

# Modelovanje preskoka na dugim vazдушnim razmacima pri djelovanju atmosferskih prenapona

Mladen Banjanin, Jovana Tuševljak

Elektrotehnički fakultet

Istočno Sarajevo, Bosna i Hercegovina

[banjanin@ymail.com](mailto:banjanin@ymail.com), [jovanatusevljak@gmail.com](mailto:jovanatusevljak@gmail.com)

Milan Savić

Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

[savic\\_ms@etf.rs](mailto:savic_ms@etf.rs)

*Sadržaj*—U radu su opisane metode koje prema međunarodnim standardima i preporukama treba da se koriste za modelovanje preskoka na vazdušnoj izolaciji u slučaju djelovanja atmosferskih prenapona. Dato je kratko objašnjenje svake metode kao i različite formule koje se preporučuju u međunarodnim standardima i radovima iz renomiranih časopisa. Izvršeno je poređenje izmjerenih i proračunatih vrijednosti preskočnih napona za slučaj prenaponskog talasa standardnog i nestandardnog oblika. Na osnovu toga je zaključeno da primjena metode V-t karakteristike izolacije, koja je veoma raširena, treba da se izbjegava zbog većih odstupanja mjerenih i računatih vrijednosti preskočnih napona.

*Ključne riječi*—preskok; V-t karakteristika; metoda progresivnog lidera; metoda površine

## I. UVOD

Izolacioni nivo opreme koja se ugrađuje u EES je testiran i dokazan udarnim atmosferskim talasom standardnog oblika 1.2/50  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$ . Talasni oblik prenapona koji dolazi na uređaje instalisane u EES-u manje ili više odstupa od standardnog talasnog oblika koji se koristi u laboratorijama visokog napona.

Na osnovu velikog broja ispitivanja uticaja talasnog oblika prenapona na vrijednosti preskočnih napona u vazduhu, razvijene su različite metode modelovanja preskoka na vazdušnoj izolaciji u slučaju djelovanja atmosferskih prenapona. Prema standardu [1] i prema [8] za modelovanje preskoka na vazdušnoj izolaciji treba da se koristi neka od sljedeće tri metode:

- 1) Volt-sekundna karakteristika izolacije,
- 2) Metoda progresivnog lidera,
- 3) Metoda destruktivnog efekta.

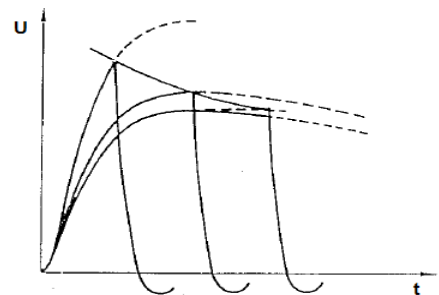
Metoda pod 1) se preporučuje za proračun preskočnih napona pri djelovanju prenapona standardnog oblika, dok se metode pod 2) i 3) preporučuju za korištenje i kod djelovanja standardnih i kod nestandardnih oblika prenaponskih talasa.

## II. VOLT-SEKUNDNA KARAKTERISTIKA IZOLACIJE

Najjednostavniji i najviše korišćen model za proračun preskočnog napona izolacije prilikom djelovanja atmosferskih prenapona jeste preko zavisnosti 50%-tnog preskočnog napona i vremena do preskoka. Ova karakteristika određuje se pomoću standardnog prenaponskog talasa 1.2/50  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  (teorijski bi se

mogla određivati za bilo koji talasni oblik prenapona) i naziva se volt-sekundna karakteristika izolacije ili V-t karakteristika. Pod 50% prekočnim naponom se podrazumijeva amplituda prenaponskog talasa koja poslije više ponovljenih udara na nepromijenjenu konfiguraciju elektroda i pri nepomjenjenim atmosferskim uslovima u 50% slučajeva izaziva preskok na izolaciji. Tipičan oblik V-t karakteristika prikazan je na sl. 1.

Smatra se da svaki prenapon koji prevazilazi napon definisan V-t karakteristikom izolacije izaziva preskok, dok niže prenapone izolacija podnosi, što ne odgovara stvarnom fiziklanom procesu koji se dešava kod razvoja prekoka. Ovom metodom se ne modeluje vrijeme potrebno da se razvije preskok između elektroda i to je njen osnovni nedostatak.



Slika 1. V-t karakteristika izolacije

### A. Volt sekundna karakteristika izolacije u analitičkom obliku

Na osnovu velikog broja ispitivanja preskočnih napona na vazdušnoj izolaciji utvrđeno je da je moguće dati matematički model funkcionalne zavisnosti amplitude preskočnog napona i vremena do preskoka. Analitički oblik V-t karakteristike izolacije je predložen u [2], a prihvaćen je u [3] i u [8], kao i u standardu [1], i dat je izrazom (2.1):

$$U(t) = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.75}} = \left( 400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) d. \quad (2.1)$$

gdje su  $d$  dužina međuelektrodnog rastojanja [m] i  $t$  vrijeme do preskoka [ $\mu\text{s}$ ].

Izraz (2.1) je validan za vremena do preskoka od 0.5  $\mu\text{s}$  do 16  $\mu\text{s}$ . Analitička V-t karakteristika izolacije je tačna samo za standardni oblik prenaponskog talasa, jer je dobijena iz eksperimentalne krive koja važi pod tim uslovima.

### III. METODA PROGRESIVNOG LIDERA

Metode za proračun vrijednosti 50%-tnih preskočnih napona izolacije pod djelovanjem talasa nestandardnog oblika se mogu podijeliti na one kojima se nastoji direktno modelovati mehanizam pražnjenja (metoda progresivnog lidera) i one koje su izvedene na osnovu poznatih veličina koje karakterišu preskok na izolaciji (metoda površine).

Metoda progresivnog lidera (LPM—Leader Progression Model) zasnovana je na modelovanju stvarnih fizikalnih procesa u međuelektrodnom prostoru za vrijeme djelovanja impulsnih prenaponskih talasa. Kod primjene metode progresivnog lidera vrijeme potrebno da se razvije preskok između elektroda se modeluje preko vremena potrebnog da se pojavi korona, vremena da se razviju strimeri i na kraju lider koji treba da pređe rastojanje od jedne do druge elektrode. Ovaj scenario detaljno je opisan u [5].

Na sl. 2 dat je grafički prikaz razvoja preskoka između elektroda [4]. Na elektrode, koje se nalaze na razmaku  $d$ , dovodi se impulsni napon talasnog oblika prikazanog na sl.2 a). U trenutku kada jačina električnog polja prevaziđe vrijednost  $E_0$  (sl.2. a) i sl.2. b)), lider počinje da se razvija sa elektrode na koju se dovodi napon (sl.2. c)). Jačina električnog polja između elektroda raste, dok se rastojanje između glave lidera i uzemljene elektrode, označeno kao  $x$ , smanjuje (sl. 2 b) i sl. 2 c)). Pad napona u kanalu lidera se zanemaruje [5]. Razmak između glave lidera i uzemljene elektrode se smanjuje dok lider ne dođe do uzemljene elektrode. U tom trenutku se smatra da se desio preskok na izolaciji.

Brzina razvijanja lidera u međuelektrodnom prostoru se može modelovati preko izraza (3.1) datog u [4] i [7], koji je prihvaćen u [1] i u [8], odnosno preko izraza (3.2) datog u [5] i [6].

$$v_1 = K \cdot e(t) \cdot \left[ \frac{e(t)}{x(t)} - E_0 \right] = 0.7785 \cdot e(t) \cdot \left( \frac{e(t)}{x(t)} - 545 \right) \quad (3.1)$$

$$v_2 = K \cdot d \cdot \left[ \frac{e(t)}{x(t)} - E_0 \right] = 400 \cdot d \cdot \left( \frac{e(t)}{x(t)} - 545 \right) \quad (3.2)$$

Najopštiji izraz za proračun brzine razvoja lidera u međuelektrodnom rastojanju je predložen u [5] i prihvaćen u [1] i u [8]. On se kao najopštiji najčešće i koristi i ima oblik (3.3).

$$v_3 = 170 \cdot d \cdot \left( \frac{u(t)}{x(t)} - 545 \right) \cdot e^{0.0015 \cdot \frac{u(t)}{d}} \quad (3.3)$$

Oznake u prethodno navedenim izrazima imaju sljedeća značenja:

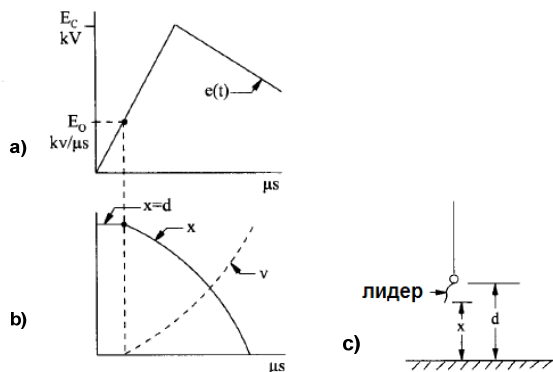
$d$  – dužina međuelektrodnog rastojanja [m],

$e(t)$  – trenutna vrijednost napona [kV],

$x$  – dužina nepremoštenog međuelektrodnog rastojanja [m],

$E_0$  – kritična jačina električnog polja [kV/m],

$K, K_1, K_2, K_L$  – konstante.



Slika 2. Mehanizam preskoka na izolaciji [4]

U [8] su date vrijednosti konstanti koje se mogu koristiti prilikom primjene formule (3.1) i one su prikazane u tabeli 1.

TABELA I. VRIJEDNOSTI KONSTANTI ZA METODU PROGRESIVNOG LIDERA DATU IZRAZOM (3.2) PREMA [8]

Облик электрода	Поларитет	$K$ [ $\text{m}^2\text{v}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$E_0$ [kV/m]
Воздушни размаци, потпорни и штапни изолатори	+	$0.8 \cdot 10^{-6}$	600
	-	$1 \cdot 10^{-6}$	670
Капасти изолаторски ланци	+	$1.2 \cdot 10^{-6}$	520
	-	$1.3 \cdot 10^{-6}$	600

#### A. Metoda progresivnog lidera u numeričkim proračunima

Neka je dužina izolatorskog lanca  $d$ . Suština proračuna je da se u svakom koraku proračuna  $H$  [ns] na osnovu nekog od izraza (3.1), (3.2), (3.3) proračuna brzina razvijanja lidera u međuelektrodnom prostoru. Na osnovu trajanja koraka proračuna  $H$  i brzine razvoja lidera  $v_i$  može se izračunati izduženje lidera primjenom izraza (3.4):

$$l_i = v_i \cdot H, \quad (3.4)$$

gdje je:  $v_i$  – brzina razvijanja lidera u  $i$ -tom koraku [m/ns],

$H$  – korak proračuna [ns].

Ukupno izduženje lidera u svih  $n$  prethodnih koraka se može dobiti iz izraza (3.5):

$$l = \sum_{i=1}^n l_i, \quad (3.5)$$

gdje je:  $l_i$ —izduženje lidera u  $i$ -tom koraku proračuna [m],  
 $n$ —ukupan broj koraka proračuna.

Preostali nepremošteni dio međuelektrodnog rastojanja se računa preko izraza:

$$x = d - l, \quad (3.6)$$

gdje je:  $l$ —ukupno izduženje lidera u svim prethodnim koracima proračuna [m],  
 $d$ —međuelektrodno rastojanje [m].

Proračun se vrši sve dok je  $x > 0$ , u trenutku kada je  $x \leq 0$  smatra se da je došlo do preskoka na izolatorskom lancu.

#### IV. METODA DESTRUKTIVNOG EFEKTA

Druga metoda koja se preporučuje za modelovanje preskoka na vazdušnoj izolaciji prilikom djelovanja prenapona nestandardnog talasnog oblika se naziva metoda destruktivnog efekta (DE—Disruptive Effect Method). Ovu metodu su razvili Witzke i Bliss [11], [12], sa namjerom da odrede sposobnost izolacije transformatora da podnosi oscilatorne prenapone. Metoda destruktivnog efekta je razvijena na osnovu činjenice da proces razvoja preskoka na izolaciji ne zavisi samo od amplitude napona koji napreže izolaciju, nego i od vremena izloženosti izolacije tom naponu koje se modeluje preko vremena potrebnog da integral površine prevaziđe kritičnu vrijednost.

Sušтина ove metode se može izraziti na sljedeći način: Postoji bazni destruktivni efekat  $DE_B$ . Ukoliko nestandardni talasni oblik prenapona ima destruktivni efekat (DE) koji prevazilazi bazni destruktivni efekat  $DE_B$ , preskok na izolaciji se javlja, i obratno.

Opšti izraz za proračun vrijednosti destruktivnog efekta je:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} [e(t) - V_0]^{k_d} dt \quad (4.1)$$

U radovima [10], [11], [12], [13] je pokazano da je određivanje konstanti iz izraza (4.1) dosta komplikovano jer one zavise od talasnog oblika primijenjenog napona, polariteta, oblika talasa i rastojanja između iskrišta. Zbog toga se nastoji smanjiti broj konstanti koje je potrebno računati. Postoje dvije modifikacije izraza (4.1) koje se najčešće koriste. U slučaju kada se usvoji da je vrijednost konstante  $k_d=1$  metoda se zove metoda ekvivalentne površine ili kraće metoda površine i data je izrazom (4.2):

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} (e(t) - V_0) dt \quad (4.2)$$

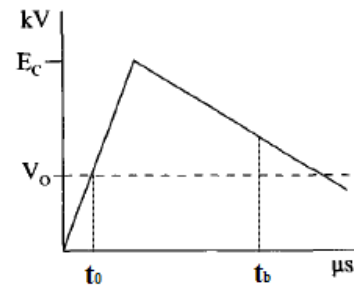
Druga modifikacija izraza (4.1) dobija se kada se usvoji da je vrijednost konstante  $V_0$  jednaka 0 [15]. U tom slučaju izraz (4.1) postaje (4.3):

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} e(t)^{k_d} dt \quad (4.3)$$

Značenje oznaka iz prethodnih izraza:

$e(t)$ —talasni oblik prenaponskog talasa,  $V_0$ —amplituda napona ispod koje nije moguće da se desi preskok (slika 3),  $k_d$ —konstanta,  $t_0$ —trenutak kada primijenjeni prenaponski talas prvi put prevaziđe napon  $V_0$ ,  $t_b$ —trenutak kada se desi preskok na izolaciji.

Na sl. 3 je prikazano značenje oznaka iz izraza (4.1). U metodi destruktivnog efekta vrši se integraljenje površine između krive prenaponskog talasa i minimalne vrijednosti napona koji može da izazove preskok na izolaciji  $V_0$ . Ta površina predstavlja destruktivno efekat  $DE$  koji se poredi sa baznim destruktivnim efektom  $DE_B$ . U [15], [16] je pokazano da formula (4.2) daje tačnije rezultate od formule (4.3) tako da se u daljem tekstu analizira metoda površine kao uprošćenje metode destruktivnog efekta.



Slika 3. Metoda destruktivnog efekta

U standardu [1] je naglašeno da se metoda površine koristi za izolacione razmake manje od 1.2 m i za ta izolaciona rastojanja su konstante i kalibrisane, a za razmake duže od 1 m predlaže se upotreba metode progresivnog lidera. U istom standardu se napominje da metodu površine ne treba koristiti u slučaju kada napon između elektroda osciluje tako da mu vrijednost opada ispod kritične vrijednosti preskočnog napona  $V_0$ .

U ovom radu su na osnovu rezultata drugih autora i na osnovu poređenja sa mjerenim vrijednostima preskočnih napona predložene konstante koje treba da se koriste u metodi površine za izolacione razmake duže od 1 m.

##### A. Metoda površine u numeričkim proračunima

Matematička relacija kojom se predstavlja metoda površine je (4.4).

Destruktivni efekat se računa u svakom koraku proračuna  $H$  [ns] preko izraza (4.4):

$$DE_i = \begin{cases} (e(t_i) - V_0) \cdot H & , e(t_i) > V_0 \\ 0 & , e(t_i) \leq V_0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Ukupni destruktivno efekat se računa na osnovu sljedećeg izraza:

$$DE = \sum_{i=1}^n DE_i \quad (4.5)$$

gdje je:  $DE_i$  –destruktivni efekat u  $i$ -tom koraku proračuna,  $n$  –ukupan broj koraka proračuna.

Proračun se vrši sve dok je  $DE < A_k$ , a u trenutku kada je  $DE \geq A_k$  smatra se da je došlo do preskoka na izolatorskom lancu. Sa  $A_k$  je označena vrijednost kritične površine, koja je u metodi površine isto što i bazni destruktivni efekat u metodi destruktivnog efekta.

Da bi se metoda površine mogla koristiti, moraju se proračunati vrijednosti dvije nepoznate konstante:  $V_0$  i  $A_k$ . Za ove konstante su prema rezultatima prikazanim u [16] i poređenjem sa eksperimentalnim rezultatima određene sljedeće optimalne vrijednosti:

$$V_0 = 0.934 \cdot U_{50\%} \quad A_k = 520 \cdot d \quad (4.6)$$

U zavisnosti od talasnog oblika prenapona, oblika iskrišta i izolacionog razmaka, ove konstante mogu imati i druge vrijednosti, npr. one što su predložene u [14], [8]...

Prema standardu [1] zavisnost 50%-tnog preskočnog napona od rastojanja između elektroda se može predstaviti preko izraza:

$$U_{50\%} = 530 \cdot d \quad (4.7)$$

Kombinovanjem izraza (4.7) i (4.9) dobija se:

$$V_0 = 0.934 \cdot U_{50\%} = 0.934 \cdot 530 \cdot d = 495 \cdot d \quad (4.8)$$

Sada se obje konstante u metodi površine mogu računati u zavisnosti od međuelektrodnog rastojanja, i to:

$$V_0 = 495 \cdot d \quad A_k = 520 \cdot d \quad (4.9)$$

gdje je  $d$  –rastojanje između iskrišta [m].

## V. POREĐENJE PRORAČUNATIH I IZMJERENIH VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA ZA SLUČAJ PRENAPONSKOG TALASA STANDARDNOG OBLIKA

Vrijednosti preskočnih napona koje daju prethodno definisane metode poređene su sa mjerenim vrijednostima da bi se provjerila tačnost svake od metoda.

U tabelama II. i III. su date izmjerene [15], [16] i proračunate vrijednosti preskočnih napona izolatorskih lanaca nazivnog napona 400 kV i 380 kV respektivno. Analizirani su jednostruki i dvostruki noseći izolatorski lanci, kao i dvostruki zatezni izolatorski lanci.

Pokazuje se da sve metode i sve formule daju približno jednake vrijednosti preskočnih napona. Uočava se dosta dobro slaganje izmjerenih i proračunatih vrijednosti preskočnih napona. Razlog tome je što su sve metode kalibrisane na vrijednostima preskočnih napona standardnog talasnog oblika.

TABELA II. IZMJERENE I PRORAČUNATE VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA PRI DJELOVANJU PRENAPONA STANDARDNOG TALASNOG OBLIKA NA 400 kV IZOLATORSKIM LANCIMA

Razmaci između armatura [m]	Mjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [15]		Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
	10 %	50 %	$V-t$	$DE$	$LPM$ (3.1)	$LPM$ (3.2)	$LPM$ (3.3)
<b>Dvostruki noseći izolatorski lanci</b>							
2.53	1526	1551	1450	1449	1440	1444	1446
2.68	1616	1645	1536	1535	1525	1529	1532
2.82	1685	1710	1616	1617	1606	1610	1612
<b>Dvostruki zatezni izolatorski lanci</b>							
2.49	1516	1534	1428	1427	1418	1422	1424
2.64	1583	1607	1514	1513	1503	1507	1510
2.78	1680	1699	1593	1592	1582	1587	1589

Vrijednosti preskočnih napona za isto izolaciono rastojanje zavise od vrste izolatora i tehnologije izrade, oblika zaštitnih armatura, zaprljanosti izolatora, atmosferskih uslova i slično, tako da nije moguće na jednostavan način modelovati sve te uticaje. Zbog toga proračunate vrijednosti preskočnih napona iz tabele II. imaju (124) veća odstupanja od mjerenih vrijednosti preskočnih napona nego u tabeli III. Razlog tome je i što su se krajem 80-tih godina počeli graditi kompaktni stubovi i izolatorski lanci za dalekovode nazivnog napona 400 kV, što znači da su se za manja izolaciona rastojanja postigli isti podnosivi udarni naponi opreme. Rezultati mjerenja iz tabele II. su dobijeni 1987. godine na novim, kompaktnijim, izolatorskim lancima tako da su mjerene vrijednosti preskočnih napona više od proračunatih. Rezultati mjerenja iz tabele III. potiču iz 1974. godine, tj. iz vremena kada se 380 kV sistem uvodio u Jugoslaviju i kada je tehnologija izrade izolatora bila lošija.

Zbog prethodno navedenih razloga nije moguće izbjeći pojavu odstupanja mjerenih i proračunatih vrijednosti preskočnih napona, ali su ta odstupanja mala i prihvatljiva za inženjersku upotrebu.

TABELA III.

IZMJERENE I PRORAČUNATE VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA PRI DJELOVANJU PRENAPONA STANDARDNOG TALASNOG OBLIKA

Jednostruki noseći izolatorski lanci nazivnog napona 380 kV										
Broj članaka	Dužina izolatora [mm]	Razmaci između armatura [mm]	Mjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [16]			Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
			0%	50%	100%	V-t	DE	LPM (3.1)	LPM (3.2)	LPM (3.3)
16	2720	2435	1371	1394	1417	1396	1395	1386	1390	1392
17	2890	2650	1461	1485	1509	1519	1518	1508	1512	1515
18	3060	2780	1560	1580	1600	1593	1592	1582	1586	1589
19	3230	2970	1631	1660	1689	1702	1701	1690	1695	1698
20	3400	3170	1744	1769	1794	1817	1816	1804	1809	1812
21	3570	3315	1805	1820	1835	1900	1899	1887	1892	1895

Dvostruki noseći izolatorski lanci nazivnog napona 380 kV										
Broj članaka	Dužina izolatora [mm]	Razmaci između armatura [mm]	Mjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [16]			Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
			0%	50%	100%	V-t	DE	LPM (3.1)	LPM (3.2)	LPM (3.3)
16	2720	2295	1297	1315	1333	1316	1315	1307	1310	1312
17	2890	2510	1439	1468	1497	1439	1438	1429	1432	1435
18	3060	2620	1510	1540	1570	1502	1501	1491	1495	1498
19	3230	2815	1592	1615	1638	1614	1613	1603	1607	1609
20	3400	3005	1710	1732	1754	1723	1722	1711	1715	1718
21	3570	3140	1758	1778	1798	1800	1799	1787	1792	1795

#### VI. POREĐENJE PRORAČUNATIH I IZMJERENIH VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA ZA SLUČAJ PRENAPONSKOG TALASA NESTANDARDNOG OBLIKA

U eksploatacionim uslovima na vazdušne razmake praktično uvijek djeluju prenaponi nestandardnog talasnog oblika. Zbog toga je potrebno analizirati rezultate koje metode daju prilikom djelovanja prenapona nestandardnog oblika.

U tabeli IV. je dato poređenje preskočnih napona koje daju pojedine metode za različite nestandardne talasne oblike prenapona. Metoda V-t karakteristike pokazuje najlošija slaganja proračunatih i mjerenih vrijednosti preskočnih napona, dok druge dvije metode daju približno jednake vrijednosti.

TABELA IV. IZMJERENE I PRORAČUNATE VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA PRI DJELOVANJU PRENAPONA RAZLIČITOG NESTANDARDNOG TALASNOG OBLIKA

Oblik talasa $\mu\text{s}/\mu\text{s}$	Izmjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [16]	Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
		114 cm (šiljak-šiljak)	V-t	DE	LPM (3.1)	LPM (3.2)
1.3/53	672	647	650	648	649	651
3.7/105	628	589	624	635	636	637
7.9/103	640	579	626	636	637	638
14.4/126	606	555	620	633	634	635
<b>116.8 cm (izolator)</b>						
1.3/53	705	664	667	665	666	668
3.7/105	667	604	640	651	652	653
7.9/103	654	593	641	651	652	653
14.4/126	670	569	636	649	650	651

U tabeli V. su date izmjerene i proračunate vrijednosti preskočnih napona dobijenih pod uticajem prenaponskog talasa oblika 1.6/18  $\mu\text{s}/\mu\text{s}$  na različite konfiguracije elektroda i za duga međuelektrodna rastojanja. Metoda V-t karakteristike opet pokazuje najlošija slaganja proračunatih i mjerenih vrijednosti preskočnih napona, dok metoda površine daje najbolja slaganja.

TABELA V. IZMJERENE I PRORAČUNATE VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA PRI DJELOVANJU PRENAPONA NESTANDARDNOG TALASNOG OBLIKA NA DUGIM VAZDUŠNIM RAZMACIMA

Oblik elektroda i rastojanje	Mjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [12]	Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
		V-t	DE	LPM (3.1)	LPM (3.2)	LPM (3.3)
šiljak-ploča, 2 m	1280	1351	1267	1229	1242	1239
šiljak-šiljak, 2 m	1380	1351	1267	1229	1242	1239
uže-uže, 3.36 m	2170	2269	2128	2063	2085	2081

U tabeli VI. date su vrijednosti preskočnih napona za talas veoma kratkog trajanja začelja od samo 5  $\mu\text{s}$ .

Na osnovu prikazanih rezultata zaključuje se da metoda površine i metoda progresivnog lidera daju bolja slaganja proračunatih i mjerenih vrijednosti preskočnih napona za slučaj djelovanja prenapona nestandardnog oblika u odnosu na metodu V-t karakteristike. Zbog toga se predlaže primjena metode progresivnog lidera ili metoda površine za modelovanje preskoka na vazdušnim razmacima.

TABELA VI. IZMJERENE I PRORAČUNATE VRIJEDNOSTI PRESKOČNIH NAPONA ZA RAZLIČITA MEĐUELEKTRODNA RASTOJANJA ZA TALAS VEOMA KRATKOG TRAJANJA ZAČELJA

Talasni oblik prenapona (1/5 $\mu$ s/ $\mu$ s)						
Međuelektrodno rastojanje [m]	Mjerene vrijednosti preskočnih napona [kV] [17]	Proračunate vrijednosti preskočnih napona [kV]				
		V-t	DE	LPM (3.1)	LPM (3.2)	LPM (3.3)
1.0160	835	947	813	814	848	815
1.2700	1035	1183	1016	1017	1060	1018
1.5240	1230	1419	1219	1220	1271	1221
1.7780	1425	1656	1422	1423	1483	1425
2.0320	1620	1893	1626	1627	1696	1629
2.2860	1815	2129	1829	1830	1907	1832
2.5400	2010	2366	2032	2033	2119	2036

Metoda progresivnog lidera i metoda površine su razvijene za modelovanje preskoka na vazдушnim razmacima prilikom djelovanja prenapona nestandardnog talasnog oblika tako da je logično da pokazuju osjetne prednosti u odnosu na metodu V-t karakteristike.

## VII. ZAKLJUČAK

U radu su predložene vrijednosti konstanti za metodu površine kako bi se ona mogla koristiti za proračun preskočnih napona na vazдушnim razmacima dužim od 1.2 m. Pokazano je da primjenom predloženih konstanti metoda daje veoma dobra slaganja vrijednosti preskočnih napona sa mjerenim. Prilikom djelovanja standardnog prenaponskog talasa oblika 1.2/50  $\mu$ s/ $\mu$ s sve tri metode daju dobra slaganja proračunatih i mjerenih vrijednosti preskočnih napona. Prilikom djelovanja prenapona nestandardnog oblika metoda V-t karakteristike pokazuje veća odstupanja u odnosu na druge dvije metode. Zaključak je da se za modelovanje preskoka na dugim vazдушnim razmacima prilikom djelovanja prenapona standardnog oblika može koristiti bilo koja od metoda. Prilikom djelovanja nestandardnih prenaponskih talasa metoda V-t karakteristike ne treba da se koristi, nego se preporučuje upotreba ili metode progresivnog lidera ili metode površine.

## ZAHVALNICA

Ovaj rad nastao je u okviru studije „Primena prenaponske zaštite prenosnih nadzemnih vodova visokog napona u cilju smanjenja broja kvarova usled atmosferskih prenapona“ koji sponzorise JP Elektromreža Srbije.

## LITERATURA

- [1] International standard IEC 60071, Eight edition, 2006.
- [2] M. Darveniza, F. Popolansky, E.R. Whitehead, "Lightning Protection of UHV Transmission Lines", *Electra*, No. 41, pp. 39 - 69, 1975.
- [3] Working group IEEE, "A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", *IEEE Tran. on Power App. and Systems*, Vol. PAS-104, No.4, April 1985, pp 919-927.
- [4] Andrew R. Hileman, "Insulation Coordination for Power Systems", CRC Press, Taylor & Francis Group, 1999, page 639, page 634.
- [5] A. Pignini, G.Rizzi, E. Nati, A. Porrino, G. Baldo, G. Pesavento, "Performance of lasrge air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accurancy of predetermination methods", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989.

- [6] CIGRE Working Group 33.07, "Guidelines for the evaluation of the dielectric strength of external insulation", No. 72, Paris 1992
- [7] C.F. Wagner, A.R. Hileman, "Mechanism of breakdown of laboratory gaps", *AIEE Transactions on Power Apparatus and System*, Vol. 80, pt III, 1961.
- [8] CIGRE Working Group 33.07, "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", *CIGRE Technical Brochure No. 63*, 1991.
- [9] A. Pignini, G.Rizzi, E. Nati, A. Porrino, G. Baldo, G. Pesavento, "Performance of large air gaps under lightning overvoltages: experimental study and analysis of accurancy of predetermination methods", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [10] A. R. Jones, "Evaluation of the Integration Method for Analysis of Non-Standard Surge Voltages", *AIEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 73, pp. 984-990, 1954.
- [11] R. L. Witzke and T. J. Bliss, "Surge protection of Cable Connected Equipment", *AIEE,Trans.*, Vol. 69, Pt I, pp. 527-542, 1950.
- [12] R. L. Witzke and T. J. Bliss, "Co-ordination of Lightning Arrester Location with Transformer Insulation Level", *AIEE Trans*, Vol. 69, Pt I, pp. 964-975, 1950.
- [13] R.O. Caldwell and M. Darveniza, "Experimental and Analytical Studies of the Effects of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS - 92, pp.1420 - 1428, 1973.
- [14] A. Ancajima, A. Carrus, E. Cinieri, C. Mazzetti, "Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses", *Power Tech 2007*, July 1-5, 2007, Lausanne Switzerland, Paper ID: 175.
- [15] Energoinvest – IRCE institut za elektroenergetiku, "ELABORAT 1689 – Laboratorijska ispitivanja izolacije vodova 400 kV", Sarajevo, juli 1987. godine.
- [16] Energoinvest–Zavod za tehniku visokog napona Sarajevo, "ELABORAT 1386–Laboratorijska ispitivanja izolatorskih lanaca 380 kV za nezagadenu atmosferu", Sarajevo, juli 1974.godine.
- [17] AIEE Committee Report, "Flashover Voltages of Insulators and Gaps", *AIEE Trans*, Vo1.53, pp.882-886,1934,

## ABSTRACT

In this paper flashover models of long air gaps under lightning impulses are described. Models of air gaps flashover are used according to international standards and scientific papers. Constant for equal area criterion method are suggested for air gaps longer then 1.2 m. Measured and calculated flashover amplitude with standard and non-standard overvoltage wave shapes are compared. In this manner every model is tested. It is concluded that V-t curve model should not be used when lightning overvoltage has non-standard wave shape.

## LIGHTNING IMPULSE FLASHOVER MODELING OF LONG AIR GAPS

Mladen Banjanin, Milan Savić, Jovana Tuševljak