

Procena stanja izolacije kablovskog voda 20 kV tip NPHO 13 nakon oštećenja izazvanog atmosferskim pražnjenjem

Ninoslav Simić¹, Jovan Mrvić¹, Ranko Jasika¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
ninoslav.simic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je prezentovan jedan pristup ispitivanju starog kabla oštećenog tokom atmosferskih pražnjenja. Dat je opis kabla i predložen je redosled realno mogućeg niza ispitivanja u cilju procene stanja izolacije. Najpre su dati i objašnjeni rezultati otpora izolacije i kapaciteta, dobijeni jednosmernim ispitnim naponom. Potom su tumačeni rezultati ispitivanja otpora izolacije, kapaciteta i detaljno predstavljene vrednosti faktora dielektričnih gubitaka $tg\delta$, dobijeni pri različitim vrednostima sinusnog napona učestanosti 0,1Hz(VLF). Na primeru je pokazana dobra vrednost $tg\delta$, kao i proboj u izolaciji kabla i istaknute su promene izmerenih parametara kabla tokom ispitivanja. Naglašena je prednost procene stanja izolacije metodom merenja faktora dielektričnih gubitaka. Na kraju je istaknut značaj sistemskog prikupljanja podataka za određeni tip kabla i mogućnost da se sa minimalnim naprezanjem izolacije odredi preostali životni vek.

Cljučne reči: kabl, otpor izolacije, faktor dielektričnih gubitaka $tg\delta$, kapacitet, jednosmerni ispitni napon, VLF (vrlo mala frekvencija).

1. Uvod

Ispitivanje kablovskih vodova na terenu je tehnički izuzetno zahtevno, zbog nemogućnosti da se obezbede odgovarajući izvori napajanja za sve vrste kablova. Naime, snaga i masa ispitne opreme, otežan prilaz kablovima na kablovskim trasama i u transformatorskim stanicama, potrebno vreme za ispitivanje, te cena opreme uslovljavaju da se u praksi najčešće sreću merna kola (kombi vozila) koja kao deo opreme uvek imaju jednosmerni [1] [2] [3] i/ili VLF (very low frequency) izvor napajanja [4]. S druge strane različiti naponski nivoi i tipovi izolacije kablova (impregnirani papir u ulju, umreženi polietilen, plastična izolacija...) zahtevaju primenu različitih standarda i metoda ispitivanja[5]. Otežavajuća okolnost je i da su kablovi pretežno kapacitivno opterećenje, naročito izraženo pri velikim dužinama. Metode ispitivanja

izolacije podnosivim naponom u definisanom vremenskom intervalu su stresne za izolaciju i pri tom daju samo trenutni rezultat, bez mogućnosti procene stanja izolacije u dužem vremenskom periodu. Ovim metodama su posebno ugroženi stari kablovski vodovi, koji bi u slučaju proboja tokom ispitivanja bili van pogona, a njihova dalja upotreba neizvesna.

U tom kontekstu, u ovom radu se prikazuje prednost korišćenja metode procene stanja izolacije na osnovu ispitivanja faktora dielektričnih gubitaka $\text{tg}\delta$ (VLF sinus). Ovaj pristup ispitivanju kabla, ima za cilj što manje naprezanje izolacije uz praćenje trenutnih rezultata tokom ispitivanja i pravovremeno reagovanje ispitivača.

2. Opis kablovskog voda

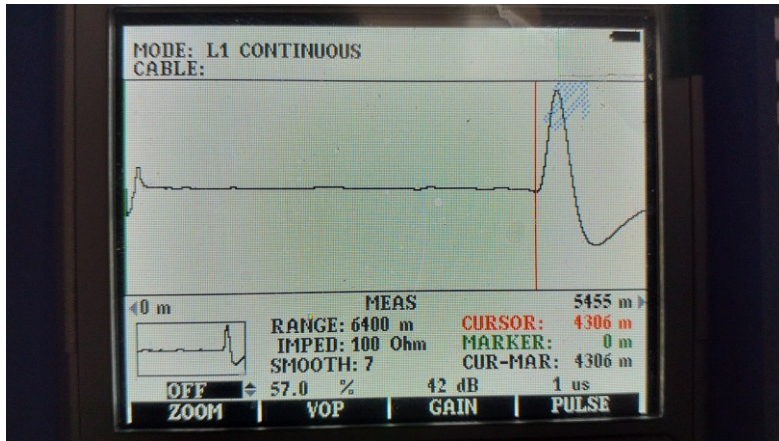
Kabl NPHO Cu 3x35 mm² je u dugogodišnjoj upotrebi od 1977. godine i izložen je velikim naprezanjima usled atmosferskih pražnjenja. Ovaj kabl je jedini vid napajanja objekta postavljenog na vrhu planine. Kablovska trasa ide velikom strminom, kabl je smešten u Faradejev kavez, a njegov električni plašt i dodatno Faradejev kavez povezuju uzemljivače dva elektroenergetska postrojenja. Kabl je, u ranijim godinama, na dva mesta saniran istim tipom kabla, ali sa aluminijskim provodnikom preseka 3x50 mm². Kabl NPHO13 (za 20 kV) se primenjuje za koso ili vertikalno polaganje. Radi se o trožilnom ekranizovanom kablju impregnisanim papirom sa plaštom od olova ili olovnih legura. Jezgro kabla je u polučvrstom kompaundu.

Prema prikupljenim podacima, kablovski vod je izložen čestim atmosferskim pražnjenjima. U poslednjem događaju zaštitni uređaj je isključio kabl, ali je kasnije kabl vraćen u pogon. Tokom eksploatacije kabl nije bio termički opterećen, jer su struje kroz kabl reda 20-50% od projektovanih vrednosti. Faradajev kavez je na nekoliko mesta oštećen u prethodnim događajima.

Sa obzirom na prioritet napajanja postrojenja na vrhu planine (radio relejni čvor, objekti od državnog značaja), postavljen je cilj da se proceni stanje izolacije kabla, bez trajnog oštećenja kabla tokom ispitivanja.

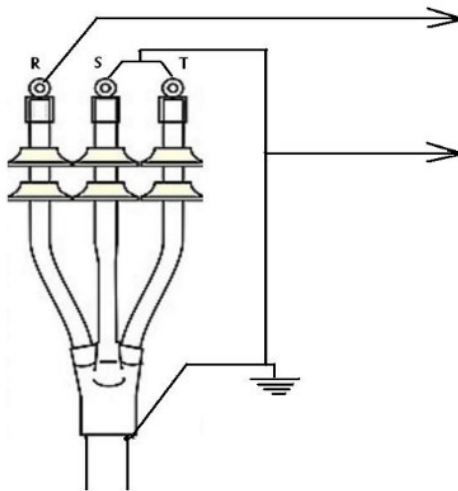
3. Ispitivanje električnog izolacionog sistema energetskog kabla

U cilju određivanja podužnih vrednosti kapaciteta, kao i sagledavanja eventualno loših mesta na izolaciji i spojnica kabla, početno ispitivanje je obavljeno reflektometrom. Izmerena je i dužina kablovskog voda i ona iznosi 4306 metara (slika 1). Reflektometrom nisu uočene značajnije neregularnosti duž kabla.



Slika 1. Određivanje dužine kablovskog voda

U cilju određivanja mogućnosti daljeg naponskog ispitivanja kabla, obavljena su prva merenja otpornosti izolacije i kapaciteta. Rezultati ovih ispitivanja su dati u tabelama 1 i 2. Ispitivanje izolacionog sistema energetskih kablova obavljeno je za svaku kablovsku žilu, pri čemu su ostale dve žile uzemljene zajedno sa plaštom kabla.

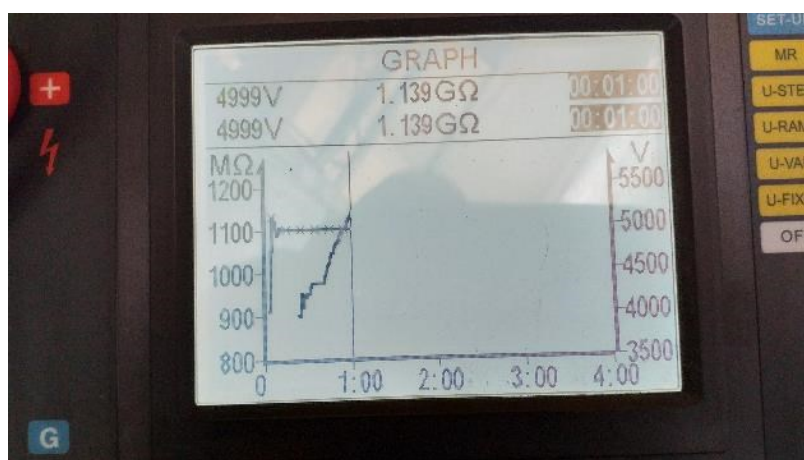


Slika 2: Šema veza pri ispitivanju elektroizolacionog sistema faze „R“

3.1. Ispitivanje električnog izolacionog sistema energetskog kabla jednosmernim naponom (izolacioni otpori, kapacitet)

Tabela 1. Rezultati ispitivanja izolacije, ispitni jednosmerni napon 5 kV

faza	Otpornost izolacije provodnika posle 1 minut $R_{iz_{60s}}$ [M Ω]	DAR $R_{iz_{60s}}/R_{iz_{30s}}$
R	883	1,18
S	1139	1,20
T	329	1,07



Slika 3. Grafički prikaz promene otpora izolacije faze S tokom jednogminutnog ispitivanja naponom 5KV DC

Tabela 2. Rezultati merenja kapaciteta izolacije provodnika, pri 5 kV DC

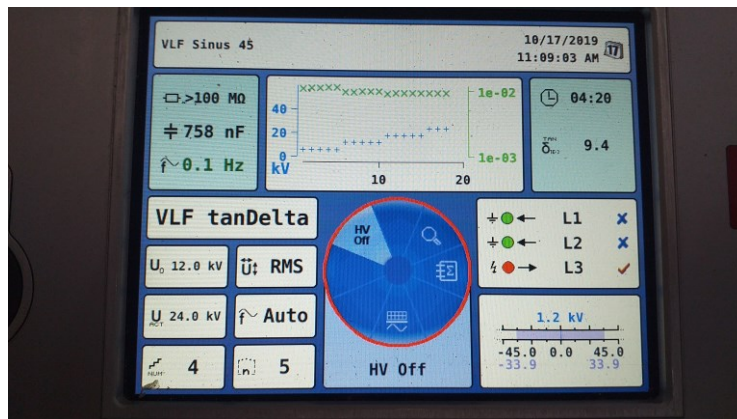
faza	Vrednost kapaciteta [nF]	Vrednost podužnog kapaciteta [nF/km]
R	753	174,8
S	752	174,6
T	757	175,8

Očekivana struja punjenja kabla, na osnovu izmerene vrednosti kapaciteta je 0,33 A/km, odnosno 1,45 A za dati kabl. Kabl radi u izolovanoj mreži 10 kV.

Kao što se vidi iz tabela, postoje određena odstupanja parametara između faza kablovskog voda. Prema dosadašnjem iskustvu, dobijene vrednosti otpora izolacije su dovoljno velike, oblik krive (slika 3) je veoma dobar, ali odstupanje vrednosti u fazi T, ukazuje na moguća oštećenja. Sa obzirom da su vrednosti kapaciteta približno jednake, pristupilo se daljim ispitivanjima. Pri tome je odabran opseg napona od $0,5U_0$ do $2U_0$, u skokovima od $0,5U_0$. Za dati kabl je $U_0=12$ kV.

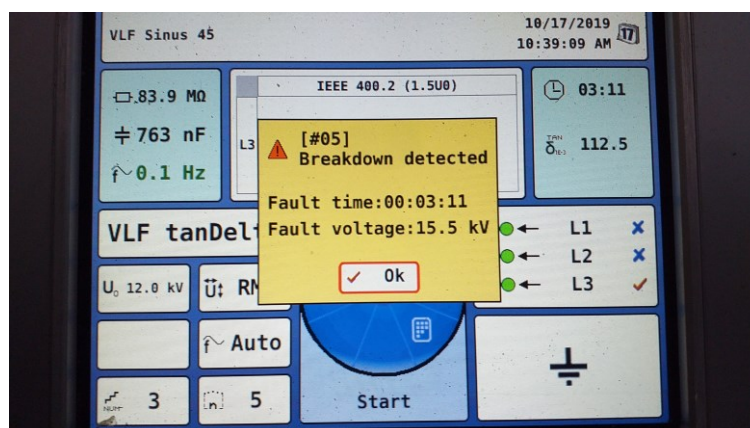
3.2. Ispitivanje električnog izolacionog sistema energetskog kabla naizmeničnim naponom (izolacioni otpori faktor dielektričnih gubitaka i kapacitet)

Ispitivanje izolacije provodnika trožilnog kabla, je obavljeno naizmeničnim, sinusnim ispitnim naponom frekvencije 0,1 Hz u cilju merenja $\tan \delta$ (faktora dielektričnih gubitaka). Vreme ispitivanja je oko 1 minut za svaku vrednost ispitnog napona. Na slici 4 je dat vizuelni prikaz faktora dielektričnih gubitaka tokom ispitivanja u fazi S.



Slika 4. Vrednosti $\tan \delta$ kabla tokom ispitivanja (predstavljen zelenom bojom) u funkciji ispitnog napona (predstavljen plavom bojom), faza S

Primećuje se stabilna vrednost $\tan \delta$ za svaku vrednost ispitnog napona, i ovo je uobičajena slika za dobru kablovsku izolaciju. S druge strane, ako postoje značajne promene vrednosti $\tan \delta$ tokom ispitivanja, tada se sa može očekivati proboj izolacije (slika 5, tabela 3).



Slika 5. Proboj u fazi T kabla tokom ispitivanja

Tabela 3. Rezultati ispitivanja faktora gubitaka u funkciji napona $U_0=12$ kV, $f=0,1$ Hz

Faza	Vrednost ispitnog napona	Riz(M Ω)	C (μ F)	tg δ $\times 10^{-3}$	Stand. devijacija σ
R	6 kV (0,5 U_0)	>100	758	11,8	0,29
	12 kV (1 U_0)	>100	758	9,7	0,16
	18 kV (1,5 U_0)	>100	758	9,3	0,12
	24 kV (2 U_0)	>100	758	9,4	0,09
S	6 kV (0,5 U_0)	>100	760	15	0,24
	12 kV (1 U_0)	>100	760	12,8	0,10
	18 kV (1,5 U_0)	>100	760	12,0	0,09
	24 kV (2 U_0)	>100	760	12,2	0,10
T	6 kV (0,5 U_0)	>100	763	21,7	0,3
	12 kV (1 U_0)	>100	763	22,2	-
	18 kV (1,5 U_0)	83,9	763	112,5	Proboj!
	24 kV (2 U_0)	-	-	-	-

Dakle, prilikom ovog ispitivanja u izolaciji faze S, pri naponu 15,5 kV nastupio je proboj, u trećem minutu ispitivanja (prvi minut pri 6 kV, drugi minut 12 kV, treći minut pokušaj podizanja napona na 18 kV– proboj pri 15,5 kV) Proboj je bio očekivan zbog velike promene vrednosti tg δ koja je nastupila tokom ispitivanja. Shodno tome, uočen je i pad otpora izolacije Riz pri naizmeničnom naponu, pre proboja. Ove vrednosti otpora se svakako veoma razlikuju od vrednosti otpora izolacije koje se dobijaju ispitivanjem jednosmernim naponom i zbog toga je u ovakvim slučajevima od velike važnosti iskustvo ispitivača, koji može zaustaviti tok ispitivanja pre proboja. U ovom slučaju, cilj je bio dokazati da je izolacija oštećena i da je to uzrok čestih proboja u eksploataciji. Pošto se radi o izolaciji od uljem impregnisanog papira, jasno je da je moguća delimična regeneracija izolacije, te se sačekalo sa ponovnim ispitivanjem oko sat vremena. Nakon toga je ponovo izmerena vrednost kapaciteta istim merilom koje je korišćeno za rezultate predstavljene u tabeli 2.

Tabela 4. Rezultati merenja kapaciteta izolacije provodnika, pri 5 kV DC

faza	Vrednost kapaciteta [nF]	Vrednost podužnog kapaciteta [nF/km]
R	753	174,8
S	752	174,6
T	779	181,2

Kao što se vidi, u odnosu na prethodne rezultate, vidljiv je porast kapaciteta na fazi na kojoj je došlo do proboja. Izolacija kabla je izdržala ponovljeno ispitivanje naponom $U_0=12$ kV. Nakon toga, kabl je vraćen u pogon i tom prilikom nije bilo vizuelnog signala postojećeg zemljospoja.

Na osnovu rezultata ispitivanja konstatuje se da je izolacija ispitivanog kabla izuzetno oslabljena i da se kabl može označiti kao veoma star. Sa obzirom na nemogućnost prilaska kablovskoj trasi celom dužinom, te na uslove rada tokom dugogodišnje eksploatacije, predložena je zamena kablovskog voda. Dodatno, ako se u obzir uzme činjenica da kabl radi u izolovanoj 10 kV mreži, te da postoji još mnogo dalekovodnih izvoda iz transformatorske stanice, tada postoji realna opasnost da prilikom pojavljivanja zemljospoja negde u mreži, nastupi proboj zbog porasta faznog napona, upravo na ispitivanom kablju. Time bi se stvorili uslovi za postojanje dvostrukog kvara, koji bi zbog uspostavljanja velike struje kratkog spoja napregao elektroenergetsku opremu u transformatorskoj stanici.

4 Zaključak

Ispitivanje kablovskog voda u dugogodišnjoj eksploataciji zahteva specifičan pristup koji zavisi od trase, starosti kabla, eksploatacionih uslova, tipa izolacije, vrste provodnika, naponskog nivoa, uslova uzemljenja mreže itd. Treba težiti primeni standardnih metoda ispitivanja, a u slučajevima kada to nije primenljivo, može se primeniti set ispitivanja koji je dogovoren između vlasnika kablovskog voda i ispitivača. Kao alternativa ispitivanju izolacije podnosivim naponom može se koristiti ispitivanje faktora dielektričnih gubitaka, sa maksimalnim naponom $2U_0$.

U ovom radu su detaljno prikazani rezultati i tok ispitivanja faktora dielektričnih gubitaka na jednom 20 kV kablju, sa izolacijom od impregnisiranog papira. Pokazano je da dolazi do vidljive promene vrednosti kapaciteta, otpora izolacije i faktora dielektričnih gubitaka $tg \delta$ pre proboja. Kabl je nakon ispitivanja uspešno vraćen u pogon. Sa obzirom na stanje izolacije ispitivanog kabla, za očekivati je da se sledeći proboj dogodi pri prvom prenaponu u mreži, bilo da potiče od atmosferskog pražnjenja ili eventualno od zemljospoja.

Veliki broj ispitivanja na kablovima istog tipa uveliko olakšava donošenje zaključka, a grafički prikaz promene $tg \delta$ u funkciji ispitnog napona pomaže u boljem sagledavanju rezultata. Ova metoda je manje stresna za izolaciju kabla i preporučuje se za stare kablove. Na osnovu ispitivanja se može proceniti preostali životni veka kabla, ali izbor ispitnih napona, tok ispitivanja i

donošenje ispravnog zaključka, u najvećoj meri zavise od iskustva ispitivača.

Literatura

- [1] SRPS N.C5.025 „Ispitivanje kablova sa izolacijom od impregnisiranog papira i metalnim plaštom za nazivne napone do 60 kV“
- [2] SRPS IEC 60055-1: 2013 „Kablovi sa izolacijom od papira i metalnim plaštom, za naznačene napone do 18/30 kV“
- [3] IEEE 400.1 – 2007 „Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with High Direct Current Voltage“
- [4] IEEE 400.2 - 2006 „Guide for Field Testing Shield Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)“
- [5] Tehnička preporuka TP3, 2012. godina „Osnovni tehnički zahtevi za izbor i montažu energetskih kablova i kablovskih pribora u elektrodistributivnim mrežama 1 kV, 10 kV, 20 kV, 35 kV, 110 kV“

Abstract: The paper presents an approach to testing old cable, damaged during atmospheric discharges. A description of the cable is given and a series of tests in the field is proposed in order to evaluate the cable insulation condition. First, the results of the insulation resistance and capacity obtained by the DC test voltage are given and explained. The results of the insulation resistance and capacitance tests as well as the values of the dielectric loss factor $\text{tg}\delta$, obtained at sine wave voltage, frequencies of 0.1Hz (VLF), were then interpreted. The example shows a good value of $\text{tg}\delta$ as well as a breakthrough in cable insulation, and the characteristic changes in the measured cable parameters during the test are highlighted. The advantage of estimating the insulation state by measuring the dielectric loss factor method is emphasized. Finally, the importance of systematic data collection for a particular cable type and the ability to determine the residual life with minimum insulation stress are highlighted.

Keywords: cable, insulation resistance, dielectric loss factor $\text{tg}\delta$, capacity, DC test voltage, VLF (very low frequency).

Evaluation of 20 kV NPHO 13 Cable Insulation after Damage Caused by Atmospheric Discharges

Ninoslav Simić, Jovan Mrvić, Ranko Jasika

Rad primljen u uredništvo: 02.11.2019. godine

Rad prihvaćen: 25.11.2019. godine