolacije). Radi se o iskrenju unutar defekata u izolaciji koji su ispunjeni vazduhom ili gasovima nastalim u elektrohemijskim procesima.

Defekti odnosno nedostaci izolacionog sistema su po svojim elektromehaničkim karakteristikama vrlo raznovrsni i nastaju kako kod novog izolacionog sistema, tako i tokom njegovog starenja. U osnovi su to šupljine ispunjene vazduhom ili nekim drugim gasom u kojima dolazi do pojave kritičnog električnog polja. Takođe, do pojave kritičnog električnog polja (obično na tangencijalnog) može doći i na površini izolacije.

Razumevanje pražnjenja u defektima počinje na razumevanju elementarnih procesa u gasu, kako pretprobajnih i probajnih, tako i pratećih efekata interakcije pražnjenja sa materijalom. Pod električnim probajem gasova podrazumeva se pojava naglog povećanja

nja provodnosti u prostoru između elektroda, uzrokovano pojavom visoke koncentracije nosilaca naelektrisanja. Dinamika procesa probaja zavisi od procesa generisanja elektrona, negativnih i pozitivnih jona i njihovog drifta što zavisi od karakteristika i stanja gasa i preuzimanja energije električnog polja. Probaju prethode elementarni procesi koji dovode do pojave inicijalnog elektrona pražnjenja.

Karakteristike nastalih impulsa parcijalnih pražnjenja odražavaju uslove lokalnog pražnjenja odnosno stanje izolacije. Informacija o stanju izolacije se dostiže do mernih priključaka i ekstrakcija potrebne informacije može da bude dosta komplikovana. Stoga posebnu pažnju treba posvetiti analizi složenih rezultata merenja parcijalnih pražnjenja. Najčešće se dijagnostička saznanja zasnivaju na laboratorijskim istraživanjima i eksploatacionim iskustvima. U laboratoriji mogu da se simuliraju pojedini dobro definisani karakteristični uslovi pražnjenja koji se ne sreću na objektima ispitivanja što omogućava izučavanje uticaja pojedinih definisanih parametara [1]. Značajno je naglasiti da se i u ispitivanjima pod jednim uslovima nedovoljno kritički prenose na ispitivanja pod drugim uslovima, pri čemu se pojavljuju značajne greške u interpretaciji rezultata. Najčešće se zanemaruju osobine izolacionih materijala, odnosno efekti pražnjenja, značaj gabarita objekta ili uzoraka, odnosi pojedinih

Adresa autora: Nenad Kartalović, Univerzitet u Beogradu, Institut "Nikola Tesla", Beograd, Koste Glavniča 8a

Rad primljen: 20.04.2016.

Rad prihvaćen: 26.05.2016.

kapacitivnosti i impedansi, uticaj tranzijentnih pojava itd..

Rad prvenstveno tretira jedan od standardnih modela parcijalnih pražnjenja, odnosno karakteristi na naelektrisanja kod modela. U literaturi [1-4] se mogu naći i različite relacije koje povezuju posmatrana naelektrisanja. U ovom radu je data analiza granica tih odnosa, iz koje se vidi da je on daleko složeniji od uobičajene predstave raspodele naelektrisanja u kondenzatorima.

2. FIZIČKI PROCESI KOD PARCIJALNIH PRAŽNJEŃA

2.1. Elementarni procesi u gasu

Elementarni procesi u gasu podrazumevaju procese koji se odigravaju na atomskom i molekularnom nivou i opisuju se kvantno mehanički i statistički. Ovi procesi su uslovljeni unutrašnjom energijom samog gasa i energijom koja se dovodi spolja u gasno elektrodni sistem preko električnog polja. Dati procesi se mogu podeliti na zapreminske i površinske, slika 1. Zapreminski pretprobajni elementarni procesi u gasu su procesi koji se odvijaju u samom gasu bez neposrednog uticaja elektroda.

- **Kretanje nosilaca naelektrisanja.** Nosioци naelektrisanja koji se nalaze u gasu biće usled delovanja električnog polja ubrzavani i njihovo haotično termalno kretanje dobija karakter driftovskog kretanja. Pored toga postoji i rezultatno difuziono kretanje zbog gradijenta gustine nosilaca naelektrisanja.

Slika 1 - Stvaranje jona i elektrona. (A^M - metastabilno stanje atoma, A - molekuli gasa, A^+ , A^- - joni gasa, e - elektron, $h\nu$ - foton). Zapreminski procesi: Z1-sudar atoma, pobuđeni atomi, metastabilni atomi, Z2-sudar elektrona i atoma (umnožavanje elektrona), Z3-fotojonizacija, Z4-pripajanje elektrona. Površinski procesi: P1-izbijanje elektrona udarom jona ili atoma u pobuđeni stanje u katodu, P2-termoemisija i emisija elektrona poljem, P3-fotoemisija elektrona sa katode

- **Eksitacija i jonizacija.** Eksitacija i jonizacija atoma i molekula je proces kod koga pri sudaru atoma

ili molekula sa nekom drugom česticom (atomom, pobuđenim atomom, elektronom, fotonom, pripajanjem elektrona) dolazi do prelaza kinetičke energije sudara u energije pobuđenih elektronskih ili molekularnih kvantnih energetske nivoa ili jonizacije.

Proces zavisi od energija, impulsa i verovatnoće (koja se izražava efikasnim presekom). Proces interakcije su brojni [5]:

gde su A , A^* i A^+ , i nepobuđeni, pobuđeni odnosno jonizovani atom, uz pojavu slobodnih elektrona e i fotona $h\nu$. Srednji život stanja pobuđenog atoma je reda 10^{-8} s osim ako nisu pobuđena metastabilna stanja, koje je vreme života reda 10^{-5} s. Proces sa metastabilnim stanjima A^M nekada mogu biti vrlo značajni kao izvor jona i elektrona:

Efikasni preseki i verovatnoće reakcija izražavaju određenu verovatnoću u dogledu pod određenim uslovima, što se opisuje efikasnim presekom reakcije σ koji je funkcija brzine odnosno kinetičke energije W_e , slika 2.

Slika 2 - Efikasni presek za elektron-molekul sudarne procese kod sumpor heksa fluorida (SF_6) kao funkcija energije elektrona W_e ; 1-elastično rasipanje (prenos impulsa), 2-eksitacija (pobuda vibracionih nivoa), 3-elektronska eksitacija, 4-jonizacija, (5,8)-vezivanje elektrona (SF_6^- , SF_5^- , F^- , SF_4^-).

Površinski pretprobajni elementarni procesi su procesi interakcije gasa i površine elektrode.

- **Sudarna emisija kroz pozitivne jone i pobuđene atome.** U električnom polju dolazi do drifta pozitivnih jona. Oni mogu pri sudaru sa zidom da budu

neutralisani, pri čemu se oslobađa elektron, pod uslovom da je suma kinetičke i potencijalne energije (jonizaciona energija) dostigla najmanje dvostruku vrednost izlaznog rada. Tako je mnogo brojni pobudni nivoi molekula gasa nalaze se iznad nivoa izlaznog rada elektrona. To znači da metastabilni molekuli gasa mogu, kroz predaju svoje potencijalne energije, da izbiju elektron sa katode.

Površinski pretoprobni elementarni procesi su procesi interakcije gasa i površine elektrode.

- *Termoemisija i emisija poljem.* Da bi slobodni elektron napustio katodu, potrebnu količinu energije (reda $3\text{eV} - 5\text{eV}$) može dobiti od termalnih kretanja u rešetki ili od električnog polja:

$$j_s = C_1 T^2 e^{-\frac{C_2 - C_3 E^{1/2}}{T}} \quad (3)$$

gde su: C_1, C_2, C_3 - karakteristične konstante, T - apsolutna temperatura katode.

Smanjenje izlaznog rada događa se prvenstveno na metalnim ili dielektričnim mestima površine (hrapavost - mikrošiljci, ne isto je), gde je inače polje dostiže velika povećanja u odnosu na srednju vrednost.

Tako je, apsorpcijom molekula gasa mogu da nastanu električni dvojni slojevi sa dipolnim karakterom koji na osnovu orijentacije dipola smanjuju ili povećavaju izlazni rad.

Moguće smanjenje izlaznog rada izaziva i tanak oksidni sloj ($<100\text{ nm}$) na kojem se nalaze pozitivni joni.

- *Foto emisija.* Fotoni energije $h\nu$ veće od izlaznog rada W_A ($h\nu > W_A$) tako je mogu da izbiju elektron sa katode [5].
- *Stvaranje inicijalnog elektrona.* Proces progresivnog generisanja naelektrisanja koji završava probijem počinje sa stvaranjem inicijalnog elektrona od nekog od prisutnih elektrona u gasu. Prema [5] stacionarna jonsko-elektronska koncentracija u vazduhu u normalnim uslovima je oko $n_i^+ \approx n_i^- \approx 2500\text{ cm}^{-3}$. Ako se ima u vidu veličina šupljine ($<1\text{ mm}^2$) može se zaključiti da relativno često nema slobodnih elektrona u njoj. Ako se tome doda da samo jedan od velikog broja slobodnih elektrona postaje inicijalni, može se zaključiti da probij u šupljini mora da kasni nakon ispunjenja uslova probija. Ukoliko se nastali slobodni elektroni nalaze na povoljnom mestu, tako da mogu da primaju dovoljno energije za jonizaciju od električnog polja i da imaju dovoljnu putanju drifta za razvoj lavine, mogu postati inicijalni

elektroni koji izazivaju inicijalnu lavinu odnosno probij gasa.

2.2. Probijni procesi u gasu

Procesi probija gasa u zavisnosti od parametra pd (proizvod pritiska p i me.uelektrodnog rastojanja d) mogu se predstaviti pomoću tri modela: 1) Taunzendov, 2) strimerski i 3) vakuumski. Dominacija nekog od ovih modela određena je koncentracijom gasa u me.uelektrodnom prostoru i odnosom me.uelektrodnog rastojanja d prema srednjoj dužini puta elektrona λ [5].

Taunzendov mehanizam probija. Probij gasa nastaje kada su uslovi takvi da je u umnožavanju naelektrisanja najzastupljeniji lavinski mehanizam, u više ciklusa (generacija), koji se uopšte ne opisuje lavinskim koeficijentom α , i udarna emisija elektrona sa katode koja se opisuje koeficijentom γ .

Strimerski mehanizam probija. Razdvajanje naelektrisanja u zoni inicijalne lavine prouzrokuje pojavu jakog lokalnog električnog polja. Velika gustina elektrona u lavinskom frontu kao i pozitivnih jona u lavinskom repu menja i izoblićava električno polje pre i iza lavine. Tako se mogu pojaviti područja prekoračenja jačine polja potrebne za iniciranje novih lavina. Na taj način nastaju kanali pražnjenja (strimeri), sa velikom brzinom kretanja ka anodi i katodi [6]. Zbog relativno velike specifične otpornosti kanala strimera dolazi do njegovog pregrevanja. Džulovim efektom što dovodi do termojonizacije koja ispunji strimerski kanal visokoprovodnom plazmom nakon čega prestaje električni probij.

Vakuumski mehanizam probija je vrlo složen i raznovrstan u svojoj inicijaciji (predprobijnim procesima) [6, 7]. Probij nastaje kada se predprobijnim procesima, u me.uelektrodnom prostoru, stvori dovoljno gasova i metalnih para koje mogu da podrže intenzivnu jonizaciju koja na kraju dovodi do stvaranja provodnog kanala između elektroda.

Karakteristična vremena probija. U novije vreme se koriste visokonaponski impulsi za analizu parcijalnih pražnjenja, pogotovu kod ispitivanja kablova. Impulsni probij se značajno razlikuje od statičnog odnosno kvazi statičnog probija. Impulsni probij je probij kod koga su karakteristična vremena impulsa (reda $1\mu\text{s}$) merljiva sa karakterističnim vremenima procesa probija, koja su reda od 10 ns do 100 ns i jako zavise od uslova pražnjenja. Vreme kašnjenja probija t_r se računa od početka premašivanja statičnog napona od strane primenjenog impulsnog napona, pa do početka probija. Vreme izgradnje varnice t_f je vreme pada razlike potencijala u me.uelektrodnom prostoru. Između elektroda dolazi (termojonizacijom kao posled-

dicom Džulovog efekta) do formiranja visokoprovodnog kanala plazme. Po pravilu, vreme izgradnje varnice je za red veličine kraće od ostalih karakterističnih vremena.

Osnovni parametri varnice proboja. Empirijskim istraživanjima je ustanovljena zavisnost otpornosti kanala varnice od dužine kanala d i protekle količine naelektrisanja q odnosno vremena formiranja varnice t_f , prema formuli:

$$R_T = \frac{k_T d}{A_T + \int_0^{t_f} |i(t)| dt} \quad (4)$$

k_T je Topleyeva konstanta a $i(t)$ je struja kanala varnice.

Eksplisito rešavanje ovog izraza je relativno složeno, u zavisnosti od uslova pražnjenja i parametara varnice. Naime, u zavisnosti od uslova pražnjenja, varnica pored omske otpornosti, može da ima i značajnu induktivnost i kapacitivnost, što treba posebno imati u vidu kod projektovanja uređaja sa efektima električnog proboja.

2.3. Prateći efekti proboja

Prateći efekti pražnjenja u gasnim šupljinama u izolaciji su višestruki, slika 3. U prvom redu dolazi do destrukcije izolacije koja može dovesti do proboja izolacije. Destrukcija prvo nastupa na zidovima šupljine koji su prekriveni slojem oksida i nastale u elektro-termo-hemijskim procesima prilikom pražnjenja, tj. do i do karbonizacije zidova šupljine. Karbonizovana šupljina dovodi do dalje degradacije materijala izolacije. Usled bombardovanja jonima zidova šupljine dolazi i do drugih elektrohemijah i mehaničkih reakcija koji uzrokuju razaranje izolacionog materijala.

Slika 3 - Prateći efekti pražnjenja. (M - metal, IM - izolacioni materijal, A - molekuli gasa, A^+ , A^- - joni gasa, e - elektron). Defekti u izolacionom materijalu i metalu kao i karbonizacija zidova šupljine zbog bombardovanja jonima ($d1, d2, d3$); Kontaminacija gasa atomima metala i izolacionog materijala ($k1, k2$); Slojevi naelektrisanja, jona, elektrona, oksidni slojevi ($s1, s2, s3$)

U zavisnosti od vrste materijala, prisustva vlage i azota, može doći i do stvaranja azotne kiseline odnosno do njene disocijacije. To dovodi do električnog

premošćenja šupljine, do intenzivnih elektrohemijah reakcija i drugih efekata koji izazivaju propadanje izolacionog materijala. Druga posledica trajanja pražnjenja u šupljini je promena uslova pražnjenja zbog kontaminacije gasa produktima površinskih reakcija, atomima i molekulima izolacionog materijala i metala. Kontaminacija u opštem slučaju povećava probojni napon zbog povećanja koncentracije gasa odnosno smanjenja slobodnog puta elektrona. Pored toga mogu da nastanu i drugi sinergijski efekti koji mogu dovesti do smanjenja probojnog napona. Treća posledica trajanja pražnjenja u šupljini je promena elektrodne konfiguracije zbog destrukcije sa jedne strane, ali i taloženja materijala sa druge strane. Tako nastaju metalne neravnine na obe elektode koje u značajnoj meri smanjuju probojni napon. Nastaju i tzv. dvojni slojevi naelektrisanja, najčešće na izolacionim i oksidnim slojevima. Oni mogu u velikoj meri da smanje ili povećaju probojni napon.

Osnovna karakteristika izolacionog materijala je dielektrična vrsta. Međutim, vrlo su važne i druge karakteristike kao što su: termalna postojanost, rezistentnost na vlagu, otpornost na zračenje (u specijalnim primenama), otpornost na vibracije, mehanički naprezanja itd. Posebno se razmatra otpornost na parcijalna pražnjenja. Ona je vrlo kompleksna pojava na koju utiču prethodno pomenute, ali i niz tehnoloških i elektrohemijah karakteristika materijala.

3. NUMERIČKO MODELIRANJE PARAMETARA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Ekvivalentni električni model segmenta izolacije prikazana je na slici 4.

Slika 4 - Defekt u izolaciji, gasni mehur, i ekvivalentni električni model; S_1, S_2 - aktivna površina šupljine (karbonizirana ili metalizirana površina)

Prema nizu radova [1-4] pojava proboja vazdušne šupljine modelovana je odvodnikom prenapona (R_{sp}) paralelno vezanim kapacitivnostima šupljine C_c , slika 5.

Slika 5 - Električni model izolacije sa parcijalnim probojem

Uobičajeni opis procesa parcijalnih pražnjenja prema ovom modelu je sledeći (slike 5 i 6): ako se izolacioni sistem opterećuje naizmeničnim naponom $V_a(t)$ dolazi do punjenja kapacitivnosti izolacionog sistema na napone, V_a , V_b i V_c . U trenutku kada napon na šupljini V_c dostigne kritičnu vrednost U_p (odnosno kritičnu vrednost polja E_{bd}), dolazi do proboja šupljine i do brzog pada napona na njoj za vreme reda 100 ns. Napon na šupljini V_c opada do vrednosti napona gašenja „pozitivne“ varnice, V_p . Istovremeno dolazi do brzog skoka napona V_b na kondenzatoru C_b . U spoljašnjem kolu se javlja strujni impuls pražnjenja, kojim se dopunjuje kondenzator C_b . Zbog daljeg porasta spoljašnjeg napona V_a dolazi do stvaranja uslova ponovnog punjenja (dopunjavanja) kondenzatora C_c do napona V_c i novog pražnjenja. Pri tome treba imati u vidu da su pražnjenja stohastička pojava i da su svi karakteristični naponi i struje stohastički veličine [8].

Slika 6 - Dijagrami napona i struja kod parcijalnih pražnjenja: $V_{10}=V_a$ - napon na objektu, $[V_c]$ - napon šupljine kada nema pražnjenja, $V_{20}=V_c$ - napon šupljine kada postoji pražnjenje, I_{pd} - strujni impulsi pražnjenja. U_p , V_p - stohastički odstupanja veličine U_p i V_p

U ovom delu analize model sa slike 5 i 6 je jednostavan i intuitivno razumljiv. No model ne može da objasni pojavu impulsa pražnjenja u zoni u kojoj spoljašnji napon V_a prolazi kroz nulu što je praktično najčešći slučaj. Tada prenaponi odnosno kritično električno polje na kapacitivnosti C_c ne bi trebalo da postoje. Datu pojavu posebno tretira model predložen u ovom radu.

3.1. Fizički elementi modela pražnjenja

Modelovanje pojava koje prate pražnjenje se može posmatrati prema slici 7 [9]. Rezultujuće polje unutar šupljine $E_h(t)$ je superpozicija spoljašnjeg (dovedenog) polja $E_0(t)$ i polja od slobodnih naelektrisanja na površini šupljine $Q_s(t)$ (gustine ρ_s), slika 7b:

$$E_h(t) = E_0(t) - E_s(t) \quad (5)$$

Prema slici 7b se vidi da su električna polja u kondenzatorima C_b i C_c i spregnuta poljem $E_0(t)$ i promena polja u jednom dovodi do promene polja u drugom kondenzatoru. Znači da se oni ne mogu smatrati kao dva diskretna kondenzatora kako je to predloženo prema ranijem modelu [1, 9].

Proboju prethode kumulativni procesi generisanja jona i elektrona. Za procenu „karakterističnog vremena formiranja kanala varnice“ τ_{sf} može se koristiti Toplevov zakon ($\bar{E}_{bd}$ - srednja jačina polja, k_T - Toplevova konstanta) [5]:

$$\tau_{sf} = 4.4 \frac{k_T}{\bar{E}_{bd}} \quad (6)$$

Slika 7 - Uzorak izolacionog sistema sa šupljinom. a) raspodela slobodnih (ρ_s) i vezanih (ρ_p) naelektrisanja; b) raspodela električnih polja; $\chi_{1,2}$ - površinska provodnost uz prisustvo slobodnih naelektrisanja, χ_c - površinska provodnost bez slobodnih naelektrisanja; ($\chi_{1,2} \gg \chi_c$)

Procesi u kanalu su izrazito nelinearni i to dovodi do promenljive otpornosti kanala varnice $R_s(i, t)$. Pod uticajem lokalnog električnog polja stvara se lokalni složeni strujni impuls $i(t)$.

Parametar „karakteristično vreme trajanja strujnog impulsa“ τ_i je određen složenom zavisnošću u akumulirane energije kondenzatora šupljine, fizičkih procesa u šupljini, električnom interakcijom sa okruženjem itd.

Tokom trajanja strujnog impulsa menja se površinska gustina slobodnih naelektrisanja varnice ρ_s (odnosno $Q_s(t)$) na zidovima šupljine, slika 7a. To stvara opozitno polje i dovodi do gašenja varnice.

Napon paljenja U i napon gašenja V varnice su međusobno povezani. Na osnovu polja E_{bd} i geometrijsko-fizičkih karakteristika šupljine procenjuje se kritični napon na šupljini U (pomoću Pašenovog zakona):

$$U = \frac{B \cdot (p \cdot d_0)}{C + \ln(p \cdot d_0)} \quad (7)$$

gde je p pritisak gasa u šupljini, d_0 je debljina gasnog sloja a B i C su karakteristične empirijske konstante za dati gasni sistem.

Slika 8 - Me usobna zavisnost napona paljenja i napona gašenja varnice

Napon gašenja je zavisian od napona paljenja (slika 8):

$$V(U) = V_{\min} + V_m \exp[-(U - U_{\min})/U_0] \quad (8)$$

gde su $U_{\min}$, $V_{\min}$ i U_0 odgovarajućim parametri. U opštem slučaju parametri se razlikuju za pozitivnu i negativnu periodu pa se imaju indekse p odnosno n . Naponi U i V imaju izrazito stohastični karakter i opisuju se preko srednje vrednosti i statističkih parametara.

3.2. Matematički elementi modela pražnjenja

Za maksimalnu vrednost spoljašnjeg napona V_{am} i njegovu sinusnu zavisnost može se pisati (slike 5, 6 i 9):

$$V_b(t) = V_{12}(t) = \frac{C_c}{C_b} V_{am} \sin(\xi t) \quad (9)$$

$$V_c(t) = V_{20}(t) = \frac{C_b}{C_c} V_{am} \sin(\xi t); \quad V_c(t) < U_p \quad (10)$$

u trenutku kada dođe do iniciranja prvog impulsa pražnjenja, $t_{10} = t(V_{20} = U_p)$, može se pisati:

$$V_{20}(t_{10}) = \int_d \vec{E}_0 \cdot d\vec{l} \approx E_{bd} d_0 = U_p \quad (11)$$

$$V_{10}(t_{10}) = \int_{d_1} \vec{E}_1 d\vec{l} + \int_d \vec{E}_0 d\vec{l} = V_{12}(t_{10}) + U_p \quad (12)$$

Tokom trajanja impulsa pražnjenja napon $V_{10}(t)$ raste relativno sporo, dok napon $V_{12}(t)$ raste, a napon $V_{20}(t)$ opada vrlo brzo do trenutka kada se varnica prvog impulsa pražnjenja gasi, $t_{11} = t(V_{20} = V_p)$.

Slika 9 - a) Električni model izolacije pomoću kondenzatora; b) Unapredni model pražnjenja sa memorijom

Električno polje u šupljini razdvaja generisana slobodna naelektrisanja u varnici i formira naelektrisanje q_{s1} od prvog impulsa pražnjenja,

$$q_{s1} = \int_{t_{10}}^{t_{11}} i(t) dt = \int_{t_{10}}^{t_{11}} \frac{V_{20}(t)}{R_s(t)} dt \quad (13)$$

gde je $R_s(t)$ trenutna otpornost kanala varnice. Sa druge strane, može se pisati jednakost koja povezuje početak i kraj impulsa pražnjenja:

$$\begin{aligned} V_{10}(t) &= \int_{d_1} E_1(t_{10}) dl + \int_{d_0} E_o(t_{10}) dl = \\ &= \int_{d_1} E_1(t_{11}) dl + \int_{d_0} E_o(t_{11}) dl - \int_{d_0} E_s dl \end{aligned} \quad (14)$$

gde je E_s polje nastalo od slobodnih naelektrisanja na zidovima šupljine. Korišćenjem veze između električnog polja i gustine naelektrisanja ($E = \rho / \epsilon_0$), kapacitivnosti i dimenzija, ($C = \epsilon_0 r S / d$), iz jednačine može se dobiti veza između naelektrisanja parcijalnog pražnjenja q_{s1} i tzv. prividnog naelektrisanja q_p protoklog u spoljašnjem kolu:

$$q_{s1} = q_p \frac{C_b + C_c}{C_b} \quad (15)$$

Novi član u jednoj od prethodnih jednačina:

$$- \int_{d_0} E_s dl = U_{30} \quad (16)$$

modeluje se kontrolisanim naponskim izvorom (V_i) redno vezanim sa C_b i C_c , slika 9. Ukupni napon na šupljini sada su naponi na C_c i $V_i = V_{30}$:

$$V_{20}(t) = V_{23}(t) + V_{30}(t) \quad (17)$$

Pražnjenje se ugasi kada napon šupljine V_{20} padne na vrednost V_p pri čemu spoljašnji napon ostaje isti:

$$V_{20}(t_{11}) = V_p = V_{23}(t_{11}) + V_{30}(t_{11}) \quad (18)$$

„Konačan“ napon izvora V_i određen je fizičkim uslovom gašenja varnice:

$$V_{30}(t_{11}) = V_p - V_{23}(t_{11}) \quad (19)$$

Kada je napon na šupljini $V_{20}(t_{21})$ ponovo dostigao kritičnu vrednost U_p u trenutku t_{21} pojaviće se novi proboj.

Nakon gašenja novog pražnjenja u trenutku t_{22} protekla je ponovo količina naelektrisanja q_{s1} koja formira novo naelektrisanje Q_{s2} koje dovodi do gašenja varnice.

Kao što se može videti, u prvom redu se ima inženjerska memorijalna efekta pražnjenja, tj. zavisnost uslova sledećeg pražnjenja o prethodnom. Sa druge strane raspodela naelektrisanja izmeću dve varnice nije statična već ima svoju dinamiku preko curenja naelektrisanja kroz izolaciju i preko zidova šupljine. To se može jednostavno modelovati pogodnim provodnostima. Ne treba izgubiti iz vida da je električni model pražnjenja moguće prisajediti fizičkom modelu pražnjenja koji bi "uvažio" njegovu stohastičnost prirode.

Postavljeni sistem iterativnih jednačina je moguće i numerički izraziti. Postoji niz softverskih paketa pomoću kojih je to moguće uraditi (Simulink, Comsol itd.).

4. NEKI REZULTATI MODELA

Procena vrednosti elemenata modela zavisi od objekta koji se modeluje (mašina, uzorak izolacije i dr.). Kako je pokazano, električno polje u šupljini se raširava kao superpozicija električnih polja nastalog od napajanja i električnog polja nastalog od slobodnih naelektrisanja u šupljini. Prilikom svakog impulsa nastaju skokovite promene električnog polja u šupljini i u dielektriku. Slobodno naelektrisanje $Q_s(t)$ se menja između dva događaja pražnjenja zbog difuzije u okolni materijal, drifta ili puzanja po površini šupljine. Prema literaturi za električno polje između dva proboja važi jednačina [6]:

$$E_h(t_{n+1}) = E_{hm} \sin(\tilde{S} \cdot t_{n+1}) + [\Delta E_{1n} + \Delta E_{2n}^{\pm}] \cdot \exp\left(-\frac{\Delta t_n}{\tau_d}\right) \quad (20)$$

gde je τ_d „karakteristična vremenska konstanta curenja naelektrisanja“, a ΔE_{1n} opisuje polje nastalo od slobodnog naelektrisanja u šupljini neposredno posle n-tog proboja, a $\Delta E_{2n}^{\pm}$ opisuje stohastičku zavisnost tog naelektrisanja.

Prema unaprednom modelu dobija se zavisnost kao na slici 10a za slučaj male promene $Q_s(t)$. U uslovima povećane provodnosti materijala izolacije (kontaminacija, vlaga itd.), povećane karbonizacije zidova šupljine ili povećanih struja puzanja dobija se savim drugi rezultat, slika 10b. tj. članovi u jednačini $\Delta E_{1n}(t_n, \tau_d, \dots)$ i $\Delta E_{2n}^{\pm}(t_n, \tau_d, \dots)$ postaju funkcija vremena. U ekstremnom slučaju potpunog premošćenja polje u šupljini postaje zanemarljivo. Parametar τ_d u jednačini ne odražava realnost procesa promene naelektrisanja.

Naime, ako dolazi do drifta naelektrisanja pod uticajem polja, onda ono može i da se nagomilava iz izolacije ili na druge načine što znatno komplikuje prethodnu pojednostavljenu sliku.

Slika 10 - Dijagram električnih polja u simetričnoj internoj šupljini. $E_h(t)$ - (rezultujuće) polje na šupljini pri postojanju pražnjenja, $E_o(t)$ - polje u dielektriku, $E_s(t)$ - kompenzaciono polje zbog slobodnih naelektrisanja. a) slučaj normalne b) slučaj karbonizirane šupljine

Kada se šupljina nalazi pri bakarnom provodniku onda je jedan zid šupljine metalni. Pri negativnoj poluperiodi dolazi do povećane emisije elektrona sa bakarne površine, odnosno do smanjenja probojnog napona. To dovodi do povećane uestanosti pražnjenja. Slični uslovi su kada je jedan zid šupljine metalni utora (žleba) mašine koji je negativan u pozitivnoj poluperiodi, tj. kada se bakarni provodnik nalazi na pozitivnom naponu. Rezultat simulacije ovih uslova dat je na slici 11.

Slika 11 - Parcijalna pražnjenja kod šupljina pri uzemljenom žlebu mašine

Pored toga primećeno je smanjenje frekvencije (ponavljanja) pražnjenja odnosno povećanja

probojnog napona pri pozitivnom metalnom zidu šupljine, slika 11. To se može objasniti uticajem više faktora [10]. U prvom redu pozitivna metalna elektroda iz ograničenog prostora šupljine "apsorbira" veliki broj elektrona što otežava pojavu inicijalnog elektrona. Sa druge strane drift pozitivnih jona ka zidu šupljine dovodi do slabljenja rezultujućeg polja u šupljini. Postojanje dvojnih slojeva naelektrisanja na neprovodnim barijerama (neisto, oksidni sloj) na metalnim površinama može značajno da promeni probojni napon [5].

5. ZAKLJUČAK

Rad razmatra mogućnost poboljšanja numeričkog modelovanja parcijalnih pražnjenja u izolacionom sistemu visokonaponskih mašina. Za ispitivanja parcijalnih pražnjenja su dostupni impulsi kao elektromagnetni odziv objekta na varni na pražnjenja u izolacionom sistemu. Rad ukazuje na to da su formalni modeli kojima se objašnjava oblik i raspodela impulsa neadekvatni. Do razjašnjenja pojavnog oblika impulsa parcijalnih pražnjenja se može doći razjašnjenjem dinamike predprobojnih, probojnih i postprobojnih pojava u izolaciji. Osnovni efekat koji određuje dinamiku pojave lokalnih varnica je "memorijski", nastao preraspodelom slobodnih i vezanih naelektrisanja u šupljini. U daljem radu se mogu istraživati uticaji uslova pražnjenja u šupljinama kao što su pritisak, temperatura, sastav gasovite sredine šupljine, električno okruženje i dr.

LITERATURA

- [1] Adolf J. Schwab, Hoshspanungs Messtechnik messgerate und messverfahren, Springer-Verlag, Heidelberg, 1981
- [2] N. P. Kolev, E. D. Gadjeva, M. G. Danikas, N. R. Gourov, An approach to develop a partial discharge

investigation Proceedings -Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 507 – 510, 1999.

- [3] C. Forssen and H. Edin, Modeling of a discharging cavity in a dielectric material exposed to high electric fields, Proc. COMSOL, Multiphysics User's Conference, Stockholm, Sweden, 2005.
- [4] C. Forssen and H. Edin, Modeling partial discharges in a cavity at different applied frequencies', Proceedings - Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, (CEIDP), pp. 132-135, 14-17 October 2007.
- [5] Kartalović Nenad, "Stohastički procesi impulsnog odziva gasne izolacije", Doktorska teza, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, 2000.
- [6] Osmokrović P, Kartalović N, Iniciranje vakumskog proboja emisijom mehanizmom, Tehnika 9-10, pp 13-18, Beograd 1991,
- [7] N. Kartalović, P. Osmokrović, Iniciranje vakumskog proboja mehanizmom mikrodela, Tehnika 4, Beograd 1993.
- [8] R Altenburger, C Heitz and J Timmer, Analysis of phase-resolved partial discharge patterns of voids based on a stochastic process approach, J. Phys. D: Appl. Phys. vol. 35, pp. 1149-1163, 2002.
- [9] N. Kartalović, Dragan Kovačević, Srđan Milosavljević. An advanced model of partial discharge in electrical insulation. Facta Universitatis, Niš, Seria, Elec. Energy Vol 24, No1, pp 43-57. ISSN 0353-3670, 2011.
- [10] Eberhard Lemke, et al. Guide for Partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270, CIGRE, WG D1.33, ISBN: 978-2-85873-053-7, December 2008.

SUMMARY

NUMERICAL MODELING OF PARTIAL DISCHARGES PARAMETERS

In recent testing of the partial discharges or the use for the diagnosis of insulation condition of high voltage generators, transformers, cables and high voltage equipment develops rapidly. It is a result of the development of electronics, as well as, the development of knowledge about the processes of partial discharges. The aim of this paper is to contribute the better understanding of this phenomenon of partial discharges by consideration of the relevant physical processes in isolation materials and isolation systems. Prebreakdown considers specific processes, and development processes at the local level and their impact on specific isolation material. This approach to the phenomenon of partial discharges needed to allow better take into account relevant discharge parameters as well as better numerical model of partial discharges.

Key words: partial discharges, breakdown processes, breakdown, model of partial discharges