

Modelovanje parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog kablovskog voda

Miodrag V. Simović
Zavod za izgradnju a.d.
Banja Luka
miodrag.simovic@zibl.net

Zoran Lazarević
Elektrotehnički fakultet
Beograd
lazarevic@etf.rs

Miroslav Tuvic
ELNOS BL
Banja Luka
miroslav.tuvic@elnosbl.com

Sadržaj— U radu je izvršeno modelovanje parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog kablovskog voda, uz primjenu programa MATLAB. Rezultati simulacije pokazuju da se parcijalna pražnjenja mogu detektovati snimanjem struja mjernih kondenzatora. Sa aspekta eventualne primjene rezultata simulacije u praktičnim ispitivanjima zaključuje se da isti mogu biti značajna podrška u određivanju tačke kablovskog voda za koju se pretpostavlja da sadrži izvor parcijalnih pražnjenja.

Ključne riječi—*parcijalna pražnjenja, simulacija, kablovski vod*

I. UVOD

Parcijalna pražnjenja predstavljaju poseban vid električnog pražnjenja, koje vrši djelimično premošćenje međuelektrodnog rastojanja ili izolacije među provodnicima. Svojim djelovanjem parcijalna pražnjenja razaraju strukturu električne izolacije i zbog tog razloga se svrstavaju u red negativnih pojava u oblasti elektroenergetike. Električna izolacija, u kojoj su tokom dužeg vremena zastupljena intenzivna parcijalna pražnjenja, ubrzano stari u poređenju sa izolacijom, u kojoj parcijalna pražnjenja ne postoje ili su izražena u manjoj mjeri. Praktična ispitivanja su pokazala da je starenje ili oštećenje izolacije povezano sa porastom intenziteta parcijalnih pražnjenja. Ovu vezu treba posmatrati u kontekstu činjenice da se, takođe u slučaju starije ili oštećene izolacije, povećava vjerovatnoća pojave potpunog proboja izolacije i havarije u postrojenju. Uzimajući u obzir moguće razmjere negativnih posledica, koje iniciraju parcijalna pražnjenja, zaključeno je da izučavanju ovog fenomena u oblasti elektroenergetike treba posvetiti posebnu pažnju. U tu svrhu inženjerska praksa je razvila čitav niz ispitnih metoda, koje imaju za cilj pravovremeno otkrivanje i određivanje parcijalnih pražnjenja, kako kvalitativno tako i kvantitativno. U okviru rada je prikazan postupak simulacije parcijalnih pražnjenja na modelu energetskog kablovskog voda uz podršku programa MATLAB/SIMULINK. Smisao simulacije procesa parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu je utemeljena na pretpostavci da je na bazi rezultata, koji su dobijeni za pretpostavljene početne uslove, moguće predvidjeti scenario odvijanja procesa parcijalnih pražnjenja, zatim isti prepoznati prilikom pojave u praksi i na kraju locirati tačku sa izvorom.

II. MODEL PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Model parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog kabla, prikazan u nastavku, je realizovan na osnovu postojećih znanja o fizičkom procesu, uz upotrebu elemenata elektroenergetike i savremenih informacionih tehnologija. Model u programu MATLAB/SIMULINK, odnosno ekvivalentno električno kolo energetskog kablovskog voda, sa parcijalnim pražnjenjima u izolaciji, je dato na Sl. 1. Zbog ograničenosti prostora na Sl.1 nije prikazano ekvivalentno električno kolo u cjelini, već je dat principijelan prikaz. Smatra se da je način prikaza modela na Sl.1 sasvim dovoljan, te da se uprošćenja neće negativno odraziti na razumijevanje principa modelovanja i tumačenje rezultata simulacije. Uzimajući u obzir zahtjeve standarda [1], koji se odnose na problem superpozicije putujućih talasa u kablovskim vodovima velike dužine, tokom izrade predmetnog modela odabrana je dužina kablovskog voda u iznosu 100m. Posledice primjene odredbi standarda [1], pri izboru dužine kablovskog voda koji se modeluje, imaju istovremeno i negativnu i pozitivnu dimenziju. Negativnom dimenzijom se može smatrati ograničenje primjene rezultata simulacije na kablovske vodove dužine isključivo do 100m, dok pozitivnu predstavlja mogućnost da efekti, nastali usled superpozicije putujućih talasa, budu zanemareni tokom izrade modela. U fazi izrade modela kabla posebna pažnja je usmjerena na njegova tri konstruktivna elementa i to provodnik, izolacionu oblogu i metalni omotač. Naime, kratkotrajna struja, koja se tokom trajanja procesa generiše u izvoru parcijalnih pražnjenja, je uspostavljena konturom, koju čine izolacija, provodnik, metalni omotač i mjerni kondenzator. U kolu datom na Sl. 1 predmetni kablovski vod je, uz puno uvažavanje prelaznog procesa pri pojavi parcijalnih pražnjenja, modelovan pomoću ekvivalentnih električnih parametara: kapacitivnosti, aktivne otpornosti i induktivnosti. Parametri energetskog kablovskog voda su izabrani shodno vrijednostima, koje u katalogima navode proizvođači kablova. Uvažavajući činjenicu da kontura, struje parcijalnih pražnjenja, sadrži provodnik i metalni omotač kablovskog voda, isto kao i nulta komponenta trofazne struje, u softverskom modelu, sa Sl. 1 figurišu parametri nulte impedanse kablovskog voda. Usvojene vrijednosti podužnih

parametara modelovanog kablovskog voda su date u nastavku: aktivna otpornost $0,178\Omega/\text{km}$, kapacitivnost $0,2\mu\text{F}/\text{km}$ i induktivnost $0,363\text{mH}/\text{km}$. Vrijednosti parametara približno odgovaraju kablovskim vodovima sa izolacijom od umreženog polietilena i nazivnim naponom 110kV . Kablovski vod je u modelu, uvažavajući zahtijevanu preciznost lociranja izvora parcijalnih pražnjenja, izdijeljen na deset identičnih segmenata. U svakom od njih pripadajuće kapacitivnosti, induktivnosti i aktivne otpornosti su spojene u ekvivalentnu π -šemu. Simulacija procesa parcijalnih pražnjenja se vrši injektiranjem pobudne količine elektriciteta q_p iz strujnog generatora, kojim je modelovan izvor parcijalnih pražnjenja, u određene tačke kablovskog voda. Simulacija procesa započinje na priključnom kraju kablovskog voda označenom sa a . Tačka injektiranja strujnog generatora se potom pomjera duž kablovskog voda, prema priključnom kraju b , uvećavajući svaki put rastojanje od tačke a za po 10% ukupne dužine voda. Simulacija procesa parcijalnih pražnjenja se okončava na priključnom kraju kablovskog voda b . Shodno modelu, prikazanom na Sl. 1, u toku simulacije parcijalnih pražnjenja predviđeno je snimanje vremenskih zavisnosti i mjerenje trenutnih vrijednosti napona, struja i akumuliranih količina elektriciteta. Negativni iznosi količina elektriciteta snimljeni na mjernim kondenzatorima simbolično pokazuju da se, u procesu parcijalnih pražnjenja, iz izolacije ispitivanog objekta, oslobađa količina elektriciteta. U praksi je uobičajeno da se ispitivanje parcijalnih pražnjenja izvodi uz upotrebu jednog mjernog kondenzatora. Standard [2], u dijelu koji se odnosi na utvrđivanje lokacije izvora u kablovskim vodovima ili namotajima, preporučuje istovremeno mjerenje parcijalnih pražnjenja na više priključnih krajeva. U skladu sa datom odredbom standarda [2] i pretpostavkom, koja se odnosi na praktičnu primjenu rezultata simulacije, u softverski model sa Sl. 1, su instalisana dva mjerna kondenzatora, označena sa C_{ka} i C_{kb} . Količine elektriciteta q_{ka} i q_{kb} , koje tokom simulacije akumuliraju mjerni kondenzatori, odgovaraju mjerljivim količinama elektriciteta u praktičnim ispitivanjima. Kada mjerni kondenzatori imaju znatno veće iznose kapacitivnosti, u odnosu na ispitivani objekat, vrijednosti mjerljive i prividne količina elektriciteta su približno jednake. Prividnu količinu elektriciteta standard [2] deklariše kao osnovnu veličinu za vrednovanje efekata parcijalnih pražnjenja. Prema standardu [2] prividna količina elektriciteta, u slučaju nagle primijene između priključaka ispitivanog objekta, uzrokuje trenutnu promjenu napona na priključcima u istom iznosu kao i parcijalno pražnjenje. U slučaju modela sa Sl. 1, pojedinačne kapacitivnosti mjernih kondenzatora C_{ka} i C_{kb} iznose $0,2\mu\text{F}$. U nastavku analize ekvivalentnog kola sa Sl. 1, pažnja će biti usmjerena na modelovanje izvora parcijalnih pražnjenja. Na početku treba podsjetiti da se ispitivanje parcijalnih pražnjenja u praksi, shodno standardu [2], sastoji od tri koraka. Prvi korak obuhvata baždarenja mjerno-ispitnog kola, drugi mjerenje parcijalnih pražnjenja i treći tumačenja rezultata ispitivanja. Analiza prelaznog procesa u ekvivalentnom električnom kolu [3][4] je pokazala da, na generisanje struje u izvoru parcijalnih pražnjenja, parametri ispitivanog objekta i kapacitivnost mjernih kondenzatora nemaju uticaj. Analiza, takođe, pokazuje da je struja generisana u izvoru parcijalnih pražnjenja kratkotrajna, te da ima eksponencijalno opadajući karakter. Poređenjem simulacije parcijalnih pražnjenja na softverskom

modelu i postupka baždarenja mjernog kola sa ispitivanim objektom u nepobuđenom stanju uočava se sličnost. Standardom [2] je predviđeno da struja, koju u praksi emituje tzv. baždarni generator, preko priključnih krajeva u ispitivani objekat unosi poznatu količinu elektriciteta. Vrijeme porasta struje mora biti kraće od $0,1\mu\text{s}$, dok preporučeno vrijeme opadanja iznosi od stotinu do nekoliko hiljada mikrosekundi. U skladu sa zaključcima analize prelaznog procesa i postupka baždarenja mjerno-ispitnog kola izvor parcijalnih pražnjenja, u modelu prikazanom na Sl. 1, je sasvim opravdano predstavljen idealnim generatorom, sa eksponencijalno zavisnom strujom:

$$i_p(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

Amplitudna vrijednost pobudne struje I_0 i vremenska konstanta opadanja struje τ su odabrane tako da idealni izvor, svojim djelovanjem u fazi simulacije procesa, omogući akumulisanje ili oslobađanje, u zavisnosti od upotrijebljenog smjera, količine elektriciteta q_p iz izolacije ispitivanog objekta. Između amplitudne struje idealnog izvora I_0 , vremenske konstante τ i pobudne količine elektriciteta q_p postoji naredni odnos:

$$q_p = \int_0^{\infty} i_p(t) dt = \int_0^{\infty} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt = I_0 \tau \quad (2)$$

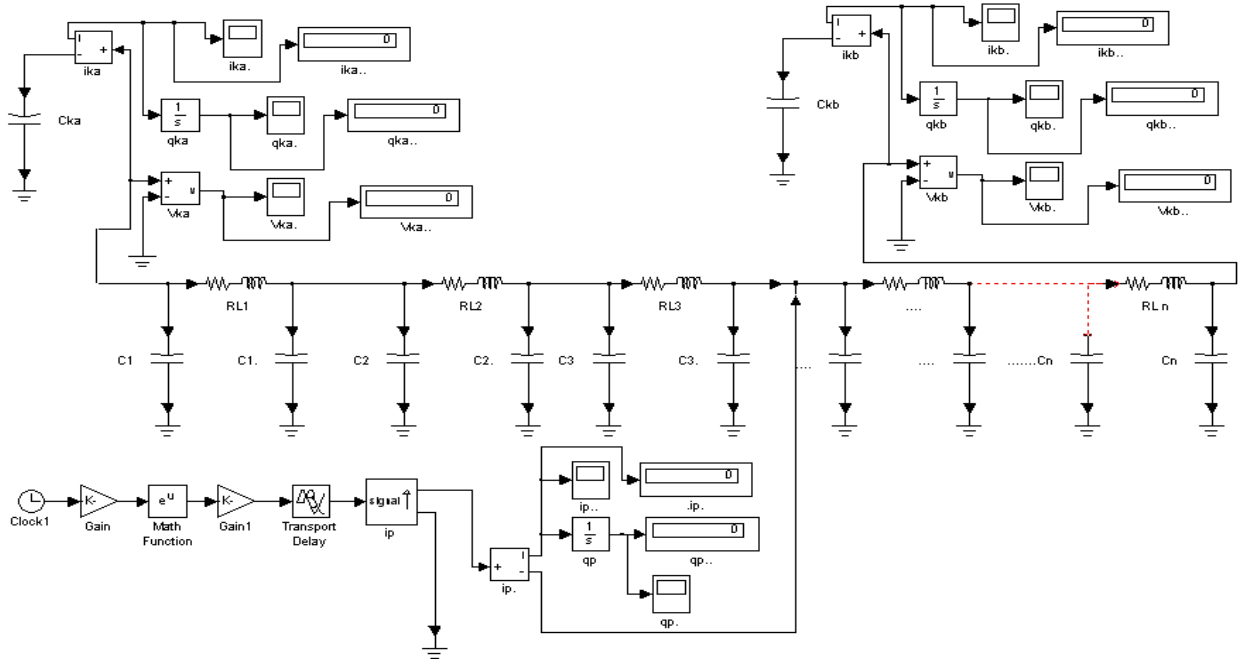
Zaključci, proistekli iz baždarenja mjerno-ispitnog kola, se primjenjuju tokom lociranja izvora parcijalnih pražnjenja. Lociranje izvora parcijalnih pražnjenja je predviđeno u trećem koraku i smatra nezaobilaznim dijelom tumačenja rezultata ispitivanja. Izvođenje lociranja se vrši analogno metodi "poređenja slika", koja je detaljno obrazložena u standardu [5]. Na bazi vrijednosti prividnih količina elektriciteta za kablovske vodove i kablovski pribor, koje su dozvoljene preporukom [6], usvojena vrijednost pobudne količine elektriciteta q_p u kolu sa Sl. 1 iznosi 10pC . Dalje, uvažavajući odredbe standarda [2] usvojena je nominalna vrijednost vremenske konstante opadanja struje pobudnog generatora u iznosu $100\mu\text{s}$. Napominje se da je u cilju poređenja promjena vrijednosti veličina, kao i procjene mogućnosti i ograničenja simulacija parcijalnih pražnjenja izvođena za više vremenskih konstanti iz opsega od 1ns do 1ms . U dosadašnjem izlaganju pažnja je posvećena obrazloženju osnovnih principa, koji su korišćeni tokom izrade modela kablovskog voda sa parcijalnim pražnjenjima u izolaciji. Treba posebno naglasiti da je modelovanje procesa u potpunosti usaglašeno sa naučnim saznanjima u oblasti parcijalnih pražnjenja, kao i standardima i preporukama, koje prate ovu oblast elektroenergetike. U dijelu koji slijedi će biti prezentovani rezultati simulacije parcijalnih pražnjenja na modelu kablovskog voda, sa posebnim osvrtom na pretpostavke o mogućnosti korišćenja dobijenih rezultata u praktičnim ispitivanjima. Takođe, posebna pažnja će biti posvećena i ograničenjima u praktičnoj primjeni rezultata simulacije.

III. SIMULACIJA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA NA MODELU

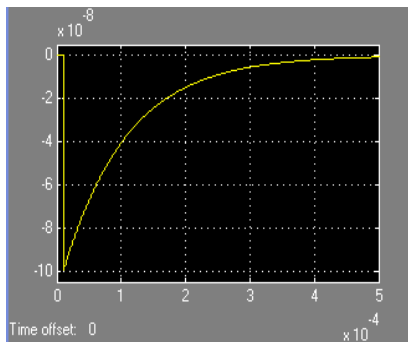
Kao što je već rečeno u ovom dijelu rada će biti analizirani rezultati, dobijeni simulacijom procesa parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu kablovskog voda primjenom programa MATLAB/SIMULINK. Analiza dobijenih rezultata predstavlja

važan segment modelovanja, jer zaključci koji iz nje proizilaze direktno utiču na značaj i poziciju modelovanja u okviru ispitivanja parcijalnih pražnjenja. Na početku analize su navedene osnovne pretpostavke, koje su vezane za početak i kraj simulacije. Prvo, postupak simulacije se započinje uz pretpostavku da je akumulirana količina elektriciteta, u mjernim kondenzatorima i kapacitivnostima kablovskog voda u

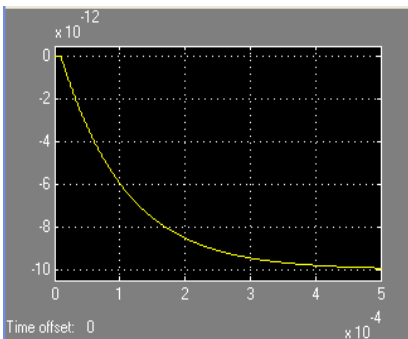
trenutku neposredno prije uključjenja strujnog generatora, kojim je modelovan izvor parcijalnih pražnjenja, jednaka nuli. Drugo, padovi napona na aktivnim otpornostima i induktivnostima kablovskog voda, mjereni u trenutku zaustavljanja simulacije ili simbolično posmatrano gašenja prelaznog procesa usled parcijalnih pražnjenja, treba da imaju vrijednost približno jednaku nuli.



Slika 1. Principijelno električno kolo za modelovanje pojave parcijalnih pražnjenja u programu MATLAB



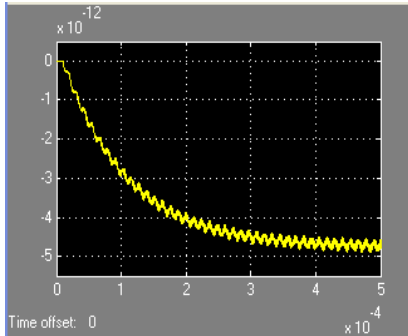
Slika 2. Vremenske zavisnosti struje pobudnog generatora i_p



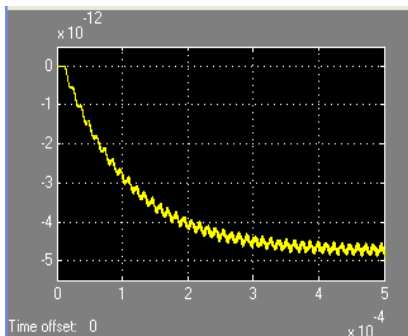
Slika 3. Vremenska zavisnost pobudne količine elektriciteta q_p

Teoretski posmatrano, potpuno gašenje prelaznog procesa usled parcijalnih pražnjenja i stacionarno stanje u električnom kolu sa Sl. 1 nastupaju u beskonačnosti, kada struja parcijalnih pražnjenja ima konstantnu vrijednost jednaku nuli. Ako se gubici energije u aktivnim otpornostima kablovskog voda, nastali tokom prelaznog procesa, zanemare pobudna količina elektriciteta, koju je injektirao strujni generatora q_p , će biti raspodijeljena jednim dijelom u mjernim kondenzatorima, a drugim dijelom u kapacitivnostima kablovskog voda. Na Sl. 2 i Sl. 3 su prikazane vremenske zavisnosti pobudne struje $i_p(t)$ i količine elektriciteta $q_p(t)$, respektivno. U skladu sa ranije navedenom pretpostavkom veličine pobudnog generatora su eksponencijalne funkcije vremena, sa vremenskom konstantom u iznosu $100\mu s$. Neposredno nakon početka prelaznog procesa pobudna struja ima negativnu amplitudnu vrijednost u iznosu $-0,1\mu A$. Pobudna količina elektriciteta eksponencijalno raste u negativnom smislu i asimptotski se, u stacionarnom stanju ili u trenutku prekida simulacije, približava amplitudnom iznosu od $-10pC$. Jednostavan proračun pokazuje da su u stacionarnom stanju količine elektriciteta, koje se akumuliraju u mjernim kondenzatorima kao posledica djelovanja pobudnog strujnog generatora prethodno navedenih karakteristika, međusobno jednake i iznose približno $-4,762pC$. Vrijednosti količina elektriciteta mjernih kondenzatora u stacionarnom stanju ne zavise od pozicije tačke kablovskog voda, u koju generator injektira pobudnu struju $i_p(t)$, odnosno količinu elektriciteta

$q_p(t)$. Razlog, zbog koga količine elektriciteta, akumulirane na mjernim kondenzatorima u postupku simulacije parcijalnih pražnjenja imaju negativnu vrijednost, je ranije objašnjen. Na Sl. 4 i Sl. 5 su prikazane vremenske zavisnosti količina elektriciteta u mjernim kondenzatorima $q_{ka}(t)$ i $q_{kb}(t)$, u slučaju injektiranja pobude q_p u priključni kraj a (0% dužine voda).



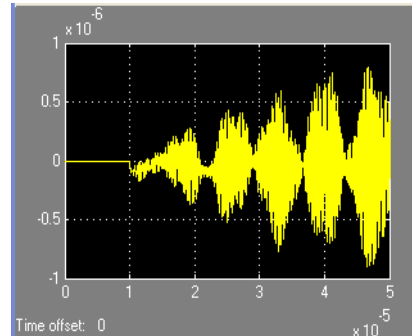
Slika 4. Vremenska zavisnost količine elektriciteta q_{ka} (0% dužine voda)



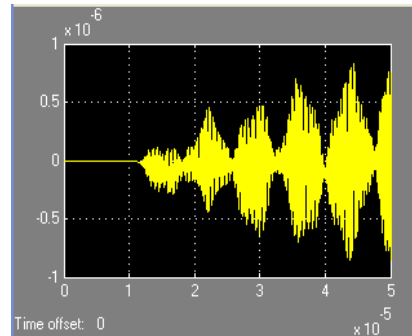
Slika 5. Vremenska zavisnost količine elektriciteta q_{kb} (0% dužine voda)

Poređenjem dijagrama na Sl. 3, Sl. 4 i Sl. 5 se uočava da među vremenskim zavisnostima $q_{ka}(t)$, $q_{kb}(t)$ i $q_p(t)$ u osnovi postoji sličnost. Naime, svaka od tri navedene vremenske zavisnosti ima eksponencijalan karakter i isti iznos vremenske konstante τ . Takođe, među dijagramima se uočava i razlika, izražena kroz pojavu deformacije u obliku “testere“, duž eksponencijalnih krivih $q_{ka}(t)$ i $q_{kb}(t)$. Deformacija se javlja kao posledica prelaznog procesa u električnom kolu tokom simulacije i shodno razlozima, koji su navedeni u nastavku ona se zanemaruje. Naime, iz dijagrama je uočljivo da je opseg deformacije znatno manji od vrijednosti 1pC, koju je standard [2], u dijelu koji se odnosi na problem smetnji naveo kao najmanju vrijednost mjerljive količine elektriciteta u praksi. Simulacija procesa parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu sa Sl. 1 traje 10ms, što predstavlja znatno veći iznos u poređenju sa vremenskom konstantom. Na na Sl. 2, Sl. 3, Sl. 4 i Sl. 5 su prikazane vremenske promjene pobudne struje $i_p(t)$ i količina elektriciteta, pobudne $q_p(t)$, mjerljive $q_{ka}(t)$ i $q_{kb}(t)$ u prvih 0,5ms simulacije. Vrijednosti količina elektriciteta, koje su na kapacitivnostima izmjerene po zaustavljanju simulacije su sledeće: $q_{ka} = -4,694\text{pC}$, $q_{kb} = -4,691\text{pC}$ i $q_p = -10\text{pC}$. Uočava se da količine elektriciteta na q_{ka} i q_{kb} , u trenutku zaustavljanja simulacije, nemaju jednaku vrijednost. Ova pojava se može pravdati sledećim razlozima. Prvi, zaustavljanje simulacije i

gašenje prelaznog procesa u kolu sa Sl. 1 se ne dešavaju istovremeno, odnosno struje u kolu nisu konstantne i jednake nuli. Drugi, zbog nesimetrične pozicije tačke, u koju je priključen pobudni generator, u odnosu na priključne krajeve kablovskog voda, promjena napona i struje na mjernim kondenzatorima nije ista. Kao i u slučaju proračuna i ovdje se može reći da su količine elektriciteta, akumulirane na mjernim kondenzatorima, jednake i nezavisne od tačke kablovskog voda u koju se injektira pobudna količina elektriciteta, samo u stacionarnom stanju, koje nastupa u beskonačnosti.



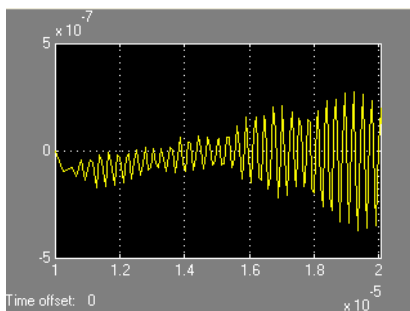
Slika 6. Vremenska zavisnost struje i_{ka} (0% dužine voda)



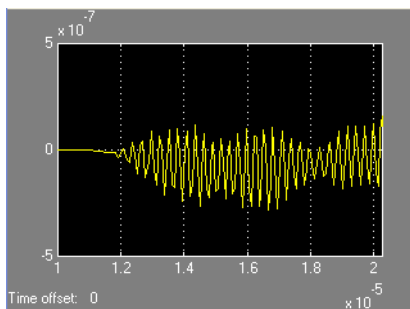
Slika 7. Vremenska zavisnost struje i_{kb} (0% dužine voda)

U praktičnim ispitivanjima zakonitost raspodjele pobudne količine elektriciteta između kapacitivnosti kablovskog voda i mjernih kondenzatora se može odrediti u postupku baždarenja. U nastavku analize, polazeći od činjenice da su kapacitivnosti mjernih kondenzatora C_{ka} i C_{kb} međusobno jednake i znatno većeg iznosa u odnosu na ukupnu kapacitivnost modelovanog kablovskog voda, smatra se da u stacionarnom stanju približno vrijedi jednakost: $q_{ka} = q_{kb} = q_p / 2$. Na Sl. 6 i Sl. 7 su prikazane vremenske zavisnosti struja mjernih kondenzatora $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$, snimljene u prvih 50 μs nakon početka simulacije. Podsjećanja radi, pobudni strujni generator je tokom snimanja spojen na priključnom kraju kablovskog voda označenom sa a . Polazeći od činjenice da struje mjernih kondenzatora $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$ u stacionarnom stanju imaju vrijednost nula, logično je da poređenje dijagrama bude izvedeno na početku simulacije. Na osnovu dijagrama vremenskih zavisnosti struja, prikazanih na Sl. 6 i Sl. 7, konstatuje se da su struje neperiodične funkcije vremena. Dalje, u cilju što preciznije analize na Sl. 8 i Sl. 9 su prikazane vremenske zavisnosti struja $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$, ali na vremenskom intervalu (10,20) μs . Značaj ovih dijagrama dolazi

do izražaja u nastavku, odnosno u fazi poređenja istih sa dijagramima, koji su prikazani na Sl. 10 i Sl. 11. Naime, predmet dijagrama sa Sl. 10 i Sl. 11 su vremenske zavisnosti struja mjernih kondenzatora $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$, takođe snimljene na vremenskom intervalu (10,20) μ s, ali u slučaju priključenja pobudnog generatora u tačku, koja je od priključnog kraja a udaljena 30% ukupne dužine modelovanog kablovskog voda. Na osnovu dijagrama sa Sl. 8, Sl. 9, Sl. 10 i Sl. 11 se uočava da su parovi vremenskih zavisnosti struja $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$ jedinstveni sa aspekta pozicije tačke, u koju se injektira pobudna struja. Pretpostavka je da uočena jedinstvenost može biti važna podrška postupku tumačenja rezultata praktičnih ispitivanja i to u dijelu, koji se odnosi na lociranje izvora parcijalnih pražnjenja. Detalji, vezani za način primjene rezultata simulacije u praksi, će biti precizirani u nastavku. Polazi se od pretpostavke da su u fazi ispitivanja parcijalnih pražnjenja na stvarnom objektu, u konkretnom slučaju kablovskom vodu, snimljeni dijagrami vremenskih zavisnosti količina elektriciteta i struja, koje se uspostavljaju u mjernim kondenzatorima.



Slika 8. Vremenska zavisnost struje i_{ka} (0% dužine voda)



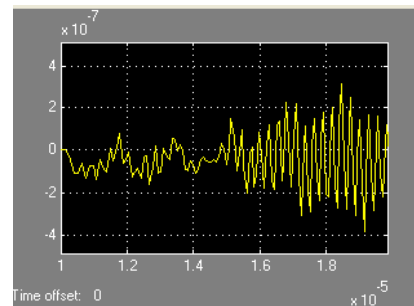
Slika 9. Vremenska zavisnost struje i_{kb} (0% dužine voda)

Dalje se pretpostavlja, da su dijagrami vremenske promjene količina elektriciteta na mjernim kondenzatorima, snimljeni u praktičnim ispitivanjima, principijelno slični dijagramima, koji su prikazani na Sl. 3 i Sl. 4. Na osnovu tih dijagrama moguće je odrediti tzv. mjerljive količine elektriciteta oslobođene sa mjernih kondenzatora u stacionarnom stanju i vremensku konstantu eksponencijalnih funkcija $q_{ka}(t)$ i $q_{kb}(t)$. Polazeći od pretpostavki da kapacitivnost mjernih kondenzatora ima znatno veći iznos u odnosu na kapacitivnost ispitivanog kabla i da se gubici snage na aktivnim otpornostima kablovskog voda mogu zanemariti, za količinu elektriciteta, oslobođenu iz ispitivanog objekta kroz izvor pražnjenja, se može pisati da je približno jednaka zbiru količina elektriciteta, koje su u stacionarnom stanju oslobođene sa mjernih kondenzatora. U kontekstu

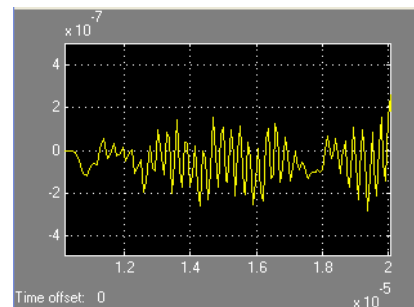
modela parcijalnih pražnjenja, koji je prikazan na Sl. 1, može se pisati sledeća jednakost:

$$q_p = q_{ka} + q_{kb} \quad (3)$$

Očitavanjem iznosa vremenske konstante τ sa snimljenih dijagrama i uvrštavanjem istog, zajedno sa prethodno određenim iznosom količine elektriciteta q_p , u formulu (2) određuje se amplitudna vrijednost eksponencijalne struje izvora parcijalnih pražnjenja I_0 . Uvrštavanjem amplitudne vrijednosti struje I_0 i vremenske konstante τ u formulu (1) dobija se vremenska zavisnost struje, koju generiše izvor tokom odvijanja procesa parcijalnih pražnjenja. Na osnovu prethodne analize proizilazi pretpostavka da je, na bazi rezultata praktičnih ispitivanja i simulacije procesa na softverskom modelu, moguće odrediti zavisnost struje, koju generiše izvor parcijalnih pražnjenja, odnosno generator u modelu sa Sl. 1.



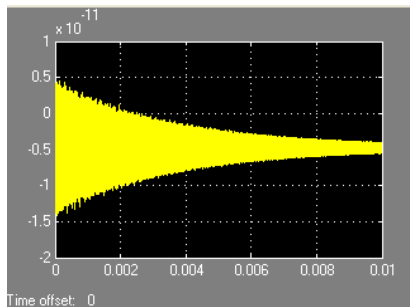
Slika 10. Vremenska zavisnost struje i_{ka} (30% dužine voda)



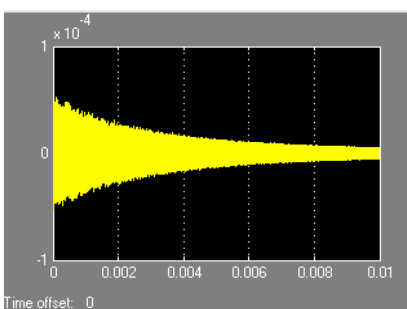
Slika 11. Vremenska zavisnost struje i_{kb} (30% dužine voda)

U nastavku će biti data važna napomena, koja se odnosi na vezu između simulacije parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu ispitivanog objekta i baždarenja mjerno-ispitnog kola, odnosno simulacije parcijalnih pražnjenja u realnim uslovima. Zbog ograničenja sa aspekta fizičkog pristupa baždarenjem je moguće simulirati pojavu izvora parcijalnih pražnjenja isključivo u okolini priključnih krajeva kablovskog voda. Nasuprot tome, softverski model nema ograničenja u fizičkom pristupu i pruža mogućnost simulacije parcijalnih pražnjenja u proizvoljnoj tački duž kablovskog voda. Na primjer u dva slučaja, opisana dijagramima na Sl. 8, Sl. 9, Sl. 10 i Sl. 11, tačke injektiranja pobudne struje na modelu su međusobno udaljene 30% ukupne dužine predmetnog kablovskog voda. Rastojanje između tačaka injektiranja se određuje u skladu sa zahtijevanim nivoom preciznosti u postupku lociranja izvora parcijalnih pražnjenja. Može se konstatovati da simulacija parcijalnih pražnjenja, na softverskom modelu, predstavlja

dopunu rezultata dobijenih tokom ispitivanja, u postupku baždarenja. Dakle, nakon sistematizacije rezultata ispitivanja na objektu u praksi i rezultata simulacije procesa parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu, stvaraju se uslovi za lociranje izvora primjenom metode “poređenja slika”[5].



Slika 12. Vremenska zavisnost količine elektriciteta q_{ka}



Slika 13. Vremenska zavisnost struje i_{ka}

U okviru navedene metode je predviđeno da se paru vremenskih zavisnosti $i_{ka}(t)$ i $i_{kb}(t)$, koji je snimljen tokom realnih ispitivanja parcijalnih pražnjenja na pobuđenom objektu, pronađe podudaran par struja, koji je snimljen u fazi simulacije na softverskom modelu ili baždarenja na mjerno-ispitnom kolu sa objektom ispitivanja u nepobuđenom stanju. Na primjer, provjerava se podudarnost para stvarnih struja parcijalnih pražnjenja, sa parovima struja na Sl. 8 i 9 ili Sl. 10 i 11., koje su snimljene pri simulaciji parcijalnih pražnjenja u tačkama, udaljenim od tačke a za 0% ili 30%, ukupne dužine kablovskog voda. Ako se pronađu podudarni parovi struja, onda se može tvrditi da su stvarni i “izvor” pražnjenja iz softverskog modela blisko locirani. Uvažavajući činjenicu da se pozicija izvora u softverskom modelu poznaje, zaključuje se da je pozicija tačke sa stvarnim izvorom pražnjenja u izolaciji objekta ispitivanja takođe poznata. Sada je važno dati napomenu, koja se odnosi na ograničenje upotrebe rezultata simulacije dobijenih na modelu sa Sl. 1. Naime, na Sl. 12 i Sl.13 su prikazane vremenske zavisnosti količine elektriciteta i struje mjernog kondenzatora, koje su snimljene u slučaju kada vremenska konstanta pobudnog generatora iznosi 100ns. Simulacija, izvedena za razne vrijednosti vremenske konstante, pokazuje da prethodno data pretpostavka o praktičnoj upotrebi rezultata simulacije parcijalnih pražnjenja na modelu, za vremenske konstante pobudne eksponencijalne struje manje od

10 μ s, nije primjenjiva. Obrazloženje, u vezi pretpostavke o praktičnoj primjene rezultata simulacije parcijalnih pražnjenja na softverskom modelu kablovskog voda, se ovdje završava.

IV. ZAKLJUČAK

Ispitivanje parcijalnih pražnjenja predstavlja nezaobilazan segment savremenih metoda dijagnostike i prevencije kvarova u izolaciji energetskih kablova. Postupak ispitivanja parcijalnih pražnjenja karakteriše složenost u tehničkom i visoka cijena ekonomskom pogledu. Modelovanje parcijalnih pražnjenja na računaru se izvodi s ciljem dobijanja informacija o procesu, unaprijed i bez nepotrebnog rizika ili velikih troškova. U radu je izvršena simulacija parcijalnih pražnjenja na modelu kablovskog voda uz pomoć programa MATLAB/SIMULINK. Predmetni model je usklađen sa standardima i preporukama, kojima je definisana oblast ispitivanja parcijalnih pražnjenja u praksi. Uvažavajući prikazane rezultate pretpostavlja se da simulacija procesa na modelu može biti korisno upotrijebljena u praktičnim ispitivanjima i to u svrhu prepoznavanja pojave i lociranja izvora parcijalnih pražnjenja. Na osnovu prikazanih rezultata, takođe se zaključuje, da je ograničenje, u primjeni simulacije u slučajevima izrazito kratkotrajnih pobudnih struja, usklađeno sa odredbama standarda, kojima je definisan postupak baždarenja mjerno-ispitnog kola u praksi.

LITERATURA

- [1] Jugoslovenski standard JUS N.C0.042 Ispitivanje energetskih kablova, Mjerenje parcijalnih pražnjenja (1990).
- [2] Jugoslovenski standard JUS N.A5.530 Visokonaponska ispitivanja, Mjerenje parcijalnih pražnjenja (1990).
- [3] Miodrag V. Simović, Zoran Lazarević, “Uloga softverskog modela u lociranju izvora parcijalnih pražnjenja”, XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, ENS-1-5, Jahorina, mart 2012.
- [4] Miodrag V. Simović, Zoran Lazarević, “Potencijalne primjene simulacije parcijalnih pražnjenja”, XI Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA, ENS-1-6, Jahorina, mart 2012.
- [5] CEI 60076-3 Transformateurs de puissance, Niveaux d'isolement essais diélectriques et distances d'isolement dans l'air Commission Électrotechnique Internationale (2000).
- [6] Tehnička preporuka br. 3, Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskog pribora u elektrodistributivnim mrežama 1kV, 10kV, 20kV, 35kV i 110kV, JP EPS-Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd, 2012.

ABSTRACT

This paper includes modelling of partial discharges in power cable insulation, using the MATLAB programme. The results of simulation show that partial discharges can be detected by recording the currents through the measuring capacitors. From the aspect of a potential application of the simulation results in practical testings, it can be concluded that they can serve as a significant support to defining the power cable point assumed to contain the source of partial discharges.

MODELLING OF PARTIAL DISCHARGES IN POWER CABLE INSULATION

Miodrag V. Simović, Zoran Lazarević, Miroslav Tuvic