

Lokalizacija parcijalnih pražnjenja u simuliranom kablovskom sistemu metodom impulsne reflektometrije

Bojana Škrbić

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
bskrbic@etf.rs

Mileta Žarković

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme
Elektrotehnički fakultet
Beograd, Srbija
miletat@etf.rs

Sažetak—Monitoring parcijalnih pražnjenja (PP) predstavlja efikasno sredstvo za povećanje pouzdanosti i raspoloživosti elektroenergetske opreme koji omogućava pravovremeno donošenje odluka o njenom održavanju, remontu i zameni. Pri tom je za minimizaciju troškova od interesa lokalizovati defektну izolaciju koja je izvor parcijalnih pražnjenja. U lokalizaciji PP-a u izolaciji energetskih kablova veliku primenu ima metoda impulsne reflektometrije. U ovom radu prikazan je aproksimativni postupak lokalizacije izvora PP-a u izolaciji energetskog kabla koji se bazira na metodi impulsne reflektometrije i rezultatima numeričkih simulacija prostiranja impulsa PP-a po energetskom kablu.

Ključne reči – energetski kabl; lokalizacija parcijalnih pražnjenja; impulsna reflektometrija; numerička simulacija

I. UVOD

Degradacija izolacije jedan je od najčešćih uzroka kvarova na elektroenergetskim kablovima. Šupljine u nekorektno instaliranim spojnicama i izolaciji kabla predstavljaju slaba mesta na kablu i potencijalan izvor PP-a. Merenje PP-a sve češće se izvodi kao deo *online* monitoring sistema i predstavlja neinvazivnu metodu kojom se pouzdano blagovremeno određuje stanje izolacije. PP predstavljaju pouzdan indikator početne faze nastanka kvara čije rano dijagnostikovanje može spričiti neplanirane ispade potrošnje, havarije i troškove koji ih prate [1]. Informacija o tačnoj poziciji izvora PP je generalno osnova optimizacije održavanja opreme u pogledu njenog maksimalnog iskorišćenja i redukcije troškova održavanja kao i smanjenje vremena prekida pogona pri nastanku kvara.

Za lokalizaciju izvora PP-a u energetskim kablovima najčešće se primenjuju sledeće metode [2]: metoda impulsne reflektometrije, metoda analize trenutaka pristizanja određenog impulsa u različite tačke duž kabla, analiza u frekvencijskom domenu impulsa merenog u različitim tačkama duž kabla.

U ovom radu prikazuje se postupak aproksimativne lokalizacije izvora parcijalnih pražnjenja u izolaciji energetskog kabla koji se bazira na rezultatima numeričkih simulacija prostiranja parcijalnih pražnjenja po energetskom kablovskom vodu. Numerički model razvijen je korišćenjem Simulink modula programskog alata MATLAB®. Cilj rada je

da se unapred prikaže scenario odvijanja procesa u slučaju pojave parcijalnih pražnjenja i da se isti prepozna radi lokalizacije i izolovanja segmenta kabla sa defektnom izolacijom koja predstavlja izvor parcijalnih pražnjenja.

II. MODELOVANJE I NUMERIČKA SIMULACIJA PARCIJALNIH PRAŽNENJA NA ENERGETSKOM KABLУ

Metoda impulsne reflektometrije ima dugu praksu u lokalizaciji izvora parcijalnih pražnjenja. Ova metoda koristi osobine povorke refleksija jednog impulsa parcijalnog pražnjenja od krajeva kabla. Tačnost kojom se određuje pozicija izvora PP-a je tipično unutar 1 % dužine kabla [3]. Za primenu ove metode signal PP-a mora biti opservabilan na kraju voda. Naime, pri propagaciji impulsa duž voda više učestanosti u njegovom spektru trpe veće slabljenje, što prouzrokuje izobličenja koja se ogledaju u povećanju širine impulsa, smanjenju nagiba prednje ivice i smanjenju amplitude, a to za posledicu ima povećanje mrtve zone i povećanje nesigurnosti u pogledu odlučivanja o tačnom položaju podnožja i vrha reflektovanog impulsa, odnosno tačnom položaju mesta nehomogenosti talasne impedanse kabla.

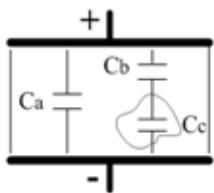
Merenje signala PP-a može se izvoditi sa jedne ili sa obe strane kablovskog voda [4]. Dvostrano merenje obezbeđuje veću osetljivost, koja je potrebna kod kablova većih dužina.

Za primenu metode impulsne reflektometrije neophodno je poznavati brzinu prostiranja elektromagnetskih impulsa po kablovskom vodu. Ona se određuje eksperimentalnim merenjem korišćenjem uređaja koji se naziva impulsni reflektometar. Reflektometar se sastoji se iz generatora test signala, koji može biti *Thevenin*-ovog ili *Nortonon*-ovog tipa, i osciloskopa. Generator reflektometra šalje impuls ka ispitivanom kablu, impuls se reflektuje od svih tačaka diskontinuiteta talasne impedanse kabla i putuje nazad ka reflektometru. Osciloskop iscrtava vremenski oblik pristiglih signala. Na osnovu vremena koje je potrebno da se reflektovani signal pojavi na ekranu oscioskopa određuje se rastojanje do diskontinuiteta, a na osnovu intenziteta reflektovanog talasa određuje se koeficijent refleksije i procenjuje priroda impedanse u posmatranoj tački. Impulsni

reflektometar se ne sme priključiti na kabl pod naponom. Isključenje kabla sa mreže moglo bi se izbeći ako bismo brzinu prostiranja talasa procenili na drugi način – numeričkom simulacijom prostiranja signala parcijalnih pražnjenja po konkretnom kablju u pogonu. U ovom radu izložen je postupak aproksimativne lokalizacije izvora PP-a na osnovu postojećih snimaka signala PP-a primenom metode impulsne reflektometrije na numerički model konkretnog kabla koji se ispituje. Na osnovu rezultata simulacija razvijenog modela formirana je referentna slika signala PP-a sa kojom bi se uporedivali eksperimentalno dobijeni snimci PP-a i približno odredila pozicija defekta na izolaciji. Ovim postupkom izbegla bi se upotreba dodatne opreme kao što je impulsni reflektometar. Štaviše, ukoliko bi se merenje parcijalnih pražnjenja vršilo na kablu u pogonu, u potpunosti bi se izbegao prekid pogona radi dijagnostikovanja stanja kabla i lokalizacije defektne izolacije.

A. Modelovanje

Slaba mesta u izolaciji kabla nastaju u vidu gasnih šupljina ili pukotina. U šupljinama se čak i pri relativno niskim naponima pojavljuju PP, koja sa porastom vremena smanjuju površinsku otpornost šupljina. Odnos električnih naprezanja u gasnoj šupljini i okolnom dielektriku je približno obrnut odnosu njihovih permitivnosti. Manja dozvoljena jačina električnog polja u šupljini i manja dielektrična kostanta gasa dovode do PP u šupljini. Usled PP šupljina postaje provodna, smanjujući izolaciono rastojanje i izolovanost elementa. Rezultat ovakve pojave je dalja degradacija izolacije koja može dovesti do trajnog defekta i skraćivanja vremena ispravnog rada elementa. Na Sl. 1. prikazan je fizički model izolacije nekog elementa sa prisutnom šupljinom. Ispravni deo izolacije ima jednu kapacitivnost C_a , a deo sa šupljinom se modeluje rednom vezom kapacitivnosti šupljine C_c i ostalog dela izolacije C_b .



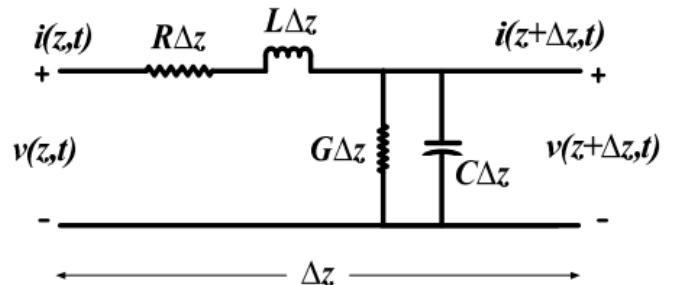
Slika 1. Fizički model izolacije sa šupljinom

Unutar šupljine mnogo lakše dolazi do probaja nego u izolaciji jer je električno polje veće i manji je probajni napon. Što je šupljina, pukotina veća, veća je i kapacitivnost C_c i lakše dolazi do PP. Kako se šupljina širi, dolazi do degradacije izolacije čija se ukupna impedansa izolovanosti, Z_{izo} , smanjuje:

$$\frac{1}{Z_{izo}} = \frac{1}{j\omega C_a} + \frac{1}{\frac{1}{C_b} + \frac{1}{C_c}} \quad (1)$$

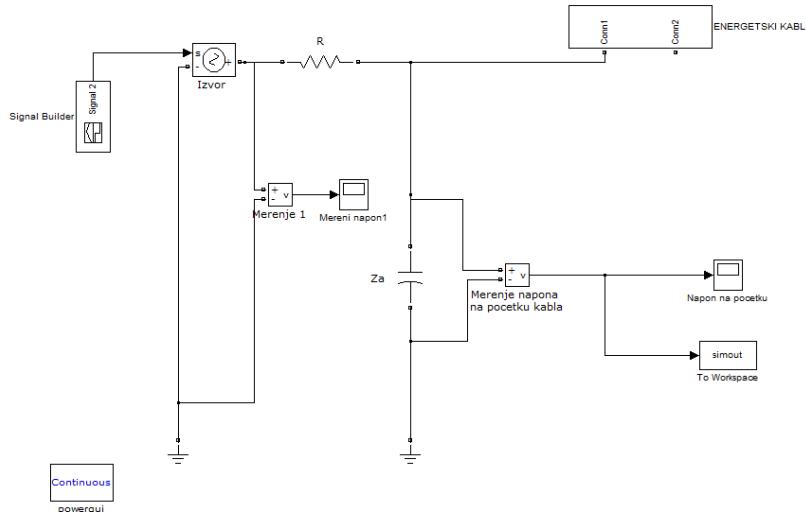
U trenutku probaja dolazi do PP koje je praćeno neutralizacijom količine elektriciteta kojim je bila opterećena kapacitivnost šupljine C_b . Probojem u šupljini dielektrika dolazi do povećanja ukupne kapacitivnosti izolacije. Na osnovu predstavljenog kapacitivnog modela defektne izolacije modelovana je defektna izolacija segmenta energetskog kabla [5]. Parametrima modela dodeljene su vrednosti $C_a=3\mu F$, $C_b=2\mu F$, $C_c=1nF$.

Energetskom kablu injektira se Dirac-ov naponski impuls. Kako bi se posmatralo prostiranje ovog signala po kablu, kabl je modelovan distribuiranim parametrima (slika Sl.2): podužnom otpornošću $R(\frac{\Omega}{km})$, induktivnošću $L(\frac{H}{km})$, kapacitivnošću $C(\frac{F}{km})$ i odvodnošću $G(\frac{S}{km})$. Na slici Sl. 2 $v(z, t)$ i $i(z, t)$ označavaju redom napon i struju u tački na udaljenosti z od početka kabla. Radi formiranja zona kvara kabl je podeljen na 8 segmenata. Model defektne izolacije je povezan u šemu između jednog para susednih segmenata. U prilog segmentiranju kabla pri lokalizaciji kvara ide činjenica da tačnu brzinu prostiranja signala ne poznajemo, odnosno model kabla nije savršen. Parametri kabla mogu se dobiti od proizvođača ali se oni razlikuju od stvarnih zbog raznih faktora: procesa proizvodnje, starenja kabla, prodiranja vlage, vrste tla u koje se kabl polaže. Zatim, pri određivanju vremenskog pomeraja između originalnog i reflektovanog impulsa čini se greška usled izobličenja impulsa pri prostiranju po kablu i prisustva šuma. Prema tome, broj segmenata kabla određuje preciznost koja se zahteva od poznavanja brzine prostiranja odnosno preciznost sa kojom se želi odrediti pozicija izvora PP-a.

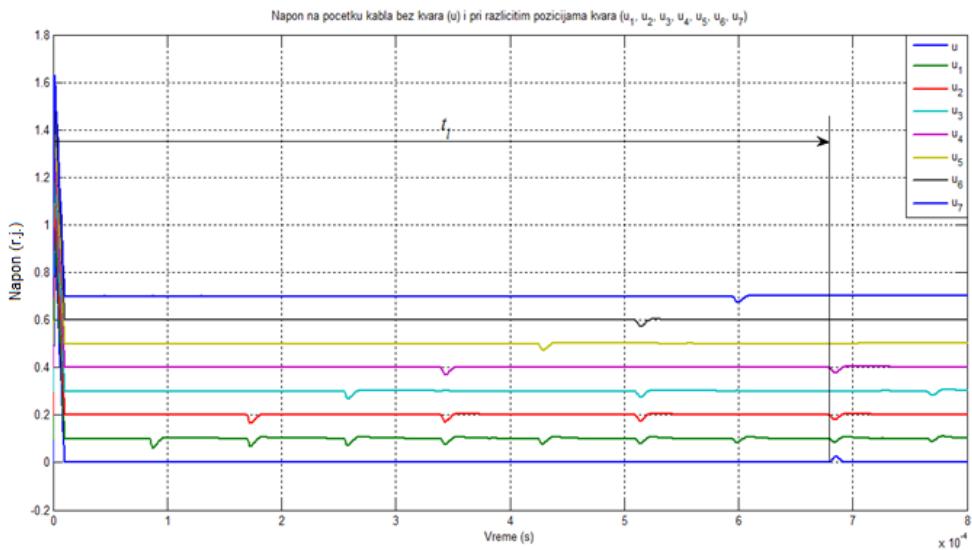


Slika 2. Model kablovskog voda dužine Δz .

Za formiranje referentne slike signala PP dovoljno je merenje napona se vrši samo na jednom kraju kabla. Formirani model energetskog kabla i reflektometrijskih merenja na njemu prikazan je na slici Sl. 3.



Slika 3. Model energetskog kabla i reflektometrijskih merenja na njemu.



Slika 4. Referentna slika signala parcijalnih pražnjenja.

B. Simulacija

Opisani model može se iskoristiti za formiranje referentne slike signala PP-a koja bi se upoređivala sa rezultatima merenja PP-a, čime bi se utvrdila pozicija eventualnog kvara (ili kvara u začetku) tokom eksploracije [6]. Za svaku od 7 mogućih pozicija defekta na izolaciji izvršena je simulacija modela. Dobijeni rezultati merenja napona prikazani su na Sl. 4 pri čemu su prethodno translirani po naponskoj osi radi bolje preglednosti. Segmenti kabla definisu zone u kojima će se izolovati parcijalni kvar.

Strujni impuls, dakle, putuje duž kabla do mesta šupljine koja predstavlja tačku promene talasne impedanse kabla. Stoga u toj tački dolazi do pojave prelamanja i refleksije ovog signala. Nastankom šupljine u izolaciji dolazi do lokalnog povećanja kapacitivnosti kabla prema zemlji, stoga je reflektovani impuls struje obrnutog polariteta. Ova struja se meri indirektno – merenjem napona na mernoj impedansiji,

vezanoj otočno prema zemlji za jedan kraj kabla. Intenzitet parcijalnih pražnjenja karakteriše se količinom proteklog (tzv. prividnog nalektrisanja), ali to neće biti analizirano. Pod pretpostavkom da je ustanovljen značajan nivo parcijalnih pražnjenja, u nastavku su prikazani rezultati simulacije merenja odziva PP-a i izložen je postupak lokalizacije defekta na izolaciji.

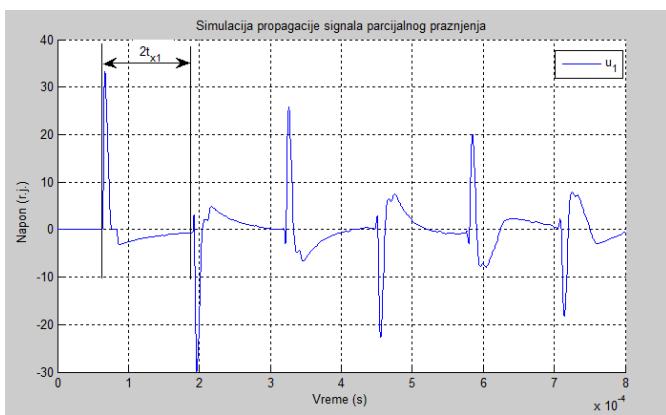
III. POSTUPAK LOKALIZACIJE IZVORA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Postupak lokalizacije izvora parcijalnih pražnjenja sastoji se iz sledećih koraka:

- Referentna slika:* Primenom opisanog MATLAB modela formira se referentna slika odziva parcijalnih pražnjenja za dati kabl u pogonu.

2. *Eksperimentalno merenje:* Merenje odziva parcijalnih pražnjenja na otvorenom kraju kabla u pogonu.
3. *Analiza snimljenih impulsa parcijalnih pražnjenja:* Potrebno je identifikovati korespondirajuće parove naponskih impulsa koji nastaju tokom jedne periode mrežnog napona. Zatim treba odrediti vremenski pomeraj između uparenih impulsa: detekcijom vrha impulsa ili početka impulsa. Detekcija početka impulsa je tačnija iz razloga što izobličenjem signala pri propagaciji duž voda dolazi do pomeranja vrha impulsa.
4. *Lokalizacija segmenta kabla sa defektom izolacijom:* Upoređenjem vremenskog pomeraja između izmerenih naponskih impulsa sa referentnom slikom odziva datog kabla na parcijalna pražnjenja može se odrediti segment kabla na kojem se nalazi defekt u izolaciji.

Radi ilustracije ovog postupka simuliran je mereni signal parcijalnih pražnjenja. Na red sa modelom šupljine, na udaljenosti x_1 od kraja kabla gde se vrši merenje napona (u_1), priključen je strujni generator i injektiran je Dirac-ov strujni impuls koji predstavlja parcijalno pražnjenje. U trenutku $t = 0$ je započeto merenje napona u_1 . U izmerenom naponskom signalu uočava se višestruko reflektovan injektirani signal. Prva dva impulsa su najpogodnija za ovu analizu. Vremenski pomeraj između ovih impulsa odgovara dvostrukoj udaljenosti mesta kvara od početka kabla gde se vrši merenje napona. Naime, nakon vremena t_{x_1} injektirani naponski signal stiže do početka kabla i reflektuje se od njega, putuje nazad do mesta kvara, reflektuje se od mesta kvara i opet putuje do početka kabla. Refleksije signala se ponavljaju sve dok se signal sasvim ne priguši. Izmereni napon na početku kabla prikazan je na slici Sl.4.



Slika 4. Simulacija propagacije signala parcijalnog pražnjenja.

Na osnovu slika Sl.3 i Sl.4 može se zaključiti da važi $t_1 \cong 0.8 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, $t_2 \cong 1.6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, $2t_{x_1} \cong 1.3 \cdot 10^{-4} \text{ s}$. Stoga je:

$$t_1 < 2t_{x_1} < t_2 \quad (2)$$

$$x_1 = l \frac{2t_{x_1}}{2} \quad (3)$$

odakle sledi da se kvar nalazi na drugom segmentu. Stoga je moguće izolovati mesto kvara od ostatka kabla tako što će se izvršiti zamena samo drugog segmenta.

Za analizu rezultata realnih merenja važno je uočiti sledeće: polaritet impulsa se menja pri refleksiji od šupljine dok pri refleksiji od otvorenog kraja kabla ostaje isti. Stoga je moguće uočiti korespondirajuće parove impulsa ukoliko se poštuje redosled kojim impulsi različitih parcijalnih pražnjenja stižu do tačke u kojoj se vrši merenje napona. Teškoće se javljaju pri dijagnostikovanju kablova kod kojih imamo višestruke šupljine raspoređene duž kabla, zatim kod kablova izloženim velikim elektromagnetskim smetnjama. S obzirom na veliki broj impulsa opisani postupak bi trebalo da se radi softverski.

Prednosti date numeričke simulacije su što ne zahteva nikakav generator impulsa za nalaženje mesta kvara kao što je impulsni reflektometar već se koristi sam mrežni napon koji uzrokuje pojavu parcijalnih pražnjenja odnosno koriste se samo merenja postojećeg sistema za monitoring. Merenja se vrše pri radnom naponu stoga ne dolazi do prenaprezanja izolacije. Referentna slika odziva nam olakšava dijagnostikovanje stanja izolacije direktnom vizuelnom inspekcijom. Dakle, postupak lokalizacije izvora parcijalnih pražnjenja je jednostavan, neinvazivan i ne zahteva dodatna ulaganja u opremu ako već postoji mogućnost da se izvode merenja parcijalnih pražnjenja.

IV. ZAKLJUČAK

Predstavljeni model i simulacija u potpunosti odgovaraju teorijskim objašnjenjima parcijalnih pražnjenja. Rezultati simulacije prvenstveno se mogu primeniti za lociranje dela kabla sa kvarom. S obzirom na kompleksnost realnih mernih podataka, opisani postupak lokalizacije izvora parcijalnih pražnjenja ima smisla implementirati u softver za automatsku analizu snimaka signala parcijalnih pražnjenja. Formirani model može se iskoristiti za kalibraciju impulsnog reflektometra, mernih impedansi i naponskog delila pre izlaska na teren, a takođe može poslužiti i u edukativne svrhe. Konstruisanjem modela kabla i merne opreme omogućena je modifikacija parametara radi uvažavanja specifičnih osobina kabla i okoline u kojoj se ispituje, podešavanja osetljivosti i eliminisanja negativnih pojava.

LITERATURA

- [1] S. Boggs and J. Densley, "Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing", IEEE Electr. Insul. Mag.e, Vol. 16, No. 5, pp. 13-18, 2000.
- [2] F. Puletti, M. Olivieri, A. Cavallini, G. C. Montanari, Localization of Partial Discharge Sources along HV and MV Cable Routes, Power Engineering Conference, 2005. IPEC 2005. The 7th International, Nov. 29 2005-Dec. 2 2005.
- [3] B. Howarth, M. Coates, and L. Renforth, "Fault Location Techniques for One of the World's Longest AC Interconnector Cables," in IEE ACDC International Conference on AC and DC Power Transmission, 2006, pp. 14-18.
- [4] M. Wild, S. Tenböhnen, E. Gulski, R. Jongen, F. de Vries, "Practical aspects of PD localization for long length Power Cables", 2013

- Electrical Insulation Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2 to 5 June 2013.
- [5] Z. Stojković, Mileta Žarković, Tomislav Rajić, "Simulacija parcijalnih pražnjenja i njihovog merenja", 32. Savetovanje CIGRE Srbija, 17. - 21. Maj 2015.
- [6] D. Clark, R. Mackinlay, R. Giussani, L. Renforth, R. Shuttleworth, "Partial Discharge Pulse Propagation, Localisation and Measurements in Medium Voltage Power Cables", Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities', 2-5 Sept. 2013.

ABSTRACT

Partial discharge (PD) monitoring represents an effective means for the improvement of dependability and reliability of the power system apparatus, which provides timely decision making about its maintenance, repair and replacement. For the

minimization of costs it is of interest to localize defected insulation, which is the source of partial discharges. Time-domain reflectometry method is widely used for localization of PD sources in power cable insulation. An approximate procedure for the localization of PD sources in power cable insulation, based on time-domain reflectometry method and numerical simulation of their propagation in power cable, are presented in this article.

PARTIAL DISCHARGE LOCALIZATION IN SIMULATED POWER CABLE SYSTEM USING TIME- DOMAIN REFLECTOMETRY METHOD

Bojana Škrbić, Mileta Žarković